

УДК 530.182, 621.373.826
DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1121-1126

ИНДУЦИРОВАННАЯ ШУМОМ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬ В ЛЕГИРОВАННОМ ЭРБИЕМ ОПТОВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ: ТЕОРИЯ И ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

© М.О. Журавлев^{1,2)}, А.А. Короновский¹⁾, О.И. Москаленко¹⁾, Д.В. Лопатин³⁾

¹⁾ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
410012, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

²⁾ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
410056, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

³⁾ Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33
E-mail: zhuravlevmo@gmail.com

Предложена теория перемежаемости в бистабильных динамических системах, находящихся под внешним шумовым воздействием. Получены теоретические закономерности, описывающие данный тип перемежаемости, а именно распределение длительности пребывания исследуемой системы вблизи устойчивого положения равновесия. Предложенная теория была применена к модельной бистабильной системе и легированному эрбием оптоволоконному лазеру, получено хорошее соответствие теории и численных результатов.

Ключевые слова: перемежаемость; мультистабильность; шум; колебательный режим; легированной эрбием оптоволоконный лазер

ВВЕДЕНИЕ

Многие процессы в природе и физике носят перемежающийся характер, когда во временной реализации исследуемой системы (при фиксированных значениях управляющих параметров) последовательно чередуются два различных динамических режима (периодические колебания внезапно сменяются хаотическими, на смену которым вновь приходит периодическая динамика; стационарное состояние прерывается колебательным движением, после чего система вновь приходит к стационарному состоянию, и т. п.) [1]. Проявления перемежающегося поведения весьма разнообразны и охватывают очень широкий круг систем, что позволяет говорить об универсальности данного явления и его фундаментальном характере [2].

Перемежаемость является одним из классических сценариев перехода от периодических колебаний к хаотическим [2]. При этом сигнал представляет собой чередующуюся последовательность регулярных (ламинарных) фаз и хаотических всплесков (турбулентных фаз). При увеличении управляющего параметра турбулентные всплески становятся все более частыми до тех пор, пока движение полностью не хаотизируется. В зависимости от характера потери устойчивости периодическим режимом (определяемого мультипликаторами предельного цикла) различают перемежаемость типов I–III [1–2].

Схожая ситуация имеет место вблизи границ различных режимов хаотической синхронизации (при этом под ламинарной фазой понимается фаза синхронного поведения, под турбулентной – фаза асинхронного поведения), в связи с чем выделяют перемежаю-

щуюся фазовую синхронизацию [3], перемежающуюся обобщенную синхронизацию [4], перемежающуюся синхронизацию с запаздыванием [5] и перемежающуюся синхронизацию, индуцированную шумом [6]. Иными словами, перемежающееся поведение предшествует установлению практически всех известных типов хаотической синхронизации, однако типы перемежаемостей, наблюдающиеся вблизи границ разных типов хаотических синхронных режимов, в общем случае являются также различными. В частности, известно, что на границах полной синхронизации, синхронизации с запаздыванием, обобщенной синхронизации и синхронизации, индуцированной шумом, наблюдается перемежаемость типа «on-off» [5; 7], на границе фазовой синхронизации в зависимости от величины расстройки управляющих параметров имеет место либо перемежаемость «игольного ушка» [8], либо перемежаемость «кольца» [9]. Тот же тип перемежаемости наблюдается также в режиме синхронизации временных масштабов на граничных временных масштабах наблюдения [10]. Также установлено, что возможно одновременное существование двух различных типов перемежаемости вблизи границы фазовой хаотической синхронизации. Если поведение системы рассматривается на граничных временных масштабах наблюдения (с использованием концепции синхронизации временных масштабов), то вблизи границы фазовой синхронизации в системе можно детектировать перемежаемость «игольного ушка» и перемежаемость «кольца» одновременно [11–13].

Необходимо отметить, что всем вышеописанным типам перемежающегося поведения в настоящий момент посвящено большое количество работ [1–11], в

которых подробно разобраны механизмы, приводящие к тому или иному типу перемежающегося поведения. Тем не менее, в рамках исследования явления перемежаемости остается ряд вопросов, которые до настоящего момента являются плохо изученными. Одним из таких направлений исследований является изучение перемежаемости, индуцированной шумом, в мультистабильных системах. Исследование данного типа перемежающегося поведения находит отражение во многих современных научных работах. В частности, в ряде работ показано, что перемежаемость, индуцированная шумом, может возникать в системах различной природы (в полупроводниковых лазерах [14], в легированном эрбием оптоволоконном лазере [15–16], мерцании квантовых точек [17], в сердечных тканях [18], в переходе Джозефсона [19]). Тем не менее, несмотря на значительный интерес со стороны исследователей к изучению мультистабильности и перемежаемости, в настоящий момент времени остается нерешенным вопрос, связанный с детальным пониманием процессов, происходящих в мультистабильных системах при воздействии на них шумов, и теоретическим описанием возникающего при этом перемежающегося поведения. В частности, в настоящий момент времени не существует общей теоретической модели, описывающей данный тип поведения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена разработке общей теоретической модели, описывающей индуцированное шумом перемежающееся поведение в мультистабильных системах. В рамках данной работы предложенная теоретическая модель прошла апробацию на примере двух модельных систем, демонстрирующих индуцированную шумом перемежаемость. Первой модельной системой является бистабильная система, находящаяся под внешним шумовым воздействием, которую в обобщенном виде можно записать следующим образом:

$$\dot{x} + \frac{dU(x)}{dx} + D\xi(t) = 0, \quad (1)$$

при этом потенциальная функция была задана следующей:

$$U(x) = \frac{x^4}{4} - \frac{x^2}{2} + bx, \quad (2)$$

где $\xi(t)$ – δ -коррелированный Гауссов шум с нулевым средним; D – интенсивность шумового воздействия. Данная потенциальная функция имеет два локальных минимума, при этом b – параметр симметрии [20].

Дифференциальное уравнение (1) со стохастическим слагаемым $\xi(t)$ приводит к стохастическому дифференциальному уравнению:

$$dX = \frac{dU(x)}{dx} dt + dW, \quad (3)$$

($X(t)$ – стохастический процесс; $W(t)$ – одномерный виннеровский процесс), которое эквивалентно уравнению Фоккера–Планка:

$$\frac{\partial \rho_X(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{dU(x)}{dx} \rho_X(x,t) \right] + \frac{D}{2} \frac{\partial^2 \rho_X(x,t)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где $\rho(x,t)$ – плотность вероятности стохастического процесса $X(t)$.

Так как в режиме перемежаемости исследуемая модельная бистабильная система долгое время находится вблизи одного локального минимума, можно предположить, что решение уравнения (4) должно быть найдено в виде метастабильного распределения медленно затухающего, в течение длительного периода времени, т. е.

$$\rho(x,t) = A(t)r(x), \quad (5)$$

где $r(x)$ – стационарная плотность вероятности, полученная из решения уравнения (4) для стационарного случая; $A(t)$ – медленно убывающий с увеличением времени коэффициент. Таким образом, соотношение для распределения времени пребывания модельной бистабильной системы вблизи устойчивых положений равновесия можно записать в следующем виде:

$$\rho_{1,2}(t) = \frac{1}{T_{1,2}} \exp\left(-\frac{t}{T_{1,2}}\right). \quad (6)$$

При этом

$$T_{1,2} = \frac{P_{1,2}}{kr(x^*)}, \quad (7)$$

где x^* – граничная точка, расположенная на равных расстояниях от локальных минимумов $U(x)$; $P_{1,2}$ – вероятности пребывания исследуемой бистабильной системы в окрестности первого или второго локального минимума; k – коэффициент нормировки.

Другими словами, в режиме индуцированной шумом перемежаемости распределения времени пребывания исследуемой системы вблизи устойчивого положения должны подчиняться экспоненциальному закону (6).

Для подтверждения результатов теоретического исследования индуцированной шумом перемежаемости в мультистабильных системах было проанализировано численное поведение двух разных систем, способных продемонстрировать данный тип поведения. В качестве первого примера была рассмотрена модельная бистабильная система (1) с той же потенциальной функцией (2), при этом интенсивность шумового воздействия $D = 0,1$. На рис. 1 показаны статистические распределения времен пребывания исследуемой системы, соответствующие двум сосуществующим устойчивым положениям в симметричном случае ($b = 0$). Рис. 1а соответствует первому сосуществующему режиму (первый локальный минимум потенциальной функции), рис. 1б относится ко второму режиму. Результаты численного моделирования представлены точками для обоих сосуществующих режимов, их теоретические аппроксимации по закону (6) показаны сплошными линиями. Хорошо видно, что результаты численного моделирования и теоретические закономерности хорошо соотносятся друг с другом, что свидетельствует о справедливости

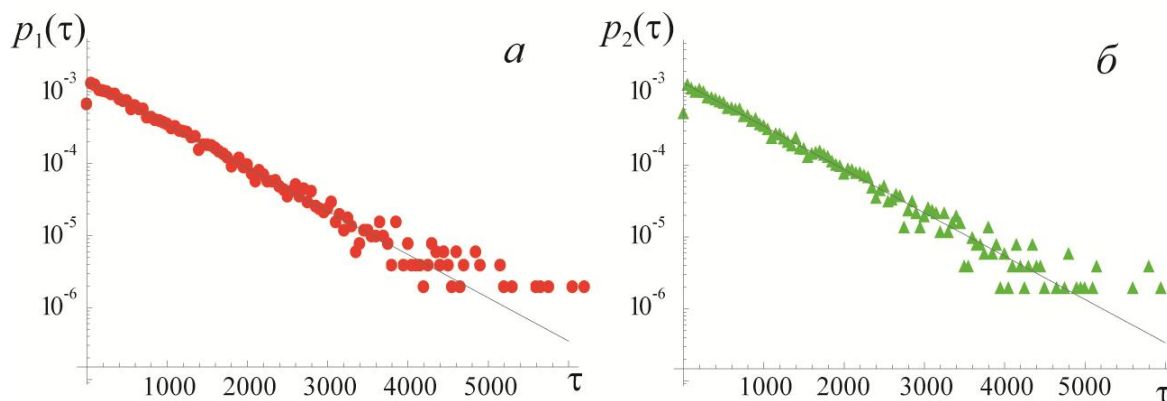


Рис. 1. Распределение времени пребывания модельной бистабильной системы (1) вблизи устойчивых положений при $b = 0$. Результаты численных расчетов представлены точками. Теоретическая закономерность (6) показана сплошной линией. Параметры аппроксимаций: (а) $T_1 = 722$; (б) $T_2 = 721$

предложенной теории индуцированной шумом перемежаемости.

В качестве второй системы для исследований в рамках данной работы был выбран легированный эрбием оптоволоконный лазер с модулируемым параметром [21]. В ряде недавних работ [16; 22–23] показано, что данная динамическая система является мультистабильной, причем при внешнем шумовом воздействии на нее она демонстрирует индуцированное шумом перемежающееся поведение, которое проявляется в том, что происходит попеременная смена одного колебательного режима другим. Данная динамическая система описывается следующими уравнениями

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2L}{T_r} x \{ r_w \alpha_0 [N(\xi_1 - \xi_2) - 1] - \alpha_{th} \} + P_{sp}, \quad (8)$$

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{\sigma_{12} r_w x}{\pi r_0^2} (y \xi_1 - 1) - \frac{x}{\tau} + P_{pump},$$

где x – это интенсивность излучения лазера; y – это среднее значение верхнего уровня лазерной генерации; L – длина активного волокна в лазере; ξ_1 и ξ_2 представляют собой параметры, определяемые соотношением между основным состояниями: поглощением σ_{12} , вынужденным переходом σ_{21} и возбужденным состоянием поглощения σ_{23} ; T_r – время внутрирезонаторного кругового обхода фотона; α_0 – коэффициент поглощения слабого сигнала эрбиевого волокна на длине волны лазера; α_{th} – коэффициент внутрирезонаторных потерь на границе; τ – время жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии; r_0 – радиус сердцевины волокна; w_0 – радиус основной моды волокна; r_w – коэффициент, указывающий на совпадение между основной модой лазера и активного волокна, легированного эрбием. Слагаемое P_{sp} отвечает за спонтанное излучение основной моды лазера, а P_{pump} – за мощность накачки в лазере и выражается как

$$P_{pump} = P_p \frac{1 - \exp[-\alpha_0 \beta L(1 - y)]}{N_0 \pi r_0^2 L}, \quad (9)$$

где P_p – это мощность накачки на входе волокна, а β – безразмерный коэффициент. Параметры для моделирования были выбраны следующими: $L = 0,88$ м, $Tr = 8,7$ нс, $r_w = 0,308$, $\alpha_0 = 40$ м⁻¹, $\xi_1 = 2$, $\xi_2 = 0,4$, $\alpha_{th} = 3,92 \cdot 10^{-2}$, $\sigma_{12} = 2,3 \cdot 10^{-17}$ м², $r_0 = 2,7 \cdot 10^{-6}$ м, $\tau = 10^{-2}$ с, $\lambda_g = 1,65 \cdot 10^{-6}$ м, $w_0 = 3,5 \cdot 10^{-6}$ м и $\beta = 0,5$, что связано с тем, что при таком выборе параметров данные численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

Мощность накачки на входе волокна модулируется гармоническим сигналом

$$P_p = p[1 - m_d \sin(2\pi f_d t)], \quad (10)$$

где p – это мощность накачки; m_d – амплитуда колебаний; f_d – собственная частота колебаний лазера ($f_d = 80$ кГц в рамках настоящей работы), при этом в данной системе возможно сосуществование до четырех периодических орбит A_i ($i = 1, 3, 4, 5$) с частотой субгармоник $f_i = f_d/i$: период колебаний один ($f_1 = f_d = 80$ кГц), период колебаний три $f_3 \approx 27$ кГц), период колебаний четыре ($f_4 = 20$ кГц) и период колебаний пять ($f_5 = 16$ кГц). Если же в мощности накачки будет присутствовать слагаемое с шумом, то получим следующее соотношение

$$P_p = p[1 - m_d \sin(2\pi f_d t) + \eta G(\zeta, f_n)], \quad (11)$$

где η – амплитуда шума, а $G(\zeta, f_n)$ – функция с ненулевым средним, характеризующая шум, причем ζ меняется в пределах $[-1, 1]$. В результате влияния шума фазовая траектория будет периодически посещать различные бассейны притяжения устойчивых аттракторов, то есть будет происходить смена одного колебательного режима другим. Таким образом, исследуемая система перейдет из мультистабильного состояния в метастабильное, и в этом случае можно будет детектировать перемежающееся поведение, индуцированное шумом. При этом влиять на количество сосуществующих устойчивых состояний и наиболее вероятное из них будут параметры стохастической модуляции f_n и η . Если амплитуда шума η достаточно мала, то система (8) будет попеременно посещать бассейны притяжения двух

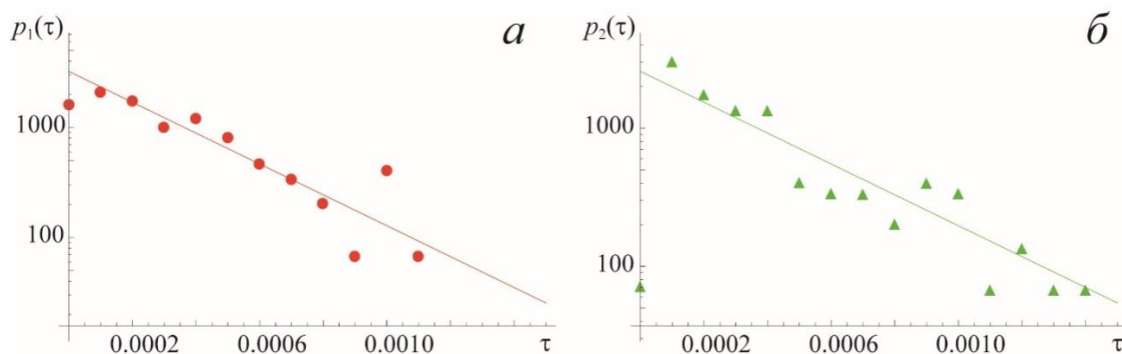


Рис. 2. Распределение времени пребывания вблизи устойчивых аттракторов ($a - A_1$, $b - A_3$) в легированном эрбиевом оптоволоконном лазере (8) для амплитуды шума $\eta = 0,11$ (точки) и их аналитические аппроксимации по закону (6) (сплошные линии). Параметры аппроксимаций: (а) $T_1 = 3,1 \cdot 10^{-4}$; (б) $T_2 = 3,9 \cdot 10^{-4}$

различных устойчивых аттракторов, что позволяет применить теорию, предложенную ранее, к исследуемой системе. На рис. 2 представлены распределения времени пребывания исследуемой системы (8) вблизи устойчивых аттракторов, соответствующих режимам A_1 и A_3 , для значения амплитуды шума $\eta = 0,11$, и представлены их теоретические аппроксимации по закону (6). Из рис. 2 видно, что теоретические закономерности и численные результаты хорошо соотносятся друг с другом. Таким образом, можно сделать вывод, что при малом значении амплитуды шума распределения времени пребывания вблизи устойчивого положения, соответствующие случаю, когда в легированном эрбиевом волоконном лазере сосуществуют два режима колебаний, подчиняются экспоненциальному закону.

В настоящей работе предложена теория индуцированной шумом перемежаемости в мультистабильных динамических системах. Показано, что распределения времени пребывания для каждого сосуществующего устойчивого режима подчиняются экспоненциальному закону. Основные результаты были проиллюстрированы на примере модельной бистабильной системы и легированного эрбием оптоволоконного лазера с модулируемым параметром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Schuster H.G. Deterministic Chaos. Weinheim, 1988.
- Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991.
- Rosenblum M.G., Pikovsky A.S. and Kurths Jürgen. From phase to lag synchronization in coupled chaotic oscillators // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. № 22. P. 4193-4196.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A. Intermittent generalized synchronization in unidirectionally coupled chaotic oscillators // Europhysics Lett. 2005. V. 70. № 2. P. 169-175.
- Boccaletti S., Valladares D. L. Characterization of intermittent lag synchronization // Phys. Rev. E. 2000. V. 62. № 5. P. 7497-7500.
- Москаленко О.И., Короновский А.А., Шурыгина С.А. Поведение нелинейных систем на границе синхронизации, индуцированной шумом // Нелинейная динамика. 2000. Т. 7. № 2. С. 197-208.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K. Intermittent behavior near the synchronization threshold in system with fluctuating control parameter // Europhysics Letters. 2014. V. 105. P. 50003.
- Pikovsky A.S., Osipov G.V., Rosenblum M.G., Zaks M. and Kurths Jürgen. Attractor-repeller collision and eyelet intermittency at the transition to phase synchronization // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. № 1. P. 47-50.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Boccaletti S. Ring Intermittency in Coupled Chaotic Oscillators at the Boundary of Phase Synchronization // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 114101.
- Zhuravlev M.O., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Ovchinnikov A.A., Hramov A.E. Ring intermittency near the boundary of the synchronous time scales of chaotic oscillators // Phys. Rev. E. 2011. V. 83. P. 027201.
- Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Zhuravlev M.O., Levin Ju.I. Cooperation of deterministic and stochastic mechanisms resulting in the intermittent behavior // Chaos, Solitons & Fractals. 2014. V. 68. P. 58-64.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Zhuravlev M.O., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. Intermittency of intermittencies // CHAOS. 2013. V. 23. № 3. P. 033129.
- Hramov A.E., Kurovskaya M.K., Rumnova A.E., Zhuravlev M.O., Grubov V.V., Koronovskii A.A., Pavlov A.N., Pisarchik A.N. Intermittent behavior in the brain neuronal network in the perception of ambiguous images // Proc. SPIE. 2017. V. 10063. P. 1006314.
- Pedaci F., Giudici M., Tredicce J.R., Giacomelli G. Stochastic resonance in bulk semiconductor lasers // Phys. Rev. E. 2005. V. 71. P. 36125.
- Pisarchik A.N., Jaimes-Reategui R., Sevilla-Escoboza R. and Huerta-Cuellar Guillermo. Multistate intermittency and extreme pulses in a fiber laser // Phys. Rev. E. 2012. V. 86. P. 056219.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Zhuravlev M.O., Pisarchik A.N., Jaimes-Reategui R. Separation of coexisting dynamical regimes in multistate intermittency based on wavelet spectrum energies in an erbium-doped fiber laser // Phys. Rev. E. 2016. V. 93. P. 052218.
- Kuno M., Fromm D.P., Hamann H.F., Gallagher A., Nesbitt D.J. Nonexponential "blinking" kinetics of single CdSe quantum dots: A universal power law behavior // J. Chem. Phys. 2000. V. 112. P. 3117-3120.
- Chialvo D.R., Jalife J. On the Non-linear Equilibrium of the Heart: Looking Behavior and Chaos in Purkinje Fibers // Cardiac Electrophysiology: From Cell to Bedside (Saunders). 1990. C. 24. P. 201-214.
- Siddiqi I., Vijay R., Pierre F., Wilson C.M., Frunzio L., Metcalfe M., Rigetti C., Schoelkopf R.J., Devoret M.H., Vion D. and Esteve D. Direct Observation of Dynamical Bifurcation between Two Driven Oscillation States of a Josephson Junction // Phys. Rev. Lett., 2005. V. 94. P. 027005.
- Rumnova A.E., Hramov A.E., Grubov V.V., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Pisarchik A.N. Theoretical background and experimental measurements of human brain noise intensity in perception of ambiguous images // Chaos, Solitons & Fractals. 2016. V. 93. P. 201-206.
- Pisarchik A.N., Kiryanov A., Barmenkov Y., Jaimes-Reategui R. Dynamics of an erbium-doped fiber laser with pump modulation: theory and experiment // J. Opt. Soc. Am. B. 2005. V. 22. № 10. P. 2107-2114.
- Pisarchik A.N., Jaimes-Reategui R., Sevilla-Escoboza R., Huerta-Cuellar G., Taki M. Rogue Waves in a Multistable System // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 274101.
- Campos-Mejía A., Pisarchik A.N. and Arroyo-Almanza D.A. Noise-induced on-off intermittency in mutually coupled semiconductor lasers // Chaos, Solitons and Fractals. 2013. V. 54. P. 96.

БЛАГОДАРНОСТИ:

1. Авторы благодарны А.Н. Писарчик и Р. Джаймс-Райтер за предоставленные данные легированного эрбием оптоволоконного лазера.

2. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-32-60078).

Поступила в редакцию 28 августа 2017 г.

Журавлев Максим Олегович, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем, старший научный сотрудник; Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Российская Федерация, доцент кафедры геоэкологии и инженерной геологии, e-mail: zhuravlevmo@gmail.com

Короновский Алексей Александрович, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой физики открытых систем, проректор по научно-исследовательской работе, e-mail: alexey.koronovskii@gmail.com

Москаленко Ольга Игоревна, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики открытых систем, начальник Управления научной деятельности, e-mail: o.i.moskalenko@gmail.com

Лопатин Дмитрий Валерьевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, директор Центра компьютерной безопасности, e-mail: +79107540080@ya.ru

UDC 530.182, 621.373.826

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1121-1126

NOISE-INDUCED INTERMITTENCY IN ERBIUM-DOPED FIBER LASER: THEORY AND NUMERICAL EXPERIMENT

© M.O. Zhuravlev^{1,2)}, A.A. Koronovskii¹⁾, O.I. Moskalenko¹⁾, D.V. Lopatin³⁾

¹⁾ Saratov Chernyshevsky State University

83 Astrakhanskaya St., Saratov, Russian Federation, 410012

²⁾ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

77 Politekhnicheskaya St., Saratov, Russian Federation, 410054

³⁾ Tambov State University named after G.R. Derzhavin

33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392000

E-mail: zhuravlevmo@gmail.com

Theory of intermittency taking place in bistable dynamical systems subjected to additional noise influence is proposed. The main characteristic of intermittency namely the residence time distribution for both coexisting regimes is obtained analytically and numerically. The proposed theory is applied to bistable energy model and erbium-doped fiber laser with two coexisting periodic orbits.

Keywords: intermittency; multistability; noise; oscillation regimes; erbium-doped optical fiber laser

REFERENCES

- Schuster H.G. *Deterministic Chaos*. Weinheim, 1988.
- Berzhe P., Pomo I., Vidal K. *Poryadok v khaose [Order in Chaos]*. Moscow, Mir Publ., 1988. (In Russian).
- Rosenblum M.G., Pikovsky A.S. and Kurths Jürgen. From phase to lag synchronization in coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, vol. 78, no. 22, pp. 4193-4196.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A. Intermittent generalized synchronization in unidirectionally coupled chaotic oscillators. *Europhysics Lett.*, 2005, vol. 70, no. 2, pp. 169-175.
- Boccaletti S., Valladares D. L. Characterization of intermittent lag synchronization. *Phys. Rev. E.*, 2000, vol. 62, no. 5, pp. 7497-7500.
- Moskalenko O.I., Koronovskiy A.A., Shurygina S.A. Povedenie nelineynykh sistem na granitse sinkhronizatsii, indutsirovannoy shumom [The behavior of nonlinear systems near the boundary of noise-induced synchronization]. *Nelineynaya dinamika – Nonlinear Dynamics*, 2011, vol. 7, no. 2, pp. 197-208. (In Russian).
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K. Intermittent behavior near the synchronization threshold in system with fluctuating control parameter. *Europhysics Letters*, 2014, vol. 105, p. 50003.
- Pikovsky A.S., Osipov G.V., Rosenblum M.G., Zaks M. and Kurths Jürgen. Attractor-repeller collision and eyelet intermittency at the transition to phase synchronization. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, vol. 79, no. 1, pp. 47-50.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Boccaletti S. Ring Intermittency in Coupled Chaotic Oscillators at the Boundary of Phase Synchronization. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 97, p. 114101.
- Zhuravlev M.O., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Ovchinnikov A.A., Hramov A.E. Ring intermittency near the boundary of the synchronous time scales of chaotic oscillators. *Phys. Rev. E.*, 2011, vol. 83, p. 027201.
- Moskalenko O.I., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Zhuravlev M.O., Levin Ju.I. Cooperation of deterministic and stochastic mechanisms resulting in the intermittent behavior. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2014, vol. 68, pp. 58-64.
- Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Zhuravlev M.O., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. Intermittency of intermittencies. *CHAOS*, 2013, vol. 23, no. 3, p. 033129.

13. Hramov A.E., Kurovskaya M.K., Runnova A.E., Zhuravlev M.O., Grubov V.V., Koronovskii A.A., Pavlov A.N., Pisarchik A.N. Intermittent behavior in the brain neuronal network in the perception of ambiguous images. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10063, p. 1006314.
14. Pedaci F., Giudici M., Tredicce J.R., Giacomelli G. Stochastic resonance in bulk semiconductor lasers. *Phys. Rev. E.*, 2005, vol. 71, p. 36125.
15. Pisarchik A.N., Jaimes-Reategui R., Sevilla-Escoboza R. and Huerta-Cuellar Guillermo. Multistate intermittency and extreme pulses in a fiber laser. *Phys. Rev. E.*, 2012, vol. 86, p. 056219.
16. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Zhuravlev M.O., Pisarchik A.N., Jaimes-Reategui R. Separation of coexisting dynamical regimes in multistate intermittency based on wavelet spectrum energies in an erbium-doped fiber laser. *Phys. Rev. E.*, 2016, vol. 93, p. 052218.
17. Kuno M., Fromm D.P., Hamann H.F., Gallagher A., Nesbitt D.J. Nonexponential “blinking” kinetics of single CdSe quantum dots: A universal power law behavior. *J. Chem. Phys.*, 2000, vol. 112, p. 3117-3120.
18. Chialvo D.R., Jalife J. On the Non-linear Equilibrium of the Heart: Looking Behavior and Chaos in Purkinje Fibers. *Cardiac Electrophysiology: From Cell to Bedside (Saunders)*, 1990, pp. 201-214.
19. Siddiqi I., Vijay R., Pierre F., Wilson C.M., Frunzio L., Metcalfe M., Rigett C., Schoelkopf R.J., Devoret M.H., Vion D. and Esteve D. Direct observation of dynamical bifurcation between two driven oscillation states of a josephson junction. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, vol. 94, p. 027005.
20. Runnova A.E., Hramov A.E., Grubov V.V., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Pisarchik A.N. Theoretical background and experimental measurements of human brain noise intensity in perception of ambiguous images. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2016, vol. 93, pp. 201-206.
21. Pisarchik A.N., Kiryanov A., Barmenkov Y., Jaimes-Reategui R. Dynamics of an erbium-doped fiber laser with pump modulation: theory and experiment. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2005, vol. 22, no. 10, pp. 2107- 2114.
22. Pisarchik A.N., Jaimes-Reategui R., Sevilla-Escoboza R., HuertaCuellar G., Taki M. Rogue waves in a multistable system. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, vol. 107, p. 274101.
23. Campos-Mejía A., Pisarchik A.N. and Arroyo-Almanza D.A. Noise-induced on-off intermittency in mutually coupled semiconductor lasers. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2013, vol. 54, p. 96.

ACKNOWLEDGEMENTS:

1. The authors thank A.N. Pisarchik and R. Jaimes-Reategui for the presented data of erbium-doped optical fiber laser.
2. The work is fulfilled under support of Russian Fund of Fundamental Research (project no. 16-32-60078).

Received 28 August 2017

Zhuravlev Maksim Olegovich, Saratov Chernyshevsky State University, Saratov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of Open System Physics Department; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation, Associate Professor of Geoecology and Geological Engineering Department, e-mail: zhuravlevmo@gmail.com

Koronovskii Alexey Aleksandrovich, Saratov Chernyshevsky State University, Saratov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Open System Physics Department, Provost for Scientific-Research Work, e-mail: alexey.koronovskii@gmail.com

Moskalenko Olga Igorevna, Saratov Chernyshevsky State University, Saratov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Open System Physics Department, Head of Scientific Activity Administration, e-mail: o.i.moskalenko@gmail.com

Lopatin Dmitrii Valerevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Director of Computer Security Center, e-mail: 79107540080@ya.ru

Для цитирования: Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Лопатин Д.В. Индуцированная шумом перемежаемость в легированном эрбием оптоволоконном лазере: теория и численный эксперимент // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 5. С. 1121-1126. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1121-1126

For citation: Zhuravlev M.O., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Lopatin D.V. Induced by noise intermittency in erbium-doped fiber laser: theory and numerical experiment. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 1121-1126. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1121-1126 ((In Russian, Abstr. in Engl.)).