

01.5

Адаптивное управление несинхронными колебаниями в сети идентичных электронных нейроподобных генераторов

© А.В. Курбако^{1,2}, В.И. Пономаренко^{1,2}, М.Д. Прохоров¹¹ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия² Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
E-mail: mdprokhorov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 28 июля 2022 г.

В окончательной редакции 24 августа 2022 г.

Принято к публикации 25 августа 2022 г.

В радиофизическом эксперименте реализована схема управления, позволяющая десинхронизовать колебания в сетях идентичных электронных нейроподобных генераторов со случайной топологией аддитивных и диффузионных связей.

Ключевые слова: нейроподобные генераторы, синхронизация, адаптивное управление, радиофизический эксперимент.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.19.53596.19328

Подстройка ритмов взаимодействующих автоколебательных систем, приводящая к их синхронизации, типична для объектов живой и неживой природы [1]. Исследование процессов синхронизации в сетях связанных осцилляторов является актуальной задачей для различных научных дисциплин, которая привлекает внимание многих исследователей [2]. В частности, многие биологические и физиологические системы могут демонстрировать синхронизацию своих элементов. Например, эффекты синхронизации играют важную роль для осуществления моторных функций [3,4], нормального функционирования сердечно-сосудистой системы [5] и реализации когнитивных функций головного мозга [6]. Однако чрезмерная синхронизация нейронов головного мозга может вызывать такие серьезные неврологические заболевания, как эпилепсия [7], шизофрения [8] и болезнь Паркинсона [9]. Поэтому задача десинхронизации колебаний в нейронных сетях вызывает большой интерес.

Для разрушения режима синхронизации колебаний в сетях связанных осцилляторов были предложены различные методы, основанные на использовании линейной [10] и нелинейной [11] запаздывающей обратной связи и инверсии среднего поля [12]. Все эти методы были разработаны для сетей осцилляторов, глобально связанных через общее поле. В реальных многоэлементных сетях часто встречаются другие типы связи между осцилляторами, например аддитивная и диффузионная связи. Задача десинхронизации колебаний в нейронных сетях со случайной топологией таких связей была исследована численно в [13], а в [14] были аналитически получены условия десинхронизации в сети диффузионно связанных осцилляторов на основе понятия колебательности по Якубовичу. В настоящей работе мы впервые реализовали в радиофизическом эксперименте десинхронизацию синхронных колебаний в сети электронных

нейроподобных генераторов со случайной топологией аддитивных и диффузионных связей, используя адаптивное управление колебательными режимами.

Рассмотрим сначала нейронную сеть, состоящую из аддитивно связанных между собой нейроподобных осцилляторов ФитцХью–Нагумо [15], динамика которых описывается модельными уравнениями следующего вида:

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{u}_i(t) &= u_i(t) - \frac{u_i^3(t)}{3} - v_i(t) + \sum_{j=1}^N k_{i,j} u_j(t) + c(t), \\ \dot{v}_i(t) &= u_i(t) + a, \end{aligned} \quad (1)$$

где $u_i(t)$ и $v_i(t)$ — динамические переменные i -го осциллятора, $i = 1, \dots, N$ — номер осциллятора, N — количество осцилляторов, ε — параметр соотношения временных масштабов, являющийся обычно малой величиной, a — пороговый параметр, $k_{i,j}$ — коэффициент связи, действующей со стороны j -го осциллятора на i -й, $c(t)$ — внешний управляющий сигнал. Будем рассматривать случай идентичных осцилляторов (1), совершающих периодические автоколебания в отсутствие связей и управляющего сигнала, т. е. случай $a < 1$ [15].

Коэффициенты $k_{i,j}$ определяют архитектуру и силу связей в сети. Если все $k_{i,j} \neq 0$, то все осцилляторы сети связаны через общее поле $\bar{u}(t) = N^{-1} \sum_{j=1}^N u_j(t)$, и при достаточно сильной связи их колебания синхронизируются. Разрушить синхронизацию осцилляторов можно, подав на них сигнал общего поля с обратным знаком в качестве управляющего сигнала [12]. Аналогичный подход можно использовать для десинхронизации сети (1), в которой отсутствует часть связей между осцилляторами. Однако в этом случае следует использовать управляющий сигнал $c(t) = -k_m D \bar{u}(t)$ [13], где k_m — макси-

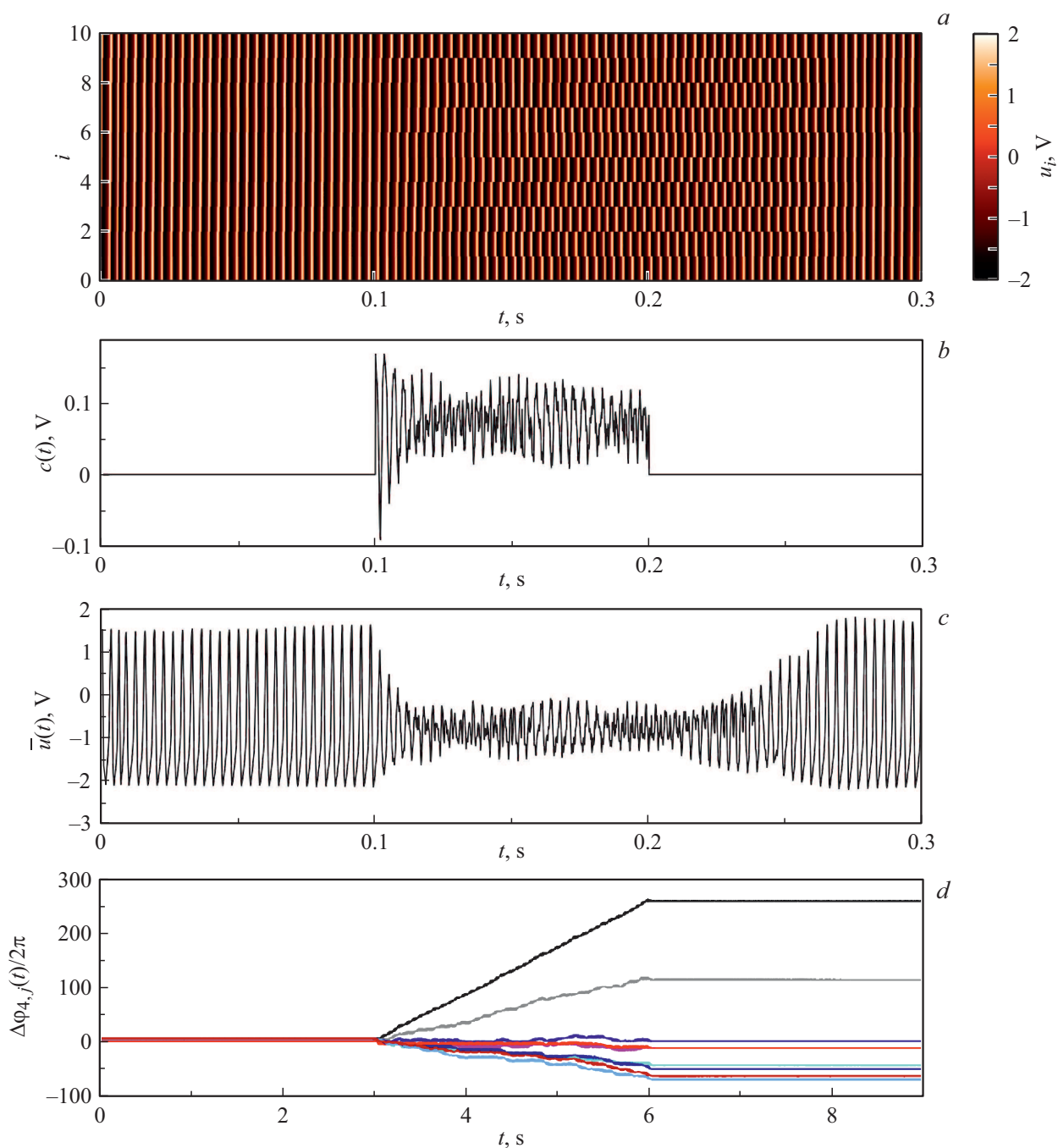


Рис. 1. *a* — пространственно-временная диаграмма колебаний переменных $u_i(t)$ аддитивно связанных генераторов (1). *b* — управляющий сигнал $c(t)$. *c* — временная динамика среднего поля $\bar{u}(t)$. *d* — временная динамика нормированных на 2π разностей фаз $\Delta\varphi_{4,j}$ между четвертым генератором и остальными девятью генераторами.

мальный из коэффициентов $k_{i,j}$, а D — среднее число осцилляторов, действующих на каждый элемент сети.

Для управления в радиофизическом эксперименте колебаниями в сети связанных идентичных нейрноподобных осцилляторов нами была построена оригинальная аналого-цифровая установка. Исследуемая сеть состояла из десяти аналоговых электронных генераторов ФитцХью–Нагумо, демонстрирующих нейрноподобную динамику, принципиальная схема которых подробно

описана в работе [16]. Для реализации связей между генераторами мы использовали подход, основанный на программном способе формирования сигналов, отвечающих за связь аналоговых генераторов [17]. При таком подходе сигналы напряжения с выхода каждого генератора подаются на многоканальный аналого-цифровой преобразователь и оцифровываются. Затем с помощью программы на платформе LabView проводится преобразование этих сигналов и формируются сигналы требу-

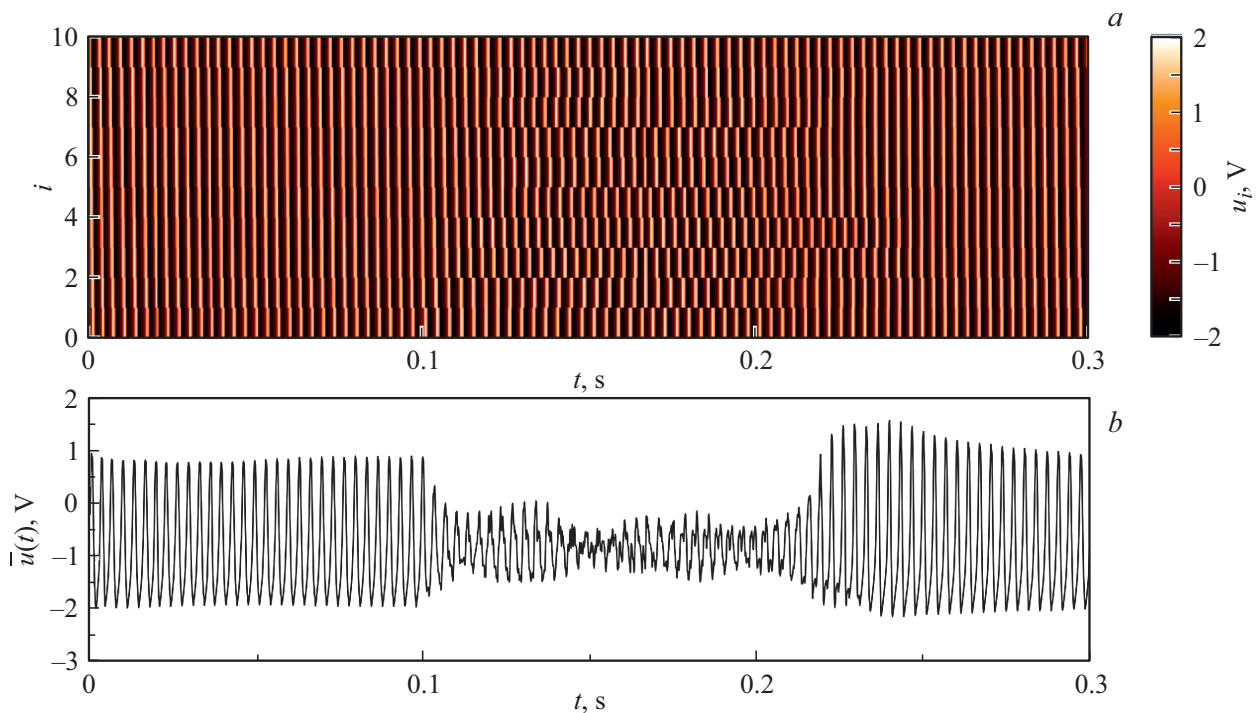


Рис. 2. *a* — пространственно-временная диаграмма колебаний переменных $u_i(t)$ диффузионно связанных генераторов (2). *b* — временная динамика среднего поля $\bar{u}(t)$.

мого вида, отвечающие за связь генераторов. К каждому из сигналов связи в соответствии с уравнением (1) добавляется управляющий сигнал $c(t)$. Сформированные таким образом сигналы преобразуются в аналоговый вид с помощью многоканального цифро-аналогового преобразователя и подаются на вход каждого генератора. Такой подход позволяет задать произвольную архитектуру и тип связей между генераторами и изменять управляющий сигнал в режиме реального времени.

На рис. 1, *a* приведена пространственно-временная диаграмма колебаний переменной $u_i(t)$ в каждом из десяти генераторов при параметрах $\varepsilon = 0.1$, $a = 0.8$, $D = 4$, $k_m = 0.02$ и значениях $k_{i,j}$, равномерно распределенных на интервале $[0; 0.02]$. Первые 0.1 s управляющий сигнал $c(t) = 0$ (рис. 1, *b*). При этом все генераторы синхронизованы между собой. Однако из-за того, что аналоговые элементы генераторов не могут быть полностью идентичными, амплитуды колебаний $u_i(t)$ разных генераторов немного различаются (рис. 1, *a*). Отметим, что в отсутствие связей (все $k_{i,j} = 0$) немного различались не только амплитуды, но и частоты автоколебаний электронных генераторов, принимая соответственно значения 2.077 ± 0.004 V (среднее \pm среднеквадратичное отклонение) и 287.4 ± 5.1 Hz. На интервале времени от $t = 0.1$ до 0.2 s управляющий сигнал разрушает синхронный режим, и значения $u_i(t)$ становятся не синхронизованными между собой (рис. 1, *a*). Последние 0.1 s опять $c(t) = 0$ (рис. 1, *b*), и после переходного процесса

синхронизация генераторов в сети восстанавливается (рис. 1, *a*).

На рис. 1, *c* показана временная динамика среднего поля $\bar{u}(t)$. На участке синхронизации ($t \in [0; 0.1]$ s) $\bar{u}(t)$ колеблется с почти постоянной амплитудой, величина которой сопоставима с амплитудой колебаний $u_i(t)$, и имеет дисперсию $\sigma = 1.45$. При наличии управляющего сигнала (при $t \in [0.1; 0.2]$ s) $\bar{u}(t)$ совершает нерегулярные колебания, амплитуда которых заметно меньше, чем на участке синхронизации, и имеет дисперсию $\sigma = 0.15$. После отключения управления амплитуда $\bar{u}(t)$ снова увеличивается. Этот результат хорошо согласуется с результатами численных исследований сетей осцилляторов, глобально связанных через общее поле, в которых было показано, что в несинхронном режиме дисперсия общего поля близка к нулю при больших N , а при синхронизации она резко возрастает [10,11].

В синхронном режиме разность фаз $\Delta\varphi_{i,j}$ между любой парой генераторов остается практически постоянной величиной, а в отсутствие синхронизации она может изменяться, демонстрируя неограниченный рост или убывание. Поскольку за время действия управляющего сигнала на рис. 1, *a-c* $\Delta\varphi_{i,j}$ не успевает сильно измениться в несинхронном режиме, мы построили график, на котором интервалы наличия и отсутствия сигнала $c(t)$ увеличены с 0.1 до 3 s (рис. 1, *d*). Видно, что при наличии управляющего сигнала на участке $t \in [3; 6]$ s синхронизация колебаний разрушается.

Рассмотрим теперь случай диффузионно связанных генераторов ФитцХью–Нагумо, описываемых уравнени-

ями следующего вида:

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{u}_i(t) &= u_i(t) - \frac{u_i^3(t)}{3} - v_i(t) \\ &+ \sum_{j=1}^N k_{i,j} (u_j(t) - u_i(t)) + c_i(t), \\ \dot{v}_i(t) &= u_i(t) + a. \end{aligned} \quad (2)$$

В отличие от случая аддитивной связи использование одинакового для всех генераторов управляющего сигнала $c(t) = -k_m D \bar{u}(t)$ приводит к гашению колебаний в сети генераторов (2) [13]. Для разрушения синхронизации при сохранении колебательной активности необходимо подавать разные сигналы на разные генераторы: $c_i(t) = k_m D (u_i(t) - \bar{u}(t))$ [13].

На рис. 2, а построена пространственно-временная диаграмма колебаний $u_i(t)$ в каждом из десяти генераторов при тех же параметрах, что на рис. 1, а. Чередующиеся участки отсутствия и наличия управляющего сигнала имеют длительность по 0.1 s. При включении управления на среднем участке графика ($t \in [0.1; 0.2]$ s) значения $u_i(t)$ десинхронизируются (рис. 2, а), а амплитуда среднего поля $\bar{u}(t)$ заметно уменьшается по сравнению с амплитудой $\bar{u}(t)$ в области синхронизации ($t \in [0; 0.1]$ s) (рис. 2, б). После отключения управления при $t = 0.2$ s синхронизация генераторов в сети восстанавливается после переходного процесса.

Итак, нами в радиофизическом эксперименте реализовано управление несинхронными колебаниями в сети идентичных электронных нейроподобных генераторов со случайной топологией редких связей. Показано, что для разрушения синхронизации в сети аддитивно связанных генераторов можно использовать одинаковый для всех генераторов управляющий сигнал, а для разрушения синхронизации в сети диффузионно связанных генераторов для каждого генератора требуется свой управляющий сигнал.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00150 (<https://rscf.ru/project/22-22-00150/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.С. Пиковский, М.Г. Розенблум, Ю. Куртс, *Синхронизация: фундаментальное нелинейное явление* (Техносфера, М., 2003). [A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths, *Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences* (Cambridge University Press, Cambridge, 2001)].

- [2] S. Boccaletti, A.N. Pisarchik, C.I. del Genio, A. Amann, *Synchronization: from coupled systems to complex networks* (Cambridge University Press, Cambridge, 2018).
- [3] M. Goulding, *Nat. Rev. Neurosci.*, **10**, 507 (2009). DOI: 10.1038/nrn2608
- [4] S.A. Kurkin, D.D. Kulminskiy, V.I. Ponomarenko, M.D. Prokhorov, S.V. Astakhov, A.E. Hramov, *Chaos*, **32**, 033117 (2022). DOI: 10.1063/5.0077789
- [5] M.D. Prokhorov, V.I. Ponomarenko, V.I. Gridnev, M.B. Bodrov, A.B. Bespyatov, *Phys. Rev. E*, **68**, 041913 (2003). DOI: 10.1103/PhysRevE.68.041913
- [6] А.Е. Храмов, Н.С. Фролов, В.А. Максименко, С.А. Куркин, В.Б. Казанцев, А.Н. Писарчик, УФН, **191** (6), 614 (2021). DOI: 10.3367/UFN.2020.06.038807 [A.E. Hramov, N.S. Frolov, V.A. Maksimenko, S.A. Kurkin, V.B. Kazantsev, A.N. Pisarchik, *Phys. Usp.*, **64**, 584 (2021). DOI: 10.3367/UFN.2020.06.038807].
- [7] R.B. Yaffe, P. Borger, P. Megevan, D.M. Groppe, M.A. Kramer, C.J. Chu, S. Santaniello, C. Meisel, A.D. Mehta, S.V. Sarma, *Clin. Neurophysiol.*, **126**, 227 (2015). DOI: 10.1016/j.clinph.2014.09.009
- [8] P.J. Uhlhaas, W. Singer, *Nat. Rev. Neurosci.*, **11**, 100 (2010). DOI: 10.1038/nrn2774
- [9] C. Hammond, H. Bergman, P. Brown, *Trends Neurosci.*, **30**, 357 (2007). DOI: 10.1016/j.tins.2007.05.004
- [10] M.G. Rosenblum, A.S. Pikovsky, *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 114102 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.114102
- [11] O.V. Popoych, C. Hauptmann, P.A. Tass, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 164102 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.164102
- [12] A. Tamaševičius, E. Tamaševičiūtė, G. Mykolaitis, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 223703 (2012). DOI: 10.1063/1.4768938
- [13] S.A. Plotnikov, A.L. Fradkov, *IFAC — PapersOnLine*, **52**, 640 (2019). DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.034
- [14] S.A. Plotnikov, A.L. Fradkov, *IFAC — PapersOnLine*, **53**, 1037 (2020). DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1286
- [15] M.A. Dahlem, G. Hiller, A. Panchuk, E. Schöll, *Int. J. Bifurcat. Chaos*, **19**, 745 (2009). DOI: 10.1142/S0218127409023111
- [16] D.D. Kulminskiy, V.I. Ponomarenko, M.D. Prokhorov, A.E. Hramov, *Nonlinear Dyn.*, **98**, 735 (2019). DOI: 10.1007/s11071-019-05224-x
- [17] Д.Д. Кульминский, В.И. Пономаренко, И.В. Сысоев, М.Д. Прохоров, *Письма в ЖТФ*, **46** (4), 26 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.04.49046.18018 [D.D. Kul'minskii, V.I. Ponomarenko, I.V. Sysoev, M.D. Prokhorov, *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 175 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020020236].