

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 535.8

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-3-208-214>

Поступило в редакцию 20.03.2026

Received 20.03.2026

Н. В. Лахмицкий, В. Н. Чижевский, академик С. Я. Килин

*Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь
пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь*

ФАНТОМНЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ РЕЗОНАНС В ИСКУССТВЕННОМ ИМПУЛЬСНОМ НЕЙРОНЕ НА ОСНОВЕ ВЕРТИКАЛЬНО ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЛАЗЕРА И ОДНОФОТОННОГО ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования фантомного вибрационного резонанса в искусственном импульсном нейроне на основе вертикально излучающего лазера и лавинного фотодиода. Показано, что прохождение сигнала, представляющего собой сумму гармоник фундаментальной частоты, отсутствующей в сигнале, через оптоэлектронный искусственный импульсный нейрон при добавлении высокочастотного сигнала определенной амплитуды приводит к появлению фантомных частот в отклике искусственного импульсного нейрона. Полученные результаты могут быть использованы в искусственных импульсных нейронных сетях для обработки сложных сигналов.

Ключевые слова: фантомный резонанс, искусственный импульсный нейрон, системы с нелинейным откликом

Для цитирования. Лахмицкий, Н. В. Фантомный вибрационный резонанс в искусственном импульсном нейроне на основе вертикально излучающего лазера и однофотонного лавинного фотодиода / Н. В. Лахмицкий, В. Н. Чижевский, С. Я. Килин // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 3. – С. 208–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-3-208-214>

Mikita V. Lakhmitski, Vyacheslav N. Chizhevsky, Academician Sergei Ya. Kilin

*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

GHOST VIBRATIONAL RESONANCE IN AN ARTIFICIAL SPIKING NEURON BASED ON A VERTICAL CAVITY LASER AND SINGLE-PHOTON AVALANCHE PHOTODIODE

Abstract. The results of an experimental study of ghost vibrational resonance in an optoelectronic spiking neuron based on a vertical-cavity surface-emitting laser and a single-photon avalanche photodiode are presented. It is shown that passing a signal representing the sum of harmonics of a fundamental frequency absent from the signal through the optoelectronic spiking neuron, with the addition of a high-frequency signal of appropriate amplitude, leads to the appearance of ghost frequencies in the spiking neuron's response. These results can be used in artificial spiking neural networks for processing complex signals.

Keywords: ghost resonance, artificial spiking neuron, nonlinear response systems

For citation. Lakhmitski M. V., Chizhevsky V. N., Kilin S. Ya. Ghost vibrational resonance in an artificial spiking neuron based on a vertical cavity laser and single-photon avalanche photodiode. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 3, pp. 208–214 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-3-208-214>

Введение. В нелинейных динамических системах резонансные явления играют ключевую роль в усилении слабых сигналов. Одно из таких явлений, известное как вибрационный резонанс (ВР), наблюдается в бистабильных и пороговых системах со статической нелинейностью, когда в систему к слабому подпороговому входному сигналу дополнительно добавляется периодический сигнал с частотой, отличной от входного сигнала [1]. Явление ВР проявляется в виде резонансного отклика на частоте низкочастотного (НЧ) входного сигнала в зависимости от амплитуды или частоты дополнительного высокочастотного (ВЧ) возбуждения. В известном смысле ВР является детерминированным аналогом явления стохастического резонанса, где шум заменяется высо-

кочастотным сигналом. Впервые ВР был экспериментально обнаружен в аналоговых электронных схемах [2] и в бистабильном вертикально-излучающем лазере (ВИЛ) для симметричных и асимметричных конфигураций бистабильности [3].

К настоящему времени, явление ВР, наряду с аналоговыми электронными схемами и вертикально-излучающими лазерами, наблюдалось в различных областях физики, химии, биологии [4]. Значительное количество работ в этом направлении посвящено теоретическим исследованиям ВР в моделях одиночных нейронов и нейронных сетей различной топологии. В частности, ВР был исследован в Фитц–Хью–Нагумо (ФХН) модели нейрона [5], нейронной сети, построенной по модели нейронов Ижикевича [6], одиночных нейронах и низкоразмерных сетях в Ходжкина–Хаксли модели нейронов [7], нейронных системах Хиндмарша–Роуза [8]. Наряду с теоретическими исследованиями ВР был проведен ряд исследований ВР в электронной реализации модели, описываемой уравнениями ФХН [9]. Также было изучено усиление распространения низкочастотной информации в сети электронных ФХН нейронов методом вибрационного резонанса [10].

Одной из разновидностей вибрационного резонанса является фантомный вибрационный резонанс (ФВР), который возникает в нелинейных системах, возбуждаемых высокочастотным возмущением и низкочастотным сигналом, состоящим из более чем одной частоты. При этом частота ВЧ сигнала должна быть значительно больше максимальной частоты НЧ сигнала. Это накладывает некоторые ограничения на диапазон частот НЧ сигнала в ФВР. В основном фантомный резонанс проявляется в выходном сигнале на недостающей частоте, которая ниже входных низких частот. Впервые ФВР был исследован теоретически в осцилляторе Дуффинга [11], а затем в модели Чуа [12] и модели плазменных осцилляторов с однонаправленной и односторонней связью [13]. Однако экспериментальных исследований ФВР до сих пор не проводилось.

В данной работе экспериментально продемонстрировано явление ФВР в оптоэлектронном искусственном импульсном нейроне (ИИН) на основе вертикально-излучающего лазера и однофотонного лавинного фотодиода (ЛФД), который хорошо имитирует основные свойства биологических нейронов [14]. Предыдущие исследования, выполненные с использованием этого ИИН, продемонстрировали явление фантомного стохастического резонанса (ФСР) [15].

Экспериментальная схема и методы исследования. Явление фантомного ВР исследовалось в ИИН, состоящем из ВИЛ, генерирующего на длине волны 850 нм с порогом генерации 1,85 В, оптического ослабителя, детектора одиночных фотонов (ID-100 SMF-20), работающего в автономном режиме с активной системой гашения лавины и защитой от засветки. Детектор имел частоту темновых отсчетов 4 Гц и мертвое время 45 нс. Вероятность детектирования фотонов составляла 0,03, что означает работу детектора в вероятностном режиме. Выходной прямоугольный импульс с детектора имел длительность 10 нс и амплитуду около 2 В. На ИИН подавался периодический сигнал, представляющий собой сумму двух синусоидальных сигналов с частотой $2f_0$ и $3f_0$ одинаковой амплитуды, где f_0 – фундаментальная частота. Значения f_0 выбирались в диапазоне от 100 кГц до 2 МГц, поскольку в явлении ВР частота ВЧ сигнала, как правило, должна быть в несколько раз больше максимальной частоты в спектре входного сигнала, в данном случае $3f_0$. Суммарный входной сигнал с амплитудой A_0 подавался на вход ИИН. К нему добавлялся ВЧ синусоидальный сигнал с частотой 20 МГц и амплитудой A_m . Измерения проводились при помощи USB осциллографа В-321 (Унитехпром БГУ) с частотой выборки 200 МГц и полосой пропускания 300 МГц, сопряженного с компьютером для последующей обработки сигналов. Для задания входного ВЧ сигнала использовался генератор сигналов произвольной формы, встроенный в Hantekscope 5 (TiePie), с частотой работы цифроаналогового преобразователя 200 МГц. Для количественного описания фантомного резонанса использовалась амплитуда отклика на фундаментальной частоте, определяемая из спектра Фурье выходного сигнала с ИИН. Одновременно вычислялось соотношение сигнал/шум как

$$SNR = 20 \lg \frac{R}{R_n},$$

где R – амплитуда отклика ИИН на фундаментальной частоте; R_n – интерполированный уровень шума на фантомной частоте. Кроме того, исследовалась плотность вероятности межимпульсных интервалов последовательности выходных импульсов с ИИН.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1, *a* представлена форма входного сигнала. На рис. 1, *b, c* показана последовательность выходных импульсов с ИИН для различных амплитуд ВЧ сигнала при фиксированной амплитуде подпорогового сигнала. При отсутствии добавочного ВЧ сигнала на выходе ИИН практически нет отклика, поскольку входной детерминированный сигнал не превышает порог срабатывания нейрона. На соответствующем спектре пики на частотах f_0 , $2f_0$, $3f_0$ отсутствуют. С увеличением амплитуды ВЧ сигнала появляются серии импульсов в виде периодических структур с периодом, соответствующим фундаментальной частоте f_0 (рис. 1, *b, c*). В спектре это проявляется в росте пика на основной частоте f_0 . При дальнейшем увеличении амплитуды ВЧ сигнала (рис. 1, *d*) периодическая структура претерпевает изменения. В каждом периоде наблюдается 2 «подпакета» импульсов, при этом на соответствующих спектрах значение пика на частоте f_0 уменьшается. Такое поведение объясняется формой входного сигнала, где в каждом периоде имеется несколько локальных максимумов с различными значениями. Аналогичное поведение наблюдалось в [15], где исследовался фантомный стохастический резонанс. При некоторой амплитуде ВЧ сигнала A_m и амплитуде входного сигнала A_0 общее значение тока накачки превышает порог срабатывания ИИН, что проявляется в виде импульсов в этом временном диапазоне. При максимальной амплитуде ВЧ сигнала данная структура исчезает (рис. 1, *e*), поскольку общее значение тока накачки в любой момент времени превышает порог срабатывания ИИН.

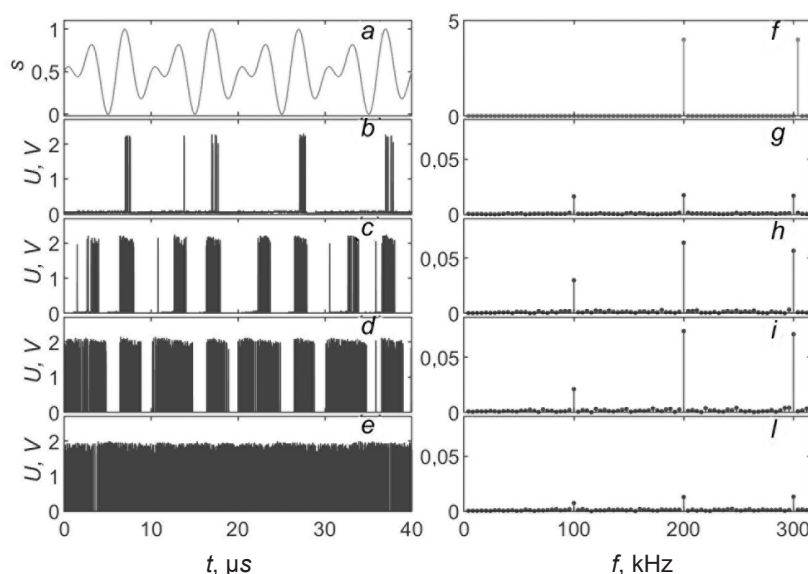


Рис. 1. Форма подпорогового входного сигнала, состоящего из ультрагармоник $2f_0$ и $3f_0$ фундаментальной частоты $f_0 = 100$ кГц (*a*), и соответствующий спектр этого сигнала (*f*). Временные отклики ИИН на входной сигнал при различных амплитудах ВЧ сигнала U_m и соответствующие спектры этих сигналов: *b, g* – 1,645 В; *c, h* – 1,755 В; *d, i* – 1,87 В; *e, j* – 2,05 В; $A_0 = 0,375$ В

Fig. 1. The shape of the subthreshold input signal consisting of ultraharmonics $2f_0$ and $3f_0$ of fundamental frequency $f_0 = 100$ kHz (*a*), and the corresponding spectrum of this signal (*f*). Time responses of the ASN to the input signal at different amplitudes of the high-frequency signal U_m and corresponding spectra of these signals: *b, g* – 1.645 V; *c, h* – 1.755 V; *d, i* – 1.87 V; *e, j* – 2.05 V; $A_0 = 0.375$ V

На рис. 2, *a* представлена зависимость отклика ИИН от амплитуды ВЧ сигнала A_m . Наблюдается рост отклика с увеличением A_m , а также смещение положения максимума, что характерно для явления ВР. Наличие двух максимумов объясняется формой входного сигнала, который содержит высшие гармоники фундаментальной частоты, где имеется 3 локальных максимума (рис. 1, *a*). Когда первый наибольший максимум субгармоник с добавочным ВЧ сигналом пересекает порог генерации, происходит резкий рост отклика, соответствующие серии коротких пачек импульсов. При дальнейшем увеличении A_m периодическая структура выходного сигнала изменяется: начинают доминировать пачки импульсов, соответствующие более мелким локальным максимумам входного сигнала. Это приводит к появлению второго максимума на зависимости отклика от A_m .

(рис. 2, *a*). На рис. 2, *b* продемонстрированы кривые откликов в зависимости от A_m для различных частот при фиксированной амплитуде входного сигнала $A_0 = 0,5$ В. С ростом фундаментальной частоты форма отклика изменяется. Зависимость амплитуды ВЧ сигнала A^{opt} от A_0 , при котором достигается максимальное значение отклика ИИН, представлена на рис. 2, *c*. Представленные данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью: $A^{\text{opt}} = -0,586A_0 + 1,983$. На рис. 2, *d* представлена зависимость максимальных значений отклика R_{max} для нескольких значений фундаментальной частоты входного сигнала. Можно отметить незначительный рост максимального отклика в зависимости от амплитуды входного сигнала A_0 с увеличением фундаментальной частоты.

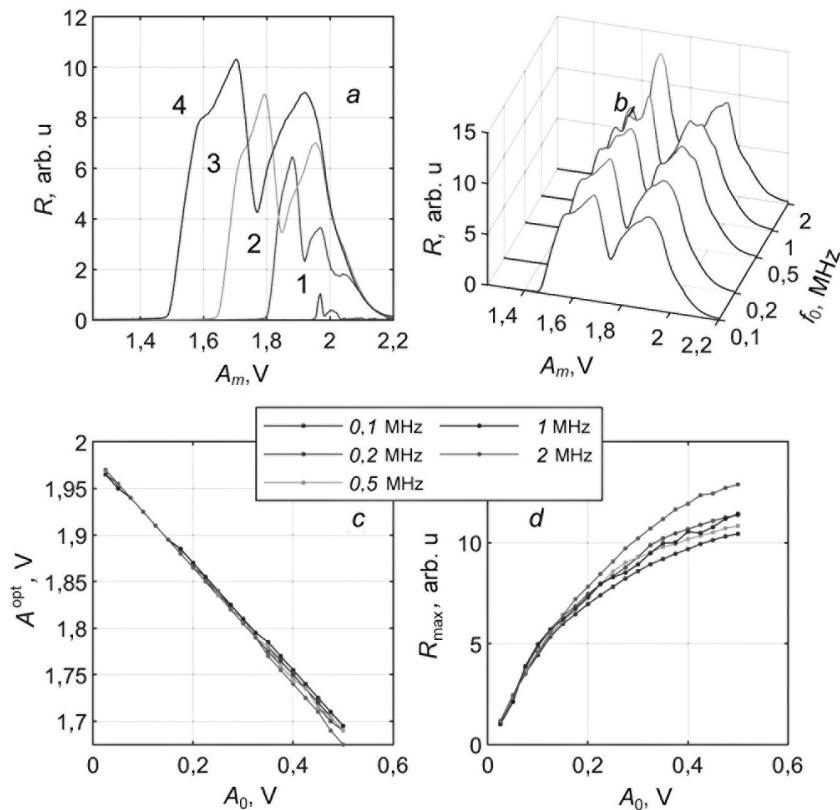


Рис. 2. Амплитуда отклика R на фундаментальной частоте $f_0 = 100$ кГц в зависимости от амплитуды ВЧ сигнала A_m для различных амплитуд входного сигнала A_0 : 0,025 (1), 0,175 (2), 0,325 (3), 0,475 В (4) (*a*); зависимость амплитуды отклика R от A_m для различных значений фундаментальной частоты f_0 при фиксированной амплитуде входного сигнала $A_0 = 0,5$ В (*b*); зависимость амплитуды ВЧ сигнала A^{opt} от A_0 , при котором достигается максимальное значение отклика ИИН (*c*); максимальное значение отклика R_{max} в зависимости от амплитуды входного сигнала A_0 (*d*). Для рисунков *c*, *d* представлена общая легенда

Fig. 2. The response amplitude R at the fundamental frequency $f_0 = 100$ kHz depending on the HF signal amplitude A_m for different input signal amplitudes A_0 : 0.025 (1), 0.175 (2), 0.325 (3), 0.475 (4) V (*a*); the dependence of the response amplitude R on A_m for different values of fundamental frequency f_0 for a fixed amplitude of the input signal $A_0 = 0.5$ V (*b*); the dependence of the HF amplitude A^{opt} on A_0 at which the maximum value of the ASN response is achieved (*c*); the maximum value of the response R_{max} depending on the amplitude of the input signal A_0 (*d*).

A general legend is provided for figures *c* and *d*

Зависимости соотношения сигнал/шум при различных значениях A_0 представлены на рис. 3, *a*. Как и в случае с зависимостью отклика (рис. 2), здесь наблюдается аналогичное поведение системы. На рис. 3, *b* представлены зависимости отношения сигнал/шум при значении $A_0 = 0,5$ В для различных значений фундаментальных частот f_0 . Из рисунка видно, что с увеличением значения фундаментальной частоты, форма отклика меняется. Максимальное значение отклика SNR_{max} в зависимости от амплитуды входного сигнала A_0 при различных значениях основной частоты представлено на рис. 3, *c*. Приведенные на графиках данные показывают, что прохождение сигнала не зависит от фундаментальной частоты.

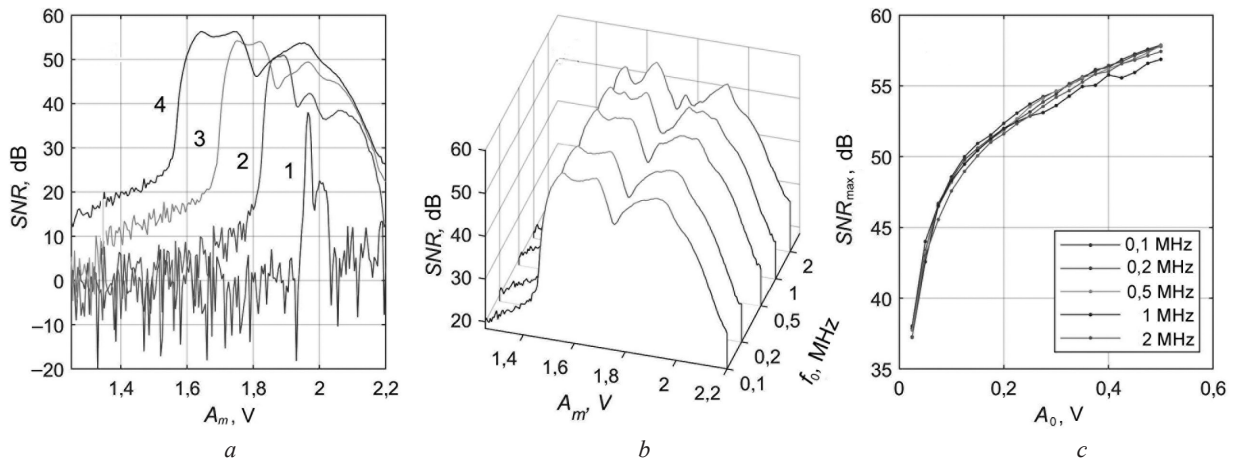


Рис. 3. Отношение сигнал/шум SNR на фундаментальной частоте в зависимости от амплитуды ВЧ сигнала A_m для ряда значений амплитуды входного сигнала A_0 : 0,025 (1), 0,15 (2), 0,275 (3), 0,40 (4) В (а); зависимость отношения сигнал/шум SNR от A_m и от A_0 для фундаментальной частоты $f_0 = 100$ кГц (b); максимальное значение SNR_{max} в зависимости от A_0 при различных значениях f_0 (с)

Fig. 3. The signal-to-noise ratio SNR at the fundamental frequency as a function of the HF signal amplitude for several values of the input signal amplitude A_0 : 0.025 (1), 0.15 (2), 0.275 (3), 0.40 (4) V (a); dependence of the signal-to-noise ratio on A_m and A_0 for $f_0 = 100$ kHz (b); the maximum value of the signal-to-noise ratio SNR_{max} depending on A_0 for different values of the fundamental frequency f_0 (c)

На рис. 4 представлена плотность вероятности межимпульсных интервалов. Межимпульсные интервалы широко используются в нейробиологии для характеристики изменчивости времени появления импульсов в нейронах при наличии шума. Распределение обладает сложной структурой, которая обусловлена вероятностным характером отклика нейрона. Выделяются несколько областей с повышенной плотностью вероятности. Часть событий сосредоточена вблизи времени $t \approx 10$ мкс, соответствующего периоду фундаментальной частоты $T_0 = 1/f_0$. В области значений $t < T_0$ расположены два пика, которые отражают наличие во входном сигнале локальных максимумов. С увеличением A_m эти области претерпевают значительные изменения.

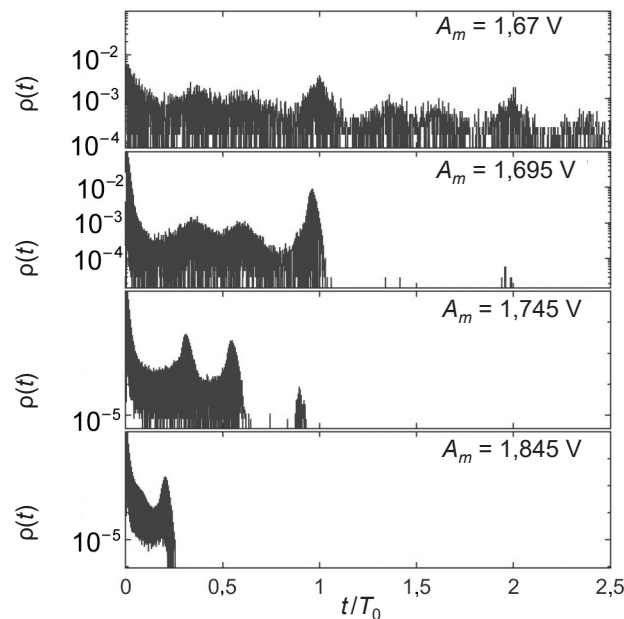


Рис. 4. Функция плотность вероятности межимпульсных интервалов $\rho(t)$ как функция времени для различных значений A_m ($f_0 = 100$ кГц, $A_0 = 0,25$ В)

Fig. 4. Robability density function of interspike intervals ρ as a function of time for different values of A_m ($f_0 = 100$ kHz, $A_0 = 0.25$ V)

Закключение. В работе представлено экспериментальное наблюдение и исследование явления фантомного вибрационного резонанса в оптоэлектронном ИИН на основе ВИЛ и ЛФД. Явление ФСР в ИИН заключается в том, что добавление высокочастотного гармонического сигнала к входному сигналу, состоящему из ультрагармоник основной частоты, приводит к генерации фундаментальной частоты, изначально отсутствующей во входном сигнале. Данный эффект может быть применен для обработки и фильтрации сигналов в искусственных импульсных нейронных сетях.

Список использованных источников

1. Landa, P. S. Vibrational resonance / P. S. Landa, P. V. E. McClintock // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 2000. – Vol. 33, N 45. – P. L433–L438. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/33/45/103>
2. Vibrational resonance in a noise-induced structure / A. A. Zaikin, L. López, J. P. Baltanás [et al.] // *Physical Review E*. – 2002. – Vol. 66, N 1. – Art. 011106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.011106>
3. Chizhevsky, V. N. Experimental evidence of “vibrational resonance” in an optical system / V. N. Chizhevsky, E. Smeu, G. Giacomelli // *Physical Review Letters*. – 2003. – Vol. 91, N 22. – Art. 220602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.220602>
4. Yang, J. Vibrational resonance: A review / J. Yang, S. Rajasekar, M. A. F. Sanjuán // *Physics Reports*. – 2024. – Vol. 1067. – P. 1–62. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.03.001>
5. Perc, M. Amplification of information transfer in excitable systems that reside in a steady state near a bifurcation point to complex oscillatory behavior / M. Perc, M. Marhl // *Physical Review E*. – 2005. – Vol. 71, N 2. – Art. 026229. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.026229>
6. Vibrational resonance in a randomly connected neural network / Y. Qin, C. Han, Y. Che, J. Zhao // *Cognitive Neurodynamics*. – 2018. – Vol. 12. – P. 509–518. <https://doi.org/10.1007/s11571-018-9492-2>
7. Baysal, V. Effects of electromagnetic induction on vibrational resonance in single neurons and neuronal networks / V. Baysal, E. Yilmaz // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2020. – Vol. 537. – Art. 122733. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122733>
8. Effects of electric field on multiple vibrational resonances in Hindmarsh–Rose neuronal systems / G. Wang, D. Yu, Q. Ding [et al.] // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2021. – Vol. 150. – Art. 111210. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.111210>
9. Bordet, M. Experimental and numerical study of noise effects in a FitzHugh–Nagumo system driven by a biharmonic signal / M. Bordet, S. Morfu // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2013. – Vol. 54. – P. 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2013.05.020>
10. Morfu, S. On the propagation of a low frequency excitation in a perturbed FitzHugh–Nagumo system: Simulation and experiments / S. Morfu, M. Bordet // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2017. – Vol. 103. – P. 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.06.006>
11. Rajamani, S. Ghost-vibrational resonance / S. Rajamani, S. Rajasekar, M. A. F. Sanjuán // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. – 2014. – Vol. 19, N 11. – P. 4003–4012. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2014.04.006>
12. Abirami, K. Vibrational and ghost-vibrational resonances in a modified chua’s circuit model equation / K. Abirami, S. Rajasekar, M. A. F. Sanjuan // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2014. – Vol. 24, N 11. – Art. 1430031. <https://doi.org/10.1142/S0218127414300316>
13. Studies on ghost-vibrational resonance in a periodically driven anharmonic oscillator / R. Samikkannu, M. Ramasamy, S. Kumarasamy, K. Rajagopal // *European Physical Journal B*. – 2023. – Vol. 96. – Art. 56. <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-023-00527-w>
14. Chizhevsky, V. N. Artificial spiking neuron based on a single-photon avalanche diode and a microcavity laser / V. N. Chizhevsky, V. A. Kulchitsky, S. Ya. Kilin // *Applied Physics Letters*. – 2021. – Vol. 119, N 4. – Art. 041107. <https://doi.org/10.1063/5.0055392>
15. Lakhmitski, M. V. Stochastic resonance in the optoelectronic artificial spiking neuron based on a VCSEL and a SPAD / M. V. Lakhmitski, V. N. Chizhevsky, S. Kilin // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2024. – Vol. 27, N 4. – P. 311–316. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14508534>

References

1. Landa P. S., McClintock P. V. E. Vibrational resonance. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 2000, vol. 33, no. 45, pp. L433–L438. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/33/45/103>
2. Zaikin A. A., López L., Baltanás J. P., Kurths J., Sanjuán M. A. F. Vibrational resonance in a noise-induced structure. *Physical Review E*, 2002, vol. 66, no. 1, art. 011106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.011106>
3. Chizhevsky V. N., Smeu E., Giacomelli G. Experimental evidence of “vibrational resonance” in an optical system. *Physical Review Letters*, 2003, vol. 91, no. 22, art. 220602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.220602>
4. Yang J., Rajasekar S., Sanjuán M. A. F. Vibrational resonance: A review. *Physics Reports*, 2024, vol. 1067, pp. 1–62. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.03.001>
5. Perc M., Marhl M. Amplification of information transfer in excitable systems that reside in a steady state near a bifurcation point to complex oscillatory behavior. *Physical Review E*, 2005, vol. 71, no. 2, art. 026229. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.026229>
6. Qin Y., Han C., Che Y., Zhao J. Vibrational resonance in a randomly connected neural network. *Cognitive Neurodynamics*, 2018, vol. 12, pp. 509–518. <https://doi.org/10.1007/s11571-018-9492-2>

7. Baysal V., Yilmaz E. Effects of electromagnetic induction on vibrational resonance in single neurons and neuronal networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, vol. 537, art. 122733. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122733>
8. Wang G., Yu D., Ding Q., Li T., Jia Y. Effects of electric field on multiple vibrational resonances in Hindmarsh–Rose neuronal systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021, vol. 150, art. 111210. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.111210>
9. Bordet M., Morfu S. Experimental and numerical study of noise effects in a FitzHugh–Nagumo system driven by a biharmonic signal. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2013, vol. 54, pp. 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2013.05.020>
10. Morfu S., Bordet M. On the propagation of a low frequency excitation in a perturbed FitzHugh–Nagumo system: Simulation and experiments. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2017, vol. 103, pp. 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.06.006>
11. Rajamani S., Rajasekar S., Sanjuán M. A. F. Ghost-vibrational resonance. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, vol. 19, no. 11, pp. 4003–4012. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2014.04.006>
12. Abirami K., Rajasekar S., Sanjuan M. A. F. Vibrational and ghost-vibrational resonances in a modified chua's circuit model equation. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2014, vol. 24, no. 11, art. 1430031. <https://doi.org/10.1142/S0218127414300316>
13. Samikkannu R., Ramasamy M., Kumarasamy S., Rajagopal K. Studies on ghost-vibrational resonance in a periodically driven anharmonic oscillator. *European Physical Journal B*, 2023, vol. 96, art. 56. <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-023-00527-w>
14. Chizhevsky V. N., Kulchitsky V. A., Kilin S. Ya. Artificial spiking neuron based on a single-photon avalanche diode and a microcavity laser. *Applied Physics Letters*, 2021, vol. 119, no. 4, art. 041107. <https://doi.org/10.1063/5.0055392>
15. Lakhmitski M. V., Chizhevsky V. N., Kilin S. Stochastic resonance in the optoelectronic artificial spikingneuron based on a VCSEL and a SPAD. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2024, vol. 27, no. 4, pp. 311–316. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14508534>

Информация об авторах

Лахмицкий Никита Васильевич – научный сотрудник. E-mail: n.lahmitski@dragon.bas-net.by.

Чижевский Вячеслав Николаевич – канд. физ.-мат. наук., вед. науч. сотрудник. E-mail: vnc@dragon.bas-net.by.

Килин Сергей Яковлевич – академик, д-р физ.-мат. наук, заведующий центром. E-mail: sergei_kilin@yahoo.com.

Information about the authors

Lakhmitski Mikita V. – Researcher. E-mail: n.lahmitski@dragon.bas-net.by.

Chizhevsky Vyacheslav N. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. E-mail: vnc@dragon.bas-net.by.

Kilin Sergei Ya. – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Center. E-mail: sergei_kilin@yahoo.com.