

01.5

Управляемая нейроморфная динамика систем фазовой синхронизации

© Л.А. Цырульникова¹, А.Р. Сафин^{1,2}¹ Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: Neuy_Lucy@mail.ru

Поступило в Редакцию 31 мая 2021 г.

В окончательной редакции 24 июля 2021 г.

Принято к публикации 24 июля 2021 г.

Исследована нейроморфная динамика бесфильтровой системы фазовой синхронизации с фазовой модуляцией опорного генератора. Переходом от импульсной односпайковой динамики к пачечной берстовой динамике можно легко управлять, изменяя глубину и частоту фазовой модуляции, а также коэффициент усиления по кольцу системы фазовой синхронизации. Показана возможность реализации нейроморфных вычислений типа „ИЛИ“ в схеме трех систем фазовой синхронизации, взаимосвязанных через общую цепь управления. Представленные результаты могут быть использованы при проектировании реализуемых аппаратно нейроморфных сетей с повышенной стабильностью частоты, устойчивых к шумовым воздействиям.

Ключевые слова: нейроморфная динамика, системы фазовой синхронизации, логические операции.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51629.18891

В настоящее время аппаратная реализация нейроморфных вычислительных комплексов представляет заметную трудность [1]. За последние годы были предложены различные варианты практических реализаций искусственных нейроморфных систем (ИНС), основанных на различных физических принципах, например полупроводниковые, оптические, магнитные и т.д. [2]. Преимуществом таких систем является высокое быстродействие, низкое энергопотребление и компактность. Однако к технологии построения ИНС кроме перечисленных выше также предъявляется требование обеспечения стабильности. В этом случае фазовые системы являются привлекательными для построения ИНС, так как с их помощью можно обеспечить требуемую стабильность при широком диапазоне синхронизации. Дополнительным доводом в пользу использования систем фазовой синхронизации (СФС) для построения ИНС является возможность реализации в наномасштабе (например, на основе спинтроники [3,4] и магноники [5]) отдельных элементов: фазового детектора, перестраиваемого генератора и фильтра, а также возможность пространственного масштабирования [6]. Далее под „нейроморфной“ динамикой мы будем понимать такое поведение динамической системы, которое демонстрирует спайковую или берстовую активность, управляемую путем изменения параметров системы [2].

Ранее в работе [7] было предложено использовать СФС как базовую ячейку ИНС со спинтронным осциллятором в качестве подстраиваемого генератора для задачи распознавания изображений. При этом сами осцилляторы не демонстрируют нейроморфного поведения, т.е. спайковой активности, и работают в режиме

автоколебаний, а СФС используется для стабилизации фазы осциллятора. При этом весовые коэффициенты при нейрообработке задаются коэффициентами усиления в цепи управления СФС [8]. Впервые возможность генерации спайковой и берстовой активности с помощью СФС была описана в работах [9,10]. При выборе в цепи управления СФС фильтра второго порядка и при определенном образом подобранных параметрах цепи обратной связи была показана возможность реализации нейроморфной динамики. Для технического упрощения реализации ИНС в настоящей работе предлагается использовать бесфильтровую СФС с фазовой модуляцией опорного генератора. При этом для генерации спайковой активности необходима устойчивая работа СФС в режиме вблизи порога асинхронных колебаний. Все зависимости в работе получены в результате численного моделирования.

Для описания нейроморфного поведения СФС необходимо записать дифференциальное уравнение для текущей разности фаз $\phi = \varphi_{VCO} - \varphi_{RO}$, где φ_{RO} , φ_{VCO} — текущие фазы опорного генератора с заданным законом модуляции и генератора, управляемого напряжением (рис. 1, а). На выходе фазового дискриминатора (ФД) формируется сигнал ошибки $e = E \sin \phi$, пропорциональный разности фаз ϕ и максимальному вырабатываемому ФД напряжению E . Управление фазой колебаний генератора, управляемого напряжением, происходит через цепь управления (ЦУ), образованную фильтром с коэффициентом передачи $K(d/dt)$. Дифференциальное уравнение для разности фаз ϕ в бесфильтровой СФС с синусоидальной характеристикой фазового дискриминатора и фазовой модуляцией опорного генератора имеет

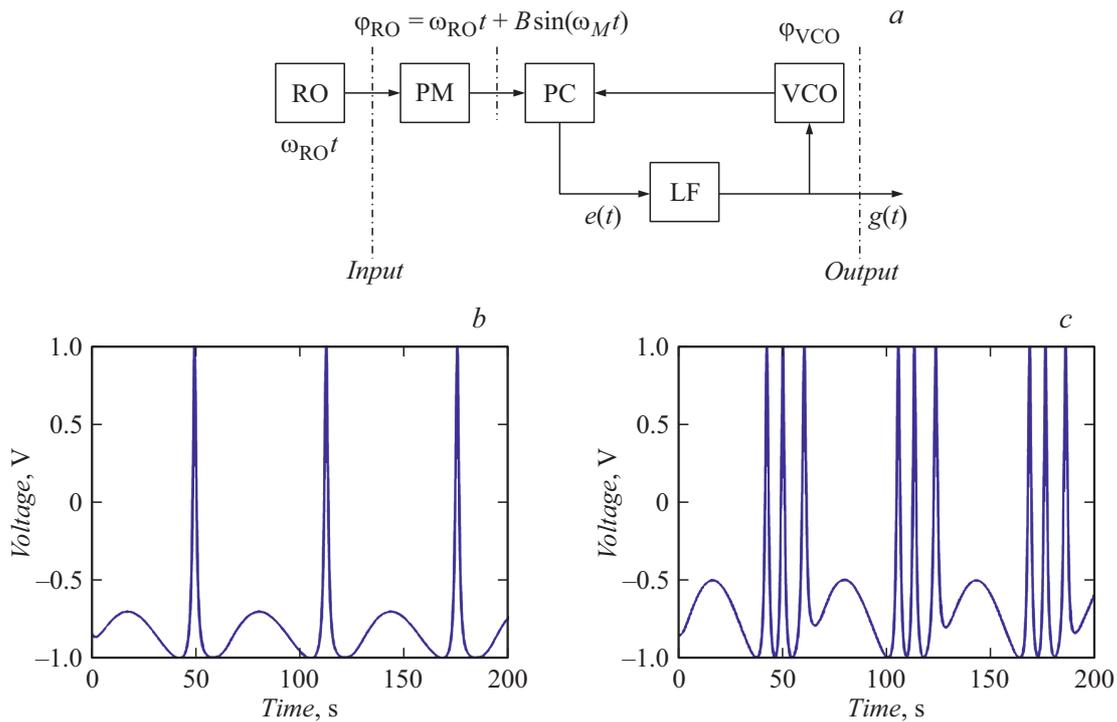


Рис. 1. *a* — структурная схема СФС с фазовой модуляцией входного сигнала. RO — опорный генератор, PM — фазовый модулятор, PC — фазовый дискриминатор (компаратор), LF — цепь управления, VCO — генератор, управляемый напряжением. *b, c* — осциллограммы напряжения (численное моделирование) на выходе цепи управления единичной бесфильтровой СФС при $\Omega = 1$, $\gamma_0 = 0.9$, $\alpha = 0.2$, $\omega_M = 0.1$ (*b*) и $\alpha = 0.4$, $\omega_M = 0.1$ (*c*).

вид [11,12]:

$$\frac{1}{\Omega} \frac{d\phi}{dt} + \sin \phi = \gamma_0 - \alpha \cos(\omega_M t), \quad (1)$$

где $\Omega = SE$ — полоса синхронизма бесфильтровой СФС, S — наклон регулировочной характеристики генератора, управляемого напряжением, $\gamma_0 = (\omega_{VCO} - \omega_{RO})/\Omega$ — относительная разность частот синхронизируемых колебаний, ω_M — частота модуляции, $\alpha = \frac{B\omega_M}{\Omega}$ — амплитуда вынуждающей силы, B — девиация фазы.

Рассмотрим динамику системы вблизи порога асинхронных колебаний при $\gamma_0 = 0.9$. На рис. 1 представлены осциллограммы напряжений с выхода ФД $e(t) = E \sin(\phi(t))$, полученные путем численного решения дифференциального уравнения (1). В частности, при фиксированной частоте фазовой модуляции $\omega_M = 0.1$ на рис. 1, *b, c* представлены осциллограммы для двух значений амплитуд модуляции $\alpha = 0.2$ и 0.4 , что соответствует режимам односпайковой и берстовой активности. На рис. 2 представлено разбиение плоскости параметров (γ_0, α) на области, соответствующие отсутствию нейроморфного поведения, спайковой и берстовой генерации.

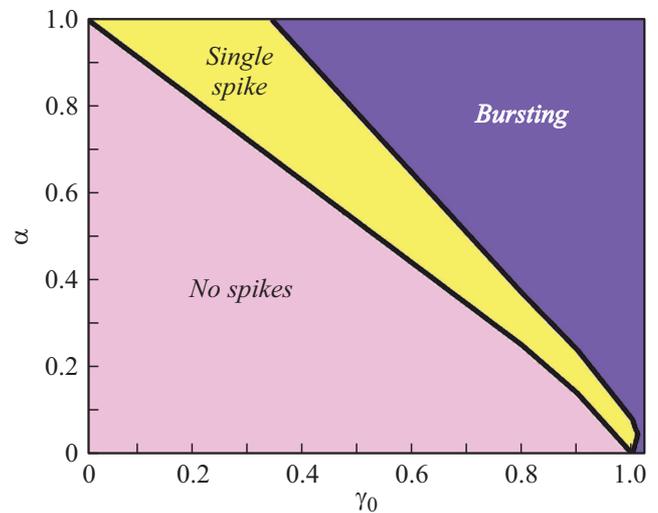


Рис. 2. Разбиение плоскости параметров (γ_0, α) на области, соответствующие отсутствию нейроморфного поведения, спайковой и берстовой генерации.

модулирующего сигнала α , что с технической точки зрения более удобно, чем изменение частоты.

Перейдем к анализу возможности реализации нейроморфных вычислений на основе взаимосвязанных СФС, работающих в режиме спайковой генерации (рис. 3, *a*). Для этого свяжем через взаимную цепь управления

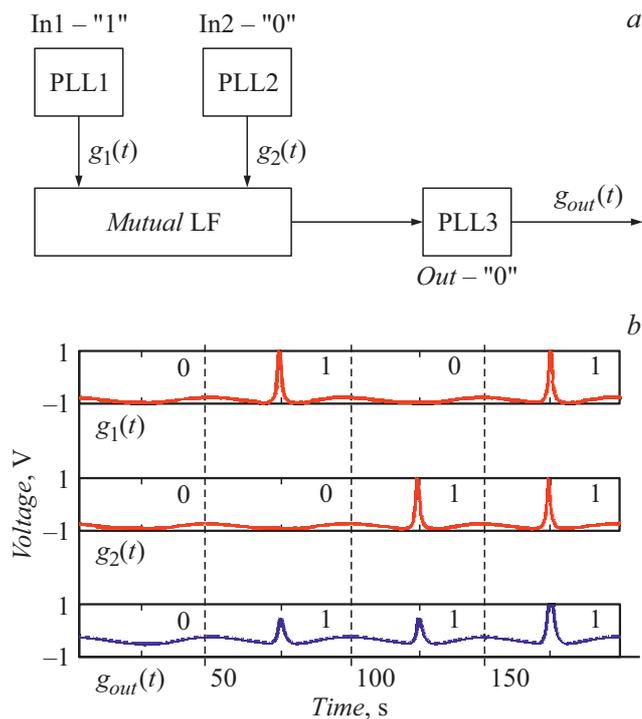


Рис. 3. Схема двух взаимосвязанных СФС через общую цепь управления, работающих в режиме спайковой генерации, с третьей СФС, работающей как решающее устройство (для примера показана операция логического „ИЛИ“), для реализации нейроморфных вычислений (а) и осциллограммы (численное моделирование) напряжений на выходе ФД при реализации операции „ИЛИ“ (b). PLL — phase locked loop, Mutual LP — mutual loop filter. Параметры моделирования: $\Omega_j = 1$ ($j = 1, 2, 3$), $\gamma_{0j} = 0.9$ ($j = 1, 2, 3$), $\omega_M = 0.1$, $\epsilon_{13} = \epsilon_{23} = 0.7$, а $\alpha_{1,2} = 0.1$ и 0.2 соответствуют логическим „0“ и „1“.

(mutual loop filter) две СФС (phase locked loops) с третьей, которая будет выступать в роли решающего устройства. Сигналы с выходов ЦУ СФС $g_{1,2}(t)$ поступают на входы взаимной ЦУ таким образом, что выходной сигнал $g_{MLF} = K_1 g_1 + K_2 g_2$ суммируется с сигналом ошибки выходной СФС. В данном случае взаимная ЦУ реализована в виде двух перемножителей и сумматора. Запишем математическую модель, описывающую динамику схемы, изображенной на рис. 3, а, в виде системы дифференциальных уравнений относительно разностей фаз $\phi_{1,2,3}$ трех СФС

$$\frac{1}{\Omega_1} \frac{d\phi_1}{dt} + \sin \phi_1 = \gamma_{01} - \alpha_1 \cos(\omega_M t), \quad (2)$$

$$\frac{1}{\Omega_2} \frac{d\phi_2}{dt} + \sin \phi_2 = \gamma_{02} - \alpha_2 \cos(\omega_M t), \quad (3)$$

$$\frac{1}{\Omega_3} \frac{d\phi_3}{dt} + \sin \phi_3 + \epsilon_{13} \sin \phi_1 + \epsilon_{23} \sin \phi_2 = \gamma_{03}. \quad (4)$$

Здесь $\epsilon_{13,23}$ — нормированные коэффициенты связи первой и второй СФС с третьей соответственно, Ω_j и γ_{0j} ($j = 1, 2, 3$) — полосы синхронизма и начальные расстройки частот СФС соответственно, $\alpha_{1,2}$ — амплитуды

модулирующих сигналов. Для остальных параметров модели (1) в (2) добавились индексы, характеризующие данную СФС. Отметим, что в третьей СФС не происходит фазовой модуляции опорного генератора. Данная модель двух связанных СФС с третьей СФС, выступающей в роли решающего устройства, может выполнять различные логические операции. В частности, на рис. 3, б представлены осциллограммы напряжений на входных СФС, уровень сигнала на которых соответствует логическим „0“ и „1“ и управляется путем изменения параметра α на каждой из СФС, а также на выходной СФС, осуществляющей операцию выбора. В данном случае уровень относительного рассогласования частот колебаний $\gamma_{0j} = 0.9$ подобран так, что реализуется таблица истинности, соответствующая логическому „ИЛИ“ при равных параметрах связи $\epsilon_{13}, \epsilon_{23} = 0.7$. Аналогичным образом можно реализовать и другие логические операции, включая большое количество входов и выходов. Анализ фазовой стабильности при таких операциях является актуальной задачей для дальнейшего исследования.

Таким образом, исследована нейроморфная динамика бесфильтровой системы фазовой синхронизации с фазовой модуляцией опорного генератора. Переходом от импульсной односпайковой к берстовой динамике можно управлять, изменяя глубину и частоту фазовой модуляции, а также коэффициент усиления по кольцу системы фазовой синхронизации. Показана возможность реализации нейроморфных вычислений типа „ИЛИ“ в схеме двух систем фазовой синхронизации, взаимосвязанных через общую цепь управления. Представленные результаты могут быть использованы при проектировании реализуемых аппаратно наноразмерных нейроморфных сетей с повышенной стабильностью частоты, устойчивых к шумовым воздействиям [3,4,7].

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта „Разработка устройств формирования, приема и обработки сигналов, выполненных на основе магнитных наноструктур“ при поддержке гранта НИУ „МЭИ“ на реализацию программ научных исследований „Энергетика“, „Электроника, радиотехника и IT“ и „Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника“ в 2020–2022 гг.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Soman, Jayadeva, M. Suri, Big Data Analytics, **1**, 15 (2016). DOI: 10.1186/s41044-016-0013-1
- [2] D. Marković, A. Mizrahi, D. Querlioz, J. Grollier, Nature Rev. Phys., **2**, 499 (2020). DOI: 10.1038/s42254-020-0208-2

- [3] A. Mitrofanov, A. Safin, N. Udalov, M. Kapranov, J. Appl. Phys., **122**, 123903 (2017). DOI: 10.1063/1.5004117
- [4] J. Torrejon, G. Khalsa, J. Torrejon, M. Riou, F.A. Araujo, P. Bortolotti, V. Cros, J. Grollier, S. Tsunegi, K. Yakushiji, A. Fukushima, H. Kubota, S. Yuasa, G. Khalsa, M.D. Stiles, D. Querlioz, Nature, **547**, 428 (2017). DOI: 10.1038/nature23011
- [5] А.В. Садовников, А.А. Грачев, С.А. Одинцов, А.А. Мартышкин, В.А. Губанов, С.Е. Шешукова, С.А. Никитов, Письма в ЖЭТФ, **108** (5), 332 (2018). DOI: 10.1134/S0370274X1817006X
- [6] Л.А. Цырульникова, Б.П. Судеев, А.Р. Сафин, Изв. вузов России. Радиоэлектроника, **23** (3), 32 (2020). DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-32-40
- [7] D.E. Nikonov, G. Csaba, W. Porod, T. Shibata, D. Voils, D. Hammerstrom, I.A. Young, G.I. Bourianoff, IEEE J. Explor. Solid-State Computat. Devices Circuits, **1**, 85 (2015). DOI: 10.1109/JXCDC.2015.2504049
- [8] F.C. Hoppensteadt, E.M. Izhikevich, IEEE Trans. Neural Networks, **11** (3), 734 (2000). DOI: 10.1109/72.846744
- [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] В.Д. Шалфеев, В.В. Матросов, *Нелинейная динамика систем фазовой синхронизации* (Изд-во Нижегородского государственного университета, Н. Новгород, 2013).
- [11] В. Линдсей, *Системы синхронизации в связи и управлении* (Сов. радио, М., 1978).
- [12] *Системы фазовой синхронизации*, под ред. В.В. Шахгильдяна, Л.Н. Белюстиной (Радио и связь, М., 1982).