

01.5

Оценка амплитуды внешнего периодического воздействия при помощи малой спайковой нейронной сети в радиофизическом эксперименте

© В.И. Пономаренко^{1–3}, Д.Д. Кульминский^{1–3,¶}, А.В. Андреев³, М.Д. Прохоров^{1,3}¹ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия² Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия³ Университет Иннополиса, Иннополис, Россия

¶ E-mail: kulminskydd@gmail.com

Поступило в Редакцию 25 августа 2020 г.

В окончательной редакции 25 августа 2020 г.

Принято к публикации 2 ноября 2020 г.

Предложен метод, позволяющий с помощью малой сети, состоящей из осцилляторов с нейроподобной динамикой, оценить амплитуду внешнего периодического воздействия. Метод основан на зависимости числа спайков, генерируемых сетью, от амплитуды внешнего сигнала. Эффективность метода продемонстрирована в радиофизическом эксперименте на примере сети, состоящей из генераторов ФитцХью–Нагумо.

Ключевые слова: спайковая нейронная сеть, нейроподобные осцилляторы, модель ФитцХью–Нагумо, радиофизический эксперимент.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.04.50636.18529

Интерес к спайковым нейронным сетям обусловлен тем, что в отличие от других искусственных нейронных сетей они используют в качестве узлов биологически реалистичные модели нейронов. Наиболее известными из таких моделей нейронов являются модели Ходжкина–Хаксли, ФитцХью–Нагумо, Моррис–Лекара и Хиндмарша–Роуза [1,2]. Биологическая адекватность спайковых нейронных сетей и наличие физиологического смысла модельных параметров позволяют эффективно моделировать с помощью таких сетей процессы обработки и запоминания информации головным мозгом [3,4]. В настоящее время спайковые нейронные сети широко используются на практике для автоматического распознавания речи [5], обработки звуковой и зрительной информации [6,7], задач обучения [8] и управления роботами [9].

Одним из основных источников информации об активности нейронов является частота следования спайков, которая представляет собой общее число спайков (импульсов), генерируемых нейронами сети в единицу времени. Известно, что внешнее периодическое воздействие, подаваемое на нейронную сеть, способно привести к изменению частоты следования спайков и, следовательно, повлиять на процесс обработки информации нейронами [10–13]. Важной задачей современной нейрофизиологии и робототехники является оценка параметров сенсорной информации, принимаемой в качестве внешнего воздействия. В настоящей работе предложен и реализован в радиофизическом эксперименте способ оценки амплитуды внешнего периодического воздействия с помощью спайковой нейронной сети. Такая сеть может быть использована в качестве входного слоя

нейронной сети системы управления движением роботов в изменяющихся условиях внешней среды.

В качестве базового элемента спайковой нейронной сети мы выбрали нейроподобный осциллятор, описываемый уравнениями ФитцХью–Нагумо [14], связали осцилляторы редкими связями и подали на каждый из них одинаковое внешнее гармоническое воздействие. Динамика осцилляторов описывается при этом модельными уравнениями следующего вида:

$$\varepsilon \dot{u}_i(t) = u_i(t) - \frac{u_i^3(t)}{3} - v_i(t) + \sum_{j=1(j \neq i)}^N k_{i,j} (u_j(t) - u_i(t)) + B \sin(2\pi f t), \quad \dot{v}_i(t) = u_i(t) + a_i, \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, N$ — номер осциллятора, N — количество осцилляторов, $u_i(t)$ описывает динамику мембранного потенциала нейрона, $v_i(t)$ отвечает за восстановление потенциала покоя мембраны, ε — параметр соотношения временных масштабов, являющийся обычно малой величиной, a_i — пороговый параметр, $k_{i,j}$ — коэффициент связи, действующей со стороны j -го элемента на i -й, B и f — амплитуда и частота внешнего гармонического воздействия соответственно. В отсутствие связей и внешнего воздействия осциллятор (1) при $a_i > 1$ находится в локально устойчивом состоянии равновесия и является возбуждимым, а при $a_i < 1$ демонстрирует периодические автоколебания, возникающие в результате бифуркации Хопфа при $a_i = 1$ [14]. Колебания переменной $u_i(t)$ при $a_i < 1$ качественно воспроизводят спайки, генерируемые настоящими нейронами.

Для экспериментального исследования системы (1) нами была построена оригинальная радиотехническая

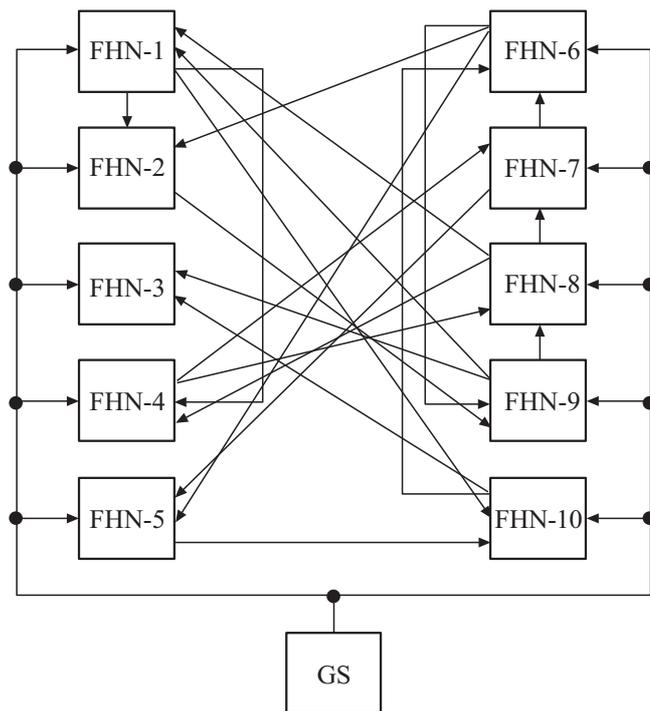


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. FHN — генераторы ФитцХью–Нагумо, GS — генератор внешнего гармонического сигнала. Стрелками показаны связи между генераторами ФитцХью–Нагумо и внешнее воздействие, подаваемое на генераторы.

установка, блок-схема которой представлена на рис. 1. Для осуществления связей между десятью генераторами ФитцХью–Нагумо, принципиальные схемы которых мы здесь не приводим, был использован предложенный нами недавно подход, в основе которого лежит программный способ формирования сигналов, отвечающих за связь между генераторами [15]. Такой подход позволяет задать произвольную архитектуру и тип связей между генераторами.

Все генераторы ФитцХью–Нагумо были выбраны неидентичными и отличались величиной параметра a_i , который принимал значения от $a_1 = 1.1 \text{ V}$ до $a_{10} = 1.325 \text{ V}$ с шагом 0.025 V . Без внешнего воздействия при таких значениях a_i генерация спайков отсутствует. Архитектура связей была выбрана таким образом, чтобы на каждый из генераторов действовало по два других генератора, номера которых были выбраны случайно. Это означает, что в уравнении (1) из девяти коэффициентов связи $k_{i,j}$ для каждого генератора семь коэффициентов $k_{i,j}$ были равны нулю. Значения всех ненулевых коэффициентов связей в сети были выбраны одинаковыми: $k_{i,j} = 0.01$, а параметр $\varepsilon = 0.1 \text{ ms}$. Мы исследовали режимы генерации спайков в зависимости от амплитуды и частоты внешнего воздействия.

На рис. 2 приведены экспериментальные временные реализации динамических переменных $u_i(t)$ всех генераторов исследуемой спайковой нейронной сети при по-

стоянных значениях параметра внешнего гармонического воздействия $y(t)$ ($B = 0.2 \text{ V}$ и $f = 240 \text{ Hz}$), временная реализация которого тоже показана на рисунке. Частота f выбрана вблизи собственной частоты генераторов, на которой происходит генерация спайков. Из рис. 2 видно, что при таком воздействии первый генератор демонстрирует периодические спайки, частота следования которых совпадает с частотой внешнего гармонического сигнала. Второй генератор также демонстрирует спайковую активность, однако количество спайков немного меньше, чем у первого генератора. Колебания генераторов, имеющих номера с третьего по шестой, содержат пачки из четырех, трех и двух последовательных спайков. Во временных реализациях седьмого и восьмого генераторов одиночные спайки чередуются с подпороговыми колебаниями малой амплитуды, а девятый и десятый генераторы вообще не генерируют спайки (рис. 2).

При уменьшении амплитуды B внешнего воздействия количество спайков, генерируемых нейроподобными осцилляторами (1), уменьшается, а при увеличении B количество спайков в сети растет. Это свойство спайковой нейронной сети можно использовать для оценки амплитуды внешнего периодического воздействия, пода-

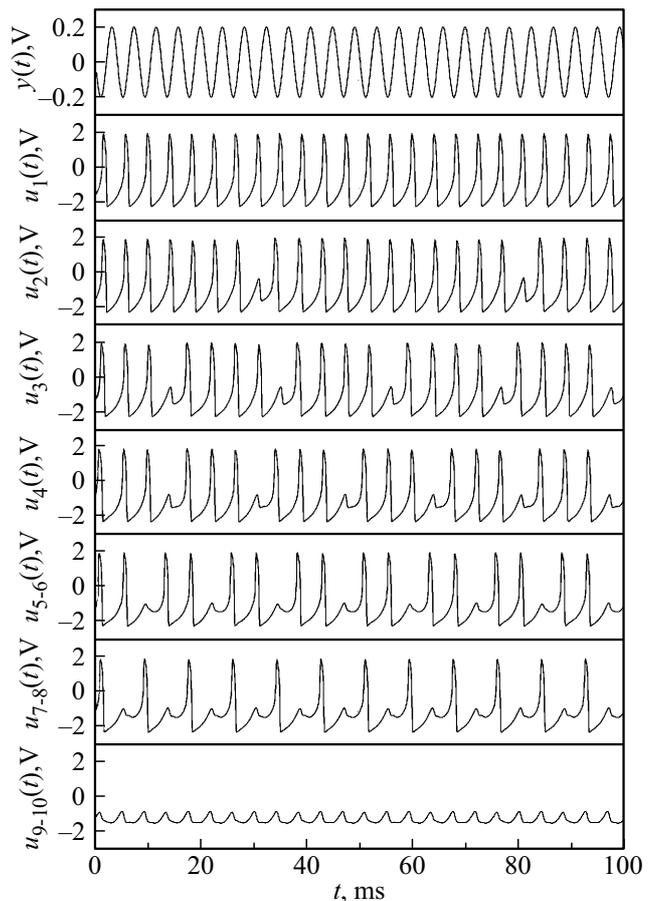


Рис. 2. Временной ряд внешнего гармонического воздействия $y(t) = B \sin(2\pi f t)$ при $B = 0.2 \text{ V}$, $f = 240 \text{ Hz}$ и экспериментальные временные ряды динамических переменных $u_i(t)$ генераторов сети.

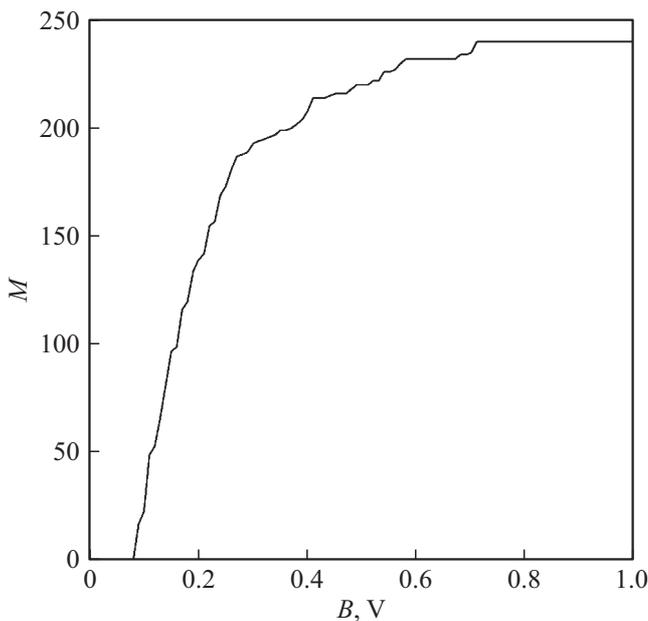


Рис. 3. Зависимость количества спайков M , генерируемых сетью, от амплитуды V внешнего гармонического воздействия $y(t)$.

ваемого на ее элементы. Мы меняли в эксперименте амплитуду V гармонического воздействия от 0 до 1 V с шагом 0.01 V и подсчитывали общее количество M спайков, генерируемых всеми десятью генераторами за 100 ms при фиксированном значении V . Полученный результат представлен на рис. 3 при $f = 240$ Hz. Построенный график позволяет оценить неизвестную амплитуду V внешнего гармонического воздействия, подсчитав количество спайков M , наблюдаемых в сети. Например, если $M = 139$, то $V = 0.2$ V, что согласуется с рис. 2. Увеличение числа N осцилляторов спайковой нейронной сети позволяет повысить точность оценки амплитуды внешнего воздействия.

Исследования показывают, что предложенный способ оценки амплитуды периодического воздействия оказывается работоспособным в широком диапазоне частот внешнего воздействия и практически не зависит от количества и архитектуры связей в спайковой нейронной сети. Основным требованием метода является расстройка параметров осцилляторов, отвечающих за возбуждение спайковой активности. Коэффициенты связи $k_{i,j}$ между осцилляторами должны быть малы. При больших $k_{i,j}$ точность метода снижается, так как зависимость $M(B)$ на рис. 3 становится слишком крутой, быстро переходя от минимального к максимальному значению M . Результаты, полученные в описанном радиофизическом эксперименте, хорошо согласуются с результатами проведенных нами численных исследований системы (1). Отметим, что предложенный метод позволяет оценить с помощью спайковой нейронной сети амплитуду не толь-

ко гармонического, но и импульсного периодического воздействия.

Итак, нами предложен и экспериментально реализован способ оценки амплитуды внешнего гармонического воздействия при помощи малой спайковой нейронной сети. В качестве элементов сети использованы нейроподобные радиотехнические генераторы ФитцХью–Нагумо, расстроенные по пороговому параметру, отвечающему за возбуждение генератора. Показано, что количество спайков, генерируемых сетью, зависит от амплитуды внешнего стимула. Полученные результаты могут быть востребованы в робототехнике при решении задач обработки информации, связанных с управлением движением роботов, и в нейрофизиологии при использовании электрической стимуляции головного мозга [11].

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-72-30003).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.I. Rabinovich, P. Varona, A.I. Selverston, H.D.I. Abarbanel, *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 1213 (2006). DOI: 10.1103/RevModPhys.78.1213
- [2] А.С. Дмитричев, Д.В. Касаткин, В.В. Клиньшов, С.Ю. Кириллов, О.В. Масленников, Д.С. Шапин, В.И. Некоркин, *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*, **26** (4), 5 (2018). DOI: 10.18500/0869-6632-2018-226-4-5-58
- [3] R.Q. Quiroga, S. Panzeri, *Principles of neural coding* (CRC Press, 2013).
- [4] S.A. Lobov, A.V. Chernyshov, N.P. Krilova, M.O. Shamshin, V.B. Kazantsev, *Sensors*, **20**, 500 (2020). DOI: 10.3390/s20020500
- [5] D. Yu, L. Deng, *Automatic speech recognition* (Springer, 2016). DOI: 10.1007/978-1-4471-5779-3
- [6] N.K. Kasabov, *Evolving connectionist systems: the knowledge engineering approach* (Springer, 2007). DOI: 10.1007/978-1-84628-347-5
- [7] M.S. Hossain, G. Muhammad, *Information Fusion*, **49**, 69 (2019). DOI: 10.1016/j.inffus.2018.09.008
- [8] S.A. Lobov, A.N. Mikhaylov, M. Shamshin, V.A. Makarov, V.B. Kazantsev, *Front. Neurosci.*, **14**, 88 (2020). DOI: 10.3389/fnins.2020.00088
- [9] Z. Bing, C. Meschede, F. Röhrbein, K. Huang, A.C. Knoll, *Front. Neurobot.*, **12**, 35 (2018). DOI: 10.3389/fnbot.2018.00035
- [10] N. Novikov, B. Gutkin, *Phys. Rev. E*, **101**, 052408 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevE.101.052408
- [11] D.M. Eidum, C.S. Henriquez, *Chaos*, **30**, 033105 (2020). DOI: 10.1063/1.5126104

- [12] A.V. Andreev, M.V. Ivanchenko, A.N. Pisarchik, A.E. Hramov, *Chaos Solit. Fract.*, **139**, 110061 (2020). DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110061
- [13] М. Рооу, Н.А. Новиков, Д.Г. Захаров, Б.С. Гуткин, *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*, **28** (1), 90 (2020). DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-90-97
- [14] M.A. Dahlem, G. Hiller, A. Panchuk, E. Schöll, *Int. J. Bifurcat. Chaos*, **19**, 745 (2009). DOI: 10.1142/S0218127409023111
- [15] Д.Д. Кульминский, В.И. Пономаренко, И.В. Сысоев, М.Д. Прохоров, *Письма в ЖТФ*, **46** (4), 26 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.04.49046.18018 [Пер. версия: 10.1134/S1063785020020236].