



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2023;31(5)

Научная статья
УДК 517.9

DOI: 10.18500/0869-6632-003061
EDN: KJVJVOV

Мультистабильность вблизи границы индуцированной шумом синхронизации в ансамблях несвязанных хаотических систем

Е. Д. Илларионова, О. И. Москаленко ✉

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия
E-mail: k3524114@yandex.ru, ✉ o.i.moskalenko@gmail.com

Поступила в редакцию 20.06.2023, принята к публикации 13.07.2023,
опубликована онлайн 14.09.2023, опубликована 29.09.2023

Аннотация. Цель настоящей работы — исследование возможности существования мультистабильности вблизи границы индуцированной шумом синхронизации в хаотических системах с непрерывным и дискретным временем. В качестве объектов исследования выбраны ансамбли осцилляторов Лоренца и логистических отображений, находящиеся под действием общего источника белого шума. Методы. Диагностика синхронизации, индуцированной шумом, осуществлялась при помощи непосредственного сравнения состояний систем, находящихся под действием общего источника шума, и расчета ошибки синхронизации. Для определения наличия мультистабильности вблизи границы этого режима произведен расчет меры мультистабильности и построена ее зависимость от интенсивности шумового воздействия на системы. Кроме того, в фиксированные моменты времени получены бассейны притяжения синхронных и асинхронных режимов для одной из систем, находящихся под действием шума, при фиксированных начальных условиях другой системы. Результатом работы является доказательство наличия мультистабильности вблизи границы синхронизации, индуцированной шумом. Заключение. Показано, что для режима перемежающейся синхронизации, индуцированной шумом, так же, как и для режима перемежающейся обобщенной синхронизации, характерна мультистабильность, проявляющаяся в данном случае как существование в один и тот же промежуток времени синхронного поведения у одной пары систем, находящихся под действием общего источника шума, в то время как у другой пары наблюдается асинхронное поведение. Обнаруженный эффект характерен как для потоковых систем, так и для дискретных отображений, находящихся под действием общего источника шума. Он может найти применение в информационно-телекоммуникационных системах при совершенствовании способов скрытой передачи информации, основанных на явлении хаотической синхронизации.

Ключевые слова: индуцированная шумом синхронизация, обобщенная синхронизация, мультистабильность, белый шум, перемежаемость.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — докторов наук (проект № МД-18.2022.1.2).

Для цитирования: Илларионова Е. Д., Москаленко О. И. Мультистабильность вблизи границы индуцированной шумом синхронизации в ансамблях несвязанных хаотических систем // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31, № 5. С. 566–574. DOI: 10.18500/0869-6632-003061. EDN: KJVJVOV

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Multistability near the boundary of noise-induced synchronization in ensembles of uncoupled chaotic systems

E. D. Illarionova, O. I. Moskalenko✉

Saratov State University, Russia

E-mail: k3524114@yandex.ru, ✉o.i.moskalenko@gmail.com

Received 20.06.2023, accepted 13.07.2023, available online 14.09.2023, published 29.09.2023

Abstract. The aim of this work is to study the possibility of the existence of multistability near the boundary of noise-induced synchronization in chaotic continuous and discrete systems. Ensembles of uncoupled Lorenz systems and logistic maps being under influence of a common source of white noise have been chosen as an object under study. *Methods.* The noise-induced synchronization regime detection has been performed by means of direct comparison of the system states being under influence of the common noise source and by calculation of the synchronization error. To determine the presence of multistability near the boundary of this regime, the multistability measure has been calculated and its dependence on the noise intensity has been obtained. In addition, for fixed moments of time, the basins of attraction of the synchronous and asynchronous regimes have been received for one of the systems driven by noise for fixed initial conditions of the other system. *The result* of the work is a proof of the presence of multistability near the boundary of noise-induced synchronization. *Conclusion.* It is shown that the regime of intermittent noise-induced synchronization, as well as the regime of intermittent generalized synchronization, is characterized by multistability, which manifests itself in this case as the existence in the same time interval of the synchronous behavior in one pair of systems being under influence of a common noise source, whereas in the other pair the asynchronous behavior is observed. The found effect is typical for both flow systems and discrete maps being under influence of a common noise source. It can find an application in the information and telecommunication systems for improvement the methods for secure information transmission based on the phenomenon of chaotic synchronization.

Keywords: noise-induced synchronization, generalized synchronization, multistability, white noise, intermittency.

Acknowledgements. This work was financially supported by the Grant Council of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists – doctors of sciences (project N. MD-18.2022.1.2).

For citation: Illarionova ED, Moskalenko OI. Multistability near the boundary of noise-induced synchronization in ensembles of uncoupled chaotic systems. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2023;31(5):566–574. DOI: 10.18500/0869-6632-003061

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

В современном мире явление синхронизации, принадлежащее к числу фундаментальных понятий теории нелинейной динамики и хаоса, играет немаловажную роль. Этот феномен широко распространен в природе, науке, технике и обществе, см., например, монографии [1–4] и обзорные статьи [5–9].

Одним из типов хаотического синхронного поведения является режим синхронизации, индуцированной шумом. Он подразумевает установление идентичных колебаний в двух или нескольких несвязанных между собой идентичных по управляющим параметрам хаотических системах за счет воздействия на них общего источника шума [10, 11]. Вблизи границы этого режима имеет место перемежающееся поведение, характеристики которого подчиняются тем же самым закономерностям, что и для режима перемежающейся обобщенной синхронизации [12].

Относительно недавно было установлено, что для режима перемежающейся обобщенной синхронизации характерна мультистабильность, подразумевающая в данном контексте существование в один и тот же промежуток времени синхронного поведения у одной пары систем, находящихся под действием общего хаотического сигнала, в то время как у другой пары наблюдается асинхронное поведение [13, 14]. Так как режимы обобщенной синхронизации и синхронизации, индуцированной шумом, по своей сути представляют собой один и тот же режим и отличаются только характером внешнего сигнала, воздействующего на системы [15], можно

ожидать, что вблизи границы синхронизации, индуцированной шумом, будет также иметь место мультистабильность.

В настоящей работе впервые исследуется возможность существования мультистабильности вблизи границы синхронизации, индуцированной шумом. В качестве объектов исследования выбраны хаотические системы с непрерывным (осцилляторы Лоренца) и дискретным (логистические отображения) временем, находящиеся под действием общего источника шума.

Осцилляторы Лоренца описываются следующими системами уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \sigma(y_i - x_i) + \varepsilon\xi, \\ \dot{y}_i &= rx_i - y_i - x_iz_i + \varepsilon\xi, \\ \dot{z}_i &= -bz_i + x_iy_i + \varepsilon\xi,\end{aligned}\tag{1}$$

где ξ — белый Гауссов шум, идентичный для всех уравнений системы, $\langle \xi_i(t) \rangle = 0$, $\langle \xi_i(t)\xi_j(t) \rangle = \delta_{ij}\delta(t - t')$, $\forall i, j$, ε — интенсивность шумового воздействия, $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i)$ — векторы состояний систем, на которые воздействует шум, $i = 1, 2$ в случае классической синхронизации, индуцированной шумом, $\sigma = 10$, $r = 28$, $b = 8/3$ — управляющие параметры. Решение системы уравнений (1) осуществлялось численно при помощи метода Эйлера, адаптированного для стохастических дифференциальных уравнений, с шагом по времени $h = 0.001$, аналогично тому, как это делалось в работе [10].

Для логистических отображений уравнения имеют следующий вид:

$$x_{n+1}^i = f(x_n^i, \lambda) + \varepsilon(f(\xi_n, \lambda) - f(x_n^i, \lambda)),\tag{2}$$

где ξ_n — Гауссов шум со средним $\mu = 0.5$ и стандартным отклонением $\sigma = 0.12$, $f(x, \lambda) = \lambda x(1 - x)$, $\lambda = 3.75$ — управляющий параметр, $i = 1, 2$ в случае классической синхронизации, индуцированной шумом, ε — интенсивность шумового воздействия.

При выбранных значениях управляющих параметров режим синхронизации, индуцированной шумом, во взаимодействующих системах Лоренца возникает при интенсивности шумового воздействия $\varepsilon = 6.5$, а в логистических отображениях — при $\varepsilon = 0.1625$. Ниже границы этого синхронного режима, как отмечалось выше, имеет место перемежающееся поведение. При этом сигнал, представляющий собой разность между состояниями систем, на которые воздействует шум, выглядит как чередование синхронных (ламинарных) и асинхронных (турбулентных) фаз, причем наличие той или иной фазы поведения в фиксированный момент времени может зависеть от выбора начальных условий анализируемых систем, что свидетельствует о наличии мультистабильности в данном случае. Для доказательства вышесказанного в фиксированные моменты времени были построены бассейны притяжения одной из систем, находящихся под действием шума, при фиксированных начальных условиях другой системы. Такие бассейны притяжения приведены на рис. 1 для систем Лоренца (1) при $\varepsilon = 5.75$ и на рис. 2 — для логистических отображений (2) при $\varepsilon = 0.153$. Синий цвет соответствует фазам синхронного поведения (когда состояния обеих систем, находящихся под действием шума, оказываются идентичными), зеленый — асинхронным фазам поведения. Белый цвет отвечает вылету изображающей точки на бесконечность. Видно, что для обеих рассмотренных систем в фиксированные моменты времени в режиме перемежающейся синхронизации, индуцированной шумом, имеет место мультистабильность. Важно отметить, что количество синхронных и асинхронных состояний меняется со временем достаточно плавно, подтверждением чего являются зависимости нормированных размеров синхронных и асинхронных кластеров от времени, приведенные на рис. 1, *e* и 2, *d*. Видно, что как для систем Лоренца, так и для логистических отображений оба кластера сосуществуют всегда, при этом размер синхронного кластера оказывается больше, чем асинхронного.

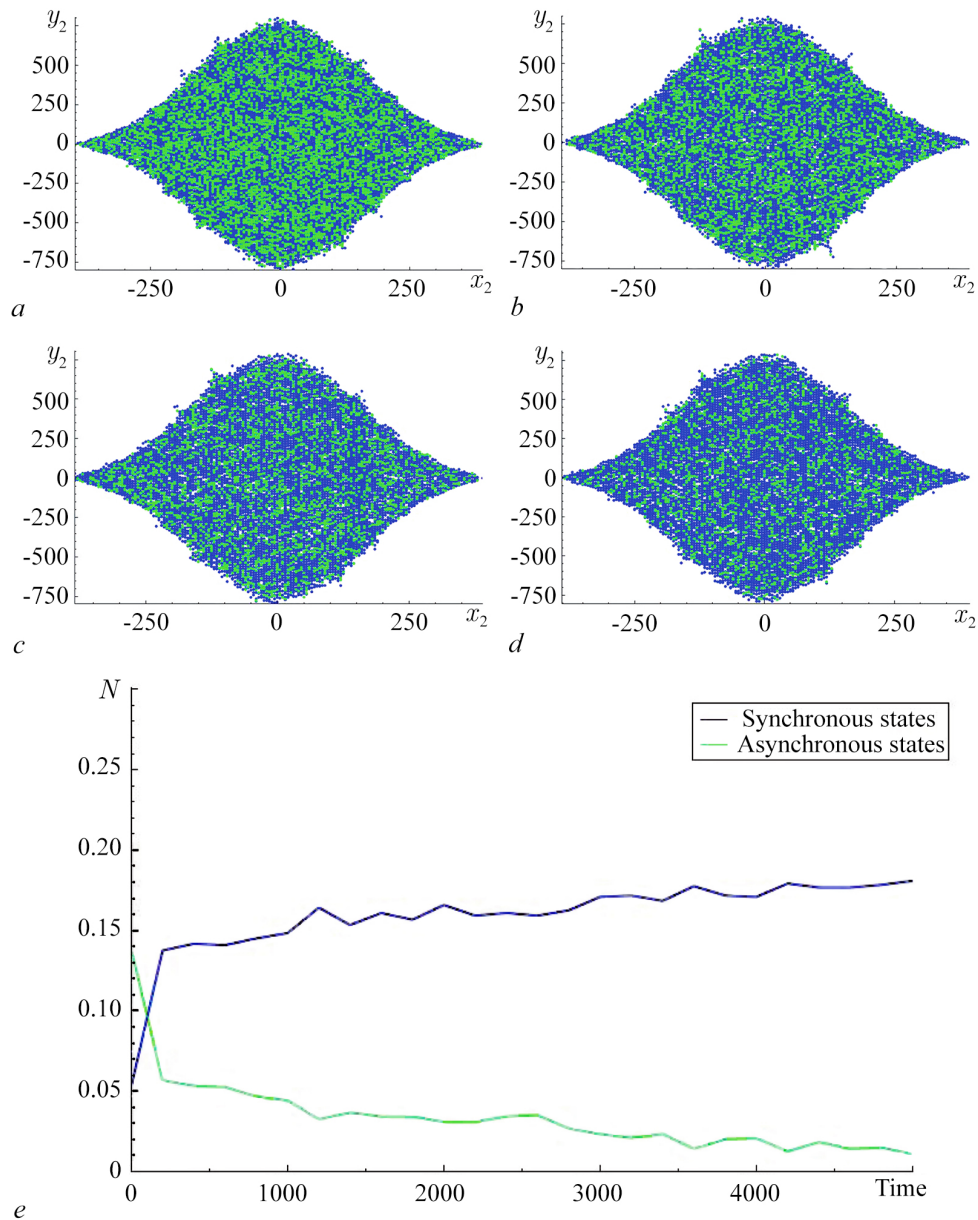


Рис. 1. $a-d$ – Бассейны притяжения синхронных и асинхронных состояний одной из систем Лоренца (1), находящихся в режиме перемежающейся синхронизации, индуцированной шумом, при значении интенсивности шума $\varepsilon = 5.75$ на плоскости начальных условий (x_2, y_2) ($z_2 = 1.1$), полученные в различные моменты времени: $t = 1000$ (a), 2000 (b), 3000 (c), 4000 (d). Синий цвет соответствует реализации в фиксированный момент времени идентичного поведения систем Лоренца, находящихся под действием общего источника шума, зеленый цвет относится к неидентичному (асинхронному) поведению этих систем. Белый цвет отвечает вылету изображающей точки на бесконечность. e – Временные зависимости нормированных размеров синхронных и асинхронных кластеров, полученные для тех же систем Лоренца при $\varepsilon = 5.75$ (цвет онлайн)

Fig. 1. $a-d$ – Basins of attraction of synchronous and asynchronous states of one Lorenz system from (1) being in the intermittent noise-induced synchronization regime for the value of noise intensity $\varepsilon = 5.75$ on the plane of initial conditions (x_2, y_2) ($z_2 = 1.1$) obtained in different moments of time: $t = 1000$ (a), 2000 (b), 3000 (c), 4000 (d). Blue color corresponds to the realization for a fixed moment of time the identical behavior in Lorenz systems being under influence of the common noise, green color refers to the nonidentical (asynchronous) behavior of such systems. White color corresponds to the going the representation point to infinity. e – Time dependences of the normalized sizes of the synchronous and asynchronous clusters obtained for the same Lorenz systems for $\varepsilon = 5.75$ (color online)

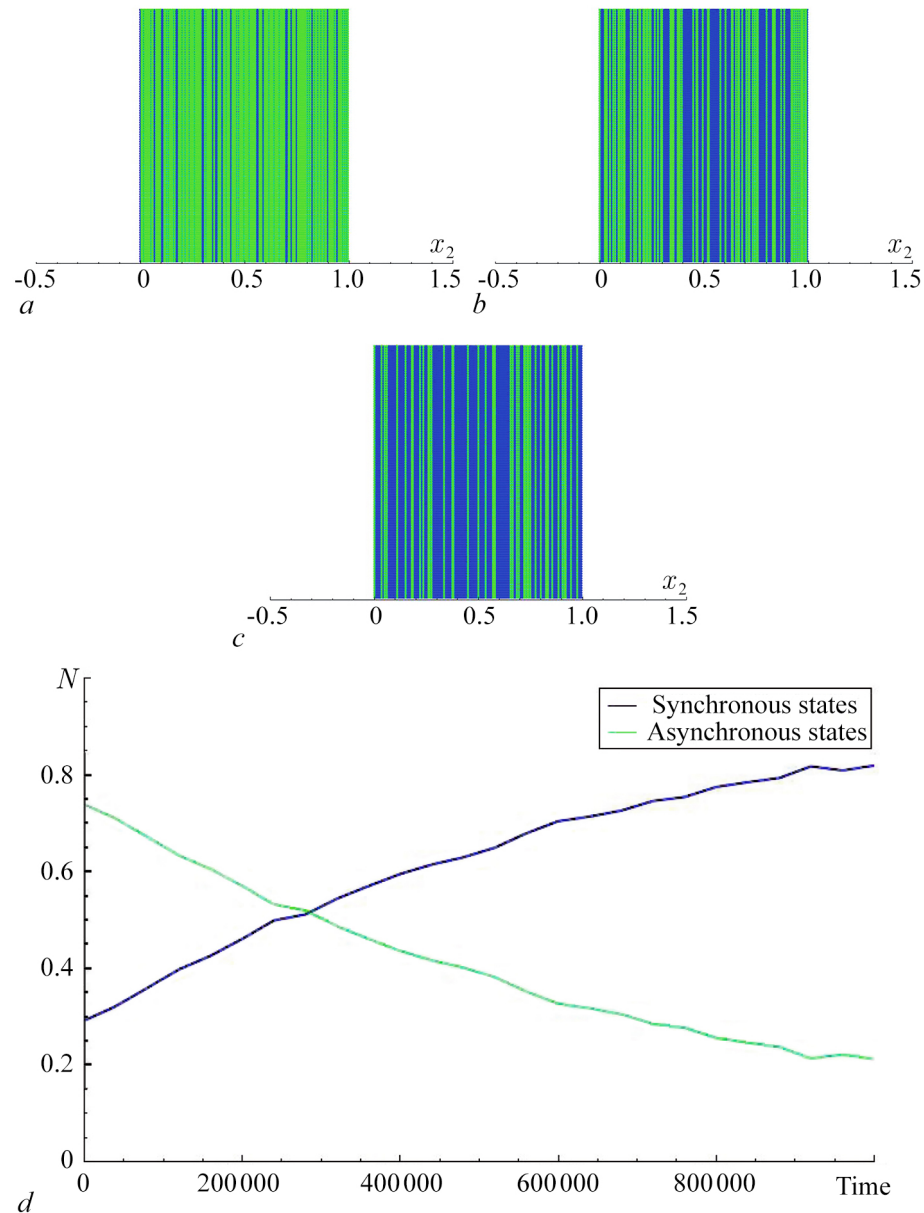


Рис. 2. *a-c* — Линейные бассейны притяжения синхронных и асинхронных состояний одного из логистических отображений (2), находящихся в режиме перемежающейся синхронизации, индуцированной шумом, при значении интенсивности шума $\varepsilon = 0.153$ на линии начальных условий x_2 , полученные в различные моменты времени: $t = 10000$ (*a*), 500000 (*b*), 1000000 (*c*). Синий цвет соответствует реализации в фиксированный момент времени идентичных состояний логистических отображений, находящихся под действием общего источника шума, зеленый цвет относится к неидентичному (асинхронному) поведению этих систем. Белый цвет отвечает вылету изображающей точки на бесконечность. *d* — Временные зависимости нормированных размеров синхронных и асинхронных кластеров, полученные для тех же логистических отображений при $\varepsilon = 0.153$ (цвет онлайн)

Fig. 2. *a-c* — Linear basins of attraction of synchronous and asynchronous states of one logistic map from (2) being in the intermittent noise-induced synchronization regime for the value of noise intensity $\varepsilon = 0.153$ on the line of initial conditions x_2 obtained in different moments of time: $t = 10000$ (*a*), 500000 (*b*), 1000000 (*c*). Blue color corresponds to the realization for a fixed moment of time the identical states in logistic maps being under influence of the common noise, green color refers to the nonidentical (asynchronous) behavior of such systems. White color corresponds to the going the representation point to infinity. *d* — Time dependences of the normalized sizes of the synchronous and asynchronous clusters obtained for the same logistic maps for $\varepsilon = 0.153$ (color online)

Для количественной характеристики степени мультистабильности по аналогии с работами [13, 14] необходимо перейти от рассмотрения двух систем к ансамблю идентичных по управляющим параметрам систем, стартующих с различных начальных условий, равномерно распределенных по аттракторам взаимодействующих систем, находящихся под действием общего шума. Такие ансамбли описываются системами (1) и (2) при $i = 1, 2 \dots N$, где N – число элементов ансамбля. Для диагностики синхронного режима в данном случае необходимо произвести сравнение состояний систем, находящихся под действием шума, по принципу «каждая с каждой», и для каждой пары взаимодействующих систем в каждый момент времени рассчитать разность их состояний по формуле

$$D = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad i \neq j, \quad (3)$$

после чего по формуле

$$P_a = 1 - \sum_{i=1}^N \frac{n}{N(N-1)} \quad (4)$$

(где n – число систем, находящихся в одинаковом состоянии с i -м осциллятором) оценить вероятность обнаружения асинхронного режима. В роли меры мультистабильности в данном случае будет выступать усредненная по времени вероятность обнаружения турбулентной фазы, рассчитанная в соответствии с формулой

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T P_a(t) dt \quad (5)$$

при изменении интенсивности шумового воздействия. Эта мера равна 0, когда все взаимодействующие системы в каждый момент времени находятся в синхронном режиме, и равна 1, когда в каждый момент времени все системы демонстрируют неидентичное поведение [13]. Если же $P \in (0, 1)$ при данном значении интенсивности шумового воздействия во взаимодействующих системах имеет место мультистабильность [13, 14].

На рис. 3, 4 представлены зависимости меры мультистабильности от интенсивности шумового воздействия, полученные для ансамблей из $N = 50$ систем Лоренца (1) и $N = 50$

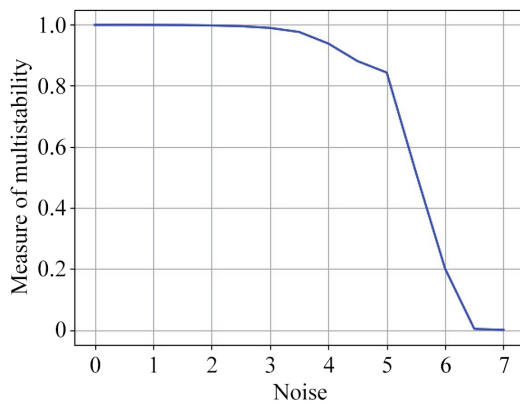


Рис. 3. Зависимость меры мультистабильности P от интенсивности шумового воздействия ε , полученная для ансамбля систем Лоренца (1), находящихся под действием общего источника шума

Fig. 3. Dependence of the multistability measure P on the noise intensity ε obtained for the ensemble of Lorenz systems (1) being under influence of the common noise source

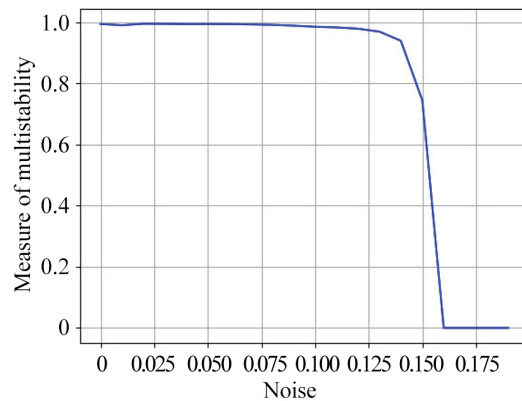


Рис. 4. Зависимость меры мультистабильности P от интенсивности шумового воздействия ε , полученная для ансамбля логистических отображений (2), находящихся под действием общего источника шума

Fig. 4. Dependence of the multistability measure P on the noise intensity ε obtained for the ensemble of logistic maps (2) being under influence of the common noise source

логистических отображений (2), находящихся под действием шума. Из рисунков видно, что по мере увеличения интенсивности шумового воздействия мера мультистабильности в обеих системах почти все время плавно уменьшается от 1 до 0*, что соответствует переходу от асинхронного состояния к режиму индуцированной шумом синхронизации. Важно отметить, что вблизи границы синхронного режима мера мультистабильности в обоих случаях оказывается положительной, что свидетельствует о наличии мультистабильности в режиме перемежающейся синхронизации, индуцированной шумом.

Таким образом, в настоящей работе на примере систем Лоренца и логистических отображений, находящихся под действием общего источника шума, показано, что для режима перемежающейся синхронизации, индуцированной шумом, так же, как и для режима перемежающейся обобщенной синхронизации, характерна мультистабильность. Полученные результаты подтверждены при помощи построения карт бассейнов притяжения синхронных и асинхронных режимов и путем расчета меры мультистабильности в зависимости от величины параметра связи. Важно отметить, что несмотря на то, что основные результаты работы получены на модельных системах, можно ожидать, что аналогичные закономерности будут наблюдаться и в реальных радиотехнических системах, что позволит использовать обнаруженный эффект для совершенствования способов скрытой передачи информации, в основе которых лежит явление хаотической синхронизации.

Список литературы

1. *Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J.* Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences. New York: Cambridge University Press, 2001. 432 p. DOI: 10.1017/CBO9780511755743.
2. *Anishchenko V.S., Astakhov V., Vadivasova T., Neiman A., Schimansky-Geier L.* Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems: Tutorial and Modern Developments. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 446 p. DOI: 10.1007/978-3-540-38168-6.
3. *Balanov A., Janson N., Postnov D., Sosnovtseva O.* Synchronization: From Simple to Complex. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 426 p. DOI: 10.1007/978-3-540-72128-4.
4. *Boccaletti S., Pisarchik A.N., del Genio C.I., Amann A.* Synchronization: From Coupled Systems to Complex Networks. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 264 p. DOI: 10.1017/9781107297111.
5. *Boccaletti S., Kurths J., Osipov G., Valladares D.L., Zhou C.S.* The synchronization of chaotic systems // *Physics Reports*. 2002. Vol. 366, no. 1–2. P. 1–101. DOI: 10.1016/S0370-1573(02)00137-0.
6. *Rosenblum M.G., Pikovsky A.S., Kurths J.* Synchronization approach to analysis of biological systems // *Fluctuation and Noise Letters*. 2004. Vol. 4, no. 1. P. L53–L62. DOI: 10.1142/S0219477504001653.
7. *Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е.* О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179, № 12. С. 1281–1310. DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912c.1281.
8. *Zhang F., Chen G., Li C., Kurths J.* Chaos synchronization in fractional differential systems // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2013. Vol. 371, no. 1990. P. 20120155. DOI: 10.1098/rsta.2012.0155.
9. *Стрелкова Г. И., Анищенко В. С.* Пространственно-временные структуры в ансамблях связанных хаотических систем // *Успехи физических наук*. 2020. Т. 190, № 2. С. 160–178. DOI: 10.3367/UFNr.2019.01.038518.
10. *Toral R., Mirasso C.R., Hernández-García E., Piro O.* Analytical and numerical studies of noise-induced synchronization of chaotic systems // *Chaos*. 2001. Vol. 11, no. 3. P. 665–673. DOI: 10.1063/1.1386397.

*Исключение составляет малая область вблизи $\varepsilon = 0.01$ на рис. 4, где происходит изменение динамики системы.

11. Wang Y, Lai Y.-C., Zheng Z. Route to noise-induced synchronization in an ensemble of uncoupled chaotic systems // *Phys. Rev. E*. 2010. Vol. 81, no. 3. P. 036201. DOI: 10.1103/PhysRevE.81.036201.
12. Москаленко О. И., Короновский А. А., Шурыгина С. А. Перемежающееся поведение на границе индуцированной шумом синхронизации // *ЖТФ*. 2011. Т. 81, № 9. С. 150–153.
13. Moskalenko O. I., Koronovskii A. A., Selskii A. O., Evstifeev E. V. On multistability near the boundary of generalized synchronization in unidirectionally coupled chaotic systems // *Chaos*. 2021. Vol. 31, no. 8. P. 083106. DOI: 10.1063/5.0055302.
14. Москаленко О. И., Евстифеев Е. В. О существовании мультистабильности вблизи границы обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных системах со сложной топологией аттрактора // *Известия вузов. ПНД*. 2022. Т. 30, № 6. С. 676–684. DOI: 10.18500/0869-6632-003013.
15. Hramov A. E., Koronovskii A. A., Moskalenko O. I. Are generalized synchronization and noise-induced synchronization identical types of synchronous behavior of chaotic oscillators? // *Phys. Lett. A*. 2006. Vol. 354, no. 5–6. P. 423–427. DOI: 10.1016/j.physleta.2006.01.079.

References

1. Pikovsky A, Rosenblum M, Kurths J. *Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences*. New York: Cambridge University Press; 2001. 432 p. DOI: 10.1017/CBO9780511755743.
2. Anishchenko VS, Astakhov V, Vadivasova T, Neiman A, Schimansky-Geier L. *Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems: Tutorial and Modern Developments*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2007. 446 p. DOI: 10.1007/978-3-540-38168-6.
3. Balanov A, Janson N, Postnov D, Sosnovtseva O. *Synchronization: From Simple to Complex*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2009. 426 p. DOI: 10.1007/978-3-540-72128-4.
4. Boccaletti S, Pisarchik AN, del Genio CI, Amann A. *Synchronization: From Coupled Systems to Complex Networks*. Cambridge: Cambridge University Press; 2018. 264 p. DOI: 10.1017/9781107297111.
5. Boccaletti S, Kurths J, Osipov G, Valladares DL, Zhou CS. The synchronization of chaotic systems. *Physics Reports*. 2002;366(1–2):1–101. DOI: 10.1016/S0370-1573(02)00137-0.
6. Rosenblum MG, Pikovsky AS, Kurths J. Synchronization approach to analysis of biological systems. *Fluctuation and Noise Letters*. 2004;4(1):L53–L62. DOI: 10.1142/S0219477504001653.
7. Koronovskii AA, Moskalenko OI, Hramov AE. On the use of chaotic synchronization for secure communication. *Physics-Uspekhi*. 2009;52(12):1213–1238. DOI: 10.3367/UFNe.0179.200912c.1281.
8. Zhang F, Chen G, Li C, Kurths J. Chaos synchronization in fractional differential systems. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2013;371(1990):20120155. DOI: 10.1098/rsta.2012.0155.
9. Strelkova GI, Anishchenko VS. Spatio-temporal structures in ensembles of coupled chaotic systems. *Physics-Uspekhi*. 2020;63(2):145–161. DOI: 10.3367/UFNe.2019.01.038518.
10. Toral R, Mirasso CR, Hernández-García E, Piro O. Analytical and numerical studies of noise-induced synchronization of chaotic systems. *Chaos*. 2001;11(3):665–673. DOI: 10.1063/1.1386397.
11. Wang Y, Lai YC, Zheng Z. Route to noise-induced synchronization in an ensemble of uncoupled chaotic systems. *Phys. Rev. E*. 2010;81(3):036201. DOI: 10.1103/PhysRevE.81.036201.
12. Moskalenko OI, Koronovskii AA, Shurygina SA. Intermittent behavior at the boundary of noise-induced synchronization. *Tech. Phys.* 2011;56(9):1396–1372. DOI: 10.1134/S1063784211090143.
13. Moskalenko OI, Koronovskii AA, Selskii AO, Evstifeev EV. On multistability near the boundary of generalized synchronization in unidirectionally coupled chaotic systems. *Chaos*. 2021;31(8):083106. DOI: 10.1063/5.0055302.
14. Moskalenko OI, Evstifeev EV. On existence of multistability near the boundary of generalized

synchronization in unidirectionally coupled systems with complex topology of attractor. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2022;30(6):676–684. DOI: 10.18500/0869-6632-003013.

15. Hramov AE, Koronovskii AA, Moskalenko OI. Are generalized synchronization and noise-induced synchronization identical types of synchronous behavior of chaotic oscillators? *Phys. Lett. A*. 2006;354(5–6):423–427. DOI: 10.1016/j.physleta.2006.01.079.



Илларионова Екатерина Дмитриевна — окончила с отличием бакалавриат Института физики СГУ (2022). В настоящее время является магистрантом второго года обучения. Научные интересы — изучение хаотической синхронизации и явлений, происходящих на ее границе, в нелинейных системах; перемежающееся поведение; влияние шума на установление синхронных режимов.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: k3524114@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-1912-863X

Москаленко Ольга Игоревна — родилась в Саратове (1984). Окончила факультет нелинейных процессов СГУ (2006). Кандидат физико-математических наук (2008), доктор физико-математических наук (2017), доцент (2012). Профессор кафедры физики открытых систем СГУ, начальник управления научной деятельности СГУ. Область научных интересов — исследование классической и хаотической синхронизации и явлений, имеющих место на ее границе, в нелинейных системах; применение непрерывного вейвлет- и фурье-анализа к проблеме хаотической синхронизации в системах с малым числом степеней свободы и пространственно-распределенных средах; изучение обобщенной синхронизации в системах с однонаправленной и взаимной связью и ее возможных приложений; влияние шума на установление синхронных режимов и характеристики перемежаемости; применение хаотической синхронизации для скрытой передачи информации; анализ хаотической синхронизации в сложных сетях; разработка методов анализа поведения систем по временным рядам и их применение к живым системам. Автор около 200 статей в центральных реферируемых отечественных и зарубежных журналах, нескольких монографий и патентов на изобретения и полезные модели.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: o.i.moskalenko@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5727-5169
AuthorID (eLibrary.Ru): 150252

