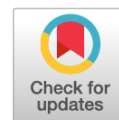


DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623344>

Динамика двух нейроноподобных генераторов с мемристивной связью

Д.И. Большаков*, М.А. Мищенко, А.И. Белов, В.В. Матросов, А.Н. Михайлов

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач междисциплинарной науки является разработка и исследование нейроморфных устройств. Такие устройства чаще всего используются для создания систем обработки разного рода информации с алгоритмами, аналогичными алгоритмам обработки данных мозгом человека или мозгом животных. Развитие такой нейроморфной электроники позволит строить вычислительные устройства и системы обработки информации на новых принципах и с высокой степенью параллелизма [1].

Нейроморфные устройства требуют разработки электронных компонентов: нейронов и синапсов.

В работе [2] предложена система фазовой автоподстройки частоты с полосовым фильтром в цепи управления. Более детальное изучение математической модели такой системы показало отсутствие состояний равновесия, соответствующих режиму синхронизации системы фазовой автоподстройки частоты, но имеются автоколебательные режимы различной сложности. Автоколебания, наблюдаемые в такой системе, аналогичны спайковым и берстовым колебаниям мембранного потенциала нейрона.

Аппаратная реализация [3] рассматриваемого нейроноподобного генератора в виде электронного устройства продемонстрировала возможность воспроизведения тех же динамических режимов, что и математическая модель [2]. Принципиальный недостаток предложенной модели [2] и её экспериментальной реализации [3] — отсутствие возбудимого режима (под возбудимой понимается динамическая система с устойчивым состоянием равновесия и периодической псевдоорбитой большой амплитуды, находящейся вблизи состояния равновесия), когда генерация импульсов будет только откликом на внешнее возмущение. В то же время подавляющее большинство нейронов головного мозга находятся в возбудимом подпороговом режиме, а их генерация в первую очередь обусловлена наличием множественной связи.

Одной из задач данной работы была модификация существующей модели нейроноподобного генератора с целью сохранения известной динамики и добавления режима возбуждаемого осциллятора.

При решении этой задачи была предложена и реализована в виде радиотехнической схемы модификация нейроноподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты с полосовым фильтром в цепи управления, устраняющая основной недостаток исходной модели — неспособность работать в возбудимом режиме. Новый динамический режим с отсутствием автоколебаний был получен за счёт введения в схему управления электронно-управляемого переключателя между фильтрами нижних и верхних частот.

На экспериментально полученных данных показано существование возбудимого режима и подтверждено существование ранее известных автоколебательных режимов различной сложности: спайкового, пачечного и хаотического [4]. Ещё одной задачей в этой работе было исследование динамики двух нейроноподобных генераторов с мемристивной связью. В качестве модели синаптической связи использовалась модель мемристора второго порядка, основанная на мемристоре Чуа. При решении данной задачи обнаружены нелинейные частотные зависимости проводимости мемристивного элемента. Эта зависимость имеет одинаковый характер для автоколебательных режимов разной сложности: спайков и берстов.

Кроме того, продемонстрирована синхронизация двух нейроноподобных генераторов, связанных через мемристический элемент. Эта синхронизация носит временный характер и сильно зависит от текущего состояния мемристивного элемента [5].

Ключевые слова: электронный нейрон; генератор; возбуждение колебаний; фазовая автоподстройка частоты; мемристор; резистивное переключение; частотно-зависимая пластичность; синхрония нейронов.

Как цитировать:

Большаков Д.И., Мищенко М.А., Белов А.И., Матросов В.В., Михайлов А.Н. Динамика двух нейроноподобных генераторов с мемристивной связью // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 790–793. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623344>

Рукопись получена: 16.05.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах».

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wunderlich T., Kungl A.F., Müller E., et al. Demonstrating advantages of neuromorphic computation: a pilot study // *Front Neurosci.* 2019. Vol. 13. P. 260. doi: 10.3389/fnins.2019.00260
2. Shalfeev V.D. Investigation of the dynamics of a system of automatic phase control of frequency with a coupling capacitor in the control loop // *Radiophysics and Quantum Electronics.* 1968. Vol. 11, N 3. P. 221–226.
3. Mishchenko M.A., Bolshakov D.I., Matrosov V.V. Instrumental implementation of a neuronlike generator with spiking and bursting dynamics based on a phase-locked loop // *Technical Physics Letters.* 2017. Vol. 43, N 7. P. 596–599. doi: 10.1134/S1063785017070100
4. Mishchenko M.A., Bolshakov D.I., Matrosov V.V., Sysoev I.V. Electronic neuron-like generator with excitable and self-oscillating behavior // *5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA); 2021 Sept 13–15; Kaliningrad.* 2021. doi: 10.1109/DCNA53427.2021.9587210
5. Mishchenko M.A., Bolshakov D.I., Lukoyanov V.I., et al. Inverted spike-rate-dependent plasticity due to charge traps in a metal-oxide memristive device // *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2022. Vol. 55, N 39. P. 394002. doi: 10.1088/1361-6463/ac79de

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

* Д.И. Большаков; адрес: Российская Федерация, 603022, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 23; e-mail: denis.bolshakov@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623344>

Dynamics of two neuron-like generators with memristive connection

D.I. Bolshakov*, M.A. Mishchenko, A.I. Belov, V.V. Matrosov, A.N. Mikhaylov

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Currently, one of the most vital goals of interdisciplinary science is the development and investigation of neuromorphic devices. These devices are frequently implemented in the construction of information processing systems that use algorithms closely resembling those used by the brain of humans and animals. The development of neuromorphic electronics enables the construction of computing devices and information processing systems according to new principles and with a high level of parallelism [1].

Neuromorphic devices necessitate the creation of electronic components, specifically neurons and synapses.

The researchers recommend the use of a phase-locked loop system accompanied by a band-pass filter within the control circuit in their research paper [2]. Further mathematical analysis of this system revealed the absence of equilibrium states that correspond to the synchronization mode of the phase-locked loop system. However, self-oscillating modes with varying degrees of complexity exist. Self-oscillations observed in this system resemble the spike and burst oscillation of a neuron's membrane potential.

Hardware implementation [3] of the neuron-like generator showed that it is possible to replicate identical dynamic modes to those in the mathematical model [2] through an electronic device.

A significant drawback of the proposed model [2] and its experimental implementation [3] is the lack of an excitable mode. By "excitable", we refer to a dynamic system with a stable equilibrium state and a periodic pseudo-orbit of significant amplitude passing near the equilibrium state. In this mode, pulse generation would respond solely to external disturbance. At the same time, the majority of neurons in the brain are in the subthreshold mode, which renders them excitable, and this generation is primarily due to the presence of multiple connections.

One aim of this study was to modify the current model of the neuron-like generator to maintain its known dynamics while including an excited oscillator mode.

While solving this problem, an electronic circuit was developed that serves as a modified version of the neuron-like generator. Based on the phase-locked loop system with a band-pass filter integrated into its control circuit, this modification effectively addresses the main issue of the previous model, specifically, its incapacity to function in excitable mode. The upgraded device now operates in a new dynamic mode that boasts an absence of self-oscillation, a feature achieved through the addition of an electronically controlled switch between the low- and high-pass filters in the control loop.

Existence of the excitable mode and previously known self-oscillating modes of varying complexity was experimentally demonstrated, confirming spike, burst, and chaotic modes [4].

Another task in this study was to investigate the behavior of two neuron-like oscillators with memristive coupling.

A second-order memristor model based on Chua's memristor was used as a synaptic connection model.

Nonlinear frequency dependencies of the conductivity of the memristive element were discovered during the problem-solving process. The self-oscillating modes of varying complexity, namely spike and burst, depict identical characteristics of this dependence.

In addition, two neuron-type generators connected by a memristive element were shown to be capable of synchronization. This synchronization between two coupled neuron-like generators is transient and highly reliant on the present condition of the memristive element [5].

Keywords: electronic neuron; generator; excitation of oscillations; phase-locked loop; memristor; resistive switching; spike-rate-dependent plasticity; neural synchrony.

To cite this article:

Bolshakov DI, Mishchenko MA, Belov AI, Matrosov VV, Mikhaylov AN. Dynamics of two neuron-like generators with memristive connection. *Genes & cells*. 2023;18(4):790–793. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623344>

Received: 16.05.2023

Accepted: 26.11.2023

Published online: 20.01.2024

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Funding sources. This study was conducted within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, section No. 9 "Artificial Intelligence and Big Data in Technical, Industrial, Natural and Social Systems".

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

REFERENCES

1. Wunderlich T, Kungl AF, Müller E, et al. Demonstrating advantages of neuromorphic computation: a pilot study. *Front Neurosci.* 2019;13:260. doi: 10.3389/fnins.2019.00260
2. Shalfeev VD. Investigation of the dynamics of a system of automatic phase control of frequency with a coupling capacitor in the control loop. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 1968;11(3):221–226.
3. Mishchenko MA, Bolshakov DI, Matrosov VV. Instrumental implementation of a neuronlike generator with spiking and bursting dynamics based on a phase-locked loop. *Technical Physics Letters.* 2017;43(7):596–599. doi: 10.1134/S1063785017070100
4. Mishchenko MA, Bolshakov DI, Matrosov VV, Sysoev IV. Electronic neuron-like generator with excitable and self-oscillating behavior. *5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA);* 2021 Sept 13–15; Kaliningrad. 2021. doi: 10.1109/DCNA53427.2021.9587210
5. Mishchenko MA, Bolshakov DI, Lukoyanov VI, et al. Inverted spike-rate-dependent plasticity due to charge traps in a metal-oxide memristive device. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2022;55(39):394002. doi: 10.1088/1361-6463/ac79de

AUTHORS' CONTACT INFO

* D.I. Bolshakov; address: 23 Gagarin avenue, 603022 Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: denis.bolshakov@gmail.com