

Учебное издание

Ануфриенко Сергей Евгеньевич

Модели импульсных нейронов

Методические указания

Корректор И. В. Бунакова
Компьютерная верстка С. Е. Ануфриенко

Подписано в печать 23.06.2009 г. Формат 60 × 84/16.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 50 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе ЯрГУ.

Отпечатано на ризографе.

Ярославский государственный университет
им. П. Г. Демидова

150000, Ярославль, ул. Советская, 14.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Кафедра компьютерных сетей

С. Е. Ануфриенко

Модели импульсных нейронов

Методические указания

*Рекомендовано
Научно-методическим советом университета
для студентов, обучающихся по специальности и направлению
Прикладная математика и информатика*

Ярославль 2009

УДК 519.2
ББК В182я73
А73

*Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2009 года.*

Рецензент
кафедра компьютерных сетей
Ярославского государственного университета
им. П. Г. Демидова

Ануфриенко, С. Е. **Модели импульсных нейронов:**
А73 метод. указания / С. Е. Ануфриенко; Яросл. гос. ун-т.
им. П. Г. Демидова — Ярославль: ЯрГУ, 2009. — 44 с.

Методические указания содержат сведения о различных моделях импульсных нейронов: порогового, автогенератора, модель, учитывающую h -ворота. Все они основаны на дифференциальном уравнении с запаздыванием; исследуются методом асимптотического интегрирования. В работе подробно описана модель сальтаторного проведения импульса.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 010501 Прикладная математика и информатика и направлению 010500 Прикладная математика и информатика (дисциплина «Нейронные сети на основе импульсной модели нейрона», блок ОПД), очной формы обучения.

Библиогр.: 10 назв.

УДК 519.2
ББК В182я73

© Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова, 2009

- [10] Тасаки, И. Нервное возбуждение / И. Тасаки. — М.: Мир, 1971. — 222 с.

Список литературы

- [1] Антонов, В. Ф. Биофизика / В. Ф. Антонов, А. М. Черный. — М.: Владос, 2000. — 451 с.
- [2] Иваницкий, Г. Р. От динамики популяционных волн, формируемых живыми клетками к нейроинформатике / Г. Р. Иваницкий, А. Б. Медвинский, М. А. Цыганов. // УФН. — 1994. — Т. 164. — №10. — С. 1041–1071.
- [3] Hodgkin, A. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve / A. Hodgkin, A. Huxley. // J. Physiol. (London). — 1952. — №117. — P. 500–544.
- [4] Экклс, Дж. Физиология синапсов / Дж. Экклс. — М.: Мир, 1966. — 395 с.
- [5] Ходжкин, А. Л. Нервный импульс / А. Л. Ходжкин. — М.: Мир, 1965. — 125 с.
- [6] Николлс, Дж. Г. От нейрона к мозгу / Дж. Г. Николлс, А. Р. Мартин, Б. Дж. Валлас, П. А. Фукс. — М.: УРСС, 2003.
- [7] Ходоров, Б. И. Общая физиология возбудимых мембран / Б. И. Ходоров. — М.: Наука, 1975. — 406 с.
- [8] Кащенко, С. А. Исследование дифференциально-разностных уравнений, моделирующих импульсную активность нейрона / С. А. Кащенко, В. В. Майоров. // Математическое моделирование. — 1993. — Т.5. — №12. — С. 13–25.
- [9] Шаде, Дж. Основы неврологии / Дж. Шаде, Д. Форд. — М.: Мир, 1976. — 350 с.

Введение

Задача моделирования живого мозга, с одной стороны, очень привлекательна, с другой — невероятно сложна. Мозг человека состоит из 10^{11} нейронов, число связей между которыми приблизительно равно 10^{15} . Один нейрон может быть соединен с сотнями и тысячами других нейронов. Средний размер нейрона менее 0.1 мм, а длина аксона может превышать один метр при толщине в несколько микрометров. Скорость передачи импульсов между нейронами головного мозга оценивается как 0.5–2 м/с [1]. Функции, выполняемые мозгом, также поражают своей сложностью и разнообразием. Имеющиеся данные о характере нейронной активности и принципах нейронных взаимодействий пока что не привели к пониманию механизмов обработки информации в мозге, таких как кодирование, запоминание, вспоминание, распознавание, принятие решений, мышление и т. д. Теория нейронных сетей является одним из перспективных направлений в теоретических исследованиях мозга [2].

За время исследования данной проблемы были разработаны многочисленные модели нейрона, но чаще всего эти модели либо были слишком сложны и не поддавались аналитическому исследованию, либо недостаточно соответствовали свойствам биологического нейрона. Наиболее точно процесс генерации спайков описали А. Ходжкин и А. Хаксли [3]. Их модель мембраны аксона кальмара представляет собой нелинейную систему из четырех дифференциальных уравнений с большим количеством параметров. Модель Ходжкина–Хаксли и ее аналоги можно исследовать только численно.

Импульсная модель нейрона, предложенная В. В. Майоровым, основана на дифференциальном уравнении с за-

паздывающим аргументом. С одной стороны, она достаточно точно описывает процессы, приводящие к генерации спайков, с другой стороны, сети из таких нейронов можно исследовать аналитически с помощью специального метода большого параметра, разработанного С. А. Кащенко. На основе этой модели разработаны нейронные сети, которые решают такие задачи, как хранение информации в динамическом виде, адаптацию нейронных ансамблей, распространение импульсов по аксону.

В данных методических указаниях рассматриваются модели порогового нейрона, автогенератора и их модификации, приводится задача о сальтаторном проведении возбуждения.

Возврат в состояние поляризации происходит за счет токов утечки. В этом случае уравнение (28) приобретает вид:

$$\dot{u} = \lambda \left[(a - f_{Na}^1(u)) f_{Na}^2(u(t-1)) - g_l \right] u + u_l^0. \quad (29)$$

Заключение

В данном пособии подробно описаны импульсные модели нейрона, основанные на дифференциальных уравнениях с запаздывающим аргументом. Сети из таких нейронов относятся к так называемым осцилляторным нейронным сетям. Изучению таких сетей сейчас уделяется серьезное внимание. По мнению многих исследователей, в частности лауреата Нобелевской премии Ф. Крика, данное направление весьма перспективно. Несмотря на то что в настоящее время искусственные нейронные сети представляют собой высокоразвитую (особенно в теоретическом аспекте) отрасль знаний, ни одна современная технология не позволяет построить искусственную нейронную сеть, близкую по масштабам к нейронной сети мозга. Однако изучение и копирование биологических нервных систем позволяют надеяться на создание нового поколения электронных устройств, имеющих аналогичные характеристики.

В силу описанных выше процессов активации и инактивации натриевых каналов для коэффициента χ_{Na} предлагается следующий вид зависимости от мембранного потенциала:

$$\chi_{Na} = (a - f_{Na}^1(u(t))) f_{Na}^2(u(t - h_{Na}^2)) , \quad (26)$$

где первый сомножитель описывает процесс активации, а второй — запаздывающий на время h_{Na}^2 процесс инактивации натриевых каналов. В (26) положительные функции $f_{Na}^1(u), f_{Na}^2(u) \rightarrow 0$ при $u \rightarrow \infty$.

Учитывая задержку калиевой проводимости, положим:

$$\chi_K = -(b - f_K(u(t - h_K))) , \quad (27)$$

где положительная функция $f_K(u) \rightarrow 0$ при $u \rightarrow \infty$.

Подставляя (24)–(27) в (23) и проводя нормировку времени, приходим к уравнению вида:

$$\begin{aligned} \dot{u} = & \lambda \left[(a - f_{Na}^1(u)) f_{Na}^2(u(t - 1)) \right. \\ & \left. - (b - f_K(u(t - h_K^0))) - g_l \right] u + u_l^0, \end{aligned} \quad (28)$$

где $\lambda \gg 1$, h_K^0 — нормированное запаздывание калиевой проводимости, u_l^0 пропорционально u_l . Без ограничения общности можно считать, что $f_{Na}^2(0) = 1$. Для простоты положим $h_K^0 = 1$. Необходимое требование к уравнению (28):

$$a f_{Na}^2(0) - (b - f_K(0)) - g_l > 0.$$

Уравнение (28) описывает как нейрон–детектор, так и пейсмеккер. В частности, оно может описывать мембрану перехвата Ранвье. Отметим, что по данным [6] в активной зоне перехвата могут отсутствовать калиевые каналы.

1 Природа мембранного потенциала

Нейрон является структурной единицей мозга и состоит из центральной части (тела), большого числа относительно коротких древовидных отростков (дендритов) и единственного длинного отростка, который называется аксоном. Тело нейрона ограничено липопротеиновой мембраной, являющейся хорошим электрическим изолятором. Большую часть времени внешняя поверхность мембраны электроположительна по отношению к внутренней. Разность потенциалов между внутренней и внешней поверхностью мембраны (мембранный потенциал) является основной характеристикой нервной клетки. Таким образом, мембрана находится в состоянии поляризации (мембранный потенциал отрицателен), это обусловлено неравномерным распределением ионов по разные стороны от мембраны. Под влиянием внутренних или внешних процессов мембранный потенциал медленно растет, и по достижении им некоторого значения, называемого пороговым, нейрон генерирует кратковременный высокоамплитудный импульс (спайк). Во время спайка мембранный потенциал быстро растет, затем так же быстро падает, и его значение становится меньше, чем вначале. После спайка мембрана гиперполяризована, нейрон находится в рефрактерном состоянии. Постепенно мембранный потенциал восстанавливает нормальное значение. Все процессы происходят за счет ионных токов через мембрану, главную роль при этом играют токи ионов натрия и калия. Рожденный нейроном спайк, распространяясь по аксону и его разветвлениям, влияет на другие нейроны [4, 5].

Ионная гипотеза о причинах поляризации мембраны была высказана Бернштейном в начале XX века [5]. Мембрана, отделяющая цитоплазму нейрона от межклеточной