01

Возбуждение и подавление колебаний в цепочке однонаправленно связанных элементов с нейроноподобной динамикой

© Л.А. Сконженко, Л.В. Красичков

Саратовский государственный университет
E-mail: lvk@cas.ssu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 11 ноября 2006 г.

Представлены результаты численных исследований особенностей распространения импульсов в цепочке модельных нейронов Розе–Хиндмарш с однонаправленной связью при наличии собственной динамики у элементов цепочки. Проведено исследование основных режимов колебаний в модельной цепочке в зависимости от величины параметра связи. На основе детального анализа бассейнов притяжения устойчивой неподвижной точки и периодического аттрактора модельного нейрона предложено объяснение механизма активации и подавления колебаний в цепочке при воздействии прямоугольным импульсом.

PACS: 05.45.Xt, 87.80.-y, 87.18.Sn

В последние десятилетия достигнут значительный прогресс в исследовании поведения биофизических и нейрофизиологических систем на основе методов нелинейной динамики [1–3]. Предпринимаются попытки применения результатов, полученных для систем биофизической природы при построении систем обработки и передачи информации [1,2,4–6]. Особое внимание уделяется анализу моделей нейрофизиологических систем, учитывающих специфику активности биологического нейрона и описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом принимают во внимание, что динамика уединенного биологического нейрона характеризуется участками быстрого и медленного изменения переменной состояния. Как правило, на временнóй реализации биологического нейрона можно выделить три характерных области [1]: 1) „покой" — изменения переменной состояния не происходит, 2) „спайки" (spikes) — резкое изменение переменной состояния, 3) „берсты" (bursts) — группы спайков. Разнообразные динамические режимы модельных нейронов описываются системой Розе–Хиндмарш (см., например, [1,7]), которая демонстрирует берстовое и спайковое поведение уединенного нейрона, а также позволяют эффективно исследовать синхронизацию ансамблей нейронов [8–11]. Особый интерес представляют эффекты переключения колебательной активности в ансамблях нейронов под внешним воздействием [12–14]. Цель данной работы состоит в исследовании особенностей активации и подавления колебаний в линии передачи, составленной из модельных нейронов, при импульсном воздействии.

Уравнения, описывающие цепочку модельных нейронов Розе–Хиндмарш с однонаправленной связью, имеют вид

$$\begin{cases} \dfrac{dx_i}{dt} = y_i + ax_i^2 - bx_i^3 - z_i + I + \varepsilon(x_{i-1} - x_i), \\ \dfrac{dy_i}{dt} = c - dx_i^2 - y_i, \\ \dfrac{dz_i}{dt} = r\left[s(x_i - e) - z_i\right], \end{cases} \tag{1}$$

где $x(t)$ —переменная, характеризующая мембранный потенциал; $y(t), z(t)$ — переменные, характеризующие „быстрые“ и „медленные“ токи соответственно, a, b, c, d, r, s, e, I — параметры, i — номер элемента $(i = \overline{1, N})$, N — количество элементов в цепочке, ε — параметр связи. На одну из границ цепочки подается внешнее воздействие x_0. Численное моделирование системы (1) проводилось с помощью метода Рунге–Кутта 4-го порядка при шаге интегрирования $\Delta t = 0.01$ и фиксированных значениях параметров $a = 3$, $b = 1$, $c = 1$, $d = 5$, $r = 0.0021$, $s = 4$, $e = -1.6$.

Для выявления особенностей переключения колебательной активности в модельной цепочке (1) был проведен детальный анализ динамики изолированного модельного нейрона при $\varepsilon = 0$, $N = 1$ для (1). Проведенный анализ показал, что изолированная система Розе–Хиндмарш в интервале значений управляющего параметра $I \in [1.269; 1.289]$ демонстрирует бистабильное поведение. При этом в фазовом пространстве сосуществуют два аттрактора: неподвижная устойчивая точка и предельный цикл. Предельный цикл соответствует периодической активности с определенным числом спайков на берсте, устойчивая точка соответствует состоянию, в котором нейрон не генерирует ни спайков на берсте, ни берстов (рис. 1, a). Для выявления значений начальных условий ($x(0)$, $y(0)$, $z(0)$), при которых в изолированной системе Розе–Хиндмарш

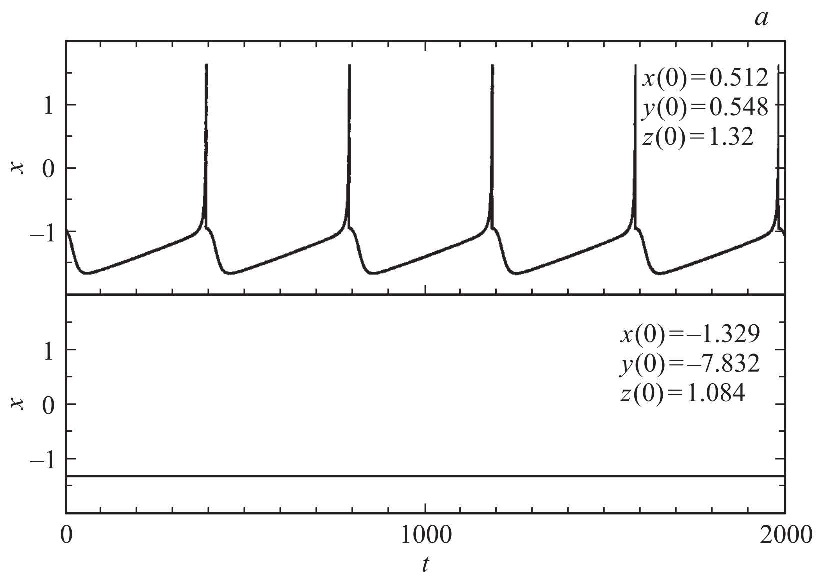
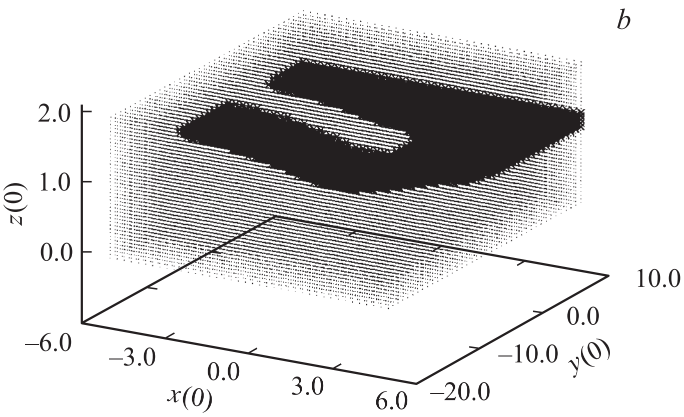


Рис. 1. Временны́е реализации изолированной системы Розе–Хиндмарш при значении параметра $I = 1.269$ для различных значений начальных условий $(x(0),\ y(0),\ z(0))$ (a). Бассейны притяжения аттракторов системы при $I = 1.269$ (b). Бассейны притяжения аттракторов системы на плоскости $(x(0),\ y(0))$ при фиксированном значении переменной $z(0) = 1.084$ (c).

реализуется один из аттракторов, были построены бассейны притяжения аттракторов (рис. 1, b). На рис. 1, b светлым оттенком отмечен бассейн притяжения предельного цикла, темным — бассейн притяжения устойчивой неподвижной точки. Видно, что бассейн притяжения устойчивой неподвижной точки представляет собой слабо деформированный лист, что позволяет рассматривать эволюцию бассейнов пряжения аттракторов только на плоскости $(x(0),\ y(0))$ при малом изменении параметра I. На рис. 1, c представлены бассейны притяжения этих аттракторов на плоскости $(x(0),\ y(0))$ при фиксированном значении переменной $z(0) = 1.084$. При воздействии на уединенный элемент Розе–Хиндмарш сигналом, имеющим форму прямоугольного импульса заданной амплитуды и длительности, возможен переход между двумя аттракторами.



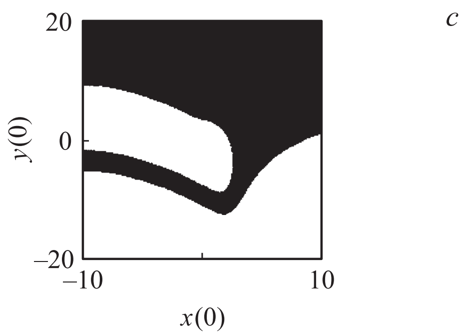


Рис. 1 (*продолжение*).

В ходе численных экспериментов выявлено, что прямоугольный импульс очень малой амплитуды ($A \sim 0.03$) и длительности ($\Delta T \sim 1$) позволяет переключать состояние уединенного элемента Розе–Хиндмарш. Это свидетельствует о том, что аттракторы в определенной части фазового пространства находятся на границах бассейнов притяжения, и даже слабое внешнее воздействие приводит к переходу изображающей точки из одной области притяжения в другую. Показано, что основную роль при переключении динамики играет момент внесения внешнего воздействия. Для исследования влияния момента внесения прямоугольного импульса была построена плоскость параметров „амплитуда внешнего воздействия–время внесения внешнего воздействия" (рис. 2, a). Начальные условия выбирались в области притяжения предельного цикла, т. е. модельный нейрон в отсутствие внешнего воздействия демонстрировал периодические колебания с одним спайком на берсте. Момент внесения импульса t_0 отсчитывался в единицах безразмерного времени от одного из максимальных значений переменной x (от одного из спайков). Диапазон изменения t_0 в этом случае равнялся межспайковому интервалу ($t_0 \in [0; 396]$). Черным цветом (рис. 2, a) обозначены области значений параметров импульса, для которых импульс внешнего воздействия переводит нейрон из состояния периодической активности в состояние покоя, белым — области, для которых импульс внешнего воздействия не изменяет существенно динамику нейрона на длительный интервал времени (переключения состояния не происходит).

На рис. 2, b представлена плоскость параметров „амплитуда импульса–длительность импульса". При построении рис. 2, b рассматривалась ситуация, когда до внесения сигнала нейрон находился в состоянии покоя. Белые области соответствуют значениям амплитуды и длительности импульса внешнего воздействия, при которых нейрон переходит из состояния покоя в состояние периодических колебаний. Черным цветом обозначены области на плоскости параметров импульса внешнего воздействия, для которых нейрон не переходит из состояния покоя в состояние периодической активности.

Представленные результаты исследований активности изолированного модельного нейрона Розе–Хиндмарш позволяют провести анализ активации и подавления колебаний в цепочке нейронов (1).

В качестве управляющего параметра был выбран параметр связи ε. Входной сигнал $x_0(t)$ представлял собой однополярный прямоугольный импульс заданной амплитуды A и длительности ΔT. Для исследования особенностей распространения сигнала в линии для различных значений амплитуды A входного импульса и параметра связи ε были построены пространственно-временны́е диаграммы. Начальные условия для элементов цепочки задавались в области притяжения предельного цикла, т. е. уединенный элемент демонстрировал периодические колебания с одним спайком на берсте. В зависимости от величины параметра связи в цепочке устанавливались различные режимы колебаний: 1) при слабой силе связи первый элемент демонстрировал периодические

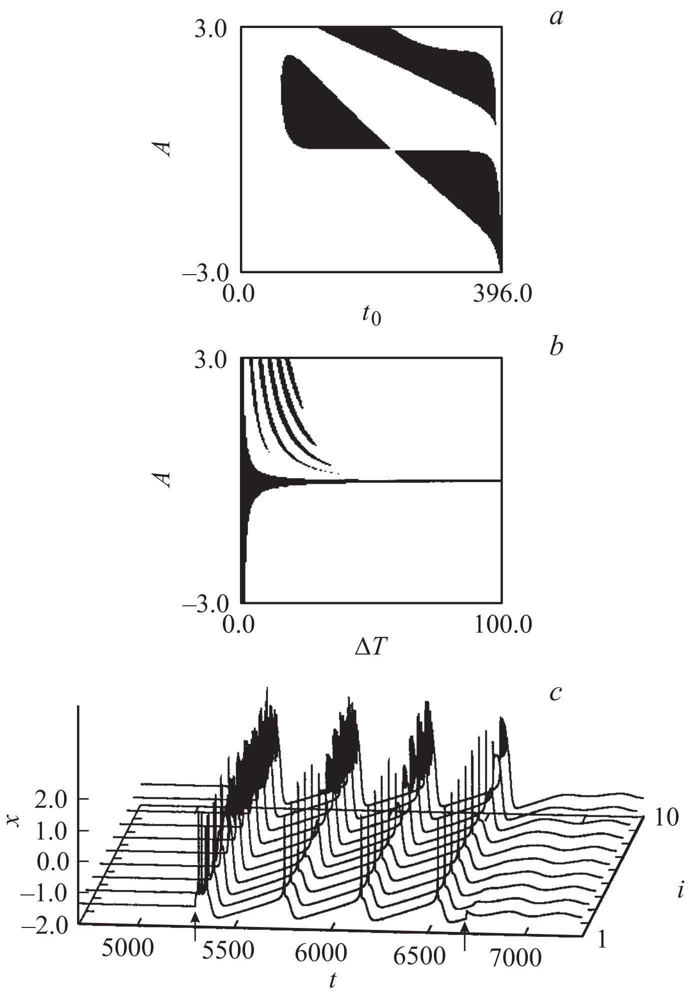


Рис. 2. Плоскость параметров „амплитуда импульса внешнего воздействия—время внесения внешнего воздействия“ (a). Плоскость параметров „амплитуда импульса внешнего воздействия—длительность импульса внешнего воздействия“ (b). Пространственно-временнáя диаграмма при $I = 1.269$, $\varepsilon = 0.9$, $A = 1.0$, $\Delta T = 4$, где стрелками обозначены моменты внесения импульсов внешнего воздействия (c).

колебания, остальные элементы не генерировали спайковой и берстовой активности; 2) при средней силе связи элементы цепочки демонстрировали непериодическое поведение; 3) при большой величине силы связи все элементы в цепочке демонстрировали периодическое поведение с одним спайком на берсте и постоянным фазовым сдвигом от элемента к элементу.

Полученные результаты позволяют рассмотреть случай, когда начальные условия для элементов цепочки задаются в области притяжения устойчивой неподвижной точки (элементы в отсутствие внешнего воздействия находились в состоянии покоя). Показана возможность переключения активности всех элементов цепочки при воздействии прямоугольного импульса заданной амплитуды и длительности. На рис. 2, *c* приведена пространственно-временна́я диаграмма для данного случая. Первый импульс возбуждает колебания во всех элементах цепочки, второй — переводит элементы цепочки в состояние покоя.

Таким образом, в работе показана возможность переключения колебательной динамики в цепочке модельных элементов Розе–Хиндмарш при воздействии прямоугольным импульсом и представлен анализ условий для такого переключения.

Список литературы

[1] *Абарбанель Г.Д.И., Рабинович М.И., Селверстон А., Баженов М.В., Хуэрта Р., Сущик М.М., Рубчинский Л.Л.* // УФН. 1996. Т. 166. № 4. С. 363–390.
[2] *Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Нейман А.Б., Стрелкова Г.И., Шиманский-Гайер Л.* Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 544 с.
[3] *Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В.* Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2005. 212 с.
[4] *Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С.* Введение в синергетику. М.: Наука, 1990.
[5] *Яхно В.Г.* // Нелинейные волны 2002 / Под ред. Гапонова-Грехова А.В., Некоркина В.И. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2003. С. 90–114.
[6] *Mayer J., Schuster H.G., Claussen J.C.* // Phys. Rev. E. 2006. V. 73. P. 031 908.
[7] *Hindmarsh J.L., Rose R.M.* // J. Proc. Roy. Soc. Lon. B. 1984. V. 221. P. 87.
[8] *Elson R.C., Selverston A., Huerta R., Rulkov N.F., Rabinovich M.I., Abarbanel H.D.I.* // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. N 25. P. 5692–5695.

[9] *Szucs A., Varona P., Volkovskii A.R., Abarbanel H.D.I., Rabinovich M.I., Selverston A.I.* // NeuroReport. 2000. V. 11. N 3. P. 1–7.
[10] *Pinto R.D., Varona P., Volkovskii A.R., Szucs A., Abarbanel H.D.I., Rabinovich M.I.* // Phys. Rev. E. 2000. V. 62. N 2. P. 2644–2656.
[11] *Rabinovich M.I., Torres J.J., Varona P., Huerta R., Wiedman P.* // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. N 2. P. R1130–R1133.
[12] *Rabinovich M.I., Volkovskii A., Lecanda P., Huerta R., Abarbanel H.D.I., Lauret G.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. N 6. P. 068 102-4.
[13] *Andreev K.V., Krasichkov L.V.* // Nonlinear Phenomena in Comples Systems. 2003. V. 6. N 4. P. 878–884.
[14] *Сконженко Л.А., Красичков Л.В.* // Изв. РАН. Сер. Физ. 2003. Т. 67. № 12. С. 1697–1700.