

<https://doi.org/10.51301/ce.2023.i2.02>

Formation of a mathematical model of the processes of conversion of impulse flows in a biological neuron

L. Lukpanova¹, A. Yerimbetova¹, G. Utemisova², E. Daiyrbayeva^{1*}

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Asfendiyarov Kazakh national medical University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: nurbekkyzy_e@mail.ru

Abstract. This study considers a model for converting pulse flows into analog quantities in the synapses of a neuron. It is assumed that the pulse flows arriving at the input of the model are converted into analog quantities describing the processes of mediator release and decay in the synaptic cleft. Special attention is paid to the effect of presynaptic inhibition, which is manifested when the mediator concentration exceeds a certain limit value. This effect occurs when the synapse is stimulated by pulse flows with high pulse repetition rate, even at full opening of the ion channel, which leads to a decrease in the influence of the synapse on the ion channel. Understanding this phenomenon is important to better analyze the functioning of neuronal networks and to develop new methods to influence the nervous system. This study provides important scientific data on the mechanisms of presynaptic inhibition and its impact on the functioning of neuronal networks. The results obtained may be useful for the development of new methods of treatment of neurological diseases, as well as for in-depth study of neuronal interaction in neuronal networks.

Keywords: *synapses, model, neural network, presynaptic inhibition.*

1. Введение

Импульсные потоки, характерные для биологических нейронов, играют ключевую роль в передаче и обработке информации в нервной системе. Процессы преобразования импульсных сигналов внутри нейрона представляют собой сложные и малоизученные явления, которые оказывают существенное влияние на функционирование мозга и его способность к адаптации к различным условиям.

Формирование математической модели этих процессов является важным шагом в понимании принципов работы нейрона и развитии технологий, основанных на принципах функционирования мозга. Построение такой модели позволяет углубить наше знание о механизмах, лежащих в основе работы нейрона, и предоставляет инструменты для проведения дальнейших исследований в области нейробиологии, искусственного интеллекта и нейроинженерии.

Биологические нейроны играют ключевую роль в передаче и обработке информации в нервной системе организмов. Импульсные потоки, или спайки, представляют собой основной механизм передачи сигналов между нейронами. Понимание процессов, лежащих в основе формирования и обработки этих импульсных потоков, имеет фундаментальное значение для раскрытия механизмов функционирования нервной системы.

Одним из ключевых аспектов в изучении нейронных процессов является разработка математических моделей, которые могут описать их поведение с высокой точностью. В частности, формирование математической

модели процессов преобразования импульсных потоков в биологическом нейроне позволяет более глубоко понять механизмы синаптической передачи, а также влияние различных факторов на динамику нейронных сетей [1].

В процессе исследования были сделаны анализ существующих работ.

В работах [2] предложена новая методология моделирования нейронных сетей для управления техническими системами. В этой методологии свойства каждого нейрона определяются исключительно его структурной организацией синаптического и дендритного аппарата, без индивидуальной настройки параметров элементов. Также авторами был разработан способ формирования структуры мембраны нейрона, зависящий от условий его взаимодействия в сети.

В статье [3] обсуждались вопросы математического моделирования нейрона и возможности его технической реализации. В отличие от существующих технических устройств, которые строятся на базе классических узлов и ориентированы на бинарную обработку, предлагаемый подход основан на разрядно-параллельной обработке числовых данных (синапсов) с целью получения желаемого результата.

В работе автора [4] рассматривается способ кодирования информации в импульсных нейронных сетях, как в биологических, так и в избирательных системах. Освещены принципы кодирования информации в центральной нервной системе, такие как суммирование импульсных входных сигналов на основе теории почти-периодических функций и нелинейное преобразование с использованием релаксационной

автоколебательной системы нейрона. Разработанное устройство для кодирования в импульсной нейронной сети демонстрирует, что позиционное распознавание входных сигналов остается инвариантным относительно их частотного кодирования.

В работе [5] проведено моделирование элемента нейронной сети с учетом его свойств как биологического объекта и принципов записи и обработки информации в нейронах. В отличие от упрощенного представления нейрона как логического элемента в сети обработки информации, рассматривался нейрон как аналоговый элемент, который как хранит, так и генерирует информацию. Были исследованы импульсы, генерируемые внутри нейрона, а также описана функциональная схема нейрона и передаточные функции отдельных дендритов и нейрона в целом. В статье также представлены результаты моделирования механизма выделения синапсом частотно-модулированных импульсов из поступающего к нему импульсного сигнала.

В работе автора [6] детально изучены следующие вопросы: искусственный нейрон, биологические нейронные сети, модель искусственного нейрона, математические модели искусственного нейрона и т.д.

Представлена схема искусственного нейрона (рисунок 1).



Рисунок 1. Схема искусственного нейрона [6]

Также представлена классификация нейронов по топологии и описанию (рисунок 2).



Рисунок 2. Классификация нейронов по топологии и описанию [6]

В данной работе [7] рассмотрены различные подходы к моделированию нейронов различных типов и механизмов их взаимодействия в составе сети, рассматривая их как совокупность участков единой мембраны нервной ткани. Использовалась система дифференциальных уравнений, которая описывает процессы преобразования сигналов в естественном нейроне. Предложенное описание можно рассматривать как моделирование модульных нейронных сетей, которые имеют выраженную морфологию с нейронными модулями и связями.

Одним из преимуществ представленной модели нейрона является её способность моделировать клетку как преобразователь импульсного потока с произвольной структурой синаптического и дендритного аппарата. Проведенные исследования подтвердили, что разработанные модели нейронов достаточно точно представляют многие процессы преобразования информации, характерные для естественных нейронов, включая пластичность и эффект пресинаптического торможения.

В статье [8] была разработана математическая модель, которая описывает процессы преобразования импульсных потоков в биологическом нейроне. Исследование позволило выявить важные закономерности в преобразовании импульсных потоков в нейроне и эффект пресинаптического торможения при достижении предельной концентрации медиатора. Эти результаты могут иметь значительное значение для понимания основных механизмов функционирования нервной системы.

В данном исследовании сосредоточимся на разработке такой математической модели, которая позволит описать процессы преобразования импульсных потоков в аналоговые сигналы в биологическом нейроне.

2. Материалы и методы

В данном разделе исследования описываем подходы и техники, используемые для формирования математической модели процессов преобразования импульсных потоков в биологическом нейроне. Эта модель позволяет нам лучше понять, как нейроны функционируют в мозге, и как они обрабатывают информацию. В этом разделе представим общий обзор методологии, которую используем для разработки нашей математической модели, а также обозначим ключевые аспекты, которые собираемся рассмотреть в дальнейшем [9-11].

Предполагается, что на входы модели поступают импульсные потоки, которые в синапсах преобразуются в аналоговые величины, описывающие процессы выделения и распада медиатора в синаптической щели.

При превышении концентрацией медиатора некоторого предельного значения эффект влияния синапса на ионный канал начинает быстро снижаться – несмотря на то, что ионный канал остается полностью открытым. Таким образом, появляется эффект пресинаптического торможения. Достижение предельного значения концентрации возможно при стимуляции синапса импульсными потоками с высокой частотой следования импульсов.

Основные особенности функционирования синапса показаны на рисунке 3. Свойства нейронов определяет

модификация структурной организации мембраны и си-наптического аппарата формируемыми связями в сети.

Входные и выходные сигналы нейрона равны нулю в отсутствии импульса, и константе E_y на время действия импульса.

Длительность импульса определяется временными параметрами мембраны нейрона. Мембрана сомы и дендритов нейрона представляет набор пар моделей ионных механизмов, описывающих процессы деполяризации и гиперполяризации, соответственно.

Каждую пару (деполяризатор и гиперполяризатор) в зависимости от их внутренних свойств можно рассматривать как модель участка дендрита или тела клетки.

Телом нейрона условно будем считать те участки мембраны, которые охвачены обратной связью с генератора потенциала действия. Также следует отметить, что чем ближе участок мембраны расположен к генераторной зоне, тем эффективнее вклад его синапсов в общую картину возбуждения нейрона.

Следующим важным фактором является эффект пресинаптического торможения, проявляющийся в том, что при превышении концентрацией медиатора некоторого предельного значения эффект влияния синапса на ионный канал начинает быстро снижаться – несмотря на то, что ионный канал остается полностью открытым. Достижение предельного значения концентрации возможно при стимуляции синапса импульсными потоками с высокой частотой следования импульсов.

Далее показаны математические описания элементов модели нейрона [12-14].

Модель Синапс. Модель синапса является ключевым элементом в изучении функционирования нервной системы и передачи сигналов между нейронами. Она описывает механизмы, с помощью которых информация передается от пресинаптического нейрона к постсинаптическому нейрону.

Одна из основных моделей синапса - это модель химического синапса. В этой модели пресинаптический нейрон выделяет нейромедиаторы в пространство синаптической щели, где они связываются с рецепторами на постсинаптической мембране, что вызывает изменение электрического потенциала и, в конечном итоге, передачу сигнала.

Также существуют модели электрических синапсов, где нейроны соединены непосредственно через электрические соединения, что позволяет электрическому сигналу проходить напрямую от одного нейрона к другому без необходимости химической передачи.

Модели синапсов могут быть сложными, учитывая множество факторов, таких как вероятность высвобождения нейромедиаторов, скорость восстановления синаптической щели и механизмы модуляции передачи сигналов. Они играют важную роль в понимании функционирования нервной системы и могут быть использованы для разработки новых методов лечения неврологических заболеваний.

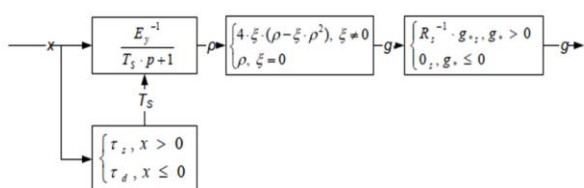


Рисунок 3. Модель Синапс

Здесь τ_s - постоянная времени выделения медиатора, τ_d - постоянная времени распада медиатора, $\xi \in 0, [0.5, \infty)$ - критическое значение концентрации медиатора, при котором начинает сказываться эффект пресинаптического торможения; нулевая величина означает отказ от использования эффекта пресинаптического торможения, R_s - сопротивление синапса («вес»), характеризует эффективность воздействия синапса на ионный механизм, E_y - амплитуда входного сигнала (рисунок 3).

Соответствующая схеме система уравнений записывается следующим образом:

$$T_s = \begin{cases} \tau_s, nпу & x > 0 \\ \tau_d, nпу & x \leq 0 \end{cases}$$

$$g^* = \begin{cases} 4\xi(\rho - \xi \cdot \rho^2), \xi \neq 0 \\ \rho, \xi = 0 \end{cases}$$

$$g = \begin{cases} R_s^{-1} \cdot g_*, nпу & g_* > 0 \\ 0, nпу & g_* \leq 0 \end{cases}$$

Начальные условия: $\rho(0) = 0$

Вход модели – дискретный сигнал $x(t)$, представляющий собой последовательность импульсов длительностью 1 мс и имеющих амплитуду E . Процесс выделения и распада медиатора предлагается моделировать инерционным звеном первого порядка с логическим управлением постоянной времени. Переменная ρ характеризует концентрацию медиатора, выделившегося в ответ на импульс.

Выход $g(t)$ модели представляет собой эффективность воздействия на ионный механизм и пропорционален проводимости синапса.

Краткая запись системы:

$$g(t) = S(x(t), t)$$

Таким образом, при отсутствии входных воздействий проводимость синапса стремится к нулю.

Ионный механизм мембраны. Ионный механизм мембраны является ключевым аспектом функционирования клеток, особенно нервных и мышечных клеток. Этот механизм определяет электрохимический потенциал покоя и возбудимость клеточной мембраны.

В основе ионного механизма лежит наличие ионных каналов в клеточной мембране, которые контролируют поток ионов через неё. Ионы, такие как натрий (Na^+), калий (K^+), кальций (Ca^{2+}) и хлор (Cl^-), играют важную роль в множестве клеточных процессов, включая передачу нервных импульсов, сокращение мышц и многие другие.

В состоянии покоя, мембрана клетки имеет различные концентрации ионов внутри и снаружи клетки. Например, концентрация натрия выше снаружи клетки, а концентрация калия - выше внутри. Это создает разность потенциалов, известную как потенциал покоя. Возбуждение клетки происходит, когда изменение потенциала мембраны достигает определенного порогового значения, что приводит к открытию ионных

каналов и внутреннему потоку ионов. Этот процесс называется деполяризацией. После достижения пика возбуждения, мембрана возвращается к состоянию покоя, что происходит благодаря закрытию ионных каналов и выведению избыточных ионов. Ионный механизм мембраны играет важную роль в множестве физиологических процессов организма и является основой для понимания работы нервной системы, мышц и других клеточных систем.

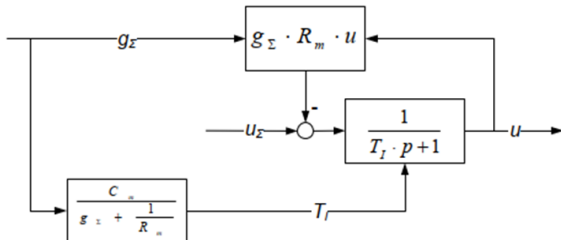


Рисунок 4. Ионный механизм мембраны

Здесь g_{Σ} - суммарная эффективность влияния синапсов на ионный механизм, $R_m > 0$ - сопротивление мембраны, C_m - емкость мембраны, v - ожидаемый вклад модели в величину внутриклеточного потенциала при отсутствии внешнего возбуждения, u - реальный вклад модели в величину внутриклеточного потенциала (рисунок 4).

Соответствующая система уравнений будет такой:

$$\left. \begin{aligned} T_I \cdot \dot{u} + (1 + g_{\Sigma} \cdot R_m) \cdot u &= u_{\Sigma}, \\ T_I &= \frac{C_m}{g_{\Sigma} + R_m^{-1}} \end{aligned} \right\}$$

Начальные условия: $u(0)=0$.

Краткая запись:

$$u(t) = I(u_{\Sigma}(t), g_{\Sigma}(t), t)$$

Суммарный мембранный потенциал нейрона u_{Σ} является алгебраической суммой выходов всех участков мембраны, моделирующих сому клетки.

Далее представлена модель генератора, осуществляющая формирование прямоугольных импульсов заданной амплитуды E_y как результат превышения потенциалом u_{Σ} фиксированного порога P .

Модель генератора потенциала действия. Модель генератора потенциала действия представляет собой упрощенную концепцию процесса возникновения и распространения нервного импульса в нейронах. Этот процесс является ключевым механизмом передачи информации в нервной системе. Генератор потенциала действия начинается с деполяризации мембраны нейрона, когда внутренний потенциал мембраны внезапно увеличивается из-за открытия натриевых каналов. Это приводит к внутреннему потоку натриевых ионов в клетку, что приводит к еще большему увеличению потенциала.

Деполяризация достигает своего пика, что вызывает открытие калиевых каналов и выход калия из клетки. Этот процесс называется реполяризацией. Как только мембрана возвращается к своему покойному состоянию,

называемому гиперполяризацией, генератор потенциала действия завершается.

Модель генератора потенциала действия позволяет понять основные этапы возникновения и распространения нервного импульса в нейронах. Она широко используется в нейрофизиологических исследованиях для изучения нервной системы и ее функций, а также для разработки новых методов лечения неврологических заболеваний.

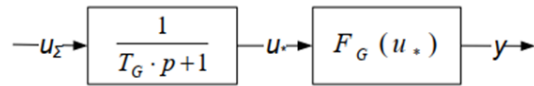


Рисунок 5. Модель генератора потенциала действия

Здесь $P > 0$ – порог нейрона; T_G – постоянная времени, которая определяет время действия обратных связей перезарядки мембраны и характеризует длительность генерируемого импульса, $y(t)$ - выходной сигнал, который автоматически поступает на обратные связи перезарядки сомы клетки (рисунок 5).

$$y = F_G(u_*) = \begin{cases} E_y, & \text{при } \begin{cases} u_* \geq P, \\ u_* \dot{u}_* \geq 0, \end{cases} \\ 0, & \text{при } \begin{cases} u_* < 0, \\ u_* \dot{u}_* < 0, \end{cases} \end{cases}$$

Система уравнений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} T_G \cdot \dot{u}_* + u_* &= u_{\Sigma}, \\ y &= F_G(u) \end{aligned} \right\}$$

Начальные условия: $u_*(0) = 0$

Краткая запись: $y(t) = G(u_{\Sigma}(t), t)$

3. Результаты и обсуждение

Построенная модель нейрона описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений. Системы уравнений, описывающие процессы в нейроне, различны для нейронов с разной структурой синаптического и дендритного аппаратов. Эти системы не имеют аналитического решения [15-16].

Оценка адекватности поведения модели нейрона естественному объекту была дана с помощью вычислительных экспериментов в среде Matlab. Изменения параметров моделей происходили при вычислении с временными параметрами процессов, протекающими в естественном нейроне.

Одной из основных характеристик естественного нейрона, качественно влияющей на преобразование импульсных потоков, является размер мембраны. В отличие от небольших нейронов, при возбуждении одинаковых групп входов крупный нейрон менее чувствителен к входным воздействиям и обычно генерирует последовательности импульсов в более низком диапазоне частот и отвечает одиночными импульсами на входные воздействия [17].

С помощью разработанной моделью можно строить нейроны с различной структурой мембраны и расположением синапсов на ней. Количество ионных механизмов позволяет рассматривать каждую пару как дендрит клетки, также можно моделировать нейроны различных размеров, не меняя значения параметров мембраны.

Таким образом, изменяя только структуру синаптического и дендритного аппарата нейрона мы формируем модель в исследуемой нейронной сети.

На рисунке 6 представлена реакция модели нейрона на возбуждающий импульс.

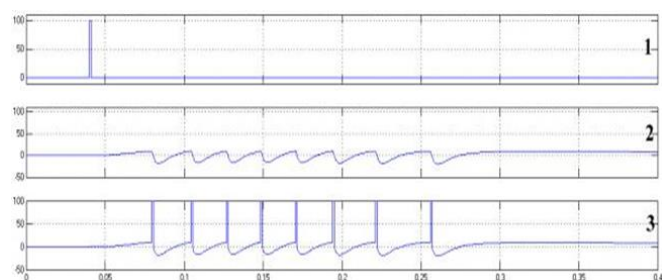


Рисунок 6. Реакция модели нейрона на возбуждающий импульс

Нейрон с синапсом на дендрите.

1 – возбуждающие воздествие.

2 – внутриклеточный потенциал мембраны на генераторе потенциала действия.

3 – ответы нейрона, совмещенные с графиком внутриклеточного потенциала.

Из графиков следует, что нейроны малых размеров реагируют на входной сигнал последовательностью импульсов, с уменьшающейся частотой. Это связано с большим сопротивлением и малой емкостью мембраны, и как следствие – существенным изменением внутриклеточного потенциала при стимуляции входа даже одним импульсом.

Большие нейроны обычно разряжаются одиночными импульсами. Из представленных результатов видно, что поведение построенных моделей соответствует реакциям естественных нейронов на одиночные входные сигналы [18].

4. Выводы

В заключении исследования отмечаем, что построенная модель нейрона описывается системой дифференциальных уравнений, которая является нелинейной. Особенности структуры синаптического и дендритного аппаратов определяют различия в системах уравнений, описывающих процессы в нейроне. Важно отметить, что данные системы уравнений не имеют аналитического решения.

Оценка адекватности поведения модели нейрона в сравнении с естественным объектом была проведена с использованием вычислительных экспериментов в среде Matlab. В ходе этих экспериментов параметры моделей

были изменены, учитывая временные параметры процессов, происходящих в естественном нейроне.

Таким образом, результаты исследования позволяют утверждать, что построенная математическая модель нейрона обладает высокой степенью адекватности к реальным процессам, протекающим в биологических нейронах. Это открывает перспективы для дальнейших исследований и применения данной модели в различных областях, связанных с нейронаукой и нейроинженерией.

References / Литература

- [1] Mazurov, M. E. (2016). Impul'snyj neyron, blizkij k real'nomu. Patent §RU2598298C2
- [2] Bahshiev, A.V. (2011). Perspektivy primeneniya modelej biologicheskikh nejronnyh struktur v sistemah upravlenija dvizheniem. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljaju-shhie sistemy*, 9(9), 85-90
- [3] Ismailov, Sh.A., Pozdnjakov, N.V. (2014). Matematicheskaja model' nejrona i vozmozhnosti ego tehnichekoj realizacii-ii. *Sistemnye tehnologii*, (12), 7-17
- [4] Mazurov, M.E. (2018). Kodirovanie informacii v impul'snyh izbiratel'nyh nejronnyh setjah. *Matematicheskaja biologija i bioinformatika*, (e31), 1-e31. 5
- [5] Chernyshev, S.L., Chernyshev, A.S. (2014). Modelirovanie nejronnoj seti s uchetom biologicheskikh svojstv nejrona. *Mashinostroenie i komp'juternye tehnologii*, (11), 510-520
- [6] Nikitin, A.V. (2017) Iskusstvennyj neyron. *Akademija Trinitarizma, M. El.*
- [7] Bahshiev, A.V., Romanov, S.P. (2012). Vosproizvedenie reakcij estestvennyh nejro nov kak rezul'tat modelirova-nija strukturno-funkcional'nyh svojstv membrany i orga-nizacii sinapticheskogo apparata. *Nejrokomp'jutery: raz-rabotka, primenenie*, (7), 25-35
- [8] Romanov, S.P., Bahshiev, A.V. (2000). Matematicheskaja model' biologicheskogo nejrona. *Modelirovanie neravno-vesnyh sistem-2000: Materialy III Vserossijskogo semina-ra, Krasnojarsk*
- [9] Jasnitskij, L.N. (2011). Iskusstvennyj intellekt. M.: BINOM, *Laboratorija znanij*
- [10] Sokolov, B.V. (2014). Neokibernetika v sovremennoj strukture sistemnyh znanij. *Izdatel'stvo CNII RTK*, 2(3), 3-11
- [11] Novikov, D.A. (2016). Kibernetika: Navigator. Istorija kibernetiki, sovremennoe sostojanie, perspektivy razvitija. M.: LENAND
- [12] Blashhik, Ja., Blinovskaja, K. & Vujchik, G.M. (2016). Osnovy nejro kibernetiki. M.: *Gorjachaja linija – Telekom*
- [13] Rassel, S. & Norvig, P. (2007). Iskusstvennyj intellekt: sovremennyj podhod, 2-e izd. M.: Izdatel'skij dom Vil'-jams
- [14] Putincev, N.I., Vishnevskij, O.V. & Vitjaev, E.E. (2014). Raz-rabotka iskusstvennyh kognitivnyh sistem na osnove modelej mozga zhivyh organizmov. *Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii*, 18(4/3), 1156-1171
- [15] Nikolls, D.G., Martin, A.R. & Vallas, B.D. (2012). Ot nejrona k mozgu. M.: *Librokom*
- [16] Hajkin, S. (2006). Nejronnye seti: polnyj kurs. M.: *Izdatel'skij dom Vil'jamc*
- [17] Hodashinskij, I.A. & Maljutin, N.D. (2015). Modeli sta-ticheskikh iskusstvennyh nejronov. Obzor. *Upravlenie, vy-chislitel'naja tehnika i informatika, doklady TUSURa*, 2 (36), 100-107
- [18] Vasil'ev, A.N. & Karp, V.P. (2012). Modelirovanie samoreguljaccii aktivnogo nejrona v seti. *Komp'juternye issle-dovanija i modelirovanie*, 4(3), 613-619

Биологиялық нейрондағы импульстік ағындарды түрлендіру үрдістерінің математикалық моделін қалыптастыру

Л. Лукпанова¹, А. Еримбетова¹, Г. Утемисова², Э. Дайырбаева^{1*}

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²С. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медициналық университеті, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: nurbekkyzy_e@mail.ru

Андатпа. Бұл зерттеу импульстік ағындарды уейрон синапстарындағы аналогтық шамаларға түрлендіру моделін қарастырады. Модельдің кірісіне түсетін импульстік ағындар синаптикалық саңылаудағы медиатордың оқшаулануы мен ыдырау процестерін сипаттайтын аналогтық шамаларға айналады деп болжанады. Пресинаптикалық тежелудің әсеріне ерекше назар аударылады, ол медиатордың белгілі бір шекті мәнінің концентрациясынан асып кеткен кезде көрінеді. Бұл әсер синапсты импульстің жоғары жиілігімен импульстік ағындармен ынталандыру кезінде, тіпті иондық арнаның толық ашылуымен де пайда болады, бұл синапстың иондық арнаға әсерінің төмендеуіне әкеледі. Бұл құбылысты түсіну нейрондық желілердің жұмысын тереңірек талдау және жүйке жүйесіне әсер етудің жаңа әдістерін жасау үшін өте маңызды. Бұл зерттеу пресинаптикалық тежелу механизмдері және оның нейрондық желілердің жұмысына әсері туралы маңызды ғылыми деректерді ұсынады. Нәтижелер неврологиялық ауруларды емдеудің жаңа әдістерін әзірлеуге, сондай-ақ нейрондық желілердегі нейрондық өзара әрекеттесуді терең зерттеуге пайдалы болуы мүмкін.

Негізгі сөздер: синапстар, модель, нейрондық желі, пресинаптикалық тежелу.

Формирование математической модели процессов преобразования импульсных потоков в биологическом нейроне

Л. Лукпанова¹, А. Еримбетова¹, Г. Утемисова², Э. Дайырбаева^{1*}

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный медицинский университет им.С.Асфендиярова, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: nurbekkyzy_e@mail.ru

Аннотация. В данном исследовании рассматривается модель преобразования импульсных потоков в аналоговые величины в синапсах нейрона. Предполагается, что импульсные потоки, поступающие на вход модели, преобразуются в аналоговые величины, описывающие процессы выделения и распада медиатора в синаптической щели. Особое внимание уделяется эффекту пресинаптического торможения, который проявляется при превышении концентрации медиатора определенного предельного значения. Данный эффект возникает при стимуляции синапса импульсными потоками с высокой частотой следования импульсов, даже при полном открытии ионного канала, что приводит к снижению влияния синапса на ионный канал. Понимание этого явления имеет важное значение для более глубокого анализа функционирования нейронных сетей и разработки новых методов воздействия на нервную систему. Данное исследование предоставляет важные научные данные о механизмах пресинаптического торможения и его влиянии на функционирование нейрональных сетей. Полученные результаты могут быть полезны для разработки новых методов лечения неврологических заболеваний, а также для углубленного изучения взаимодействия нейронов в нейронных сетях.

Ключевые слова: синапсы, модель, нейронная сеть, пресинаптическое торможение.

Received: 27 February 2023

Accepted: 15 June 2023

Available online: 30 June 2023