

01.5

## Новый подход к экспериментальному исследованию больших ансамблей радиотехнических генераторов со сложными связями

© Д.Д. Кульминский<sup>1,2</sup>, В.И. Пономаренко<sup>1,2</sup>, И.В. Сысоев<sup>1,2</sup>, М.Д. Прохоров<sup>1</sup><sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия<sup>2</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия  
E-mail: kulminskydd@gmail.com

Поступило в Редакцию 22 августа 2019 г.

В окончательной редакции 22 августа 2019 г.

Принято к публикации 14 ноября 2019 г.

Предложен новый подход, позволяющий экспериментально исследовать сложную динамику в больших ансамблях связанных радиотехнических генераторов. Подход применен для построения аналого-цифровой экспериментальной установки для исследования ансамблей генераторов с запаздывающей обратной связью, в которой реализована возможность задания произвольной архитектуры связей и разных типов связей между генераторами. Продемонстрирована возможность реконструкции сложной топологии связей и параметров всех генераторов по их экспериментальным временным рядам.

**Ключевые слова:** ансамбли осцилляторов, радиофизический эксперимент, генераторы с запаздыванием, реконструкция уравнений.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.04.49046.18018

Задача исследования сложной динамики ансамблей связанных осцилляторов уже давно привлекает к себе внимание многих авторов [1–6]. В большинстве случаев для исследования больших ансамблей осцилляторов применялись теоретические и численные методы, а экспериментальным исследованиям уделялось значительно меньше внимания. Это объясняется сложностью постановки натурального эксперимента, которая быстро возрастает с увеличением размера ансамбля и количества связей между его элементами. Удобными объектами для экспериментального изучения сложной динамики ансамблей осцилляторов являются радиотехнические генераторы. С их помощью были исследованы процессы синхронизации в цепочках связанных осцилляторов [7,8] и в ансамблях осцилляторов, связанных через общее поле [9,10]. Однако экспериментальная реализация сложной архитектуры связей и сложных функций связи между радиотехническими генераторами в больших ансамблях остается пока трудной задачей.

В настоящей работе предложен новый подход к экспериментальному исследованию больших ансамблей радиотехнических генераторов со сложными связями, в основе которого лежит программный способ формирования сигналов, отвечающих за связь между генераторами. Такой подход позволяет задать произвольную архитектуру связей и реализовать практически любой вид связей между генераторами в радиофизическом эксперименте.

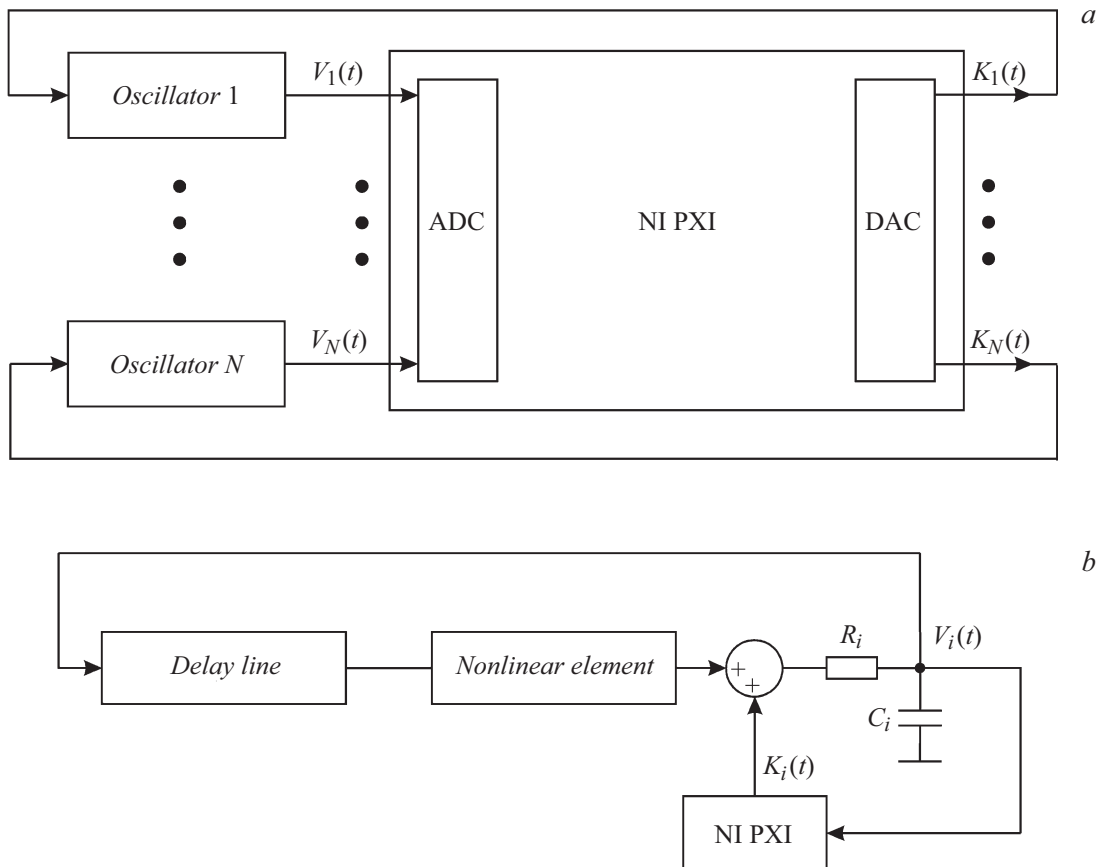
Для экспериментального исследования больших ансамблей радиотехнических генераторов нами построена оригинальная аналого-цифровая установка, блок-схема которой представлена на рис. 1, а. Для осуществления связи между генераторами была использована система ввода-вывода многоканальных данных — National

Instruments PCI eXtensions for Instrumentation (NI PXI). Сигналы напряжения  $V_i(t)$  с выхода каждого генератора (где  $i = 1, \dots, N$ ;  $N$  — число генераторов) подаются на аналоговые входы многоканального аналого-цифрового преобразователя и оцифровываются с частотой  $f = 10$  kHz для дальнейшей обработки. Затем с помощью программы на LabView проводится преобразование сигналов  $V_i(t)$  и формируются отвечающие за связь генераторов сигналы

$$K_i(t) = \sum_{j=1}^N k_{i,j} (V_j(t) - V_i(t)), \quad (1)$$

где  $k_{i,j}$  — коэффициенты, характеризующие силу связи. Сигналы  $K_i(t)$  преобразуются в аналоговый вид с помощью многоканального цифро-аналогового преобразователя и подаются в качестве управляющего воздействия на вход каждого генератора.

В рамках настоящей работы в установке реализована простая линейная связь между генераторами. При аналоговом моделировании такая связь соответствует связи двух радиотехнических генераторов через резистор [11]. Помимо резисторов для связи генераторов можно использовать и другие элементы: конденсатор, катушку индуктивности или мемристор, реализуя емкостную [12], индукционную [13] или мемристорную связь [14,15] соответственно. Поскольку сигналы, отвечающие за связь генераторов, формируются в экспериментальной установке программным образом, в ней можно реализовать связь генераторов через резистор, конденсатор, катушку индуктивности или мемристор, внося соответствующие изменения в программу. Кроме того, можно легко задать произвольную архитектуру связей между генераторами и реализовать различные



**Рис. 1.** *a* — блок-схема экспериментальной установки. Показаны только первый и *N*-й генераторы. NI PXI — система ввода-вывода многоканальных данных, ADC — аналого-цифровой преобразователь, DAC — цифро-аналоговый преобразователь. *b* — блок-схема базового генератора.

виды нелинейных и запаздывающих связей. Установка работает в режиме реального времени и позволяет при необходимости подстраивать в ходе эксперимента силу связей для управления коллективной динамикой генераторов.

В качестве базового элемента ансамбля мы выбрали генератор с запаздывающей обратной связью, представляющий собой кольцевую систему, состоящую из линии задержки, нелинейного элемента и низкочастотного *RC*-фильтра первого порядка. Блок-схема базового генератора представлена на рис. 1, *b*. Связь базового генератора с другими генераторами ансамбля реализована подачей сигнала связи  $K_i(t)$  на вход сумматора, расположенного между фильтром и нелинейным элементом. Динамика *i*-го генератора с запаздыванием описывается модельным уравнением следующего вида:

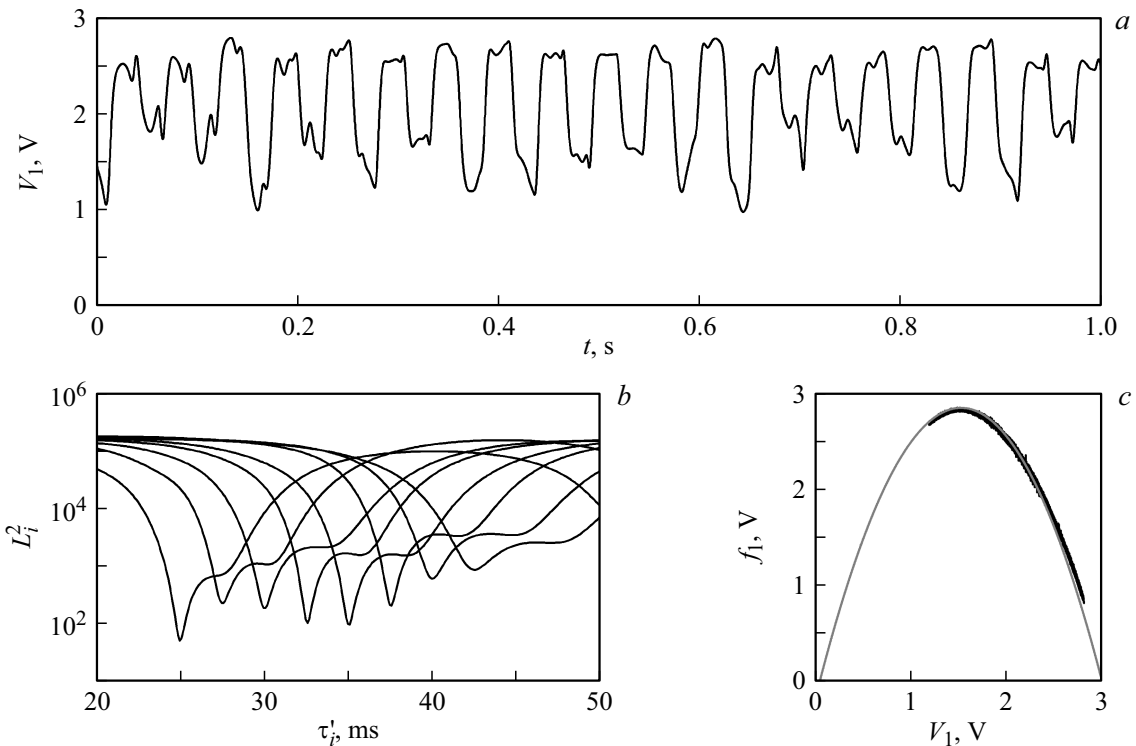
$$R_i C_i \dot{V}_i(t) = -V_i(t) + f_i(V_i(t - \tau_i)) + K_i(t), \quad (2)$$

где  $V_i(t)$  и  $V_i(t - \tau_i)$  — напряжения на входе и выходе линии задержки соответственно,  $\tau_i$  — время запаздывания,  $R_i$  и  $C_i$  — сопротивление и емкость элементов фильтра,  $f_i$  — передаточная характеристика нелинейного элемента, а  $K_i(t)$  имеет вид (1). В качестве базового

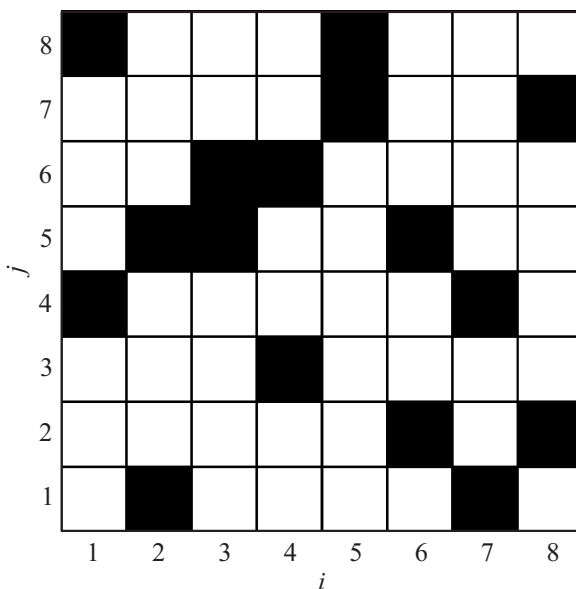
осциллятора ансамбля можно использовать также другие автогенераторы. Отметим, что похожий подход был использован нами для экспериментального исследования синхронизации двух генераторов, описываемых уравнениями ФитцХью–Нагумо, взаимно связанных запаздывающей связью [16].

Для иллюстрации работоспособности созданной экспериментальной установки мы провели реконструкцию модельных уравнений (2) ансамбля, состоящего из восьми связанных генераторов с запаздыванием. Из 56 возможных связей в ансамбле случайным образом задано 16 однонаправленных связей. Все генераторы ансамбля являются неидентичными. Их параметры принимают случайные значения в следующих интервалах:  $\tau_i \in [25, 42.5]$  ms,  $R_i C_i \in [2, 4.8]$  ms,  $k_{i,j} \in [0.05, 0.15]$ . Все нелинейные элементы генераторов имеют квадратичную передаточную характеристику. На рис. 2, *a* приведен фрагмент временной реализации сигнала  $V_1(t)$  в первом генераторе, имеющем параметры  $\tau_1 = 25$  ms,  $R_1 C_1 = 2$  ms,  $k_{1,4} = 0.15$ ,  $k_{1,8} = 0.08$ ,  $k_{1,j} = 0$  при  $j \neq 4, 8$ .

Используя предложенный нами ранее метод реконструкции [17], основанный на минимизации для каждого генератора целевой функции, характеризующей рас-



**Рис. 2.** *a* — временная реализация сигнала  $V_1(t)$  первого генератора; *b* — зависимости  $L_i^2(\tau_i')$  для каждого из восьми генераторов ансамбля; *c* — восстановленная нелинейная функция (жирная линия) и истинная функция  $f_1$  (светлая линия) первого генератора.



**Рис. 3.** Диаграмма результата реконструкции архитектуры связей. Черным цветом показаны правильно восстановленные связи, белым — правильно диагностированные отсутствующие связи.

стояние между точками реконструируемой нелинейной функции, мы построили на рис. 2, *b* зависимости целевой функции  $L_i^2$  от пробного времени запаздывания  $\tau_i'$  для всех восьми генераторов ансамбля. Глобальные миниму-

мы пяти зависимостей  $L_i^2(\tau_i')$ , в том числе  $L_1^2(\tau_1')$ , наблюдаются при истинных временах запаздывания генераторов. Для трех генераторов минимум  $L_i^2(\tau_i')$  оказался смещен относительно истинного времени запаздывания на время  $t_s = 0.1$  ms, равное интервалу выборки точек временных рядов.

Восстановленные коэффициенты связи для первого генератора  $k'_{1,4} = 0.148$  и  $k'_{1,8} = 0.079$  достаточно близки к истинным значениям. Восстановленный параметр инерционности  $(R_1C_1)' = 2.1$  ms тоже близок к истинному значению  $R_1C_1$ . Точность восстановления параметров остальных генераторов ансамбля получилась примерно такой же.

На рис. 2, *c* приведена нелинейная функция первого генератора, восстановленная при  $k'_{1,4}$ ,  $k'_{1,8}$  и  $(R_1C_1)'$ . Она достаточно хорошо совпадает с истинной передаточной характеристикой  $f_1$  нелинейного элемента первого генератора. Аналогичным образом мы восстановили нелинейные функции остальных генераторов, получив высокое качество реконструкции.

Результат реконструкции архитектуры связей в ансамбле приведен на рис. 3. Клетка с координатами  $(i, j)$  показывает влияние  $j$ -го генератора на  $i$ -й, кроме клеток на диагонали, не несущих никакой информации. Метод позволил выявить все 16 имеющихся в ансамбле связей, ложных связей не обнаружено.

Итак, нами предложен перспективный подход к экспериментальному исследованию больших ансамблей радиотехнических генераторов с большим количеством

связей. Используя предложенный подход, мы построили экспериментальную установку, которая позволяет программным образом задавать произвольную архитектуру и тип связей между генераторами и при необходимости изменять связи в ходе эксперимента. Работоспособность установки продемонстрирована на примере ансамбля генераторов с запаздывающей обратной связью. С ее помощью впервые проведена реконструкция сложной архитектуры связей, коэффициентов связей и собственных нелинейных функций генераторов с запаздыванием по их экспериментальным временным рядам.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ, проект МК-1199.2019.8 (дизайн экспериментальной установки), а также Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-02-00071 (исследование и реконструкция ансамблей генераторов с запаздыванием).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Afraimovich V.S., Nekorkin V.I., Osipov G.V., Shalfeev V.D.* Stability, structures, and chaos in nonlinear synchronization networks. Singapore: World Scientific, 1995. 260 p. DOI: 10.1142/2412
- [2] *Boccaletti S., Latora V., Moreno Y., Chavez M., Hwang D.-U.* // Phys. Rep. 2006. V. 424. P. 175–308. DOI: 10.1016/j.physrep.2005.10.009
- [3] *Osipov G.V., Kurths J., Zhou C.* Synchronization in oscillatory networks. Berlin: Springer, 2007. 370 p. DOI: 10.1007/978-3-540-71269-5
- [4] *Масленников О.В., Некоркин В.И.* // УФН. 2017. Т. 187. № 7. С. 745–756. DOI: 10.3367/UFNr.2016.10.037902
- [5] *Kundu P., Sharma L., Nandan M., Ghosh D., Hens C., Pal P.* // Chaos. 2019. V. 29. P. 013112. DOI: 10.1063/1.5051535
- [6] *Голдобин Д.С., Долматова А.В.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2019. Т. 27. В. 3. С. 33–60. DOI: 10.18500/0869-6632-2019-27-3-33-60
- [7] *Gambuzza L.V., Buscarino A., Chessa S., Fortuna L., Meucci R., Frasca M.* // Phys. Rev. E. 2014. V. 90. P. 032905. DOI: 10.1103/PhysRevE.90.032905
- [8] *Arumugata E.M.E., Spano M.L.* // Chaos. 2015. V. 25. P. 013107. DOI: 10.1063/1.4905856
- [9] *Temirbayev A.A., Nalibayev Y.D., Zhanabaev Z.Z., Ponomarenko V.I., Rosenblum M.* // Phys. Rev. E. 2013. V. 87. P. 062917. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.062917
- [10] *Ponomarenko V.I., Kulminskiy D.D., Prokhorov M.D.* // Phys. Rev. E. 2017. V. 96. P. 022209. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.022209
- [11] *Sysoev I.V., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Bezruchko B.P.* // Phys. Rev. E. 2014. V. 89. P. 062911. DOI: 10.1103/PhysRevE.89.062911
- [12] *Liu Z., Ma J., Zhang G., Zhang Y.* // Appl. Math. Comput. 2019. V. 360. P. 94–106. DOI: 10.1016/j.amc.2019.05.004
- [13] *Yao Z., Ma J., Yao Y., Wang C.* // Nonlinear Dynamics. 2019. V. 96. P. 205–217. DOI: 10.1007/s11071-019-04784-2
- [14] *Xu Y., Jia Y., Ma J., Alsaedi A., Ahmad B.* // Chaos Soliton Fract. 2017. V. 104. P. 435–442. DOI: 10.1016/j.chaos.2017.09.002
- [15] *Корнеев И.А., Шабалина О.Г., Семенов В.В., Вадивасова Т.Е.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26. В. 2. С. 24–40. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-2-24-40
- [16] *Пономаренко В.И., Кульминский Д.Д., Прохоров М.Д.* // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 17. С. 11–18. DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46565.17366
- [17] *Sysoev I.V., Ponomarenko V.I., Kulminskiy D.D., Prokhorov M.D.* // Phys. Rev. E. 2016. V. 94. P. 052207. DOI: 10.1103/PhysRevE.94.052207