

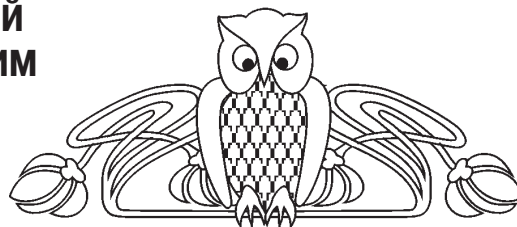


Список литературы

1. Минкин В. И., Симкин Б. Я., Мендяев Р. М. Теория строения молекул. Ростов н/Д : Феникс, 1997. 560 с.
2. Браун П. А., Киселёв А. А. Введение в теорию молекулярных спектров. Л. : ЛГУ, 1983. 232 с.
3. Цирельсон В. Г. Квантовая химия. Молекулы, молекулярные системы и твёрдые тела. М. : Бином, 2010. 422 с.
4. Свердлов Л. М., Ковнер М. А., Крайнов Е. П. Колебательные спектры многоатомных молекул. М. : Наука, 1970. 550 с.
5. Элькин М. Д., Нуралиева Д. М., Лихтер А. М., Алыкова О. М. Математическое моделирование колебательных спектров димеров карбоновых кислот в конденсированном состоянии // Естественные науки. 2011. № 2 (55). С. 210–215.
6. Тараховский Ю. С., Ким Ю. А., Абдраимов Б. С., Музафаров Е. Н. Флавоноиды : биохимия, биофизика, медицина. Пушино : Synchronbook, 2013. 310 с.
7. Элькин М. Д., Шигаутдинова И. Т., Смирнов В. В., Нуралиева Д. М., Лихтер А. М., Гайсина А. Р. Структурно-динамические модели флавоноидов // Естественные науки. 2012. № 37 (3). С. 161–167.
8. Элькин М. Д., Панкратов А. Н., Гайсина А. Р. Структурно-динамические модели и спектроскопическая идентификация моногидроксиизофлавонов // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Химия. Биология. Экология. 2014. Т. 14, вып. 2. С. 21–27.
9. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B. et al. Gaussian 03. Revision B.03 / Gaussian Inc. Pittsburg, 2003. 302 p.
10. Эрман Е. А., Элькин М. Д., Стефанова Г. П., Равчева Н. А. Программно-аналитическая поддержка задач молекулярного моделирования // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики. 2014. № 10 (97), вып. 14. С. 63–67.
11. Элькин М. Д., Бабков Л. М. Учет ангармонического смещения полос в модельных расчетах колебательных спектров димеров с водородной связью // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2011. Т. 11, вып. 1. С. 20–25.
12. Girlando A., Pecile C. Vibrational analysis of chlorinated p-benzoquinone // J. Mol. Spectroscopy. 1979. Vol. 77. P. 347–384.
13. Lanelli B., Pecile C. The vibrational spectra of quinines. Infrared spectra of single crystals of 1,4-benzoquinone and 1,4-benzoquinone-d4 // Spectrochim. Acta. 1973. Vol. 29A. P. 1989–1999.
14. Fausto R., Quinteiro G., Breda S. Vibrational spectroscopy and ab initio MO study of molecular structure and vibrational spectra of α - and γ - pyrones // J. Mol. Structure. 2001. Vol. 598. P. 287–303.

УДК 534.015

РЕКОНСТРУКЦИИ МОДЕЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО КОРОТКИМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ РЕАЛИЗАЦИЯМ



А. С. Караваев^{1,2}, Ю. М. Ишбулатов¹, Е. И. Боровкова¹,
Д. Д. Кульминский^{1,2}, В. С. Хорев¹, А. Р. Киселев^{1,3,4},
В. И. Пономаренко^{1,2}, М. Д. Прохоров²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН

³Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского

⁴Научный центр сердечно-сосудистой хирургии имени А. Н. Бакулева, Москва

E-mail: karavaevas@gmail.com

Методика реконструкции моделей систем с запаздыванием, основанная на синхронном отклике ведомой системы, имеющей структуру, аналогичную структуре модели исследуемого объекта, используется для реконструкции параметров систем с запаздывающей обратной связью по коротким зашумленным реализациям. Работоспособность и возможности подхода демонстрируются при реконструкции параметров радиофизического хаотического генератора и модели системы биологической природы.

Ключевые слова: системы с запаздыванием, реконструкция, хаос, радиофизический эксперимент.

Recovery of Models of Time-delay Systems from Short Experimental Time Series

A. S. Karavaev, Yu. M. Ishbulatov, E. I. Borovkova,
D. D. Kulminskiy, V. S. Khorev, A. R. Kiselev,
V. I. Ponomarenko, M. D. Prokhorov

Time-delay systems reconstructed from short and noisy time series is conducted by the specialized method based on utilizing of driven system with the structure similar to the structure of the studied object. To show the efficiency of this approach, parameters



were reconstructed for radiophysical chaotic generator and for the model of biological system.

Key words: time-delay systems, reconstruction, chaos, radiophysical experiment.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-1-17-24

Введение

Реконструкция математических моделей систем по экспериментальным данным открывает широкие возможности, позволяет развить фундаментальные представления о внутреннем устройстве исследуемых систем, оценить значения параметров, недоступных непосредственно измерению [1]. Зачастую «универсальные» методы решения задачи реконструкции модели по экспериментальным данным оказываются неэффективными и не позволяют выявить структуру модели. В этих случаях можно сделать какие-либо разумные предположения о структуре уравнений системы и провести оценку параметров уже с учетом этих представлений. Для таких случаев требуются специализированные методики, ориентированные на узкие классы систем. Одним из таких интересных классов уравнений являются уравнения с запаздыванием. Автоколебательные модели систем с запаздыванием – генераторы с запаздывающей обратной связью (ГЗОС) – характерны для многих технических, живых систем и других объектов реального мира [2–5]. В связи с этим в последние годы был предложен целый ряд специализированных методов реконструкции [6–10]. Однако границы применимости этих методов также ограничены, и требуется поиск новых подходов. Одним из случаев, требующих развития специализированных подходов, является ограничение времени наблюдения экспериментальной реализации динамической переменной. Это типично при анализе сигналов многих технических систем, в частности систем связи [11, 12], и особенно характерно для объектов биологической природы. Живые системы являются, как правило, сильно нестационарными объектами, параметры которых могут быстро и значительно меняться во времени и при изменении внешних условий. Во всех этих случаях фактически единственным решением является проведение реконструкции по участкам временных реализаций возможно меньшей длины.

Известные методы реконструкции хаотических систем, не учитывающие априорную информацию об исследуемой системе, как правило, требуют наличия экспериментальных

реализаций длиной 10 и более времен запаздывания [6–10], что ограничивает возможности их использования при решении задач анализа экспериментальных данных.

Дополнительную сложность представляет реконструкция систем, функционирующих в режимах, близких к периодическим, так как такие сигналы несут меньше информации о системе, чем хаотические реализации, требуя для анализа более длинных сигналов.

В данной работе предлагается методика реконструкции моделей ГЗОС, основанная на построении ведомой системы, имеющей структуру, аналогичную исследуемой системе и наблюдении ее синхронного отклика на экспериментальный сигнал. Возможности такого подхода при анализе коротких временных рядов изучаются в ходе реконструкции математической модели экспериментальной установки – гибридного хаотического генератора с запаздыванием, а также периодических реализаций математической модели системы биологической природы.

Методы

В работе рассматривается подход, ориентированный на восстановление параметров систем, описываемых модельным уравнением:

$$\varepsilon_0 \dot{x}(t) = -x(t) + f(x(t - \tau_0)), \quad (1)$$

где ε_0 – инерционность, f – нелинейная функция, τ_0 – время запаздывания.

Предложенный авторами статьи метод восстановления времени задержки основан на использовании ведомой системы, включенной по схеме с синхронным откликом. Временной ряд $x(t)$ исследуемой системы подается на вход ведомой системы, имеющей структуру, идентичную исследуемой, но с петлей обратной связи, разорванной вычитателем. На выходе вычитателя присутствует разность сигналов $z(t) = x(t) - v(t)$, где $v(t)$ – сигнал на выходе инерционного элемента ведомой системы (рис. 1). Если параметры ведомой системы идентичны параметрам исследуемой, то дисперсия D разностного сигнала $z(t)$ будет определяться только измерительными шумами и будет равна 0 в отсутствии шума. Если параметры отличаются, то дисперсия $z(t)$ будет принимать значения порядка дисперсии самой экспериментальной реализации. Подобный подход использовался, например, при построении хаотической системы скрытой передачи информации, предложенной в работах [11, 12].

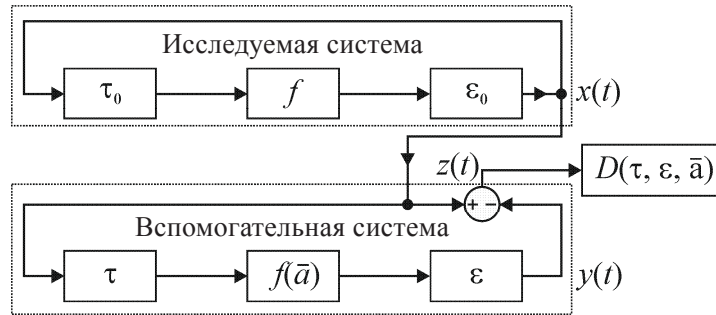


Рис. 1. Принцип работы применяемой методики реконструкции с использованием синхронного отклика вспомогательной системы

Для решения задачи реконструкции параметры нелинейной функции \bar{a} , а также управляющие параметры τ и ε находятся путем минимизации целевой функции – дисперсии $D(\tau; \varepsilon; \bar{a})$ сигнала на выходе вычитателя ведомой системы.

Исследуемые системы

В работе исследовались реализации радиофизической экспериментальной установки – хаотического ГЗОС, реализованного в виде гибридного устройства. Линия запаздывания и нелинейный элемент были реализованы в

цифровом виде на базе 32-разрядного ARM-микроконтроллера (МК) Atmel ATSAM3X8E, сигнал с выхода нелинейного элемента подавался на вход 16-битного цифроаналогового преобразователя (ЦАП) Analog Devices AD5060, проходил через инерционный элемент, представляющий собой RC-фильтр нижних частот (ФНЧ), оцифровывался с помощью 16-битного аналогоцифрового преобразователя (АЦП) Analog Devices ADS8326 и подавался в цифровом виде на вход линии задержки, представляющей собой кольцевой буфер в оперативной памяти МК (рис. 2).

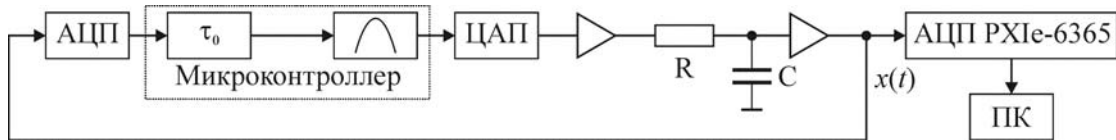


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки для исследования хаотического генератора с запаздывающей обратной связью с квадратичной нелинейностью. Треугольниками показаны повторители, выполненные на микросхеме AD822

На входе и выходе ФНЧ были помещены повторители, выполненные на прецизионных операционных усилителях Analog Devices AD822. На выходе ФНЧ наблюдалась динамическая переменная, которая оцифровывалась с помощью 16-битного АЦП National Instruments PXIe-6355 со скоростью 0.1 Мвыб./с, и ее реализация сохранялась в персональном компьютере для последующей реконструкции.

Работа АЦП, ЦАП и реализация цифровых вычислений МК синхронизовалась в прерывании его прецизионного 32-битного таймера. Ядро МК тактировалось 84 МГц тактовым сигналом (максимальная скорость для данного МК) от 20 МГц кварцевого резонатора через блок фазовой автоподстройки частоты. Такая

реализация системы обеспечила выполнение одной итерации цифровых вычислений с обновлением данных на выходе ЦАП и входе АЦП за $\Delta t = 10^{-5}$ с.

В качестве передаточной функции нелинейного элемента ГЗОС было выбрано квадратичное преобразование. Таким образом, ГЗОС описывался уравнением

$$RC\dot{x}(t) = -x(t) + \lambda_0 - x^2(t - \tau_0), \quad (2)$$

где $RC = \varepsilon_0$ – постоянная времени ФНЧ, λ – управляющий параметр.

Уравнение (2) может быть сведено к виду (1) заменами $\varepsilon_0 = RC$, $f((t - \tau_0)) = \lambda_0 - x^2(t - \tau_0)$.

Для генерации реализаций были использованы следующие параметры: $R = 5358.8$ Ом,



$C = 46.6$ нФ, $\varepsilon_0 = 203$ мкс, $\tau_0 = 2500$ мкс (250 единиц дискретного времени), $\lambda_0 = 1.74$ В.

Для исключения влияния шумов дискретизации, измерительных шумов и искажений, вносимых аналоговыми компонентами, результаты реконструкции модели радиофизического генератора по экспериментальным данным сопоставлялись с результатами реконструкции математической модели генератора с идентичными параметрами, временные реализации которой генерировались в ходе ее численного решения на компьютере.

Для изучения возможностей метода реконструкции при анализе коротких периодических реализаций авторами статьи была выбрана система барорефлекторной регуляции среднего артериального давления, предложенная в работе [4]. Модельное уравнение этой системы, выбранное по результатам физиологических экспериментов, имеет вид (1) с нелинейной функцией f вида:

$$f(x) = k \left(\frac{r^*}{1 + e^{-\beta x}} - \frac{r^*}{1 + e^{\beta x}} \right), \quad (3)$$

где $k = -1.65$ мм рт.ст./мкВ, $r^* = 1$ мкВ, $\beta = 2$ – параметры, значения которых были выбраны в работе [4] из соображений лучшей аппроксимации результатов физиологического эксперимента.

Для уменьшения числа подгоняемых свободных параметров при реконструкции функция (3) аппроксимировалась в виде

$$f(x) \approx a_0 \tanh(b_0 x), \quad (4)$$

где $a_0 = -1.65$ мм рт. ст. и $b_0 = 1.0$ – свободные параметры. Выбранные параметры (4) обеспечивают наилучшую аппроксимацию функции (3) в смысле наименьших квадратов.

Нелинейная функция имеет сигмоидальный вид, и система может демонстрировать только периодическую динамику. При типичных для здоровых людей значениях параметров $\tau_0 = 3.6$ с и $\varepsilon_0 = 2.0$ с [4] система демонстрирует периодические колебания с периодом около 10 с, что соответствует физиологическим наблюдениям. Для получения временной реализации уравнение (1) с нелинейной функцией вида (3) численно интегрировалось методом Эйлера с шагом интегрирования 0.01 с.

Изучение реальных систем всегда осложнено наличием измерительных шумов. Поэтому в ходе численного моделирования исследовалась возможность реконструкции сигналов в присутствии измерительного гауссовского δ -коррелированного шума.

Результаты

Участки временных реализаций и спектры мощности радиофизической установки и математической модели, описываемых уравнением (2), представлены на рис. 3. Оценки по этим данным стандартных отклонений экспериментальной и модельной реализаций дают значения 0.80 В и 0.81 В соответственно. Таким образом, шумы различной природы определяют порядка 1% стандартного отклонения экспериментальной реализации.

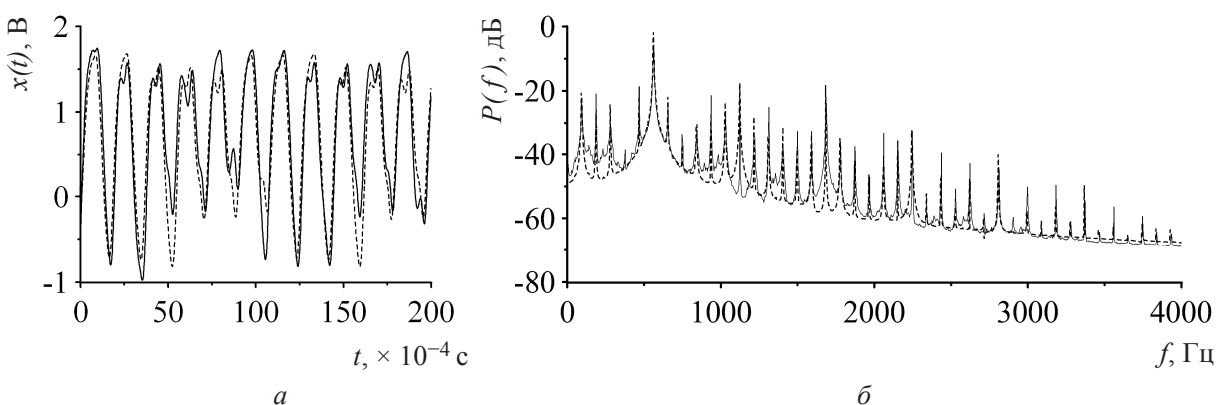


Рис. 3. Временные реализации (а) и спектры мощности (б) экспериментальной установки (сплошная линия) и модели ГЗОС (пунктир), полученные при значениях параметров: $\varepsilon_0 = RC = 203$ мкс, $\tau_0 = 2500$ мкс, $\lambda_0 = 1.74$ В

По полученным хаотическим реализациям осуществлялась динамическая реконструкция параметров модельных уравнений в предпо-

ложении, что структура уравнения в виде (2) известна априорно. На рис. 4 представлены зависимости $D(\tau, \varepsilon, \lambda)$ от каждого из параметров



при оптимальном значении двух других для реконструкции ГЗОС по данным радиофизического и численного экспериментов.

С помощью проведенной процедуры реконструкции были восстановлены значения параметров по реализации модели: $\tau^M = 2500$ мкс,

$\varepsilon^M = 203$ мкс, $\lambda^M = 1.74$ В и по экспериментальной реализации: $\tau^E = 2490$ мкс, $\varepsilon^E = 208$ мкс, $\lambda^E = 1.78$ В. При этом для восстановления параметров по сигналам обеих систем оказалось достаточно временной реализации длиной 0.004 с (400 дискретных отсчетов – 1.5 времени запаздывания).

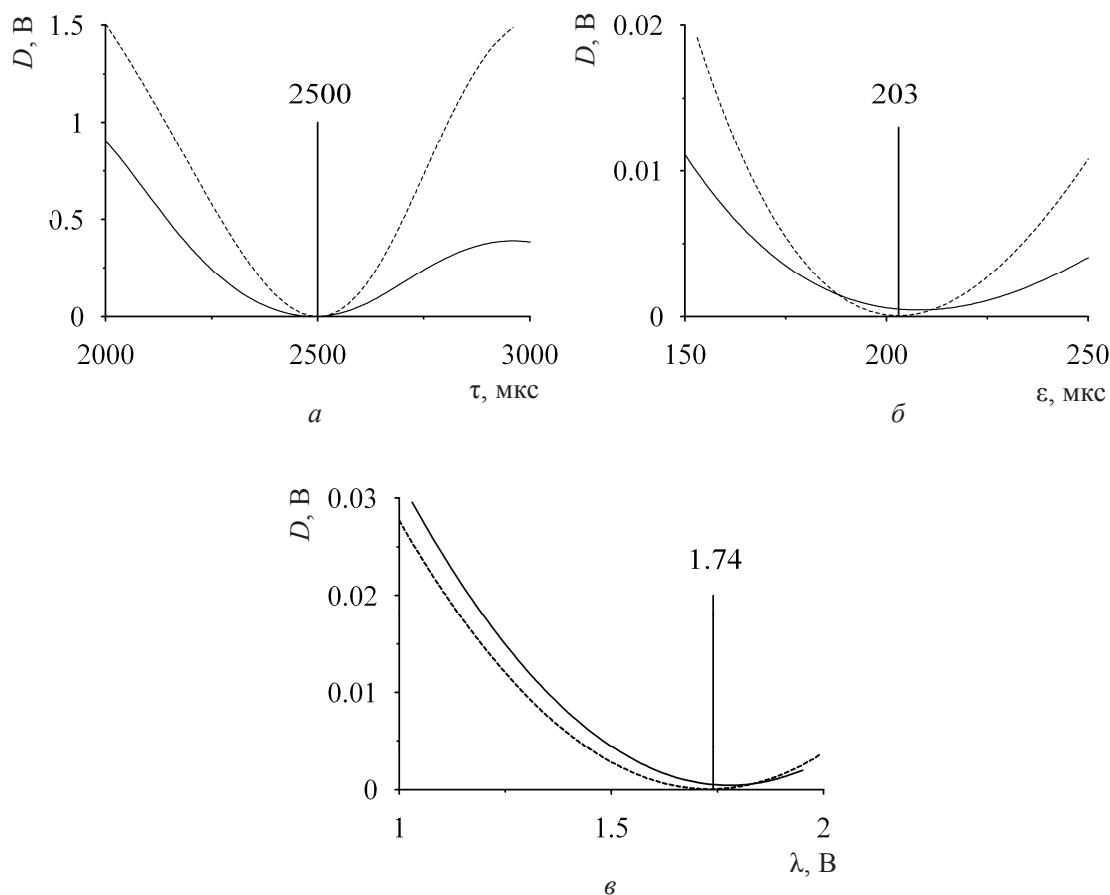


Рис. 4. Зависимости $D(\tau, \varepsilon, \lambda)$ от τ (а), ε (б), λ (в), полученные при восстановленных оптимальных значениях двух других параметров. Зависимости построены при анализе экспериментальной реализации радиофизического генератора хаоса (сплошная линия) и незашумленной реализации модели ГЗОС (пунктир)

Дальнейшее увеличение длины реализации не выявило повышения точности восстановления параметров.

Возможности используемой методики при реконструкции моделей систем с задержкой по коротким периодическим реализациям исследовались в ходе реконструкции модели системы барорефлекторной регуляции среднего артериального давления, в том числе в присутствии измерительного шума. Участки временных реализаций этой модели без шума и в присутствии 1% шума (в смысле отношения стандартных отклонений шума и незашумленного сигнала), а также спектры мощности этих сигналов представлены на рис. 5.

Результаты реконструкции параметров модели системы барорефлекторной регуляции представлены на рис. 6. При анализе временных реализаций были восстановлены следующие значения параметров: $\tau^c = 3.59$ с, $\varepsilon^c = 2.00$ с, $a^c = -1.65$ мм рт. ст., $b^c = 1.00$. Такие значения параметров восстанавливаются при длине реализации более 20 с (2000 дискретных отсчетов, 5.5 времен запаздывания на длине ряда). При восстановлении параметров модельного уравнения в присутствии 1% измерительного шума получены следующие оценки значений параметров: $\tau^n = 3.59$ с, $\varepsilon^n = 2.00$ с, $a^n = -1.65$ мм рт. ст., $b^n = 1.00$. Реконструкцию удается осуществить при длине реализации более 30 с (3000 дискрет-

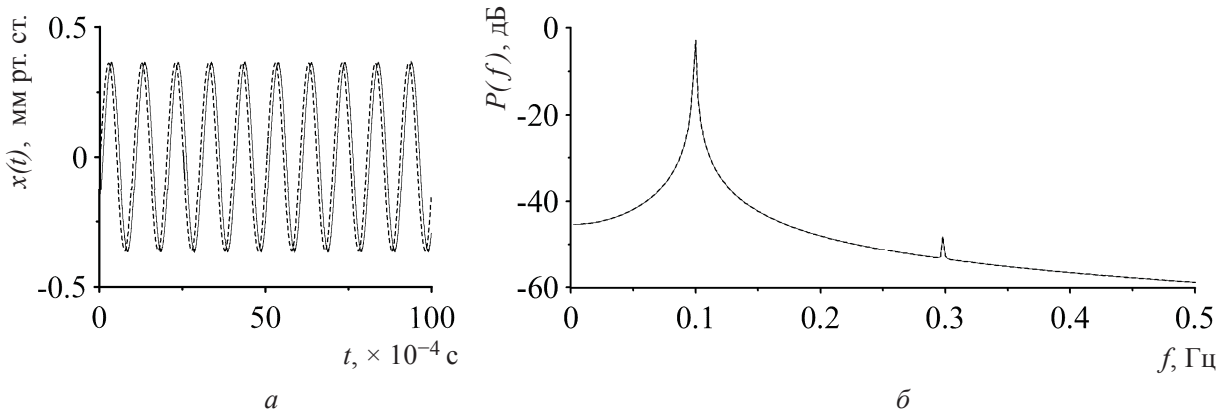


Рис. 5. Временные реализации динамической переменной, имеющей смысл среднего артериального давления (а) и спектры мощности (б) модели системы барорефлекторной регуляции артериального давления без шума (сплошная линия) и с 1%-ным гауссовским шумом (пунктир), полученные при значениях параметров модели: $\varepsilon_0 = 2$ с, $\tau_0 = 3.6$ с, $\beta = 2$, $r^* = 1$ мкВ, $k = -1.65$ мм рт. ст./мкВ

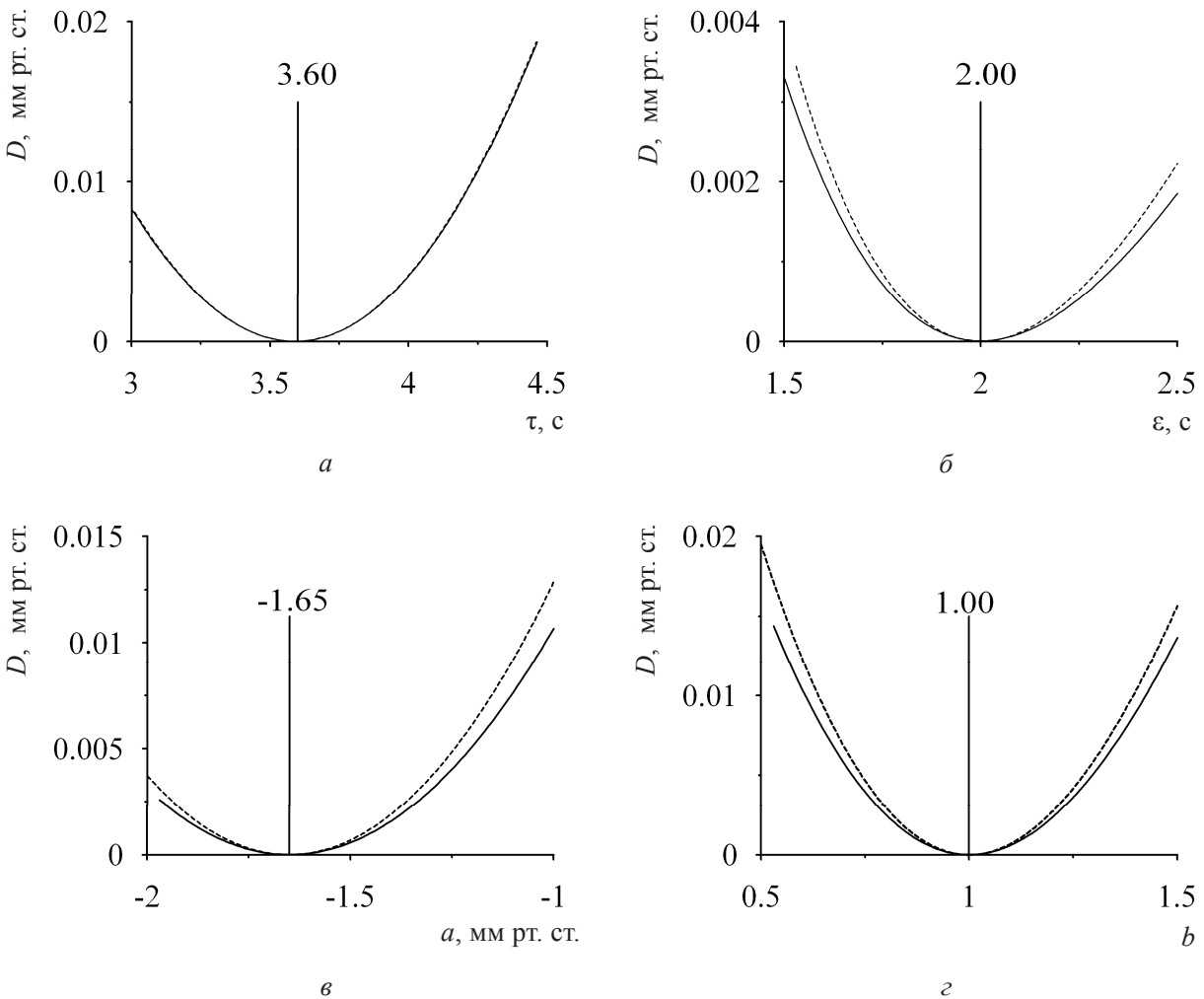


Рис. 6. Зависимости $D(\tau, \varepsilon, a, b)$ от параметров: τ (а), ε (б), a (в), b (г), построенные при оптимальных значениях трех других восстановленных параметров. Зависимости построены при анализе незашумленной (пунктир) и зашумленной 1%-ным гауссовским шумом (сплошная линия) реализаций модели системы барорефлекторной регуляции артериального давления. Сечения строились при переборе значений параметров τ, ε, a и b с шагом 0.01



ных отсчетов, 8.5 времен запаздывания). При уменьшении длины реализаций ниже указанных значений ошибка оценки параметров резко возрастает. Дальнейшее увеличение длины реализации не вызывает увеличения точности оценки.

Результаты реконструкции нелинейной функции в виде (4) при анализе зашумленной реализации сравниваются с «эталонной» функцией (3) на рис. 7. Видно, что несмотря на наличие шума, нелинейная функция восстанавливается с высокой точностью.

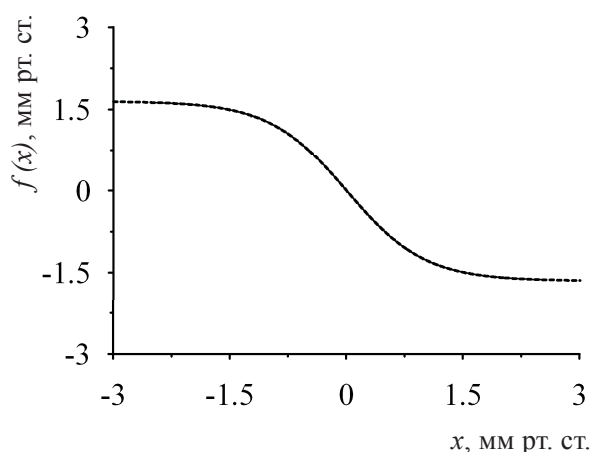


Рис. 7. Сопоставление нелинейной функции (3) системы биологической природы (пунктир) и восстановленной нелинейной функции в виде (4). Реконструкция осуществлялась по зашумленному 1%-ным измерительным шумом короткому временному ряду длиной 3000 дискретных выборок (3 характерных периода колебаний)

Заключение

Работа посвящена решению проблемы реконструкции модельных уравнений систем с запаздывающей обратной связью по коротким временным рядам. Для этого используется методика, основанная на синхронном отклике на экспериментальную реализацию ведомой системы, структура которой аналогична структуре модельного уравнения исследуемого объекта.

Проведена реконструкция модельных уравнений радиофизического хаотического генератора с запаздыванием, его численной модели, а также модели системы биологической природы, демонстрирующей периодическую динамику.

Полученные результаты указывают, что предложенная методика, учитывающая априорную информацию об объекте исследования, позволяет с хорошей точностью осуществлять реконструкцию параметров моделей по существенно более коротким временным реализаци-

ям, чем другие известные подходы. При этом, в силу того, что сигналы хаотических систем несут больше информации, чем периодические сигналы, реконструкция параметров хаотических генераторов может быть осуществлена по еще более коротким реализациям (менее двух времен запаздывания), чем по периодическим (около десяти времен запаздывания при наличии 1%-ного измерительного шума).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-02-03061), гранта Президента РФ МД-4368.2015.7.

Список литературы

1. Ишбулатов Ю. М. Динамические модели вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы // Бюл. мед. интернет-конференций. 2015. Т. 5, № 11. С. 1426–1429.
2. Ikeda K. Multiple-valued Stationary State and its Instability of the Transmitted Light by a Ring Cavity System // Opt. Commun. 1979. Vol. 30. P. 257–261.
3. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. 16. P. 347.
4. Ringwood J., Malpas S. Dynamic relationship between sympathetic nerve activity and renal blood flow : a frequency domain approach // American J. of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology. 2001. Vol. 280, № 4. P. R1105–1115.
5. Mackey M. C., Glass L. Pathological physiological conditions resulting from instabilities in physiological control systems // Science. 1977. Vol. 197. P. 287.
6. Tian Y.-C., Gao F. Extraction of delay information from chaotic time series based on information entropy // Physica D. 1997. Vol. 108. P. 113–118.
7. Bunner M. J., Meyer Th., Kittel A., Parisi J. Recovery of the time-evolution equation of time-delay systems from time series // Phys. Rev. E. 1997. Vol. 56. P. R5083–5089.
8. Bunner M. J., Popp M., Meyer Th., Kittel A., Parisi J. Tool to recover scalar time-delay systems from experimental time series // Phys. Rev. E. 1996. Vol. 54. P. R3082–3085.
9. Караваев А. С., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Восстановление моделей скалярных систем с запаздыванием по временным рядам // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27, вып. 10. С. 43–51.
10. Караваев А. С., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Гриднев В. И., Киселев А. Р., Безручко Б. П., Посненкова О. М., Струнина А. Н., Шварц В. А. Методика реконструкции модели системы симпатической барорефлекторной регуляции артериального давления по экспериментальным временным рядам // Технологии живых систем. 2007. Т. 4, № 4. С. 34–41.



11. *Караваяев А. С., Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д.* Экспериментальная система скрытой передачи информации на генераторе с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 1. С. 3–11.

12. *Кульминский Д. Д., Караваяев А. С., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д.* Система скрытой передачи данных в медицинских информационных системах, основанная на хаотической синхронизации генераторов с запаздывающей обратной связью // Бюл. мед. интернет-конференций. 2014. Т. 4, № 7. С. 971–974.

УДК 539.234

ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ pH РАСТВОРОВ

**Д. М. Митин, Н. В. Волкова, С. В. Герман,
А. В. Маркин, С. Б. Вениг, А. А. Сердобинцев**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: mitindm@mail.ru

Показана возможность создания pH-сенсора на основе тонких плёнок аморфного кремния. Принцип работы датчика схож с механизмом действия ионоселективного полевого транзистора. Изменение pH исследуемого раствора приводит к изменению толщины обедненной области и, следовательно, проводимости структуры на основе пленки аморфного кремния.

Ключевые слова: аморфный кремний, тонкие плёнки, pH-сенсор, магнетронное распыление.

Application of Thin Film Structures Based on Amorphous Silicon for pH Measurements in Solutions

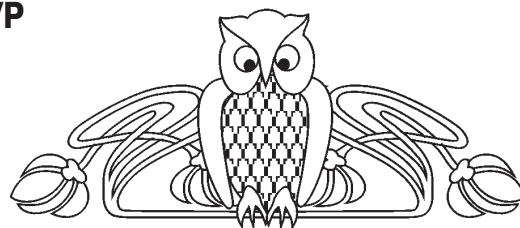
**D. M. Mitin, N. V. Volkova, S. V. German,
A. V. Markin, S. B. Venig, A. A. Serdobintsev**

Formation possibility of pH-sensor based on amorphous silicon thin films is shown. The principle of sensor operation is similar to the ion-selective field effect transistor. Change of the investigated solution pH leads to change of depletion width and conductivity of amorphous silicon thin film structure.

Key words: amorphous silicon, thin films, pH-sensor, magnetron sputtering.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-1-24-26

Развитие современной науки и техники приводит к необходимости разработки новых типов первичных преобразователей физических величин. Особенно актуальной данная задача становится при проектировании интеллектуальных систем управления процессами. В качестве примера таких систем можно привести комплексы контроля параметров жизнедеятельности человека. Разработка столь сложных систем требует объединения, по крайней мере, двух областей знания: биохимии и электроники. Пересечение и взаимное проникновение этих научных на-



правлений позволило создать новую научную область – биоэлектронику [1].

Область применения химических сенсоров очень широка: от определения состава внутриклеточной жидкости до анализа газов, природных и сточных вод, продуктов питания и т.д. Анализ биологических жидкостей очень быстро выделился в отдельное направление аналитического применения химических сенсоров, а необходимость определения состава проб малых объемов обуславливает важность разработки и изготовления микросенсоров для этих целей.

Протекание различных химических процессов сильно зависит от реакции среды в растворе. Кислотность реакционной среды имеет особое значение для биохимических реакций, протекающих в живых системах. Поэтому величина pH раствора является важнейшим показателем, который необходимо контролировать как при диагностике, медицинских процедурах, так и при проведении экспериментов в научно-исследовательских лабораториях и в ходе разнообразных технологических процессов [2].

В последние десятилетия большинство исследований в области pH-сенсоров было посвящено разработке и созданию датчиков на основе ионоселективных полевых транзисторов (ИСПТ) [3]. Помимо прочих причин это связано с тем, что pH-электроды на основе ИСПТ имеют ряд преимуществ по сравнению со стеклянными pH-электродами, а именно прочность, портативность, быстрый отклик, простые условия хранения и чистки, измерения в полутвердых образцах. Однако общее количество технологи-