

Схема делителя частоты в виде цепочки однонаправленно связанных генераторов нейроподобной активности

М. А. Сусоров¹✉, И. В. Сысоев^{1,2}, М. В. Корнилов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н. Г. Чернышевского, Россия

E-mail: ✉susorovm@gmail.com, kornilovmv@gmail.com, ivssci@gmail.com

Поступила в редакцию 03.07.2026, принята к публикации 14.07.2026,
опубликована онлайн 15.07.2026

Аннотация. Цель настоящего исследования — изучение возможности работы в качестве каскадного делителя частоты цепочки однонаправленно связанных радиотехнических генераторов, построенных путём схмотехнической реализации модифицированных уравнений системы фазовой автоподстройки частоты с нелинейной функцией связи в виде гиперболического тангенса. Методы. В работе при различных коэффициентах связи и числе элементов численно исследуется математическая модель цепочки генераторов, изучается зависимость частоты в цепочке от параметров отдельного осциллятора и параметров связи. Для реализации вынужденных колебаний для всех генераторов, кроме ведущего, параметр постоянного смещения напряжения, отвечающий в том числе за частоту колебаний, выставляется как можно меньше (с оценкой возможности реализации столь малых значений в натурном эксперименте), что на больших временах позволяет рассматривать режим собственной динамики как близкий к подпороговому возбудимому. Результаты. Для системы из двух осцилляторов (ведущий–ведомый) показано, что при амплитуде связи, равной $1/2$, реализуется устойчивый режим деления частоты вдвое, структурно устойчивый в широком диапазоне расстроек параметра постоянного смещения. Исследование каскадной архитектуры, содержащей до семи ведомых генераторов, выявило, что для коротких цепей (длиной до 4 звеньев) деление происходит с эффективностью, близкой к идеальной (каждое звено даёт двукратное понижение частоты). Однако при увеличении числа каскадов эффективность снижается: отношение частот соседних звеньев падает. Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании аналоговых делителей частоты и полезны для моделирования генерации низкочастотных ритмов в мозге путём преобразования более высокочастотных.

Ключевые слова: модифицированный электронный нейрон, каскадный делитель частоты, нейроморфные системы, синаптическая связь

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00406, <https://rscf.ru/project/25-22-00406/>

Для цитирования: Сусоров М. А., Сысоев И. В., Корнилов М. В. Схема делителя частоты в виде цепочки однонаправленно связанных генераторов нейроподобной активности // Известия вузов. ПНД. 2026. DOI: 10.18500/0869-6632-003229. EDN: ITPZIM

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

Frequency divider circuit as a chain of unidirectionally coupled generators of neuron-like activity

M. A. Susorov¹✉, M. V. Kornilov^{1,2}, I. V. Sysoev^{1,2}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

²Saratov State University, Russia

E-mail: ✉susorovm@gmail.com, kornilovmv@gmail.com, ivssci@gmail.com

Received 03.07.2026, accepted 14.07.2026, available online 15.07.2026

Abstract. The purpose is to investigate the possibility of a chain of unidirectionally coupled radio-frequency oscillators, constructed by means of circuit implementation of modified phase-locked loop equations with a nonlinear coupling function in the form of a hyperbolic tangent, operating as a cascade frequency divider.

Methods. In this work, the mathematical model of a chain of oscillators is numerically investigated for various coupling coefficients and numbers of elements, and the dependence of the frequency in the chain on the parameters of an individual oscillator and on the coupling parameters is studied. In order to realize forced oscillations, for all generators except the master one, the DC bias voltage parameter, which is responsible, among other things, for the oscillation frequency, is set as small as possible (with an assessment of the feasibility of achieving such small values in a physical experiment). This allows, at large times, the regime of intrinsic dynamics to be considered as close to subthreshold excitable behavior.

Results. For a system of two oscillators (master–slave), it is shown that at a coupling amplitude of 1/2, a stable frequency-division-by-two regime is realized, which is structurally stable over a wide range of detunings of the DC bias parameter. Investigation of a cascade architecture containing up to seven slave generators revealed that for short chains (up to four stages long), the division occurs with efficiency close to ideal (each stage provides a twofold frequency reduction). However, as the number of cascades increases, the efficiency decreases: the frequency ratio of adjacent stages drops

Conclusion. The obtained results can be used in the design of analog frequency dividers and are useful for modeling the generation of low-frequency rhythms in the brain by converting higher-frequency ones.

Keywords: modified electronic neuron, cascade frequency divider, neuromorphic systems, synaptic coupling

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-22-00406, <https://rscf.ru/project/25-22-00406/>

For citation: Susorov MA, Sysoev IV, Kornilov MV. Frequency divider circuit as a chain of unidirectionally coupled generators of neuron-like activity. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2026. DOI: 10.18500/0869-6632-003229

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

Введение

Построение математической модели нейрона головного мозга – это актуальная задача современной науки. Существует множество моделей, построенных с точки зрения биофизического подхода на основе рассмотрения всех основных трансмембранных токов, начиная с работы Ходжкина и Хаксли [1] и включая ряд следующих классических работ, где представлены упрощённые модели [2–5], и заканчивая более современными работами, где рассматриваются конкретные типы нейронов [6]. При этом такие модели зачастую оказываются крайне сложными при построении больших сетей и требуют больших вычислительных мощностей для численного моделирования [7]. Ещё одна проблема биофизических моделей – сложность их схемотехнической реализации, если ставится задача построения сетей электронных нейронов для задач нейропротезирования или построения искусственного интеллекта. Другой подход — феноменологический [8], когда пытаются воспроизвести

динамические режимы отдельного нейрона в генераторе, построенном изначально по иным принципам. Некоторые такие модели [9, 10] оказываются довольно успешны и при относительной простоте как уравнений, так и радиоэлектронной схемы воспроизводят многие режимы реальных нейронов весьма точно. Существуют также модели, основанные на биологических (чаще всего это нейрон ФитцХью–Нагумо), но затем глубоко переработанные для упрощения схемотехнического исполнения так, что они уже далеки от прототипа, но при этом оказываются способны генерировать требуемые режимы [11].

При построении феноменологических моделей аналоговые генераторы в виде систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) оказались весьма успешны [12]. Впервые такая схема была предложена именно в качестве феноменологической модели нейрона в работе [9], где было показано, что она способна демонстрировать богатый набор колебательных режимов от регулярных спайков до хаотических бёрстов. При этом сам по себе аналоговый генератор, взятый авторами [9] за основу, был описан теоретически много ранее [13], но в своё время не нашёл приложений за пределами своей исходной предметной области исследования систем фазовой автоподстройки частоты. Поскольку реконструкция нелинейных функций генератора по экспериментальному сигналу, проделанная в работе [14] показала, что предложенная в [10] схема весьма неточно описывается уравнениями из [9], далее мы будем рассматривать не её, а предложенную в [15] модифицированную модель, более пригодную для прямого аналогового моделирования.

Если задачей на микро уровне является моделирование отдельного нейрона, то не менее важной макро задачей — выяснение того, каким образом простые нейронные ансамбли порождают сложную ритмическую активность. В поисках ответа исследователи всё чаще обращаются к аналогиям с радиотехническими и логическими схемами, в частности, к принципам деления частоты, которые могут быть реализованы через коллективную динамику нейронов. В последние годы предложен ряд механизмов, объясняющих этот переход. Так, модели кольцевых генераторов на основе малых ансамблей (2–8 нейронов) демонстрируют возможность управления частотой за счёт изменения синаптических задержек или числа элементов в цепи, что позволяет имитировать как стационарные ритмы, так и их патологические перестройки [16]. Концепция частотного мультиплексирования показывает, что разные информационные потоки могут передаваться по одним и тем же нейронным путям, используя различные частотные каналы, подобно тому, как радиостанции работают на разных несущих [17]. Альтернативная модель параметрического резонанса предлагает гипотезу, что частоты основных ритмов (дельта, тета, альфа, бета, гамма) связаны отношениями, близкими к удвоению, а смена состояний мозга происходит через каскадное возбуждение гармоник [18]. Несмотря на различия в деталях, все эти подходы сходятся в том, что ритмогенез является коллективным свойством сетевого взаимодействия, а не врождённым свойством одиночных нейронов, и что принципы деления и умножения частот могут служить эффективным концептуальным мостом между микро и макроуровнями организации мозга.

В данной работе рассматривается возможность применения модифицированных нейронов [15] к задачам моделирования делителя частоты и реализации каскадного делителя частоты. Такой подход позволяет получить широкий диапазон выходных частот при минимальном количестве внешних управляющих сигналов, что критически важно для нейроморфных систем с ограниченными энергетическими и вычислительными ресурсами. В данной работе исследуется вопрос, насколько эффективно цепочка таких генераторов может понижать частоту с каждым звеном, как длина цепочки влияет на устойчивость режимов деления и существует ли предел, когда дальнейшее добавление элементов теряет смысл.

1. Методика

В работе рассматриваются связанные однонаправленной связью модифицированные осцилляторы, предложенные в [15], построенные на основе уравнений для системы ФАПЧ. В качестве нелинейной характеристики фазового детектора была выбрана функция $\text{th}(\phi)$, а первое уравнение модифицировано явным переключением направления интегрирования $s(\phi)$, которое ограничивает изменения фазы в диапазоне $[-\pi/2; \pi/2]$:

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= s(\phi)y, \\ \dot{y} &= z, \\ \varepsilon_1 \varepsilon_2 \dot{z} &= \gamma - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)z - y + \varepsilon_1 \text{th}(\phi)y + I_{syn}, \\ \begin{cases} s(\phi) = 1, & \text{при } \phi \leq -\pi/2, \\ s(\phi) = -1, & \text{при } \phi \geq \pi/2, \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — отвечают за параметры полосового фильтра, γ — за начальную расстройку (накачку) системы. Связь между осцилляторами вносилась через I_{syn} и определялась следующим образом:

$$I_{syn,i} = \sum_{j=1}^N C_{i,j} \theta(y_j), \quad (2)$$

где $C_{i,j}$ — это коэффициенты, определяющие отсутствие (значение 0) или наличие (значение 1) направленной связи от j -го осциллятора к i -му. Таким образом выбор $C_{i+1,i} = 1 \ \forall i = \overline{0, n-2}$ (n — число элементов в цепочке), и $C_{i,j} = 0$ во всех остальных случаях, позволил получить архитектуру исследуемой системы в виде цепочки связанных однонаправленной связью генераторов (рис. 1). Функция $\theta(y)$ определяла синаптическую связь между генераторами и задавалась следующим образом:

$$\theta(y) = \frac{1}{d} \cdot \text{th}(y), \quad (3)$$

где вещественный множитель d выбирался из значений узлов сетки, получавшейся в результате разбиения интервала $[2^{-1}; 2^4]$ на 40 отрезков в логарифмическом масштабе. Интегрирование системы ОДУ проводилось методом Рунге–Кутты второго порядка, поскольку система содержала разрывную функцию.

В численном эксперименте параметры $\varepsilon_1 = 4.5$, $\varepsilon_2 = 10$ были зафиксированы для всех осцилляторов в системе. Для ведущего генератора, который в схеме на рис. 1 изображен под номером 0, параметр $\gamma_0 = 0.075$, что позволило получить периодический спайковый режим колебаний, временной ряд и фазовый портрет которого представлены на рис. 2 (а, б). Для всех ведомых осцилляторов параметры γ_i выбирались равными для $i = \overline{1, 7}$ и варьировались от 10^{-5} до 10^{-2} . Этот выбор обусловлен тем, что в модифицированной системе [15] нет чисто возбудимого режима, а в оригинальной [9] такой режим достигается за счет добавления полосового фильтра в цепи управления [19]. Поэтому, с точки зрения моделирования динамики биологических систем, где все процессы идут на конечных временах, устанавливая малое значение γ , можно получить период колебаний ведомых осцилляторов $T_i \gg T_0$ и считать такой режим «подпороговым». Временной ряд и фазовый портрет изолированного ведомого осциллятора при $\gamma = 10^{-3}$ представлены на рис. 2 (с, д). Из графиков сигналов видно, что применение классического Фурье анализа для вычисления частот может быть затруднено, особенно для режимов с большими значениями периодов. Таким образом, оценку частоты сигналов было принято проводить на основе межспайковых интервалов. Для

этого был выбран порог амплитуды сигнала в 0.2 и в дальнейшем оценивалась следующая величина:

$$f = \frac{1}{\text{Median}(\Delta t_k)}, \quad (4)$$

где Δt_k – межспайковый интервал.

2. Результаты

На первом шаге численного эксперимента рассматривалась система, состоящая из двух генераторов – $0 \rightarrow 1$, при этом $\gamma_1 = 10^{-3}$. Параметр синаптической связи d изменялся в диапазоне $[0.5; 16]$. Отсекался переходный процесс 200 000 единиц безразмерного времени, после чего рассматривалось окно в 200 000 единиц безразмерного времени. Для каждого d вычислялось отношение частот f_1/f_0 . График этой зависимости представлен на рис. 3 (b), где видно, что исследуемая система работает как делитель частоты при выборе d

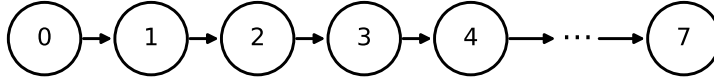


Рис. 1. Схематичное изображение цепочки осцилляторов. Осциллятор 0 — ведущий, генераторы с 1 по 7 — ведомые.

Fig. 1. Schematic representation of the oscillator chain. Oscillator 0 is the driving one, generators 1 through 7 are the driven ones.

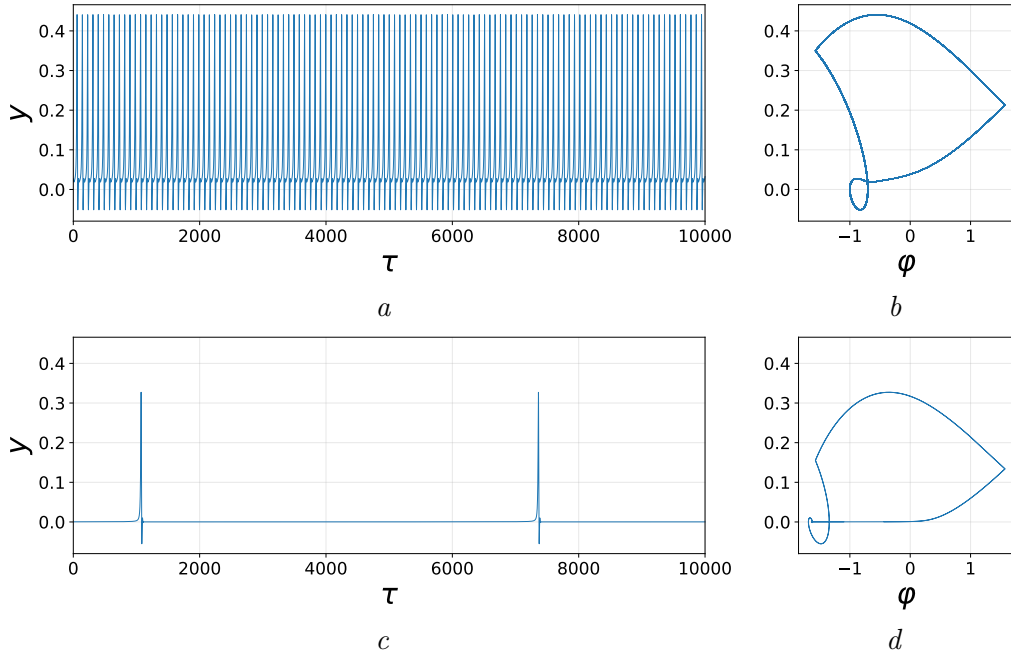


Рис. 2. Временной ряд и фазовый портрет осциллятора (a), (b) — ведущего, (c), (d) — изолированного ведомого.

Fig. 2. Time series and phase portrait of an oscillator: (a), (b) — driving, (c), (d) — isolated driven.

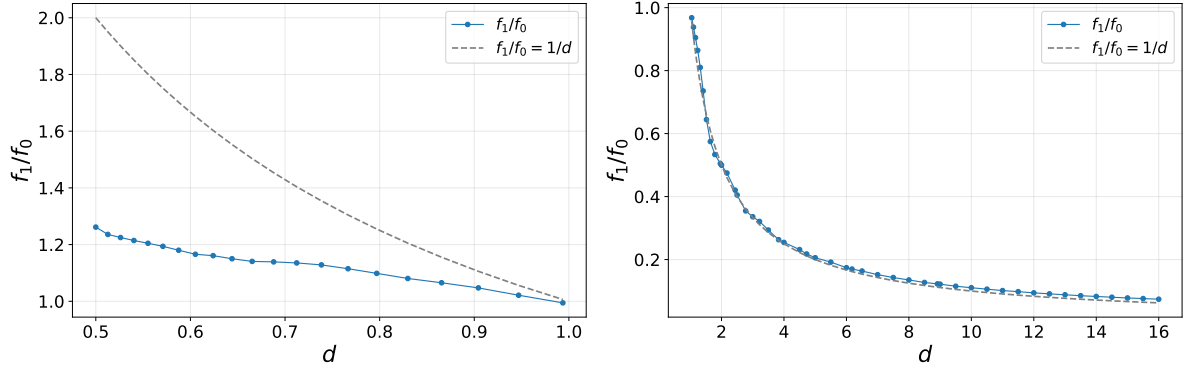


Рис. 3. График зависимости отношения частот f_1/f_0 от значения множителя связи d при $\gamma_0 = 0.075$, $\gamma_1 = 10^{-3}$ (а) – когда d варьируется в диапазоне $[0.5; 1]$, (б) – в диапазоне $[1; 16]$. Линией отмечены результаты численного эксперимента, пунктиром – идеальный случай, когда отношение частот ведомого к ведущему генератору равна $1/d$.

Fig. 3. Plot of the dependence of the frequency ratio f_1/f_0 on the coupling factor d for $\gamma_0 = 0.075$, $\gamma_1 = 10^{-3}$: (a) when d varies in the range $[0.5; 1]$, (b) in the range $[1; 16]$. The solid line shows the results of the numerical experiment, the dashed line indicates the ideal case where the frequency ratio of the slave to the master oscillator equals $1/d$.

в диапазоне от 1 до 2^4 . В частности, для $d = 2$ наблюдается уменьшение частоты ведомого генератора в 2 раза. При выборе параметра $d < 1$ (рис. 3 (а)) можно увеличить частоту ведомого генератора, однако кратного увеличения не наблюдается.

Следующим этапом исследования было оценить то, как выбор параметра γ ведомого и ведущего осцилляторов влияет на эффективность работы связки генераторов как делителя частоты. Для этого был зафиксирован параметр $d = 2$, а значения γ_0 варьировались от $5 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-1} , γ_1 – от 10^{-5} до 10^{-2} . После чего оценивалась зависимость отношения собственных частот колебаний ведомого к ведущему осциллятору: f_1/f_0 . Результаты численного эксперимента представлены на графике рис. 4 – видно, что отношение частот устойчиво держится вблизи $1/2$: режим деления вдвое является структурно довольно устойчивым в широком диапазоне γ_0 и γ_1 .

В завершение данной работы было решено проверить гипотезу о возможности построения каскадного делителя частоты на основе исследуемых модифицированных электронных нейронов. Для этого в численном эксперименте была реализована архитектура связей между осцилляторами представленная на рис. 1. Число электронных нейронов в цепочке L варьировалось от 2 до 8. Для оценки эффективности реализованного каскадного делителя была предложена следующая величина:

$$\chi_d(L) = 1 + \log_d \frac{f_0}{f_{L-1}}, \quad (5)$$

которая позволит оценить насколько эффективно производится каскадное деление частоты. В частности, в идеальном случае, когда каждый каскад делит частоту ведущего осциллятора в k раз, $\chi_k(L) = L$. Таким образом, можно говорить, что при $\chi_d(L) < L$ эффективность каскадного делителя частоты ослабевает, и наоборот, если $\chi_d(L) > L$.

На рис. 5 представлена зависимость $\chi_d(L)$ от количества генераторов в цепочке: (а) в случае, когда параметры ведомых осцилляторов $\gamma_i = 10^{-3}$, $i = \overline{1, 7}$, (б) – $\gamma_i = 10^{-4}$ (частота собственных колебаний ведомых осцилляторов при $\gamma_i = 10^{-3}$ больше, чем при $\gamma = 10^{-4}$). Величина γ_0 для ведущего осциллятора была установлена в 0.075. Кругами отмечены зна-

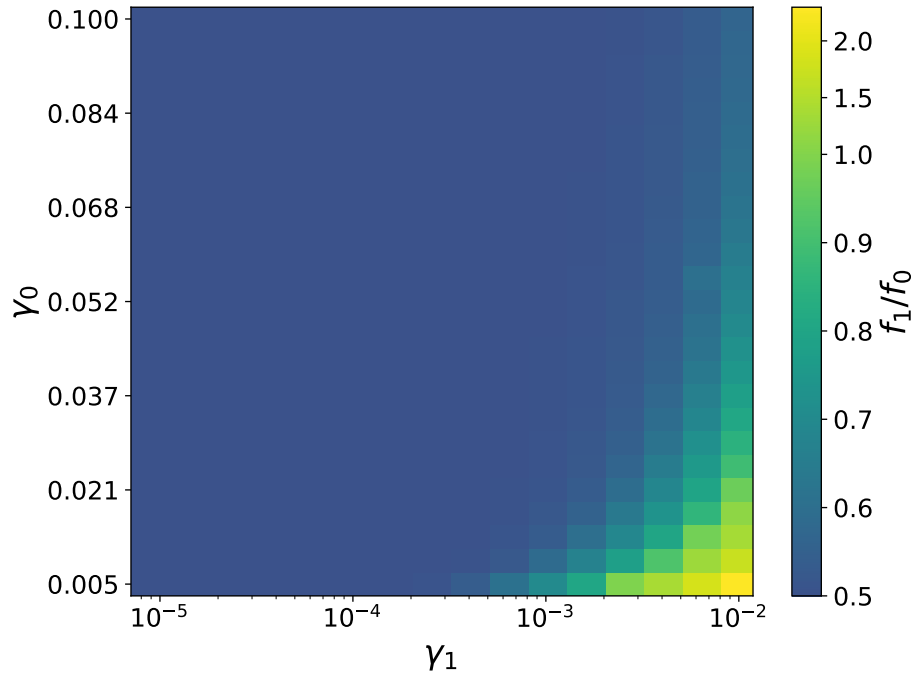


Рис. 4. Зависимость отношения собственных частот ведомого и ведущего осцилляторов (f_1/f_0) при $d = 2$. По оси абсцисс отложены значения γ_1 построенные в логарифмическом масштабе, по оси ординат — γ_0 в линейном.

Fig. 4. Dependence of the frequency ratio of the driven and driving oscillators (f_1/f_0) at $d = 2$. The abscissa axis shows the values of γ_1 plotted on a logarithmic scale, and the ordinate axis shows γ_0 on a linear scale.

чения величины χ_2 , а крестами χ_3 (для параметров синаптической связи (3) $d = 2$ и $d = 3$ соответственно). Пунктирной линией показана идеальная ситуация — когда коэффициент деления всей схемы равен произведению делителей каждого из каскадов, т.е. $\chi_d(L) = L$. Из графиков видно, что в случае с меньшим параметром ведомых осцилляторов γ_i каскадный делитель частоты показывает лучшую эффективность для каждого из выбранных значений d (рис. 5 (b)). Это связано с особенностями выбора режима колебаний для ведомых осцилляторов, который в начале работы мы определили в как «подпороговый». Данный режим характерен тем, что у него имеются собственные колебания, и их $T_i \gg T_0$. А в рамках выбранной архитектуры связей невозможно получить частоту ведомого осциллятора ниже его собственной. Стоит отметить, что при $\gamma_i = 10^{-3}$ для коротких цепей, в которых значения χ_2 для $L = \overline{2, 4}$ и χ_3 для $L = \overline{2, 3}$ совпадают с эталонной зависимостью $\chi_d(L) = L$: каждое звено делит частоту ровно в d раз, и деление накапливается каскадно. При $\gamma_i = 10^{-4}$ максимальная длина эффективной каскадной цепочки генераторов увеличивается до 7 при $d = 2$ и до 5 при $d = 3$.

Заключение

В работе предложена схема делителя частоты на основе цепочки последовательно однонаправленно связанных генераторов, построенных путём схемотехнической реализации системы ФАПЧ с полосовым фильтром. Такие генераторы могут рассматриваться как феноменологические модели нейронов, поскольку способны генерировать периодические спайки,

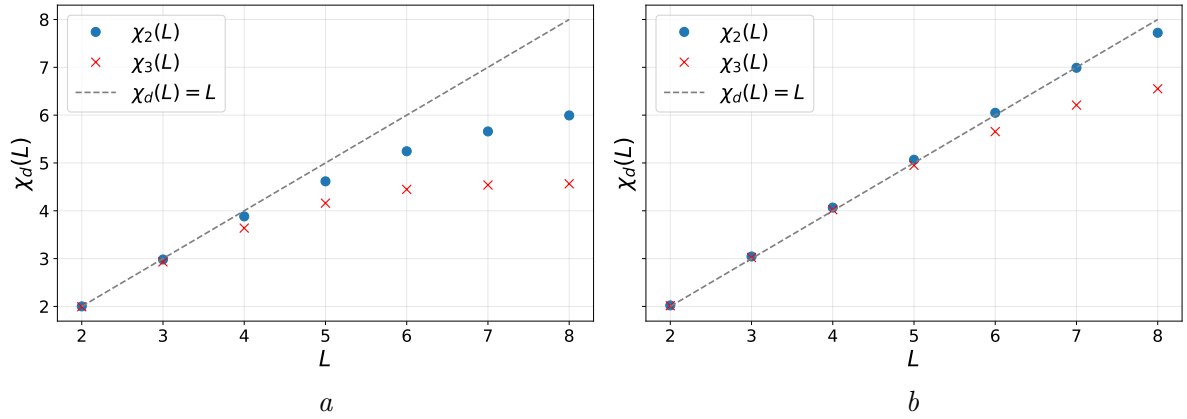


Рис. 5. График зависимости величины χ_d от длины цепи генераторов L а) — при параметре ведомых осцилляторов $\gamma_i = 10^{-3}$, б) — при $\gamma_i = 10^{-4}$; кружками отмечены значения $\chi_d(L)$ при значении параметра синаптической связи $d = 2$, крестами — при $d = 3$, пунктирной линией — идеальный случай $\chi_d(L) = L$.

Fig. 5. Plot of the quantity χ_d versus the generator chain length L : (a) for the parameter of the driven oscillators $\gamma_i = 10^{-3}$, (b) — for $\gamma_i = 10^{-4}$; circles mark the values of $\chi_d(L)$ for the synaptic coupling parameter $d = 2$, crosses — for $d = 3$, dashed line shows the ideal case $\chi_d(L) = L$.

бёрсты и хаотические бёрсты. Генераторы соединяются сигмоидной функцией связи (3) по аналогии с реальными нейронами [20, 21]. Построенная таким образом цепочка позволяет делить колебания пропорционально изменению коэффициента связи, который в радиотехнической натурной реализации можно задать с помощью потенциометра. Так, при выборе параметра связи $d = 2$ для двух нейронов отношение частот ведомого и ведущего осцилляторов устойчиво сохраняется на уровне $1/2$ в широком диапазоне расстроек параметров γ обоих генераторов, что свидетельствует о структурной устойчивости данного режима. Это важное свойство позволяет рассматривать такую связку как надёжный элементарный делитель, пригодный для включения в более сложные каскадные схемы.

При построении каскадного делителя, состоящего из $L - 1$ ведомых генераторов (общая длина цепи L варьировалась от 2 до 8 генераторов), было показано, что длина цепочки, эффективно выполняющей требуемую функцию, зависит от частоты собственных колебаний используемых электронных нейронов. Однако в случае натурного эксперимента возможности уменьшения значения параметра γ ограничены. Поэтому для реализации на практике лучше рассматривать вариант представленный на рис. 5 (а), где видно, что эффект «насыщения» наступает тем раньше, чем больше значение параметра синаптической связи d . Данный эффект достигается за счет того, что частота вынужденных колебаний начинает приближаться к собственной частоте ведомых электронных нейронов, которые из-за ограничений модели даже в выбранном в работе «подпороговом» режиме обладают собственными колебаниями. Тем не менее, общее деление частоты, которое можно реализовать в рамках предложенной схемы, составляет до 64 раз при использовании 8 генераторов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке аналоговых нейроморфных устройств, где требуется точное деление частоты, а также для создания генераторных решёток с управляемым спектром. Представленная схема также может быть рассмотрена как модель генерации низкочастотных ритмов из более высокочастотных в реальном мозге, например, как механизм преобразования гамма-активности в тета- или дельта-ритм. Чтобы говорить об этом более уверенно, необходимо проверить возможность такого преобразования на других моделях нейронов, как это было сделано в работе [22], где рассмотрен другой возможный механизм.

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований можно выделить:

- поиск способов компенсации потери эффективности в длинных цепочках, например, введением дополнительной отрицательной обратной связи или вариацией параметров отдельных каскадов, а также за счёт изменения нелинейной функции генератора или параметров;
- экспериментальную верификацию на реальных электронных схемах;
- обобщение модели на случай двунаправленной связи и сетей более сложной топологии.

Список литературы

1. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // J Physiol. 1952; 117(4):500-544. DOI: 10.1113/jphysiol.1952.sp004764
2. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophysical Journal. 1961; 1:446–446. DOI: 10.1016/s0006-3495(61)86902-6
3. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proc. Ire. 1962; 50:2061–2070. DOI: 10.1109/JRPROC.1962.288235
4. Morris C, Lecar H. Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber. // Biophys J. 1981; 35(1):193–213. DOI: 10.1016/S0006-3495(81)84782-0
5. E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons // IEEE Transactions on Neural Networks. 2003; 14(6):1569-1572. DOI: 10.1109/TNN.2003.820440
6. Yoshida M., Hayashi H. Emergence of sequence sensitivity in a hippocampal CA3–CA1 model // Neural Networks. 2007; 20(6):653–667. DOI: 10.1016/j.neunet.2007.05.003
7. Bugnon T, Mayner WG, Cirelli C, Tononi G. Sleep and wake in a model of the thalamocortical system with Martinotti cells // European Journal of Neuroscience. 2022; 59(4):703–736, DOI: 10.1111/ejn.15836
8. Schmidt R, LaFleur KJ, de Reus MA, van den Berg LH, van den Heuvel MP. Kuramoto model simulation of neural hubs and dynamic synchrony in the human cerebral connectome // BMC Neurosci. 2015; 16:54. DOI: 10.1186/s12868-015-0193-z
9. Мищенко М. А., Шалфеев В. Д., Матросов В. В. Нейроноподобная динамика в системе фазовой синхронизации // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012; 20(4):122-130. DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-4-122-130
10. M. A. Mishchenko, D. I. Bolshakov, and V. Matrosov, Instrumental implementation of a neuronlike generator with spiking and bursting dynamics based on a phase-locked loop. Tech. Phys. Lett., 2017; 43:596–599. DOI: 10.1134/S1063785017070100
11. Takaishvili L.V., Ponomarenko V.I., Sysoev I.V. Simple tunable generator of neuron-like activity // Chaos, Solitons & Fractals. 2025; 196:116316. DOI: 10.1016/j.chaos.2025.116316
12. Barton Taylor, et al. A Subthreshold Time-Domain Analog Spiking Neuron With PLL-Based Leak Circuit and Capacitive DAC Synapse // IEEE Solid-State Circuits Letters. 2024; 1-1. DOI: 10.1109/LSSC.2024.3384762
13. Shalfeev, V.D. Investigation of the dynamics of a system of automatic phase control of frequency with a coupling capacitor in the control loop // Radiophys Quantum Electron. 1968; 11:221-226. DOI: 10.1007/BF01033800
14. Mikhail A. Mishchenko, Denis I. Bolshakov, Alexander S. Vasin, Valery V. Matrosov, and Ilya V. Sysoev. Identification of phase-locked loop system from its experimental time series // IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs. 2022. 69(3):854-858. DOI: 10.48550/arXiv.2102.09638

15. Takaishvili, L. V., Ponomarenko, V. I., Kornilov, M. V., Sysoev, I. V. Electronic Bursting Neuron: design, equations and hardware implementation // arXiv preprint arXiv:2607.02122. <https://arxiv.org/abs/2607.02122> DOI: 10.48550/arXiv.2607.02122
16. Егоров Н. М., Сысоева М. В., Пономаренко В. И., Корнилов М. В., Сысоев И. В. Кольцевой генератор нейроподобной активности с перестраиваемой частотой // Известия вузов. ПНД. 2023; 31(1):103-120. DOI: 10.18500/0869-6632-003025
17. Si, H., Sun, X. Inter-areal transmission of multiple neural signals through frequency-division-multiplexing communication // Cogn Neurodyn. 2023; 17:1153–1165. DOI: 10.1007/s11571-022-09914-y
18. Magazù, S., Caccamo, M.T. Parametric resonance brain model // Sci Rep. 2024; 14:24657. DOI: 10.1038/s41598-024-76610-8
19. Большаков Д.И., Мищенко М.А., Матросов В.В., Сысоев, И.В. Электронный нейроподобный генератор с возбудимым и автоколебательным режимом на основе системы фазовой автоподстройки частоты // Письма в Журнал технической физики. 2022; 48(9):23-26. DOI: 10.21883/PJTf.2022.09.52446.19094
20. Kopell N., Ermentrout G.B., Whittington M.A., Traub R.D. Gamma rhythms and beta rhythms have different synchronization properties // Proc Natl Acad Sci USA. 2000; 97(4):1867–72. DOI: 10.1073/pnas.97.4.1867
21. Marreiros A.C., Daunizeau J., Kiebel S.J., Friston K.J. Population dynamics: variance and the sigmoid activation function // Neuroimage. 2008; 42(1):147–57. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2008.04.239
22. Kapustnikov, A.A., Sysoev, I.V., Sysoeva, M.V. Network motifs in talamocortical system model responsible for delta-rhythm generation // Chaos Solitons and Fractals. 2025; 200(3):117081. DOI: 10.1016/j.chaos.2025.117081

References

1. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // J Physiol. 1952; 117(4):500-544. DOI: 10.1113/jphysiol.1952.sp004764
2. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophysical Journal. 1961; 1:446–446. DOI: 10.1016/s0006-3495(61)86902-6
3. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proc. Ire. 1962; 50:2061–2070. DOI: 10.1109/JRPROC.1962.288235
4. Morris C, Lecar H. Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber. // Biophys J. 1981; 35(1):193–213. DOI: 10.1016/S0006-3495(81)84782-0
5. E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons // IEEE Transactions on Neural Networks. 2003; 14(6):1569-1572. DOI: 10.1109/TNN.2003.820440
6. Yoshida M., Hayashi H. Emergence of sequence sensitivity in a hippocampal CA3–CA1 model // Neural Networks. 2007; 20(6):653–667. DOI: 10.1016/j.neunet.2007.05.003
7. Bugnon T, Mayner WG, Cirelli C, Tononi G. Sleep and wake in a model of the thalamocortical system with Martinotti cells // European Journal of Neuroscience 2022; 59(4):703–736, DOI: 10.1111/ejn.15836
8. Schmidt R, LaFleur KJ, de Reus MA, van den Berg LH, van den Heuvel MP. Kuramoto model simulation of neural hubs and dynamic synchrony in the human cerebral connectome // BMC Neurosci. 2015; 16:54. DOI: 10.1186/s12868-015-0193-z
9. Mishchenko M. A., Shalfeev V. D., Matrosov V. V. Neuron-like dynamics in phase-locked loop // Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2012; 20(4):122-130. DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-4-122-130

10. M. A. Mishchenko, D. I. Bolshakov, and V. Matrosov, Instrumental implementation of a neuronlike generator with spiking and bursting dynamics based on a phase-locked loop. *Tech. Phys. Lett.*, 2017; 43:596–599. DOI: 10.1134/S1063785017070100
11. Takaishvili L.V., Ponomarenko V.I., Sysoev I.V. Simple tunable generator of neuron-like activity // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2025; 196:116316. DOI: 10.1016/j.chaos.2025.116316
12. Barton Taylor, et al. A Subthreshold Time-Domain Analog Spiking Neuron With PLL-Based Leak Circuit and Capacitive DAC Synapse // *IEEE Solid-State Circuits Letters*. 2024; 1-1. DOI: 10.1109/LSSC.2024.3384762
13. Shalfeev, V.D. Investigation of the dynamics of a system of automatic phase control of frequency with a coupling capacitor in the control loop // *Radiophys Quantum Electron*. 1968; 11:221-226. DOI: 10.1007/BF01033800
14. M. A. Mishchenko, Denis I. Bolshakov, Alexander S. Vasin, Valery V. Matrosov, and Ilya V. Sysoev. Identification of phase-locked loop system from its experimental time series // *IEEE Transactions on circuits and systems—II: express briefs*. 2022. 69(3):854-858. DOI: 10.48550/arXiv.2102.09638
15. Takaishvili, L. V., Ponomarenko, V. I., Kornilov, M. V., Sysoev, I. V. Electronic Bursting Neuron: design, equations and hardware implementation // *arXiv preprint arXiv:2607.02122*. <https://arxiv.org/abs/2607.02122> DOI: 10.48550/arXiv.2607.02122
16. Egorov N. M., Sysoeva M. V., Ponomarenko V. I., Kornilov M. V., Sysoev I. V. Ring generator of neuron-like activity with tunable frequency // *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2023; 31(1):103-120. DOI: 10.18500/0869-6632-003025, EDN: AXLDTJ
17. Si, H., Sun, X. Inter-areal transmission of multiple neural signals through frequency-division-multiplexing communication // *Cogn Neurodyn*. 2023; 17:1153–1165. DOI: 10.1007/s11571-022-09914-y
18. Magazù, S., Caccamo, M.T. Parametric resonance brain model // *Sci Rep*. 2024; 14:24657. DOI: 10.1038/s41598-024-76610-8]
19. D.I. Bolshakov, M.A. Mishchenko, V.V. Matrosov, I.V. Sysoev Electronic neuron-like generator with excitable and self-oscillating modes on the basis of phase-locked loop // *Technical Physics Letters*. 2022; 48(5):17-20. DOI: 10.21883/TPL.2022.05.53470.19094
20. Kopell N., Ermentrout G.B., Whittington M.A., Traub R.D. Gamma rhythms and beta rhythms have different synchronization properties // *Proc Natl Acad Sci USA*. 2000; 97(4):1867–72. DOI: 10.1073/pnas.97.4.1867
21. Marreiros A.C., Daunizeau J., Kiebel S.J., Friston K.J. Population dynamics: variance and the sigmoid activation function // *Neuroimage*. 2008; 42(1):147–57. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2008.04.239
22. Kapustnikov, A.A., Sysoev, I.V., Sysoeva, M.V. Network motifs in talamocortical system model responsible for delta-rhythm generation // *Chaos Solitons and Fractals*. 2025; 200(3):117081. DOI: 10.1016/j.chaos.2025.117081



Сусоров Максим Анатольевич – родился в 2001 году в Краснодарском крае. Окончил Физико-механический институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, бакалавриат (2023) и магистратуру (2026), по направлению «Прикладная математика и информатика». Стажер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальные когнитивные исследования» Института физики и математики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Россия, 195251 Санкт-Петербург, Политехническая, 29
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: susorovm@gmail.com
ORCID: 0009-0002-8168-6472
AuthorID (eLibrary.Ru): 1306584



Сысоев Илья Вячеславович – родился в Саратове (1983). Окончил факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского по специальности «физика» (2004, СГУ). Защитил диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (2007, СГУ) и доктора физико-математических наук (2019, ИРЭ) по специальности «Радиофизика». Имеет учёное звание профессора по специальности «Радиофизика» (2024, СГУ). Заведующий кафедрой высшей математики СПбПУ, профессор кафедры системного анализа и автоматического управления СГУ. Научные интересы – исследование сигналов биологической природы методами нелинейной динамики, исследование эффективности и модернизация подходов к анализу сигналов. Автор более 100 статей, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Россия, 195251 Санкт-Петербург, Политехническая, 29
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: ivssci@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9203-5504
AuthorID (eLibrary.Ru): 128457



Корнилов Максим Вячеславович – родился в Саратове (1988). Окончил Лицей математики и информатики (2005), механико-математический факультет (2009, бакалавр математики) и факультет нано- и биомедицинских технологий (2011, магистр техники и технологий) Саратовского государственного университета. Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «Радиофизика» (2015, СГУ). Доцент кафедры высшей математики СПбПУ и доцент кафедры системного анализа и автоматического управления СГУ. Научные интересы – анализ временных рядов, математическое моделирование биологических процессов, автоматическое распознавание изображений, компьютерное зрение. Автор 17 статей, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Россия, 195251 Санкт-Петербург, Политехническая, 29
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: kornilovmv@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1634-9007
AuthorID (eLibrary.Ru): 681980