

## Кодирование информации в импульсных избирательных нейронных сетях

Мазуров М.Е

*Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова, Москва*

[mazurov37@mail.ru](mailto:mazurov37@mail.ru)

Исследована нелинейная динамика, физические процессы и переработка информации в биологических нейронных сетях. Рассмотрено кодирование информации в импульсных нейронных сетях биологических и избирательных. Рассмотрены принципы кодирования информации в центральной нервной системе. Рассмотрены: суммирование импульсных входных сигналов на основе теории почти-периодических функций, нелинейное преобразование с помощью релаксационной автоколебательной системы нейрона. Рассмотрен метод кодирования входной информации в избирательных импульсных нейронных сетях. В качестве единицы информации установлена полная импульсная последовательность. Интенсивность входного сигнала кодируется синхронным изменением частоты импульсных последовательностей. С помощью теории почти-периодических функций доказано, что позиционное распознавание входных объектов инвариантно относительно частотного кодирования интенсивности входных сигналов. Разработано устройство для кодирования в импульсной нейронной сети, с помощью которого доказано, что позиционное распознавание входных сигналов инвариантно относительно частотного кодирования их интенсивности.

*Ключевые слова: избирательные импульсные нейронные сети, кодирование информации в нейронных сетях, почти-периодические функции, кодирование информации в биологических нейронных сетях, динамические процессы в нейроне.*

## Coding Information in Impulsive Selective Neural Networks

Mazurov M.E.

*Russian Economic University G.V. Plekhanova, Moscow*

Nonlinear dynamics, physical processes and information processing in biological neural networks are investigated. The coding of information in pulsed neural networks of biological and selective ones is considered. The principles of information coding in the central nervous system are considered. We consider: the summation of impulse input signals on the basis of the theory of almost periodic functions, a nonlinear transformation by means of the relaxation self-oscillatory system of a neuron. The method of encoding input information in selective pulsed neural networks is considered. As a unit of information, a complete pulse sequence is established. The intensity of the input signal is encoded by a synchronous change in the frequency of the pulse sequences. With the help of the theory of almost periodic functions it is proved that positional recognition of input objects is invariant with respect to frequency coding of the intensity of input signals. A device for encoding in a pulsed neural network has been developed, with the help of which it has been proved that positional recognition of input signals is invariant with respect to frequency coding of their intensity.

*Key words: selective pulsed neural networks, information coding in neural networks, almost-periodic functions, information coding in biological neural networks, dynamic processes in the neuron.*

### Методы кодирования информации в биологических нейронных сетях

Возможные методы кодирования информации в биологических нейронных сетях, искусственных

нейронных сетях и в центральной нервной системе иллюстрируются рисунком 1 [1–7].

Для ЦНС, ввиду сложности протекающих там процессов указаны только принципы, которые могут быть использованы для кодирования информации.

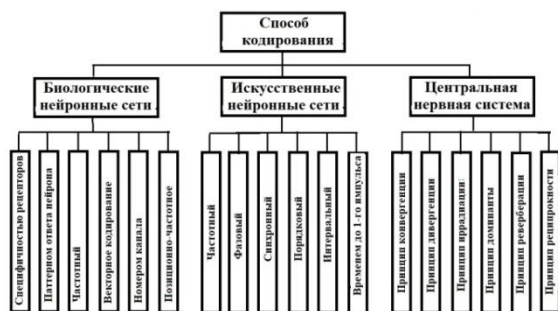


Рис. 1. Способы кодирования информации в биологических нейронных сетях, искусственных нейронных сетях и в центральной нервной системе.

## Конкретные принципы кодирования в биологических нейронных сетях

В настоящее время известны несколько принципов кодирования информации в нейронных сетях [8–10].

Способ 1. Кодирование информации благодаря специфичности рецепторов, избирательно реагирующих на определенные параметры стимуляции.

Способ 2. Частотный способ передачи информации – частотный код. Методы частотного кодирования весьма разнообразны.

Способ 3. Анализ передачи сигнала о вибрации от соматических рецепторов показал, что информация о частоте вибрации передается с помощью частоты, а ее интенсивность кодируется числом одновременно активных рецепторов.

Способ 4. Паттерн ответа нейрона – система передачи информации о стимулах с помощью рисунка разрядов нейрона.

Способ 5. Кодирование номером канала. Идея о том, что информация кодируется номером канала, присутствовала уже в опытах И.П. Павлова с кожным анализатором собаки.

Способ 6. Механизм векторного кодирования сигнала предложен Е. Н. Соколовым [10]. Сходный механизм передачи сигнала о стимулах действует и тогда, когда стимулы различаются не местом приложения, а другими признаками.

## Общие свойства кодирования информации в нейронных сетях

Вся информация или значительная ее часть, передаваемая в нервной системе от одного отдела к другому, заключена в пространственном и временном распределении импульсных потоков.

Нейрон, по-разному реагируя на различные паттерны, может участвовать в выполнении нескольких функций. Каждый оттенок качества ощущения возникает в результате деятельности комплекса нейронов, образующих динамические ансамбли, формирование которых зависит от характера паттернов, приходящих от рецепторов.

Для каждой модальности имеется своя форма кодирования информации в соответствии с физическими свойствами различаемых стимулов. Одни качества распознаются сенсорными системами, функционирующими по принципу топической организации, другие кодируются паттернами. Например, распознавание многих качеств зрительных образов осуществляется мечеными линиями, а вкусовые раздражители кодируются паттернами.

## Кодирование интенсивности раздражения

Кодирование интенсивности. Так как частота афферентной импульсации зависит от амплитуды рецепторного потенциала, которая в свою очередь пропорциональна интенсивности раздражения, то кодирование интенсивности стимула осуществляется посредством изменения частоты следования нервных импульсов от рецепторов в нервные центры. Увеличение интенсивности раздражителя кодируется увеличением частоты импульсной активности.

Между интенсивностью стимула и частотой потенциалов действия существует логарифмическая зависимость – ощущение увеличивается пропорционально логарифму интенсивности раздражения. Эта зависимость получила название закона Вебера–Фехнера.

## Пространственное кодирование

В некоторых сенсорных системах естественная стимуляция рецепторов характеризуется тем или иным распределением локальных стимулов. Способность определять место или конфигурацию стимулов называется пространственным различением. Пространство кодируется величиной площади, на которой возбуждаются рецепторы, это пространственное кодирование. Локализация действия раздражителя кодируется тем, что рецепторы различных участков тела посылают импульсы в определенные зоны коры мозга.

## Временное кодирование

Временное кодирование. Способность оценки времени неотделима от других аспектов кодирования. Частота нервных разрядов – это универсальная переменная величина, которая изменяется во времени. Кодирование информации осуществляется группой равномерно следующих импульсов. В качестве сигнальных признаков используются такие временные параметры выходных сигналов, как частота импульсации или продолжительность межимпульсных интервалов. Для временного различия двух раздражителей необходимо, чтобы нервные процессы, вызванные этими раздражителями, не сливались во времени.

## Основное свойство нервных проводников

В проводниковом отделе сенсорной системы кодирование осуществляется только на «станциях переключения», т.е. при передаче сигнала от одного нейрона к другому, где происходит смена кода.

В нервных волокнах информация не кодируется, они исполняют роль проводов, по которым передается информация, закодированная в рецепторах и переработанная в центрах нервной системы [11, 12].

Устойчивость временного паттерна ответа – отличительная черта нейронов специфической системы мозга.

## Методы кодирования в искусственных импульсных нейронных сетях

Методы кодирования импульсных последовательностей в искусственных импульсных нейронных сетях определяются возможностями технических систем. Они отличаются от методов кодирования в биологических нейронных сетях. Известны следующие методы кодирования в искусственных импульсных нейронных сетях.

Известны следующие методы кодирования информации в ИНС: 1) фазовый задается точным положением импульсов во времени (относительно какого-либо общего опорного; 2) временем до появления первого импульса; 3) порядковый задается порядком получения импульсов на выходах сети; 4) интервальный – информация о сигнале задается расстоянием между импульсами, получаемыми на выходах сети; 5) резонансный – информация о сигнале задается плотной последовательностью импульсов, приводящей к возникновению резонанса. Иллюстрация известных видов кодирования показана на рисунке 2.

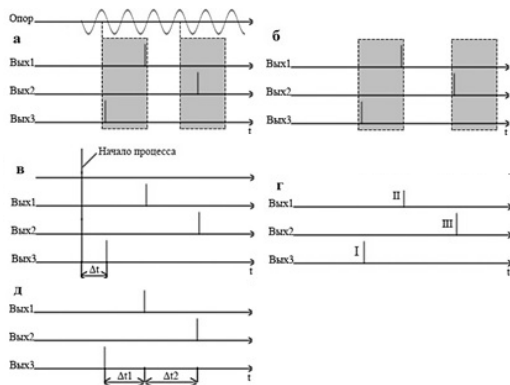


Рис. 2. Известные виды кодирования в искусственных импульсных нейронных сетях.

Помимо этого, существуют виды кодирования информации, являющиеся смешанной формой нескольких простых видов. Следует отметить, что по методам кодирования информации в импульсных нейронных сетях в настоящее время нет полной

ясности, и эта проблема требует дальнейшего исследования.

## Закономерности преобразования импульсных потоков в биологических и искусственных нейронных сетях

Мы рассмотрели несколько претендентов для осуществления кодирования информации в биологических нейронных сетях и искусственных нейронных сетях. Какие информационные задачи должны решать импульсные последовательности, и какое кодирование следует применить для решения этих задач. Какие информативные параметры должны изменяться при кодировании.

1) Первой основной задачей является перенос информации с одного места в нервной системе на другое, Длина этих путей может колебаться от микрон до метров (миллион микрон). Таким образом, отростки нейронов дендриты, аксоны, нервные проводники это электрические провода, переносящие информацию. Эта задача прекрасно выполняется в нейронных сетях [11, 12].

2) Роль синапсов. Основное предназначение синапсов – обеспечение односторонней проводимости электрических импульсных последовательностей. Если бы такой односторонней проводимости не было, то возникла бы всеобщая положительная обратная связь, возникла бы хаотическая динамика, что привело бы к гибели системы. Синапс превращает электрические импульсы в химические кванты медиатора с последующим суммированием квантов медиатора. Установлена вспомогательная роль синапса: помощь в суммировании электрических импульсов импульсной последовательности; облегчение суммирования импульсов импульсной последовательности за счет роста величины самих синапсов.

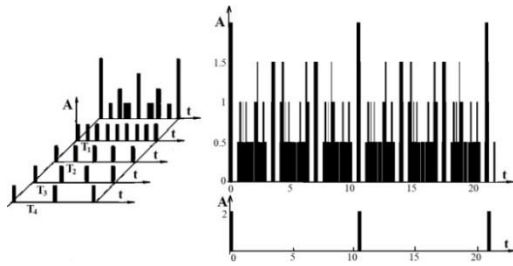
3) Как происходит суммирование импульсных последовательностей? Суммирование бинарных последовательностей очень просто. Пусть  $k$  номер ячейки бинарной последовательности. Тогда суммой  $S$  называется сумма всех 1 в ячейках с одинаковым номером.

Как суммируются импульсные последовательности. Этот вопрос намного сложнее.

Специфика суммирования состоит в том, что для последовательностей из коротких импульсов с различными периодами временное положение импульсов может не совпадать, и тогда их амплитуды не суммируются. В общем случае сумма разнопериодных импульсных последовательностей является равномерной почти-периодической функцией, и их суммирование происходит на основе свойств почти-периодических функций (ППФ) [13].

Рассмотрим его на примере суммирования периодических импульсных последовательностей с разными несоизмеримыми периодами. Иллюстрация таких ИП показана ниже. Сигналы на входах и на выходах нейронов можно представить в виде суммы

почти-периодических функций, как показано на рисунке 3 слева, суммарный импульсный поток показан выше оси времени на рисунке 3 справа.



**Рис. 3.** Схематическое изображение последовательности электрических импульсов нейрона в виде прямоугольных импульсов слева.

Четыре импульсные последовательности с периодами  $T_1 \div T_4$ ,  $\varepsilon$  – почти-период приблизительно равен  $T_\varepsilon = 15T_1 = 12T_2 = 6T_3 = 5T_4 = 10.5$ .  $\varepsilon$ -почти-период заключен между двумя максимумами. Сгущения и разрежения для импульсных потоков с несоизмеримыми периодами следования импульсов  $T_1 = 0.7$ ,  $T_2 = 0.875$ ,  $T_3 = 1.75$ ,  $T_4 = 2.1$  показаны на рисунке 3 справа.

Максимальная амплитуда суммы импульсов существует и достигается через  $\varepsilon$ -почти-период и равна  $4A = 2$ , где  $A$  – амплитуда импульса равная 0.5. В пределах  $t \in |t - T| < \varepsilon$  происходит суммирование амплитуд импульсов, происходящее через каждые  $\varepsilon$  – почти-периоды. Известно, что для возбуждения нейрона необходимо, чтобы сумма импульсов, пришедших по дендритам, превышала порог возбуждения. Специфическое свойство почти-периодических функций – существование  $\varepsilon$ -почти-периодов и максимальной суммы импульсов, следующих с интервалом  $\varepsilon$ -почти-периода, – позволяет осуществить избирательную обработку информации [14–16].

Нелинейным блоком нейрона является аксонный холмик в основании аксона. Эта система может быть потенциально автоколебательной и генерировать в ответ на входной импульс один ответный импульс на выходе. Возможна генерация периодической последовательности импульсов или пачек импульсов (берстов).

### Кодирование в импульсных нейронных сетях

Из рассмотрения методов кодирования импульсных последовательностей в биологических нейронных сетях вытекает, что такое кодирование является не стабильным и не надежным. Имеет место нестабильность из-за шумов, а также из-за самих импульсных потоков, которая выражается в нестабильности межимпульсных интервалов, наличия пачек импульсов, также имеющих значительную нестабильность по величине межимпульсных интервалов в пачке, так и нестабильность по временным интервалам между пачками импульсов. Поэтому все известные методы

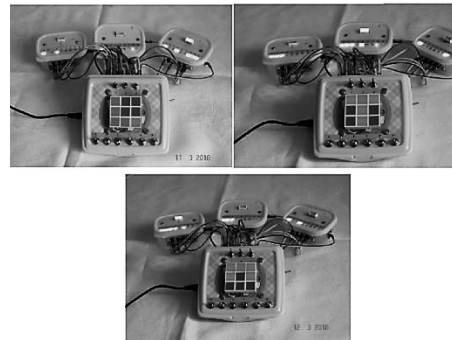
кодирования импульсных последовательностей по любым параметрам являются не стабильными и не надежными. Предлагается метод кодирования, не имеющий перечисленных недостатков.

Единицей информации бинарной последовательности является 1, отсутствие – 0. Единицей информации для импульсных нейронных сетей предполагается брать всю ИП, то есть вся ИП – это 1; отсутствие ИП – это 0. Таким образом, все нестабильности в ИП нивелируются.

В данной работе предлагается способ кодирования информации в ИМНС, учитывающий механизмы и свойства кодирования импульсных последовательностей. Предполагается, что используются избирательные нейронные сети, обучение которых достигается не подбором весовых коэффициентов, как в нейронных сетях с нейронами МакКаллока–Питтса, а с помощью кластеров каналов связи, настроенных на специфические свойства входных сигналов [14–16]. Операция суммирования входных сигналов реализуется за счет суммирования импульсных последовательностей, благодаря использованию свойств почти-периодических функций.

Принципиальным является вопрос: сохранится ли правильность распознавания при увеличении интенсивности входного сигнала, вызывающего изменения частоты импульсных последовательностей, идущих от объекта. Можно доказать, используя неравенства Кронекера теории ППФ, что распознавание является топологически инвариантным относительно частот входного сигнала. Сам процесс распознавания остается инвариантным относительно изменения интенсивности входного сигнала.

Как изменяется динамика процесса распознавания при изменении интенсивности входного сигнала. Процесс распознавания не нарушается, но частота следования импульсов на выходе регистрирующего нейрона или пула нейронов увеличивается пропорционально изменению интенсивности входного сигнала. Это обстоятельство иллюстрируется на экспериментальном макете, показанном на рисунке 4.



**Рис. 4.** Конструктивное оформление разработанного прототипа – избирательного перцептрона. Пример реализации распознавания букв Л, Т, П.

Это обстоятельство подтверждается экспериментальными исследованиями нейронной активности определенных участков головного мозга при его «просветлении». При увеличении интенсивности входного сигнала частота импульсной активности исследуемого участка головного мозга изменяется пропорционально изменению интенсивности входного сигнала.

## Список литературы

1. Александров Ю.И., Анохин К.В., Соколов Е.Н., Греченко Т.Н. и др. *Нейрон. Обработка сигналов. Пластичность. Моделирование. Фундаментальное руководство*. Тюмень: изд-во Тюменского ГУ, 2008. 548 с.
2. Борисюк Г.Н., Борисюк Р.М., Казанович Я.Б., Иваницкий Г.Р. Модели динамики нейронной активности при обработке информации мозгом – итоги «десятилетия». *Успехи физических наук*. 2002. Т. 172. № 10. С. 1189–1214.
3. Греченко Т.Н. *Психофизиология*. М.: Гардарики, 2009. 572 с.
4. Хайкин С. *Нейронные сети. Полный курс: 2-е изд.* М.: «Вильямс», 2006. 1102 с.
5. Галушкин А.И. *Нейронные сети. Основы теории*. М.: Горячая линия – Телеком, 2010.
6. Ежов А.А., Шумский С.А. *Нейрокомпьютинг и его применения в экономике и бизнесе*. М.: МИФИ, 1998.
7. Чернавский Д.С. *Синергетика и информация. Динамическая теория информации: 2-е изд.* М.: УРСС, 2004.
8. Izhikevich E.M. *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*. London: The MIT Press, 2007.
9. Melamed O., Gerstner W., Maass W., Tsodyks M., Markram H. Coding and learning of behavioral sequences. *Trends in Neurosciences*. 2004. V. 27. № 1. P. 11–14.
10. Соколов Е.Н. Векторное представление ассоциативного обучения. *Журн. ВНД*. 2000. Т. 50. № 1. С. 80–87.
11. Гутман А.М. *Дендриты нервных клеток: теория электрофизиология, функция*. Вильнюс: Мокслас, 1984. 144 с.
12. Magee J.C., Johnston D. Plasticity of dendritic function. *Current Opinion in Neurobiology*. 2005. V. 15. № 3. P. 334–342.
13. Левитан Б.М. *Почти-периодические функции*. М.: Гостехиздат, 1953.
14. Мазуров М.Е. Синхронизация релаксационных автоколебательных систем, синхронизация в нейронных сетях. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2018. Т. 82. № 1. С. 83–87.
15. Мазуров М.Е. *Импульсный нейрон, близкий к реальному: патент на изобретение*. 2015. № 2598298.
16. Мазуров М.Е. *Однослойный перцептрон на основе избирательных нейронов: патент на изобретение*. 2015. № 2597497.