

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 517.9

Аглямзянова Г.Н., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Гумерова Л.З. кандидат педагогических наук, доцент кафедры системного анализа и информатики, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Гарипова Р.Ф., магистрант, ФГБОУ ВО «Набережночелнинский государственный педагогический университет»

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация: Данная статья посвящена истории развития импульсных нейронных сетей, изучению работ ученых. Рассматриваются математические модели импульсных нейронных сетей. Ставится проблема численной реализации.

Ключевые слова: Нейронные сети, импульсные нейронные сети, спайки, система дифференциальных уравнений, численное решение.

Одним из важнейших направлений в современном мире является изучение искусственных нейронных сетей. Создание математических моделей искусственных нейронных сетей и изучение их свойств представляет собой важнейший метод исследования в области нейротехнологий. За их основу берут биологические нейроны. Все механизмы, которые обрабатывает мозг человека, являются своего рода электрическими сигналами, проходящими через нервную систему. Основным элементом является нейрон. Нейрон или нервная клетка - это электрически возбудимая клетка, которая общается с другими клетками через специализированные соединения, называемые синапсами.

Актуальность данного исследования заключается в необходимости подробного изучения, и дальнейшего внедрения нейронных сетей для решения ряда задач в экономике, математике и информатике.

Работа над теориями искусственных нейронных сетей велась уже давно. Первыми рассматривали У. Мак-Каллок и В. Питтс, а также Д. Хебб и Дж. Экклс. За это время были разработаны различные модели нейрона, однако они не соответствовали свойствам биологического.

С помощью исследований ученых выделили три поколения искусственного интеллекта:

1. Нейронные сети первого поколения получились не похожими на биологические нейроны. Такие модели носят название перцептроны.
2. Второе поколение планировало глубокое обучение и сверточные сети, однако они также не были близки к биологическим.
3. Третье поколение – импульсные (спайковые) нейронные сети. Биологическую правдоподобность можно назвать одним из основных принципов их построения.

Наиболее точный процесс передачи спайков от одного нейрона к другому были рассмотрены учеными А. Ходжкином и Э. Хаксли. Их модель представляет собой нелинейную систему из четырех дифференцированных уравнений в соответствии с рисунком 1.

$$c \frac{dV}{dt} = g_{Na} m^3 h (V_{Na} - V) + g_K n^4 (V_K - V) + g_l (V_l - V),$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m_{\infty}(V) - m}{\tau_m(V)},$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{h_{\infty}(V) - h}{\tau_h(V)},$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_{\infty}(V) - n}{\tau_n(V)},$$

Рис. 1. Уравнения модели Ходжкина-Хаксли

Здесь V - потенциал нейрона, c – емкость мембраны. Введем обозначения

$$I_{Na} = m^3 h g_{Na} (V_{Na} - V)$$

$$I_K = n^4 g_K (V_K - V)$$

$$I_l = g_l (V_l - V)$$

Тогда I_l – ток утечки, I_{Na} – ток, обусловленный протеканием ионов натрия через мембрану, I_K – ток, обусловленный протеканием ионов калия через мембрану. Здесь $V_{Na}, V_K, V_l, g_{Na}, g_l$ являются константами модели, которые определяют равновесные потенциалы ионных каналов, а также их максимальные проводимости соответственно. Нужно отметить, что проводимость ионных каналов имеет нелинейную зависимость от трансмембранного потенциала. Именно в силу этого возникает сложная динамика в модели. Для описания данного эффекта в модель введены так называемые воротные переменные m, h, n . Важно, что первое уравнение на рисунке 1 описывает динамику отдельного нейрона. В это уравнение добавляются еще слагаемые, если рассматривать взаимодействие между нейронами:

$$I_i^{sin} = \sum_j G_{ij} r_j(t) (V_{syn} - V_i), \quad j \neq i, \quad j = 1, \dots, N$$

Нейроны связываются друг с другом посредством синаптических связей и передающихся по ним нервных импульсов. Константа G_{ij} определяет максимальную проводимость синаптической связи от нейрона с номером j к нейрону с номером i , V_{syn} является в модели параметром, определяющим равновесный потенциал синаптической связи. Динамические переменные r_i описывают активацию синаптической связи в результате изменения мембранного потенциала V_i :

$$\frac{dr_i}{dt} = \alpha F(V_i) (1 - r_i) - \beta r_i$$

где $F(V_i) = \frac{1}{1+e^{-\frac{10-V_i}{2}}}$ - нелинейная активационная функция; α , β константы.

С помощью этих уравнений авторы модели Ходжкина-Хаксли объясняли процессы распространения импульса по цепочки нейрона.

Коэффициенты в уравнениях подбираются экспериментально. Они представляют собой параметры скоростей калиевых и натриевых потоков, а также уровни концентрации ионов вне и внутри клеток. Выбор коэффициентов является самой сложной частью построения модели. Важно не только построить модель, но также обозначить область ее применимости. Система дифференциальных уравнений на рисунке 1 служит описанием переходного периода – генерации спайка. Авторы, Ходжин и Хаксли, не рассматривали вопрос совмещения полученных экспериментально данных с данными, полученными по математической модели после переходного периода. Ученые только успешно объясняли процесс распространения нервного импульса по волокнам.

Дальнейшее совершенствование построенной модели было связано с вопросами переноса теории на другие нейронные образования. Здесь возникает проблема, связанная с тем, что функция нервного волокна – это реакция на внешние раздражители, а многие нейроны обладают свойством авторитмичности, т.е. нейроны спонтанно генерируют спайки с определенной периодичностью. Исследователи в этой области рассматривают два аспекта:

- 1) если нервные структуры функционируют нормально, то проявляется периодическая активность;
- 2) периодическая активность задействована в процессах хранения и переработки информации на клеточном уровне.

Были предприняты попытки выбора коэффициентов в системе дифференциальных уравнений модели мозга Ходжкина-Хаксли таким

образом, чтобы наблюдалась периодичность. Однако это искусственный способ, так как форма спайка задает ограничения на параметры из системы.

Для решения проблемы периодичности было предложено также дополнить математическую модель. Но в этом случае, количество параметров увеличивается, что усложняет систему.

В 1990 году В.В. Майоров предложил свою модель импульсного нейрона. В основу этого метода лег калиево-натриевый цикл. Ученый за начало отчета взял уровень наибольшей поляризации мембраны – состояние гиперполяризации.

Модель В.В.Майорова основана на дифференциальном уравнении с запаздывающим аргументом в соответствии с рисунком 2.

$$c\dot{u} = I_{Na} + I_K + I_l.$$

Здесь

$$I_l = g_l (u_l - u),$$

Рис. 2 Уравнение Майорова

Здесь переменная u описывает положительное отклонение мембранного потенциала от состояния гиперполяризации.

С одной стороны, она достаточно точно описывает процессы, приводящие к генерации спайков, имеет глубокий биологический смысл, достаточно проста и объясняет авторитмичность нейронов. С другой стороны, сети из таких нейронов можно исследовать аналитически с помощью специального метода большого параметра, разработанного С. А. Кащенко.

Таким образом, математической моделью импульсных нейронных сетей является система обыкновенных дифференциальных уравнений. Если задать начальные условия, то задачу Коши можно решить посредством численных методов, реализовав их в программном коде. Параллельная реализация численного решения поставленной задачи для модели мозга

типа Ходжина-Хаксли была реализована авторами ранее. В дальнейшем планируется осуществить численное решение в других реализациях, а также для других моделей нейронных сетей.

Благодаря модели импульсного нейрона были разработаны феноменологические модели. Последние имитируют функционирование нейрона на высшем уровне. На основе таких моделей нейронные сети решают задачи хранения и обработки информации, распространения импульсов по аксону.

В первую очередь речь идет о моделях нейронного клеточного автомата и обобщенного нейронного элемента. Такие модели отличаются биологической адекватностью и достаточной простотой, что позволяет решать с их помощью более широкий класс задач, исследуя соответствующие нейронные сети как аналитическими, так и численными методами.

Список использованных источников

1. Hodgkin A. L., Huxley A. F. A quantitative description of membrane current and its applications to conduction and excitation in nerve // J. Physiol. London, 1952 V. 117. P. 500–544.
2. Аглямзянова Г.Н., Гумерова Л.З. Параллельная реализация численного решения одной системы дифференциальных уравнений// Russian Journal of Education and Psychology. – 2021. - Том 12, № 1-2. – С. 7-13
3. Андреева Е.А., Пустарнакова Ю.А. Оптимизация нейронной сети с запаздыванием: Применение функционального анализа в теории приближений: //Сб. научн. тр. - Тверь: ТвГУ, 2000.
4. Ануфриенко, С. Е. Нейронные модели на основе импульсного нейрона: учебное пособие / С.Е. Ануфриенко, Е.В. Коновалов; Ярославль: 2012.
5. Галушкин, А.И. Нейронные сети: история развития теории: Учебное пособие для вузов. / А.И. Галушкин, Я.З. Цыпкин. - М.: Альянс, 2015.

6. Кащенко С.А. Исследование стационарных режимов дифференциально-разностного уравнения динамики популяции насекомых. Моделирование и анализ информационных систем. 2012
 7. Майоров В. В., Ануфриенко С. Е. Импульсные нейросети: учебное пособие. Ярославль: ЯрГУ, 2006. 98 с
 8. Майоров В. В., Мышкин И. Ю., Математическое моделирование нейронной сети на основе уравнений с запаздыванием, Матем. моделирование, 1990.
 9. Николенко С., Архангельская Е., Кадурин А. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. Санкт-Петербург: 2020.
 10. Рашид,Тарик Создаем нейронную сеть. Санкт-Петербург: ООО «Альфа-книга», 2017.
 11. Ростовец В.С. Искусственные нейронные сети: учебник для вузов, Издательство «Лань», 2021.
-

Aglyamzyanova G.N. Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Naberezhnye Chelny Institute of the Kazan (Volga Region) Federal University

Gumerova L.Z. Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of System Analysis and Computer Science, Naberezhnye Chelny Institute of the Kazan (Volga Region) Federal University

Garipova R.F. master's student, Naberezhnye Chelny State Pedagogical University

MATHEMATICAL MODELS OF IMPULSE NEURAL NETWORKS

Abstract: This article is devoted to the history of the development of impulse neural networks, the study of the works of scientists. Mathematical models of impulse neural networks are considered. The problem of numerical implementation is posed.

Keywords: Neural networks, impulse neural networks, spikes, system of differential equations, numerical solution.