

01.5

Электронный нейроподобный генератор с возбудимым и автоколебательным режимом на основе системы фазовой автоподстройки частоты

© Д.И. Большаков¹, М.А. Мищенко¹, В.В. Матросов¹, И.В. Сысоев^{1,2}¹ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия² Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

E-mail: mischenko@neuro.nnov.ru

Поступило в Редакцию 30 ноября 2021 г.

В окончательной редакции 28 февраля 2022 г.

Принято к публикации 12 марта 2022 г.

Предложена экспериментальная реализация нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты с полосовым фильтром, способная генерировать в режимах, характерных для нейронов мозга, в том числе производить одиночные импульсы и пачки импульсов (берсты) — как регулярные, так и хаотические, а также функционировать в возбудимом (неколебательном) режиме, отвечая на внешние воздействия, что характерно для подавляющего большинства нейронов мозга. Ранее разработанные модели фазовой автоподстройки частоты, воспроизводящие нейроподобную активность, в возбудимом режиме функционировать не могли. Сделан вывод, что на основе предложенного генератора можно создавать сети для моделирования сетей нейронов головного мозга.

Ключевые слова: электронный нейрон, генератор, возбуждение колебаний, фазовая автоподстройка частоты.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.09.52446.19094

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач междисциплинарной науки является проектирование и исследование нейроморфных устройств [1]. Такие устройства чаще всего применяются для создания систем обработки разного рода информации с алгоритмами, схожими с алгоритмами обработки данных человеческим мозгом или мозгом животных. Разработка такой нейроморфной электроники позволит строить вычислительные устройства и системы обработки информации по новым принципам и с высоким уровнем параллелизма [2]. Нейроморфные устройства требуют разработки электронных компонентов: нейронов и синапсов. Созданию и исследованию таких систем в последние годы посвящено множество работ [1,3–7].

В работе [8] была предложена система фазовой автоподстройки частоты с полосовым фильтром в цепи управления. Более детальное изучение математической модели такой системы показало, что в указанной системе отсутствуют состояния равновесия, соответствующие режиму синхронизации системы фазовой автоподстройки, но наблюдаются автоколебательные режимы различной сложности [9]:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\tau} &= y, & \frac{dy}{d\tau} &= \tau, \\ \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{dz}{d\tau} &= \gamma - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)z - (1 + \varepsilon_1 \cos \varphi)y. \end{aligned} \quad (1)$$

Наблюдаемые в такой системе автоколебания переменной y качественно похожи на спайковые и берстовые

колебания мембранного потенциала нейрона. Параметры инерционности фильтра в петле управления ε_1 и ε_2 позволяют задавать необходимый динамический режим, а γ оказывает воздействие, сходное с воздействием внешнего тока. Было выполнено разбиение пространства параметров на области существования различных динамических режимов.

Аппаратная реализация [10] рассматриваемого нейроподобного генератора в виде электронного устройства показала возможность воспроизведения тех же динамических режимов, что и в математической модели (1) [11]. Система (1) инвариантна относительно преобразования $(\gamma, \varphi, y, z) \rightarrow (-\gamma, -\varphi, -y, -z)$, поэтому все наблюдаемые динамические режимы, полученные при условии $\gamma > 0$, наблюдаются и при $\gamma < 0$, но в „перевернутом“ виде. Из этого следует фундаментальный недостаток предложенной модели (1) и ее экспериментальной реализации — отсутствие возбудимого режима (под возбудимой понимается динамическая система, имеющая устойчивое состояние равновесия и периодическую псевдоорбиту большой амплитуды, проходящую в окрестности состояния равновесия [12]), когда генерация импульсов имела бы место только в ответ на внешнее воздействие. В то же время подавляющее большинство нейронов мозга находится в возбудимом подпороговом режиме, и их генерация обусловлена в первую очередь наличием большого числа связей.

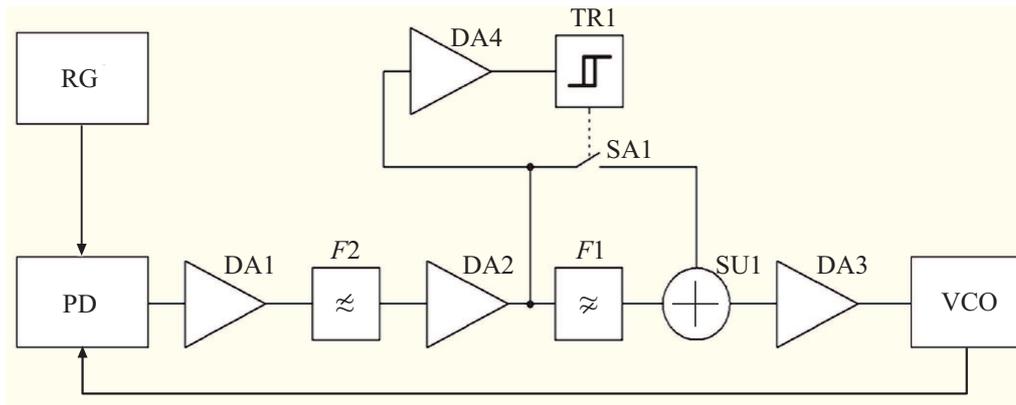


Рис. 1. Функциональная схема нейроподобного генератора с возбудимым и автоколебательным режимами на основе системы фазовой автоподстройки частоты. Пояснение в тексте.

Целью настоящей работы является модификация имеющейся модели нейроподобного генератора для сохранения известной динамики и добавления режима невозбужденного генератора работы.

Для устранения указанного недостатка и добавления возбудимого режима в области параметров $\gamma < 0$ в схему нейроподобного генератора между низкочастотной и высокочастотной частями полосового фильтра добавлен переключатель, активируемый при превышении сигналом порога, что дало возможность сохранить известную динамику при $\gamma > 0$ и добавить режим невозбужденного генератора при $\gamma < 0$.

В основе представленной на рис. 1 функциональной схемы модифицированного генератора лежит система фазовой автоподстройки частоты, включающая опорный генератор (referent generator, RG), фазовый дискриминатор (phase detector, PD) и генератор, управляемый напряжением (voltage-controlled oscillator, VCO). Элементы DA1, DA2, DA3, F1 и F2 являются элементами исходного полосового фильтра, элементы DA4 и TR1 являются элементами цепи слежения за состоянием системы, а элемент SA1 — электронный ключ, управляемый цепью слежения. Принцип работы модифицированного фильтра заключается в следующем: на вход поступает сигнал с выхода фазового дискриминатора (PD), далее данный сигнал проходит через буферный усилитель DA1, в котором осуществляется токовая развязка выхода PD от входа фильтра нижних частот, что позволяет снизить общий уровень шума и время переходных процессов в системе. С выхода DA1 сигнал поступает на вход фильтра нижних частот F2, в котором происходит отсечение высокочастотной составляющей сигнала, а также его сглаживание. Блок F2 имеет возможность перестройки параметров, что в свою очередь позволяет менять частотный диапазон пропускания фильтра и степень сглаживания сигнала. С выхода F2 сигнал поступает на вход второго буферного усилителя DA2, который необходим для ограничения влияния работы фильтра нижних частот F2 на фильтр верхних частот

F1, что в свою очередь позволяет не допустить возникновения обратной волны вследствие высокого выходного сопротивления F2 и низкого входного сопротивления F1 и тем самым повысить общую стабильность схемы во время работы. Далее сигнал с выхода DA2 поступает на вход фильтра верхних частот F1, а также параллельно на цепь управления триггера электронного ключа и входную контактную группу самого электронного ключа. При прохождении сигнала через F1 происходит отсечение низкочастотной и постоянной составляющей, тем самым формируется сигнал, необходимый для работы устройства в известном ранее режиме генерации нейроподобных колебаний различной сложности, описываемых уравнениями (1). Цепь управления DA4 (инвертирующий повторитель) и триггер Шмитта TR1 построены таким образом, что в триггере Шмитта TR1 происходит сравнение сигнала с выхода фильтра F2 с верхним порогом триггера, подобранным таким образом, чтобы обнаруживать сигнал, возникающий при установлении параметра $\gamma < 0$. В случае превышения порога триггер переходит из состояния логического „0“ в состояние логической „1“, тем самым замыкая электронный ключ SA1. После замыкания ключа сигнал с выхода DA2 проходит не только через фильтр F1, но и в обход, пропуская низкочастотную и постоянную составляющую. За счет этого формируется система фазовой автоподстройки частоты с фильтром нижних частот, которая способна обеспечить режим синхронизации, тем самым формируя постоянный сигнал на выходе фильтра в цепи управления. Сигнал на выходе фильтра верхних частот F1 соответствует переменной y в системе (1), которая интерпретируется как мембранный потенциал нейрона. Таким образом, в нейроподобном генераторе на основе системы фазовой автоподстройки частоты формируется неавтоколебательный возбудимый режим.

Если триггер TR1 изначально находился в состоянии логической „1“, то происходит сравнение инвертированного сигнала с выхода буферного усилителя DA2 с

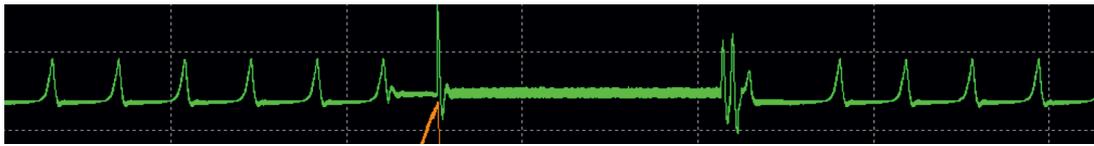


Рис. 2. Пример осциллограммы напряжения на выходе фильтра верхних частот при переходе генератора от автоколебательного к возбудимому режиму работы и обратно.

нижним порогом переключения. Нижний порог переключения подобран таким образом, что он активируется при переходе в область параметров $\gamma > 0$. В случае пересечения сигналом этого порога происходит переключение триггера TR1 из состояния логической „1“ в логический „0“, и электронный ключ размыкается, а сигнал проходит только через цепь фильтра верхних частот F1. С выхода фильтра F1 и электронного ключа SA1 сигнал поступает на равноценные входы сумматора SU1, где происходит окончательное формирование сигнала управления для реализации как автоколебательного, так и возбудимого режима. С выхода SU1 сигнал поступает на буферный усилитель DA3, который выполняет задачу согласования выхода блока фильтрации и управляющего входа генератора, управляемого напряжением. С выхода DA3 сигнал управления через выход блока фильтрации поступает на вход генератора, управляемого напряжением (VCO), тем самым замыкая петлю управления системы фазовой автоподстройки частоты.

Операторный коэффициент передачи предложенного фильтра в цепи управления может быть представлен следующим образом:

$$K(p) = \frac{T_1 p}{1 + (T_1 + T_2)p + T_1 T_2 p^2} + \frac{S}{1 + T_2 p} = \frac{S + (1 + S)T_1 p}{1 + (T_1 + T_2)p + T_1 T_2 p^2}, \quad (2)$$

где S — функция состояния триггера Шмитта TR1, принимающая значения 0 и 1. С учетом модификации фильтра в цепи управления и указанного коэффициента передачи уравнение (1) может быть переписано следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} = y, \\ \frac{dy}{d\tau} = z, \\ \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{dz}{d\tau} = \gamma - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)z - (1 + \varepsilon_1 \cos \varphi + S \varepsilon_1 \cos \varphi)y - S \sin \varphi, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$S = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{sw} \geq U_{thr2} - (U_{thr2} - U_{thr1})S_{old}, \\ 0 & \text{при } U_{sw} < U_{thr2} - (U_{thr2} - U_{thr1})S_{old}, \end{cases}$$

U_{sw} — управляющее напряжение на триггере Шмитта TR1, U_{thr1} и U_{thr2} — пороговые напряжения, при которых осуществляется переключение триггера TR1 в состояние 0 и 1 соответственно. Поскольку значение последующего состояния триггера Шмитта зависит от предыдущего, введем функцию состояния S_{old} , которая также принимает значения 0 или 1. Управляющее напряжение U_{sw} снимается с фильтра нижних частот F2 (рис. 1).

Предложенная модификация фильтра в цепи управления была реализована в виде аналоговой электрической схемы и использована для модификации предложенного ранее аппаратного нейроподобного генератора с импульсной и пачечной динамикой [10]. Для демонстрации наличия автоколебательного и возбудимого режимов работы получены осциллограммы напряжения на выходе фильтра верхних частот F1 при переходе из области параметров $\gamma > 0$ в область $\gamma < 0$ и обратно (рис. 2).

Осциллограмма на рис. 2 демонстрирует исчезновение колебаний и установление постоянного сигнала при переходе из области параметров $\gamma > 0$ в область $\gamma < 0$, а также возникновение автоколебаний при обратном изменении параметров. Перестройка параметра γ осуществлялась за счет изменения частоты опорного генератора системы фазовой автоподстройки частоты.

Были выполнены разбиения сечений пространства параметров электронного нейроподобного генератора на области с различным динамическим поведением, представленные на рис. 3. Обозначение областей различных динамических режимов на рис. 3 соответствует обозначениям, введенным в [9], и отражает количество импульсов в пачке в случае пачечных (берстовых) колебаний.

Полученные разбиения сечений пространства параметров на области с различным динамическим поведением качественно похожи на разбиения для системы (1) в области положительных γ [9]. При отрицательных γ в генераторе реализовался стационарный равновесный режим, при котором на выходе нейроподобного генератора наблюдался постоянный сигнал.

Таким образом, в работе предложена и реализована в виде радиотехнической схемы модификация нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты с полосовым фильтром в цепи управления, устраняющая базовый недостаток исходной модели — неспособность работать в возбудимом режиме. Новый динамический режим с отсутствием автоколебаний

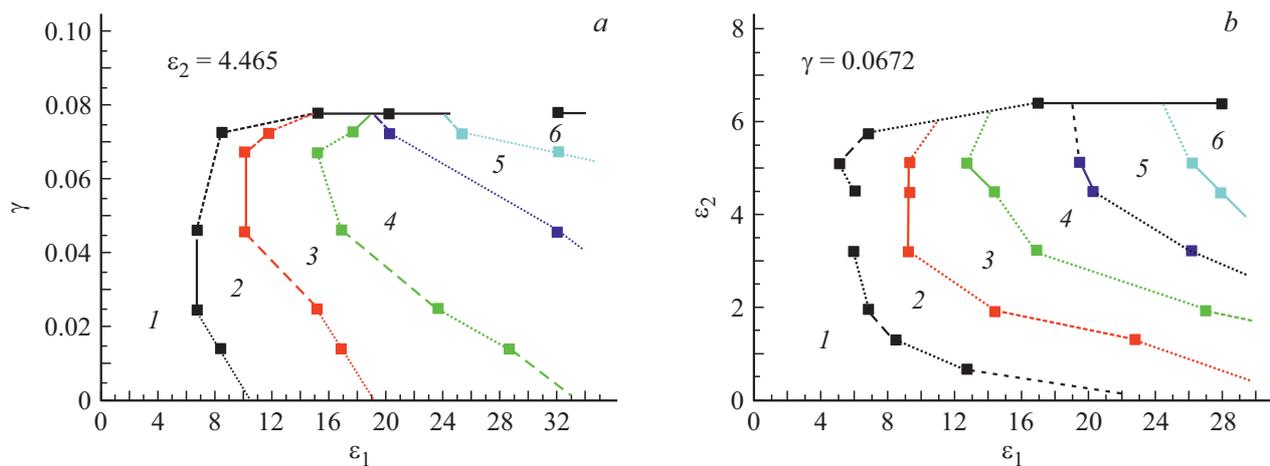


Рис. 3. Области существования различных динамических режимов в сечениях пространства параметров электронного нейроподобного генератора при фиксированных параметрах ε_2 (a) и γ (b).

в области параметров $\gamma < 0$ получен за счет введения в цепь управления электронно-управляемого ключа между фильтрами нижних и верхних частот. В эксперименте выполнено разбиение сечений пространства параметров электронного нейроподобного генератора на области существования различных динамических режимов. Наряду с существованием нового режима подтверждено наличие известных ранее автоколебательных режимов различной сложности: спайковых, берстовых и хаотических.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Президента МД-3006.2021.1.2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Zhu, T. Zhang, Y. Yang, R. Huang, *Appl. Phys. Rev.*, **7** (1), 011312 (2020). DOI: 10.1063/1.5118217
- [2] T. Wunderlich, A.F. Kungl, E. Müller, A. Hartel, Y. Stradmann, S.A. Aamir, A. Grübl, A. Heimbrecht, K. Schreiber, D. Stöckel, C. Pehle, S. Billaudelle, G. Kiene, C. Mauch, J. Schemmel, K. Meier, M.A. Petrovici, *Front. Neurosci.*, **13**, 260 (2019). DOI: 10.3389/fnins.2019.00260
- [3] C.S. Thakur, J.L. Molin, G. Cauwenberghs, G. Indiveri, K. Kumar, N. Qiao, J. Schemmel, R. Wang, E. Chicca, J.O. Hasler, J.-S. Seo, S. Yu, Yu Cao, A. van Schaik, R. Etienne-Cummings, *Front. Neurosci.*, **12**, 891 (2019). DOI: 10.3389/fnins.2018.00891
- [4] S.T. Keene, C. Lubrano, S. Kazemzadeh, A. Melianas, Y. Tuchman, G. Polino, P. Scognamiglio, L. Cinz, A. Salleo, Y. van de Burgt, F. Santoro, *Nature Mater.*, **19** (9), 969 (2020). DOI: 10.1038/s41563-020-0703-y
- [5] P. Stoliar, O. Schneegans, M.J. Rozenberg, *Front. Neurosci.*, **15**, 102 (2021). DOI: 10.3389/fnins.2021.635098
- [6] V. Erokhin, *BioNanoScience*, **10** (4), 834 (2020). DOI: 10.1007/s12668-020-00795-1
- [7] I.A. Surazhevsky, V.A. Demin, A.I. Pyasov, A.V. Emelyanov, K.E. Nikiruy, V.V. Rylkov, S.A. Shchanikov, I.A. Bordanov, S.A. Gerasimova, D.V. Guseinov, N.V. Malekhonova, D.A. Pavlov, A.I. Belov, A.N. Mikhaylov, V.B. Kazantsev, D. Valenti, B. Spagnolo, M.V. Kovalchuk, *Chaos Soliton. Fract.*, **146**, 110890 (2021). DOI: 10.1016/j.chaos.2021.110890
- [8] V.D. Shalfeev, *Radiophys. Quantum Electron.*, **11** (3), 221 (1968). DOI: 10.1007/BF01033800
- [9] М.А. Мищенко, В.Д. Шалфеев, В.В. Матросов, *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*, **20** (4), 122 (2012). DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-4-122-130
- [10] М.А. Мищенко, Д.И. Большаков, В.В. Матросов, *Письма в ЖТФ*, **43** (13), 10 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.13.44806.16737 [M.A. Mishchenko, D.I. Bolshakov, V.V. Matrosov, *Tech. Phys. Lett.*, **43** (7), 596 (2017). DOI: 10.1134/S1063785017070100].
- [11] M.A. Mishchenko, D.I. Bolshakov, A.S. Vasin, V.V. Matrosov, I.V. Sysoev, *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs.*, **69** (3), 854 (2022). DOI: 10.1109/TCSII.2021.3122892
- [12] E.M. Izhikevich, *Int. J. Bifurc. Chaos.*, **10** (6), 1171 (2000). DOI: 10.1142/S0218127400000840