

УДК 621.386:616-073.7(045)

**О. М. Ключко**, канд. біол. наук, доц.  
**Ю. Л. Манагадзе**, студ.  
**А. О. Пашківський**, студ.

## ПРОГРАМНІ МОДЕЛІ 2D МАТРИЦІ НЕЙРОНІВ В СИСТЕМІ ДЛЯ ЕКОМОНІТОРИНГУ ТА КОДУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Інститут аеронавігації НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

*На основі отриманих експериментальних та аналітичних даних біофізичних експериментів з вивчення електричних струмів у нейронах мозку створені моделі 2D матриці нейронів, що має властивості пам'яті та кодування зображень.*

**Ключові слова.** 2D матриця, нейрон, програмна модель, пам'ять, кодування, зображення.

**Вступ.** В сучасну епоху нанотехнологій традиційні методи науки і техніки доповнюються новими, як експериментальними, так і теоретичними, що відкриває дослідникам нові можливості. Великий інтерес представляють фізичні ефекти, які досліджують в перспективних матеріалах і нанорозмірних структурах для створення нових компонентів електронної техніки. Такими структурами, насамперед, є двовимірні структури у вигляді шарів наноскопічних розмірів – мембран (технічних та біологічних), одномірні – квантові нитки або дроти, і нульрозмірні – квантові точки. Протягом багатьох років ряд авторів досліджували фізико-хімічні властивості мембран у живих біологічних системах [1, 2], зокрема властивості високомолекулярних компонентів поверхневих мембран нейронів головного мозку ссавців (ГМС) [1, 2, 5, 6], та передачу сигналів інформації в нейроні у напрямку поверхневої мембрана – білкові структури цитоплазми – молекула ДНК. Під час таких досліджень були зроблені спостереження, які дозволяють за принципами біоніки навіть розглядати ряд молекулярних структур у нейронах, як природні аналоги деяких радіотехнічних та телевізійних пристроїв. Іншим напрямком досліджень наносвіту по праву вважають застосування молекулярних флуорохромів, які можуть утворювати сполуки з молекулами, і в умовах експерименту візуалізувати ті чи інші процеси в складних біологічних системах [3, 4]. Сукупність результатів, отриманих у таких експериментах були покладені в основу створення комп'ютерних моделей, представлених у даній роботі.

**Постановка задачі.** Розробити програмну модель 2D матриці з нейронів, яка мала б властивості пам'яті та кодування зображень, взявши за основу результати експериментів із вивчення електричних струмів у нейронах ГМС та дії флуоресцентних зондів.

**Основна частина.** Фізична природа можливого екрану на основі біонічних елементів. Штучні нейронні мережі — математичні моделі, а також їх програмні або апаратні реалізації, побудовані за принципом організації та функціонування біологічних нейронних мереж (в т.ч. мереж нервових клітин живого організму) наразі дуже активно використовуються науковцями всього світу для вирішення багатьох проблем, в тому числі і при створенні гібридних технічних систем. Важливою особливістю деяких типів таких мереж є можливість їх самовдосконалення, а також інші характеристики, які роблять їх цінним матеріалом для робіт багатьох науковців та інженерів. В основу оригінальної моделі, що є одним із варіантів двовимірної мережі з природних нейронів, були покладені експерименти, описані в наших роботах [4, 5, 6]. Сенс зареєстрованого явища [4] полягав у тому, що при надходженні збуджуючого електричного сигналу на нейрон його вміст змінює оптичні характеристики, починає «світінитися» в наслідок «світіння» флуоресціюючих молекулярних комплексів (тубуліновий білок + флуорохром), які були попередньо введені у цитоплазму нейрона. Це явище раніше описане нами у роботі [4] та інших. Виконання всього об'єму робіт, результати яких ми описуємо в даній статті, відбувалося у кілька нижчеперелічених етапів, результати етапів 1-3 виконані попередньо.

1 – Були проведені серії експериментальних досліджень, а по тому всебічно проаналізовані результати виконаних нами експериментів з реєстрації трансмембранних електричних хемокерованих струмів (ТЕХ-струмів) на нейронах з використанням методів внутрішньоклітинного діалізу та фіксації потенціалу та змін оптичних характеристик нейронів (за умов використання флуоресцентних молекулярних маркерів, реєстрація за допомогою люмінесцентного мікроскопа [4] при надходженні збудження на нейрони. За результатами таких досліджень були розроблені попередні програмні моделі, що передували описаним у даній роботі [7].

2 - Розроблена модель гіпотетичного екрану («квазі екрану»). Матрицю екрану формує набір нейронів (в умовах культури) на пластиковій підложці, армованій електродами [8]. Біотехнічна

конструкція вноситься в електричне коло з вимірювальною апаратурою, що описане в численних відповідних керівництвах [1, 2].

3 - Наступним кроком ми намагалися створити програмну модель цього квазі екрану, який в якості світлочутливих елементів містить нейрони зі змінними оптичними властивостями люмінесценції, організованими на матриці-підложці, армованій електродами. При цьому нейрони геометрично організовані у вигляді 2D матриці і відповідають пікселям екрану.

Всі ці 3 етапи роботи були виконані, результати опубліковані раніше у ряді науково-технічних видань [4, 7, 8, 9]. Наступні етапи роботи полягали у: 4 - створенні програмних моделей функціонування цієї 2D матриці нейронів при надходженні на неї збуджуючого вхідного сигналу (створена демонстраційна модель роботи елементарного екрану з таких біонічних елементів), та 5 - розробленні елементарної схеми кодування інформації на такому екрані при створенні найпростіших зображень. Результати робіт, виконаних на етапах 4 та 5 описані нижче.

**Описання квазі екрану з біонічних елементів у складі біотехнічної системи.** Розробляючи біотехнічну систему, що поєднує у собі біологічний та технічний компоненти, ми маємо на увазі наступне. На рисунку 1 А, Б зображено біотехнічну систему, як поєднання біонічної (1) та електронно-вимірювальної частин (2). На рис. 1, А біонічна частина представлена у вигляді 1,а – елемента, що містить один нейрон або його фрагмент. Рисунок 1, Б демонструє біонічний елемент 1,б у вигляді 2D матриці з n елементами, кожен з яких є аналогічним до 1,а. Розробляючи ідею створення квазі екрану з світних біонічних елементів, приймаємо наступну абстракцію. Квазі екран можна уявити у вигляді шахової дошки з чергуванням рядків і стовпчиків, в окремі клітини якої вміщені досліджувані нами оптично активні елементи. Оптично активні елементи такого екрану розміщуються на пластиковій підкладці спеціально розробленого геометричного профілю, армованого електродами. В певних клітинах такого екрану знаходяться світлочутливі біонічні елементи (рис 1 А, В).

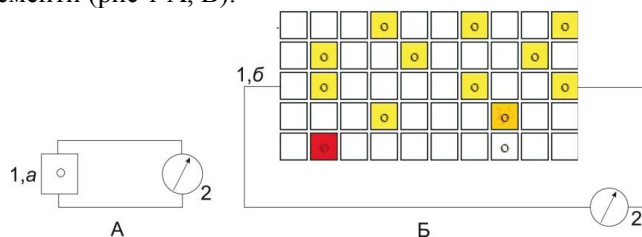


Рис 1. Біотехнічна система, як поєднання біонічної (1) та електронно-вимірювальної частин (2). 1,А для одного нейрону або його фрагменту; 1,Б – для 2D матриці нейронів.

На квазіекрані, наведеному на Рис. 1 А, Б показані крапками біонічні елементи та їх взаємне розташування на матриці. Таке розташування елементів на екрані визначається умовами, за яких можливе існування біонічних елементів в умовах експерименту [4, 5, 6].

**Припущення моделі.** При створенні моделі ми зробили наступні припущення.

1) Кожен піксель екрану може перебувати у 3-х станах, що на моделі позначені кольорами "червоний",

"жовтий" («оранжевий»), "безколірний".

2) Функціонування пікселя можна описати моделлю з 4-х фаз, природа яких відповідає 4-м певним станам білкових молекул (канало-рецепторний комплекс - КРК, що містять канал іонного електричного струму) (описання фаз дивись нижче).

3) Демонстраційну швидкість відпрацювання моделі збільшено у 60 разів у порівнянні із реальними процесами в природі, зареєстрованими експериментально [4]: одній хвилині реального процесу відповідає 1 секунда моделі.

4) Кодування зображення відбувається шляхом утворення набору точок різних кольорів за певний інтервал часу.

**Описання біонічних елементів.** Як було сказано вище, світлочутливими елементами такого екрану є біонічні елементи із змінними оптичними властивостями. У складі нашого екрану вони відіграють роль пікселів. Такими біонічними елементами для нашого експерименту можуть бути :

1) комплекс молекули білку та молекули оптично активної речовини (флюорохрому);

2) «світні» нейрони, тобто ті, флюоресценція яких була зареєстрована [4].

Наша модель створена для другого варіанту екрану, коли в якості оптично активних елементів розглядаються нейрони з інкорпорованими молекулами флюорохрому. Розроблена нами модель базується на динаміці змін оптичних характеристик нейронів, описаній в [4].

**Відображення динаміки змін оптичних характеристик нейронів у складі матриці квазі екрану.** Згідно із зареєстрованими результатами експериментів реакцію нейрону на надходження збудження сигналу можна уявити у вигляді трьох послідовних фаз, які мають свій фізичний, біохімічний та фізіологічний смисл (рис. 2). Проте для більш адекватного відображення

послідовності подій, спостережуваних в експерименті, ми ввели ще точки реєстрації, проміжні, після фази 2. Нижче подано фізико-хімічний смисл цих точок, вибраних для створення моделі.

1) Перша фаза збудження біонічного елементу в момент часу  $t_0$  – момент часу до надходження збуджуючого електричного сигналу (рис. 2). Момент  $t_0$  характеризується тим, що амплітуда цього сигналу  $A=0$ , інтенсивність флюоресценції нейрону наближається до нуля ( $E_0$ ). На моделі пікселі у цій фазі кольором не виділені (рис. 1, 3, 4).

2) Друга фаза збудження біонічного елементу в момент часу ( $t_1$ ). Фаза зображена на рисунку 2, як точка 2. Інтервал між  $t_1-t_0=20$  секунд. При переході з фази 1 у 2 амплітуда збуджуючого сигналу – електричного струму зростає до максимуму  $A=A_{max}$ . Світіння пікселю є максимальне ( $E_{max}$ ). На моделі нейрони в цій фазі позначено червоним кольором (рис. 4, 5).

3) Проміжні точки, що є характеристичними (проміжна фаза) для збудження біонічного елементу в момент часу ( $t_2, t_3$ ). (показані на рис. 2, як точки на векторі між 2 та 3). Інтервал між  $t_2-t_0 = 30$  секунд та часові точки поблизу цього значення. Для цих значень амплітуда збуджуючого сигналу (електричного струму) починає зменшуватися (світіння біонічного елементу зменшується)  $A=A_{min}$ . Світіння пікселю є мінімальне ( $E_{min}$ ). На моделі позначено жовтим та оранжовим кольорами у залежності від величини амплітуди струмів та інтенсивності світіння у цих точках (рис. 4, 5).

4) Четверта фаза збудження біонічного елементу в момент часу  $t_4$ . Інтервал між  $t_4-t_0 = 180$  секунд. Фаза характеризується тим, що амплітуда цього сигналу (електричного струму)  $A=0$ , інтенсивність флюоресценції – наближається до нуля ( $E_0$ ). На моделі ці точки кольором не мають (рис 3).

Зображені на рис. 2 А, В вектори означають перехід системи з одного стану в інший. Фактично, переходи, зображені на рис. 2 А, В адекватно відповідають 3-м фазам функціонування молекул КРК у складі біомембрани при пропусканні ними ТЕХ-струмів при проходженні збуджуючого сигналу. Вершини трикутника (рис. 2 А, В) означають три стани, в яких може перебувати система. Ці три стани на моделі позначені кольорами «білий, червоний, жовтий (оранжовий)». На рис. 2, В на векторі переходу позначені характеристичні точки, смисл яких роз'яснено вище. При цьому:

- вектор, що позначає перехід молекул КРК з 3 в 1

відповідає вищеописаним фазам 1 і 3 (без кольору);

- точка 2 відповідає фазі 2 (червоний колір);

- точки на векторі, що позначає перехід молекул КРК з 2 в 3 відповідають точкам переходу (жовтий та оранжовий кольори застосовані для різних точок у залежності від величини амплітуди сигналу).

Системи, які можна описати таким чином, потенціально є системами з «пам'яттю», якщо в якомусь із станів система може перебувати довше у порівнянні з іншими станами. Отже, запропонована нами модель може бути розширена для моделювання екрану з елементами, що мають властивості пам'яті.

**Демонстрація моделі.** На рис. 3 показано початковий вигляд моделі, не зафарбовані кола показують наявність біонічного елементу: першу фазу роботи програми.

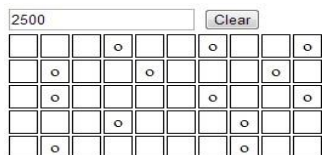


Рис 3. Початковий вигляд (пояснення див. у тексті).

На наступному рисунку 4 зображено модель станом на 101 секунду роботи. Збуджуючий систему вхідний електричний сигнал надходить у ліву верхню клітинку-комірку та активує перший із оптично-активних елементів. По тому цей сигнал передається послідовно з лівого верхнього кута до нижнього правого. На рис.4 видно, що один із елементів знаходиться у фазі 2 (максимальне збудження), а більшість елементів вже пройшли фазу 2 і перейшли у стани, проміжні між 2 та 3 (позначені точками на векторі 2-3) демонструє нам роботу програми на 120 секунді. Видно, що всі елементи поступово, через заданий інтервал часу, переходять від однієї фази до іншої, тобто збудження хвилею переміщується у напрямку від лівого верхнього кута до правого нижнього.

Алгоритм моделі. **Вищеописана модель є базовою. Її алгоритм наведено на рисунку 6.**

**Кодування зображень на моделі.** Розглянемо наступний етап – кодування зображень у рамках описаної нами вище моделі (рисунки 7- 9). На рис. 7 фактично, подане те ж зображення, що і на рис 4. Відмінність між ними та, що оптично-активні збудливі елементи (нейрони) на рис. 4 знаходяться не у кожній клітинці, а чергуються з порожніми комітками-клітинками.

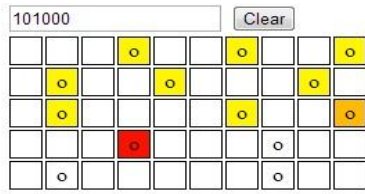


Рис 4. Робота моделі на 101 секунді (пояснення див. у тексті).

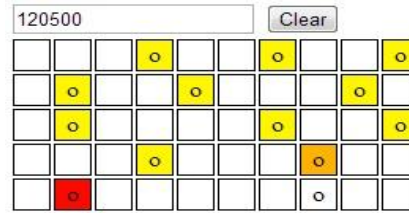


Рис 5. Кінцевий вигляд: робота моделі на 120 секунді (пояснення див. у тексті)

На рис. 7 такі оптично-активні збудливі елементи (нейрони) розташовані у кожній клітинці, заповнюючи їх всі підряд. Це означає, що збуджуючий сигнал передається зліва направо від елемента до елемента. Активними на рис.7 є елементи-нейрони у перших 13 позиціях, заповнені перший та частково другий рядок матриці. Як було описано вище, найбільш інтенсивно забарвлений елемент («червоний»)

означає елемент у стані максимального збудження (із відповідними до цього стану величинами ТЕХ-струмів та оптичних характеристик (див.вище). У рамках моделі прийmemo, що наявність такого ОДНОГО елемента у стані максимального збудження означає КОЛО, яке автоматично виникає за таких умов у нижній частині малюнку.

На рисунках 8 та 9 зображений подальший розвиток процесу, коли збуджуючий сигнал перемістився вже далі у напрямку правого нижнього кута. На рис. 8 вже два нейрони у позиціях 10 та 14 демонструють максимальні величини ТЕХ-струмів та інтенсивності люмінесцентного «світіння». Приймемо у рамках моделі, що наявність ДВОХ нейронів у максимальній фазі збудження кодуються ТРИКУТНИКОМ.

На рисунку 9 зображений випадок, коли збуджуючий сигнал, переміщуючись поступово із лівого верхнього кута до правого нижнього активізував уже всі елементи моделі в усіх 50 позиціях. При цьому у стані максимального збудження (максимальні ТЕХ-струми та максимальна люмінесценція) все ще перебувають два нейрони у позиціях 13 та 17 (або 3 та 7 другого рядка). Отже, якщо прийняти,

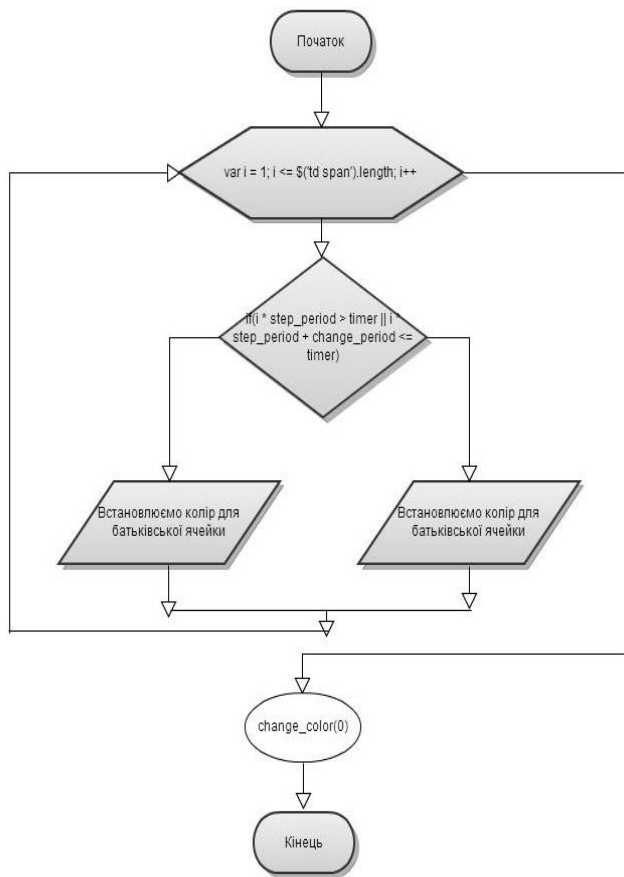


Рис 6. Алгоритм базової моделі.

що два нейрони у стані максимального збудження кодують ТРИКУТНИК, то і цей випадок також кодує саме цю фігуру, незалежно від активності нейронів у інших 48 позиціях.

**Обговорення та висновки.** Раніше ми повідомляли, що нами були проведені серії експериментальних досліджень, а по тому всебічно проаналізовані результати цих експериментів з реєстрації ТЕХ-струмів на нейронах з використанням методів внутрішньоклітинного діалізу та фіксації потенціалу. В інших серіях експериментів за допомогою люмінесцентного мікроскопа ми досліджували зміни оптичних характеристик нейронів за умов використання флуоресцентних молекулярних маркерів [4] при надходженні збудження на нейрони. За результатами таких досліджень нами були розроблені попередні програмні моделі, що передували описаним у даній роботі [7, 9]. В даній роботі наведені результати наших останніх робіт, що є продовженням попередніх.



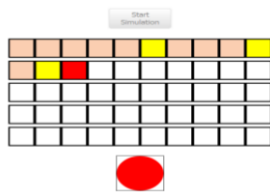


Рис. 7. Кодування зображень у рамках створеної моделі: фігура «КОЛО» (пояснення див. у тексті).

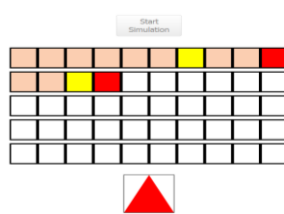


Рис. 8. Кодування зображень у рамках створеної моделі: фігура «ТРИКУТНИК»

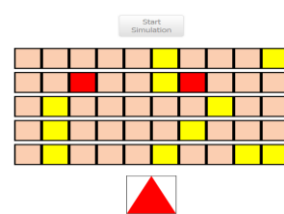


Рис. 9. Кодування зображень у рамках створеної моделі: фігура «ТРИКУТНИК» (варіант 2) (пояснення див. у тексті).

1. Розроблена модель біотехнічної системи - екрану, що в якості світлочутливих елементів містить нейрони із змінними оптичними властивостями флюоресценції. При цьому нейрони відповідають пікселям екрану.

2. Матрицю екрану формує набір нейронів на пластиковій підложці, армованій електродами.

3. Створена демонстраційна модель роботи елементарного екрану з таких біонічних елементів, що являє собою 2D матрицю з елементів-нейронів, на яку надходить збуджуючий електричний сигнал та надалі поширюється у площині матриці. При цьому елементи-нейрони на такій матриці знаходяться на різних стадіях збудження. 4. Розроблена елементарна схема кодування інформації на такому екрані при створенні найпростіших зображень (коло, трикутник). У рамках створеної нами моделі на матриці 50 нейронів (10 X 5) наявність одного (1) нейрона у стані максимальної активності кодує фігуру КОЛО. Наявність двох (2) нейронів у стані максимальної активності на цій матриці кодує фігуру ТРИКУТНИК. Це дійсно незалежно від того, що інші нейрони на цій матриці перебувають у станах, які не досягають величин максимальної активності.

5. Виконана робота є подальшим створенням програмного забезпечення для біотехнічних систем.

6. У термінах створеної моделі трикутник може означати, наприклад, присутність певного літального апарату, а коло – відсутність такого об'єкту.

Результати цієї роботи можуть бути застосовані на практиці – в освітньому процесі студентів, що вивчають відповідні дисципліни та при подальшій розробці нових біотехнічних систем. Моделі, розроблені і представлені у даній роботі, в подальшому можуть бути застосовані у двох напрямках. Перший – для моделювання експериментальних досліджень реального мозку на простішій моделі, у порівнянні з 3D моделлю реального мозку (ГМС). Другий – для створення біотехнічних пристроїв, що могли б слугувати для розпізнавання різних об'єктів. І, без сумніву, може бути застосована у навчальному процесі студентів, що вивчають відповідні дисципліни.

Роботами в рамках сучасних проєктів може бути створення різноманітних імплантів. Вже зараз відомо про розробки імпланту, який може бути вмонтований в мозок людини і поєднаний з її оком для відновлення втраченого зору. Така біотехнічна система також може бути створена, як сукупність імпланту та технічної частини, спрямована на ліквідацію ушкоджень організму. У такому випадку, за допомогою таких технічних систем, стануть реальними мрії про допомогу людям з обмеженими фізичними можливостями, стануть можливими проєкти з допомоги їм повертатись до повноцінного життя.

#### Список літератури

1. Костюк П.Г. Механізми електричної возбудимості нервової клітки / П.Г. Костюк, О.А. Кривопаль. – М.: Наука, 1981. – 204 с.
2. Сигворс Ф. Регістрація одиночних каналів / Сигворс Ф., Сакман Б., Неер Э. – М.: Мир, 1987. – 448 с.
3. Belan P. Localization of Ca<sup>++</sup> extrusion sites in pancreatic acinar cells / Belan P., Gerasimenko O., Tepikin A. // Journal of Biological Chemistry. – 1996. – V.271. – P.7615-7619.
4. Шутко В.М. Рідкокристалічні наноструктури в нейронах та розробка на їх основі екранів для телевізійних систем / Шутко В.М., Ключко О.М. // Вісник Інженерної Академії Наук – 2012 – №3-4. – С. 170-173.
5. Pharmacological properties of amino – acid receptors in isolated hippocampal neurons / [Krishtal O., Kiskin N., Tsyndrenko A., Klyuchko E.] // "Walter de Gruyter" – Berlin (Germany), Receptors and ion channels – 1987. – P. 127 – 137.
6. Akaïke N. Spider toxin blocks excitatory amino-acid responses in isolated hippocampal pyramidal neurons / Akaïke N., Kawai N., Kiskin N. I., Klyuchko E. M., Krishtal O. A., Tsyndrenko A. Ya. // Neuroscience Letters. – 1987. – V. 79. – P. 127 – 137.
7. Ключко О. М. Моделювання поширення електричних сигналів по нейрону та його наноструктурам / Ключко О.М., Хайрутдінов Р. Р. // Електроніка та системи управління. – 2011. – №2(28). – С. 120-124.
8. Ключко О. М. Нові принципи розробки екранів для телевізійних систем / Ключко О.М., Холявко І. В. // Вісник Інженерної Академії Наук. – 2013. – №2. – С. 79-83.
9. Ключко О. М. Комп'ютерне моделювання деяких наноелементів для радіотехнічних та телевізійних систем / Ключко О.М., Пашківський А.О., Шеремет Д.Ю. // Електроніка та системи управління. – 2012. – №3(33). – С. 102-107.