

**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ
СО СВЕРХВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ**

Аннотация. Разработан метод построения запоминающих устройств со сверхвысокой плотностью записи информации на основе использования принципов работы молекулярных систем нейрона и его ядерных компонентов — ДНК и РНК. Предложена модель передачи импульсов между синапсами и структурами нейронов в процессе изменения порога чувствительности нейрона в зависимости от величины тока. Такие устройства могут использоваться как запоминающие модули наноразмерных сенсоров.

Ключевые слова: сверхвысокая плотность записи информации, модель передачи импульсов между синапсами и структурами нейронов; запись информации на органических носителях.

Исследования в таких направлениях нанотехнологий, как создание новых материалов, наноразмерных сенсоров, нанороботов для «адресной доставки» лекарственных препаратов, требуют соответствующей информационной поддержки в виде наноэлектронных запоминающих устройств. Все процессы, обеспечивающие жизнедеятельность организма человека, происходят вследствие иерархической передачи информации. Одним из важных звеньев такой иерархии является синтез белковых молекул в молекулярных комплексах клетки — рибосомах. Внутри клеток с помощью рибосом постоянно пересылаются «оцифрованные инструкции» в виде рибонуклеиновой кислоты (РНК) или матричной РНК (мРНК), в соответствии с которыми происходит формирование белков из аминокислот. Эти сложные процессы осуществляются образованием последовательности так называемых конкатенатов — комплексов из топологически связанных замкнутых молекул дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Рибосома — эффективная и надежная «молекулярная машина» с точки зрения нанотехнологий. Эта структура размером 20 нм содержит до 10^5 атомов и инициирует процесс копирования и усложнения биологических систем. В соответствии с механизмом роста биосистем происходит непрерывное считывание программ генетического кода, заложенного в ДНК, который по многочисленным каналам обратных связей вызывает рост живых организмов. Таким образом, нанотехнологам предоставляется возможность использовать коды чужих систем и содержащуюся в них информацию.

Цель настоящей работы — создание запоминающих устройств со сверхвысокой плотностью записи информации на основе использования возможностей наноэлектронных и молекулярных систем нейрона, а также его ядерных компонентов — ДНК и РНК.

Актуальность разработок электронной клетки. Процессы управления в клетке, в частности при формировании запоминающих структур, зависят от работы ядерного комплекса клетки в составе ДНК и РНК, которая заключается в функционировании их молекулярных фрагментов, представляющих генные структуры. Эти структуры, в свою очередь, организуются в генные сети (ГС), а именно группы координированных функциональных генов, взаимодействующих через свои первичные продукты в виде РНК, белков и других метаболитов. Гены представляют участки нити ДНК, кодирующие построение и работу бел-

ков. Белки являются строительными и функциональными блоками клеток и тканей, а также ферментов — структур, управляющих всеми важными процессами в нейроне, других клетках и организме в целом. Таким образом, управление работой ДНК, РНК, ферментами и другими белками выведено на ГС.

В рамках непрерывных и дискретных моделей возможен гибридный подход к моделированию динамики ГС. Такую сеть разделяют на две подсистемы. Первая — регуляторная, включает совокупность регуляторных генов и их макромолекулы. Ее состояния моделируются на языке дискретных моделей (например, с использованием пороговых функций); вторая — исполняющая, содержит гены, обеспечивающие выполнение различных биохимических процессов. Она моделируется системами дифференциальных уравнений. Подобные модели позволяют исследовать иерархическую схему организации клетки: ДНК–РНК–белки–энзимы–сети химических реакций–физиология клетки. Концепция ГС также дает возможность выстраивать иерархическую модель, в которой локальные ГС более низкого уровня, решая свои частные задачи, обмениваются сигналами и объединяются в сети более высокого уровня — до модели целого организма [1]. Функционирование элемента ГС при многоэтапном формировании регуляторного белка можно представить с помощью дифференциальных уравнений

$$\frac{dx_1}{dt} = A - k_1x_1, \quad \frac{dx_i}{dt} = k_{i+1}x_{i+1}, \quad \frac{dx}{dt} = k_{n_g}x_{n_g} - \beta x. \quad (1)$$

Здесь n_g — количество промежуточных стадий синтеза белка, x_1, x_i — концентрации промежуточных продуктов синтеза белка, x — концентрация белка, A — скорость инициации конститутивного синтеза, k_1, k_{i+1} — скорости перехода белка из состояния 1 в $(i+1)$ -е промежуточное состояние, β — скорость деградации белка.

Генные сети являются важнейшим механизмом записи информации на основе процессов обработки информации в ДНК нейронов. Для анализа информации в ДНК можно использовать секвенатор — устройство для автоматизированного считывания последовательностей нуклеотидов (элементов) в цепи ДНК. В таком устройстве предусмотрена коррекция ошибок автоматизированной полимеразной (ферментной) цепной реакции при анализе элементов цепи ДНК. После корректировки ошибок малые фрагменты ДНК-цепей с помощью «зеркальных» цепочек и чтения соединяют в массив данных в соответствии с адресными метками, нанесенными на указанных фрагментах.

Для записи информации в ДНК применяют тот же способ кодирования, что и для преобразования информации перед загрузкой на жесткий диск. Однако если при кодировании данных для компьютера используются нули и единицы, то в ДНК задействованы четыре нуклеотида, являющихся основой для записи информации. Каждому из них соответствует определенная последовательность компонентов, которые посредством химических реакций выстраиваются в определенном порядке, образуя цепь. При декодировании данных можно использовать оптическое спектрометрическое считывание последовательности ДНК. Доказательством эффективности молекулярных носителей данных является создание ДНК-дисков, размещенных в сферах из диоксида кремния, где они могут храниться сотни лет [2].

Процессы преобразования цифровых данных в последовательность нуклеотидов ДНК. ДНК содержит четыре типа нуклеотидов: аденин (А), цитозин (С), гуанин (G) и тимин (Т). Нить ДНК представляет собой их линейную последовательность. Таким образом, имеется четыре кодовых символа (А, С, G, Т). Очевидным подходом к хранению данных является их кодирование в четверич-

ной системе счисления: 0 = А, 1 = С, 2 = G, 3 = Т. Заметим, что синтез и секвенирование цепей ДНК подвержены ошибкам. Вероятность ошибок можно снизить, если закодировать двоичную информацию не в четверичной, а в промежуточной троичной системе счисления.

Для обеспечения произвольного доступа к данным используется перевод ключей в уникальные последовательности праймеров. Праймеры — это короткие синтетические нити ДНК, определяющие начало и конец области, которую необходимо копировать. Праймеры обеспечивают произвольный доступ к цепи ДНК с помощью полимеразной цепной реакции, генерирующей множество копий ДНК. Цепи конкретного объекта имеют общий праймер, а разные цепи с одним и тем же праймером — свои адреса. Контролируя последовательности, используемые как праймеры для полимеразной цепной реакции, можно определять, какие нити будут копироваться.

Система хранения данных на базе ДНК. Система хранения данных с использованием ДНК состоит из синтезатора ДНК, кодирующего данные, контейнера для их хранения и секвенатора ДНК, считывающего последовательности ДНК и транслирующего их обратно в «цифру». Процесс считывания и записи данных в краткой форме приведен на рис. 1.

Сохранение данных в ДНК проходит в три этапа: преобразование цифровых данных в последовательность нуклеотидов ДНК, синтез молекул ДНК и непосредственно хранение данных.

Формирование долговременной памяти. Согласно экспериментальным данным [3–5] долговременная память может быть результатом возникновения новых синапсов, которые, в свою очередь, фиксируются по обратной связи в ДНК [5]. Избирательная электрическая активация определенной нейронной сети обеспечивает кратковременное запоминание. Для получения долговременной памяти многократная электрическая активность в нейронных цепях вызывает химические или структурные изменения в самих нейронах, что приводит к возникновению новых нейронных цепей.

Инструкции для синтеза белка, переносимые молекулой РНК, представляют собой специфические последовательности органических оснований, присоединенных к остову молекулы. Эти основания являются матрицами для синтеза белков.

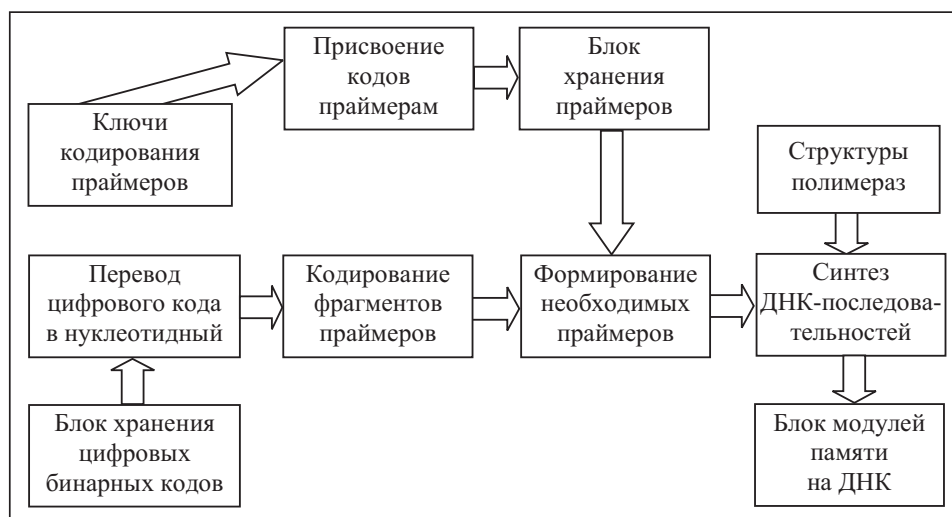


Рис. 1. Схема преобразования цифровых данных в последовательность нуклеотидов ДНК

Запоминание в структурах мозга человека можно рассматривать как процесс, связанный с синтезом белка, активирующего нейронные цепочки [6–8]. Архитектуру такой схемы определяют гены — участки цепи молекулы ДНК в составе ГС.

Когда необходимо извлечь из памяти какую-либо информацию с зафиксированным при запоминании адресом, активируется нейронная сеть. Каждая новая порция информации сравнима с битом — минимальной единицей количества информации, равным одному из двух состояний (0 или 1). Каждый новый бит информации изменяет состояние белка, а следующие порции-биты сравниваются с существующими белками: нужная информация вспоминается, если происходит совпадение.

Процесс запоминания важной информации в долговременной памяти центральной нервной системы человека согласно [3, 4] содержит этап «закрепления» генами полученной информации. Запоминание происходит с участием генов, которые записываются в виде «битовых» последовательностей на цепи молекул ДНК.

В процессах формирования памяти используются 10^{10} нейронов и связей между ними. Все системы мозга важны для памяти, но ключевым механизмом является изменение в синапсах — местах контакта между двумя нейронами. Наличие этих микроскопических контактных площадок позволяет отросткам одного нейрона соединяться с отростками другого.

Моделирование проводимости синаптической контактной площадки — важный этап в изучении процессов обработки информации в нейроне. На основе механизмов работы мембранных оболочек нейрона и синапса построена топология синаптических сетей нейронов. Отметим значительное количество обратных связей синапсов с ядром, позволяющих анализировать особенности обработки информации в нейроне. При этом существенный интерес представляет процесс поступления информации в ядро нейрона, в котором «принимается решение» о поддержании состояния синаптического контакта и осуществляется передача соответствующих сигналов в эту зону [9, 10].

Мембранные комплексы нейрона имеют важное значение в регулировании синаптического тока для передачи соответствующих сигналов в нейрон. Рассмотрим процессы формирования запоминающих структур, хранящихся в нейронах в виде изменений структуры ДНК, вызываемых сигналами, несущими информацию об изменениях окружающей среды [3].

При использовании нейронных сетей для прохождения сигнала архитектура сети может оставаться постоянной, изменяется только количество нейронов и синапсов [11, 12]. Рассмотрим необходимые условия работы синаптического контакта, обеспечивающие активацию нейрона, и функцию мембранных комплексов нейрона в регулировании синаптического тока для передачи соответствующих сигналов в нейрон.

В состоянии покоя потенциал нейрона равняется U_0 . Для того чтобы нейрон активировать, требуется изменить его потенциал на величину, превышающую порог нейрона U_p . Порог нейрона — величина, зависящая от состояния нейрона, а также времени его пребывания в этом состоянии [11]. Поэтому порог нейрона является функцией, зависящей от времени: $U_p(t)$.

Нейрон будет активирован, если

$$\Delta U(t) = U_p(t), \quad (2)$$

где $\Delta U(t)$ — изменение потенциала нейрона, а именно переменная напряжения на емкости мембраны во время прохождения через нее синаптического тока I_d .

Такой ток описывается α -функцией [11], характеризующей резкий скачок постсинаптического потенциала после активации нейрона, а также его медленное угасание:

$$I_d(t) = g_{\text{syn}} \alpha(t - \tau_d) I_0, \quad (3)$$

где g_{syn} — максимальная синаптическая проводимость синаптического контакта в нейроне, I_0 — синаптический ток в момент генерации потенциала действия, τ_d — постоянная задержки, что характеризует время распространения нейромедиаторов в аксоне.

Рассмотрим уравнение для определения $\Delta U(t)$ с учетом величин сопротивления и емкости мембран синаптического контакта:

$$\frac{d\Delta U(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_2} \Delta U(t) = \frac{1}{C} I_d(t), \quad (4)$$

где $\tau_2 = R_M C$ — постоянная времени мембраны, R_M, C — сопротивление и емкость мембраны соответственно.

Переменная t — время, прошедшее с начала запуска системы. Таким образом, можно считать, что $\Delta U(0) = 0$. Решив уравнение (4) с учетом данного условия, получим следующее выражение:

$$\Delta U(t) = \frac{1}{C} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \int_0^t I_d(x) e^{\frac{x}{\tau_2}} dx. \quad (5)$$

Для более развернутого решения уравнения (5) воспользуемся уравнениями (2) и (3), описывающими синаптический ток I_d :

$$\Delta U(t) = \frac{1}{C} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \int_0^t g_{\text{syn}} I_0 \frac{(x - \tau_d) e^{\frac{x - \tau_d}{\tau}}}{\tau} dx. \quad (6)$$

Для определения полного изменения потенциала нейрона просуммируем полученные формулы с учетом каждого синапса:

$$\Delta U(t) = \sum_{i=0}^n \Delta U_i(\delta_i), \quad (7)$$

где $\Delta U_i(\delta_i)$ определяется для каждого i -го синапса, $\delta_i = t - t_1$ — время существования импульса до момента t .

Как было отмечено, активация нейрона приводит к генерации потенциала действия, а также передаче синаптического тока к нейрону.

Соотношения (2)–(7) представляют собой математическую модель синаптического контакта. Они описывают передачу импульса между синапсами нейронов, процесс изменения порога нейрона в зависимости от состояния синапса, изменения потенциала нейрона, а также ток, который передается по синапсам в момент генерации потенциала действия для активации нейрона.

Состояние разработок запоминающих устройств на основе ДНК. В запоминающем устройстве [7] на основе ДНК используется блок формализованного представления ДНК в цифровом виде данных, секвенатор ДНК и блок с набором ферментов для разрезания и сшивания нуклеотидов ДНК. В искусственную ДНК записывается пять файлов общим объемом 5,2 Мбит. Используя носитель памяти короткой одноцепочечной ДНК, можно записать на массив таких ДНК пять различных файлов для представления данных в виде последовательности азотистых оснований ДНК. Данные кодируются в четырех блоках по 25 нуклеотидов. В 17 нуклеотидах кодируются адресные метки, необходимые для сбора данных в выходной файловый массив. Кодирование выполняется в три этапа. Двоичный

код, в котором представлены данные, вначале конвертируется на компьютере в троичный код, с помощью которого восьмибитовые блоки данных представляются в виде последовательности из пяти тройных чисел (0, 1, 2). Далее блочная последовательность таких чисел конвертируется в код из трех нуклеотидов. Троичное кодирование позволяет не только сжать данные, но и уменьшить вероятность ошибок при дальнейшем чтении ДНК и реконструкции массива.

В работе [9] нуклеотиды синтезируются запоминающим устройством, а затем объединяются в короткие цепочки. Окончательный синтез ДНК из этих цепочек выполнялся с помощью клеточной структуры дрожжей. «Чернилами» для такого биопринтера служат растворы нуклеотидов. На выходе получают биомолекулы, описанные в инструкции устройства.

В [13] предложена запоминающая среда на основе использования метода секвенирования ДНК. После секвенирования копии молекулы ДНК помещаются в четыре раствора. Каждый раствор характеризуется пониженной концентрацией одного нуклеотида по сравнению с другими тремя. При проведении полимеризации ДНК в каждом растворе регистрируются факты выделения ионов с помощью сенсоров на основе МДП-структур (МДП — металл, диэлектрик, полупроводник) и измеряются промежутки времени между моментами их выделения. При большом промежутке присоединяется нуклеотид с пониженной концентрацией и затем определяется его расположение в секвенируемой ДНК. Определение момента присоединения нуклеотида к растущей цепи ДНК путем измерения сигнала от каждого сенсора проводится в режиме стохастического резонанса.

Разработка запоминающего устройства со сверхвысокой плотностью записи информации. В запоминающем устройстве со сверхвысокой плотностью записи информации с применением новых элементов необходимо реализовать синтез фрагмента ДНК с использованием РНК для последующей передачи указанного фрагмента в измененную ДНК с помощью РНК-зависимой ДНК-полимеразы.

Для запоминания разработана структурная схема запоминающего устройства со сверхвысокой плотностью записи информации. Такое устройство включает блок формализованного представления ДНК в цифровом виде данных, секвенатор ДНК, блок с набором ферментов для разрезания и сшивания нуклеотидов ДНК, набор нуклеотидов РНК для передачи новой информации от источника сигналов в измененную ДНК с помощью РНК-зависимой ДНК-полимеразы [6].

В данном устройстве (рис. 2) жидкостные системы ДНК (блок 1) и РНК (блок 2) имеют в своем составе подсистему детекции (блок 3) на основе МДП-сенсоров, чувствительных к выбросам ионов водорода в раствор. Подсистема детекции включает четыре планарные матрицы, на поверхности которых расположены от 1 до N сенсоров. Устройство имеет источник напряжения смещения (блок 6) и генератор шума (блок 7). В качестве сенсора используется структура с возможностью формирования режима стохастического резонанса,

выполненная на основе МДП-диода, позволяющего обеспечить работу сенсора в середине участка бистабильности за счет смещения рабочей точки МДП-диода. Для этого один выход источника смещения (блок 6) подключен к катоду устройства, а другой — к генератору шума. Анод МДП-диода является выходом сенсора и подключен к одному из N входов усилителя тока (блок 4), выход которого подключен к входу аналого-цифрового преобразователя (блок 5), связанного

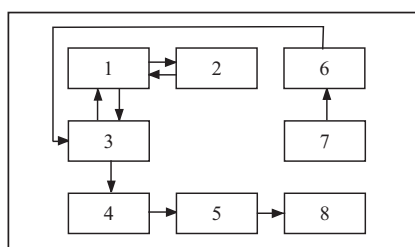


Рис. 2. Структурная схема запоминающего устройства со сверхвысокой плотностью записи информации

с входом компьютера (блок 8). МДП-диод состоит из многослойной конструкции, включающей соединенный с анодом первый металлический контакт, расположенный на нижнем слое кремния с дырочной проводимостью (p-Si), верхняя поверхность которого соединена с нижней поверхностью слоя кремния с электронной проводимостью (n-Si). Верхняя поверхность n-Si покрыта слоем диэлектрической алмазоподобной пленки, на верхней поверхности которой образована рабочая зона для стабилизации фрагментов ДНК.

Для работы устройства используют четыре вида растворов для полимеризации фрагментов ДНК по числу видов нуклеотидов. Каждый раствор содержит все четыре вида нуклеотидов с концентрацией одного нуклеотида, меньшей, чем в трех других. Если в каком-нибудь растворе концентрация любого вида нуклеотида снижена, то в трех других концентрация этого вида нуклеотидов имеет исходное значение. Фрагменты ДНК секвенируются с помощью жидкостной системы с использованием автоматизированной пипетки и помещаются на поверхность четырех полупроводниковых сенсоров в виде диэлектрического слоя со стабилизацией на нем в заранее нанесенные растворы четырех видов для проведения реакции полимеризации ДНК.

С помощью жидкостной системы (блок 1) в раствор добавляются молекулы ДНК-полимеразы и выполняется рабочий цикл секвенирования фрагмента ДНК. При этом осуществляется детектирование момента присоединения нуклеотида к растущей цепи ДНК измерением сигнала от каждого сенсора. Сенсоры выполнены на МДП-диоде с возможностью регистрации или изменения концентрации ионов водорода на фрагменте ДНК, который полимеризуется в режиме стохастического резонанса. Такой режим обеспечивается выбором рабочей точки МДП-структуры сенсора посередине участка бистабильности и введением сигнала шума от генератора шума (блок 7) на катод МДП-диоода.

Регистрируются четыре сигнала с выходов усилителей МДП-сенсоров, размещенных на четырех матрицах, и с помощью компьютера обрабатываются данные. При этом определяются моменты задержки сигнала при включении каждого вида нуклеотидов в молекулу ДНК на каждом отдельном сенсоре.

Восстанавливается последовательность нуклеотидов в секвенируемой ДНК интегрированием полученных данных о расположении нуклеотидов с пониженной концентрацией в каждом из четырех растворов каждого сенсора на четырех матрицах.

Записанные в память компьютера четыре сигнала-циклограммы (по одному от каждого из четырех МДП-диодов) имеют различия в виде задержек (отсутствие изменения сигнала) в те моменты времени, когда молекула полимеразы ДНК в соответствующем растворе, дойдя до фрагмента ДНК, концентрация комплементарного нуклеотида которого в растворе снижена, будет ожидать его подхода из раствора для встраивания в фрагмент ДНК. Реконструкцию информационной последовательности секвенированной ДНК по задержкам в ходе реакции полимеризации фрагментов ДНК осуществляют следующим образом.

После записи изменений проводимости по времени всех четырех растворов проводится их сравнение. При этом определяются моменты задержек в появлении сигналов изменения проводимости того или иного раствора. Задержки (или фазы отсутствия) изменения такого сигнала указывают на наличие в данном месте в информационной последовательности секвенированной ДНК того нуклеотида, концентрация которого в этом растворе существенно снижена по сравнению с другими. Затем в жидкостную систему РНК (блок 2), содержащую нуклеотиды — аденин, урацил, гуанин, цитозин, добавляют раствор РНК-зависимой ДНК-полимеразы. В жидкостной системе РНК (блок 2), связанной с блоком 1,

происходит синтез ДНК на матрице РНК, что и является эффектом реализации запоминающего устройства со сверхвысокой плотностью записи информации.

Таким образом, устройство позволяет запоминать и передавать полученную информацию на измененную ДНК введением набора нуклеотидов РНК для передачи данных с использованием РНК-зависимой ДНК-полимеразы. В жидкостной системе РНК происходит синтез ДНК на матрице РНК. Как отмечалось выше, долговременная память может быть результатом возникновения новых синапсов, которые, в свою очередь, фиксируются по обратной связи в ДНК.

Анализ процессов обработки информации в нейронах может использоваться для создания перспективных запоминающих устройств. Предложенная модель передачи импульсов между синапсами и структурами нейронов в процессе изменения порога чувствительности нейрона в зависимости от величины тока позволяет синапсам активировать нейроны. Данный подход можно применять в реализации элементной базы для создания устройств, использующих возможности нейронов по обработке информации.

Приведенные результаты разработки запоминающих устройств со сверхвысокой плотностью записи информации на основе принципов функционирования молекулярных систем нейрона и его ядерных компонентов ДНК и РНК позволяют применять такие устройства при сенсорной диагностике в качестве запоминающих модулей наноразмерных сенсоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирязев А.В., Панкина Л.К. Моделирование генных сетей. Москва: Изд-во РГАУ-МСХА. 2016. 52 с.
2. Лихошвай В.А., Матушкин Ю.Г., Ратушный А.В., Ананько Е.А., Игнатъева Е.В., Подколотная О.В. Обобщенный химико-кинетический метод моделирования генных сетей. *Молекулярная биология*. 2001. Т. 35, № 6. С. 1072–1079.
3. Boles K.S., Kannan K., Gill J., Felderman M., Gouvis H., Hubby B., Kamrud K.I., Venter J.C., Gibson D.G. Digital-to-biological converter for on-demand production of biologics. *Nature Biotechnology*. 2017. Vol. 35. P. 672–675.
4. Минеева О.А., Бурцев М.С., Анохин К.В. Подходы к изучению геномной и синаптической пластичности в сетях нервных клеток, культивируемых на мультieleктронных матрицах. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2012. Т. 62, № 3. С. 261–269.
5. Kandel E.R. The molecular biology of memory storage: a dialog between genes and synapses. *Biosci. Rep.* 2001. Vol. 21. P. 565–611.
6. Запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації. Патент України на корисну модель № 124147. Ходаковський М.І. Опубл. 26.03.2018. Бюл. «Промислова власність». 2018. № 6.
7. Goldman N., Bertone P., Chen S., Dessimoz C., LeProust E.M., Sipos B., Birney E. Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA. *Nature*. 2013. Vol. 494. P. 77–80.
8. Toropova K.A., Anokhin K.V., Tiunova A.A. Blockade of histone deacetylation in the brain modulates the expression of transcription factors c-FOS and ZENK and potentiates the formation of long-term memory in neonatal chicks. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2016. Vol. 46, N 3. P. 256–263.
9. Gallistel C., Balsam P. Time to rethink the neural mechanisms of learning and memory. *Neurobiology*. 2014. Vol. 108. P. 136–144.
10. Cai D., Pearce K., Chen S., Glanzman D.L. Reconsolidation of long-term memory in Aplysia. *Current Biology*. 2012. Vol. 22. P. 1783–1788.

11. Захаров Д.Г., Кузнецов А.С. О динамических механизмах воздействия синаптических токов на модель нейрона с дифференциацией отклика. *Письма в ЖЭТФ*. 2015. Т. 102, № 3. С. 211–215.
12. Потієнко М.В. Структурна модель процесів пам'яті людини. *Вісник Київського університету. Серія: фіз.-мат. науки*. 2010. Вип. 4. С. 169–172.
13. Способ секвенирования ДНК и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2539038. Мантуров А.О., Гуторов М.А. Оpubл. 10.01.2015. Бюл. «Изобретения. Полезные модели». 2015. № 1.

Надійшла до редакції 25.06.2018

М.І. Ходаковський

МЕТОД ПОБУДОВИ ЗАПАМ'ЯТОВУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З НАДВИСОКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ ЗАПИСУ ІНФОРМАЦІЇ

Анотація. Розроблено метод побудови запам'ятовувальних пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації на основі використання принципів роботи молекулярних систем нейрона та його ядерних компонентів — ДНК і РНК. Запропоновано модель передачі імпульсів між синапсами і структурами нейронів у процесі зміни порога чутливості нейрона в залежності від величини струму. Такі пристрої можна використовувати як запам'ятовувальні модулі нанорозмірних сенсорів.

Ключові слова: надвисока щільність запису інформації, модель передачі імпульсів між синапсами і структурами нейронів, запис інформації на органічних носіях.

M.I. Khodakovskiy

THE METHOD OF CONSTRUCTING MEMORY DEVICES WITH ULTRAHIGH DENSITY OF INFORMATION RECORDING

Abstract. A method is developed to construct memory devices with an ultrahigh density of information recording based on the principles of operation of the neuron molecular systems and its nuclear components, DNA and RNA. A model of impulse transfer between synapses and neuron structures during variation in the neuron sensitivity threshold as a function of current is proposed. Such devices can be used as memory modules in nanoscale sensors.

Keywords: ultra-high density of information recording; model of impulse transmission between synapses and neuron structures; record information on organic memory carriers.

Ходаковський Николай Иванович,

кандидат техн. наук, старший научный сотрудник Института кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, Киев, e-mail: nhodak@ukr.net.