

УДК 004.942

К. П. Газдюк*, аспірант,
В. В. Жихаревич*, канд. фіз.-мат. наук,
О. М. Нікітіна**, канд. фіз.-мат. наук,
С. Е. Остапов*, д-р фіз.-мат. наук, професор

*Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, м. Чернівці,

**Чернівецький факультет Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут», м. Чернівці

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РУХОМИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКОМОЦІЇ ЧЕРВ'ЯКОПОДІБНИХ ОРГАНІЗМІВ

Об'єктом дослідження даної роботи є моделювання підсистеми дощового черв'яка, яка керує його локомоцією. В якості методу для моделювання обрано метод рухомих клітинних автоматів (РКА), який з успіхом використовується для моделювання різних систем, де мають місце зміни об'єму – від пружних деформацій до розривів. При цьому система розбивається на фрагменти, що представляються у вигляді окремих дискретних елементів – автоматів. Механічна підсистема відображає відповідні фрагменти тіла організму та моделює скорочення м'язів. При скороченні поперечних м'язів відповідні фрагменти тіла збільшуються у довжині та стискаються, а при скороченні поздовжніх навпаки – зменшуються у довжині та розширюються. Сигналом для скорочення м'язів є стан відповідного «нервового закінчення» нейронної підсистеми, що асоціюється із відповідним РКА. Робота клітинно-автоматного алгоритму є асинхронною. Це передбачає довільний випадковий вибір одного РКА зі всієї множини та відповідну модифікацію його стану та стану його найближчих сусідів згідно із правилами взаємодії. При моделюванні нейронної підсистеми реалізовано елементарні аналоги штучних нейронів (персептронів). Для кожного окремого РКА вказано координати віддалених фрагментів модельованого організму, стани яких є вхідними сигналами для відповідного нейрону. Для забезпечення вибору оптимального руху запропоновано еволюційний алгоритм на основі нейронної підсистеми з використанням аналогів елементарних штучних нейронів. Отримана комп'ютерна модель, що імітує черв'якоподібну локомоцію. Проведені дослідження у програмному середовищі показали, що з довільного початкового хаотичного стану організм прямує до стану максимально ефективного руху (мінімум енергії при максимальній швидкості), що обумовлене самоорганізацією сигналів у хаотичній нейронній мережі.

Ключові слова: *рухомі клітинні автомати, комп'ютерне моделювання, локомоція, схема сусідства.*

Вступ. Із стрімким розвитком комп'ютерних технологій все більше можливостей з'являється для дослідження принципів організації та функціонування елементарних живих організмів та їхніх підсистем [1, 2]. Актуальність і важливість цих досліджень є поштовхом для розуміння інформаційних процесів, що протікають у більш високоорганізованих істот, зокрема й людини, та призвели до виникнення нової науки — біоінформатики. На сьогоднішній день побудувати повну модель найменшого живого організму практично неможливо, проте одним із шляхів проведення досліджень у цьому напрямку є моделювання живо-подібних систем (life-like systems), що передбачає спрощення моделі та виділення лише найбільш суттєвих властивостей її складових. Це спонукає до розгляду проблеми не тільки з інженерної точки зору, а і з програмної, тобто створення середовища моделювання поведінки одно- та багатоклітинних організмів для дослідження можливості їх локомоції, побудови оптимальної моделі руху на основі взаємодії між їхніми нейронами, проведення експериментів і збору даних для подальших досліджень нервової системи [3, 4].

Об'єктом дослідження роботи є моделювання підсистеми дощового черв'яка, яка керує його локомоцією. В якості методу для моделювання обрано метод рухомих клітинних автоматів (РКА), який з успіхом використовується для моделювання різних систем [5], де мають місце зміни об'єму — від пружних деформацій до розривів. При цьому довільна система розбивається на окремі фрагменти, що представляються у вигляді окремих дискретних елементів — автоматів. Основна відмінність між класичними клітинними автоматами та рухомими полягає у відсутності у останніх прив'язки до деякої фіксованої однорідної просторової клітинної структури, натомість автомати можуть набувати довільних неперервних значень координат у просторі. Спільними рисами є те, що, як і для класичних клітинних автоматів, стан деякого рухомого автомата у наступний момент часу визначається станом його найближчого оточення згідно заданої схеми сусідства.

У дослідженні змодельований об'єкт поділено на дві частини — механічну підсистему та нейронну [6, 7], з використанням методу РКА та штучних нейронних мереж відповідно.

Основна частина. Механічна підсистема відображає відповідні фрагменти тіла організму та моделює скорочення м'язів: поперечних та поздовжніх. При скороченні поперечних м'язів відповідні фрагменти тіла повинні збільшуватись у довжині та стискатись, а при скороченні поздовжніх навпаки — зменшуватись у довжині та розширюватись. Сигналом для скорочення м'язів є стан відповідного «нервового закінчення» нейронної підсистеми, що асоціюється із відповідним РКА.

На рис. 1 зображено структуру фрагменту множини клітинних автоматів механічної підсистеми змодельованого об'єкта. Схема сусідства

передбачає наявність у кожного РКА не більше чотирьох сусідів. Якщо для деякого РКА відсутній хоча б один сусід, він вважається пограничним (білі круги на рис. 1 із відсутніми сусідніми зв'язками, показаними пунктирними лініями). Горизонтальні зв'язки із сусідами відповідають поздовжнім м'язам, а вертикальні — поперечним.

Робота клітинно-автоматного алгоритму є асинхронною. Це передбачає довільний випадковий вибір одного РКА зі всієї множини (позначений чорним на рис. 1) та відповідну модифікацію його стану та стану його найближчих сусідів згідно із правилами взаємодії. Після завершення взаємодії вибирається інший РКА випадковим чином та процес повторюється.

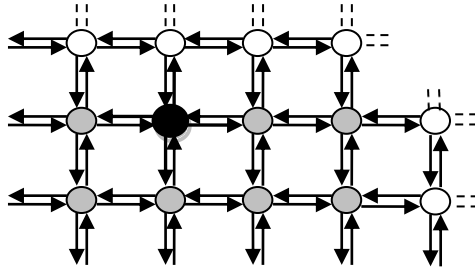


Рис. 1. Фрагмент множини клітинних автоматів модельованої системи та вибраний для взаємодії РКА (чорного кольору)

При організації руху черв'якоподібного організму використовувалася аналог одностороннього руху дощових черв'яків, що забезпечується наявністю на поверхні тіла специфічних ворсинок. Ці ворсинки легко ковзають при переміщенні в один бік, натомість ковзання у протилежний бік ускладнюється (збільшується тертя). Найпростіший варіант реалізації такої односторонньої динаміки — це заборона руху пограничних РКА (білі кола на рис. 1) у напрямку розташуванням лівого сусіда (при переміщенні організму вправо) або навпаки.

Суть клітинно-автоматних взаємодій полягає у встановленні відстаней між відповідними РКА під впливом відповідних сигналів (рис. 2).

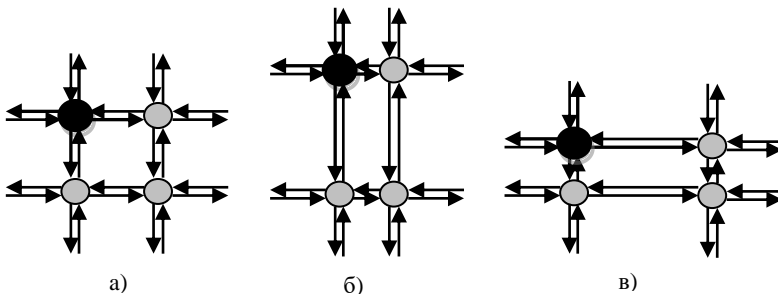


Рис. 2. Приклади взаємного розташування клітинних автоматів при взаємодії

На рис. 2 показано приклади взаємного розташування РКА при взаємодії. Рис. 2 а) відображає стан РКА у випадках або відсутності сигналів скорочення м'язів для вибраної клітини, або намаганні скоротити обидва м'язи (поздовжній та поперечний). Рис. 2 б) відображає стан РКА у випадку сигналу скорочення поздовжнього м'язу, а рис. 2 с), відповідно, у випадку поперечного.

При цьому необхідно дотримуватись принципу нестисненості фрагментів тіла модельованих організмів, згідно якого об'єм фрагментів при довільних деформаціях є незмінним. Якщо розглядати не тримірну, а двомірну модель, то мова йде про постійність площі фрагментів. У нашому випадку елементарного прямокутного підходу відображення фрагментів, необхідно не тільки встановлювати відповідні відстані між двома взаємодіючими РКА, а ще й встановлювати відповідні відстані між діагональними РКА, тобто із сусідом сусіда вибраного РКА (рис. 3 а)). Причому, якщо сусід поздовжній, то сусід сусіда — поперечний і навпаки. Якщо це не передбачити, то неминуче відбудеться порушення принципу нестисненості (рис. 3 б)).

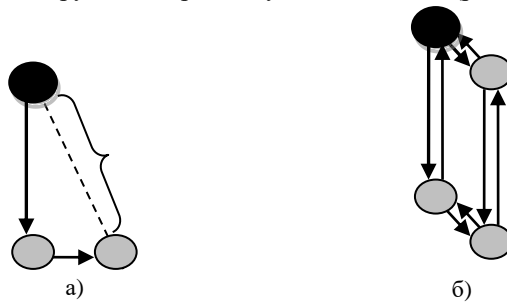


Рис. 3. Схематичне зображення результату РКА-взаємодії:
 а) при збереженні принципу нестисненості;
 б) при порушенні принципу нестисненості

При моделюванні нейронної підсистеми реалізовано елементарні аналоги штучних нейронів (персептронів). Для кожного окремого РКА вказано координати віддалених фрагментів модельованого організму, стани яких є входними сигналами для відповідного нейрону. При цьому входні зв'язки утворюються хаотичним чином. Кількість зв'язків є фіксованою для всіх РКА. На рис. 4 показано спрощене схематичне зображення організації нейронної підсистеми. Тут, для простоти, наведено лише два штучні нейрони із п'ятьма зв'язками. У нижній частині рисунку показано хаотичну геометрію зв'язків, а у верхній — відповідну модель нейронів (знизу — входні рецептори, зверху — вихідні керуючі сигнали). Основна задача штучних нейронів, по аналогії із біологічними нейронами, — формувати сигнали на виході, виходячи із набору входних

сигналів залежно від функції перетворення та стану входів. У нашому випадку стан входів — це один із трьох варіантів взаємного розташування клітинних автоматів, показаних на рис. 2.

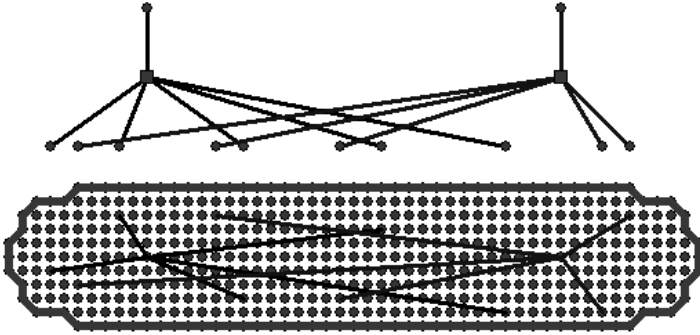


Рис. 4. Спрощене схематичне зображення організації нейронної підсистеми

Для опису математичної моделі нейронної мережі визначимо функцію перетворення $f : X \rightarrow Y$, що формує одне з трьох вихідних значень (0 — відсутність сигналу, 1 — скоротити поздовжній м'яз, 2 — скоротити поперечний м'яз), залежно від значення суми вхідних сигналів, помножених на вагові коефіцієнти. Кожен вхід має свою власну синаптичну вагу, яка надає входу вплив, необхідний для функції суматора елемента обробки:

$$y_j = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq \sum_{i=1}^K x_i w_i < 2K/3, \\ 1, & \text{if } 2K/3 \leq \sum_{i=1}^K x_i w_i \leq 4K/3, \\ 2, & \text{if } 4K/3 < \sum_{i=1}^K x_i w_i \leq 2K, \end{cases} \quad (1)$$

де $0 \leq j \leq N$, n — кількість РКА у модельованому об'єкті, K — максимальна кількість зв'язків для нейронів; x_i ($i = 0, 1, 2$) — вхідні сигнали; $w_i \in [0, \dots, 1]$ — вагові коефіцієнти, що є мірою сили вхідних зв'язків і моделюють різноманітні синаптичні сили біологічних нейронів.

Ваги суттєвого входу підсилюються і, навпаки, вага несуттєвого входу примусово зменшується, що визначає інтенсивність вхідного сигналу. Слід зауважити, що значення вагових коефіцієнтів та порядок розташування умовних операторів у формулі (1) може змінюватись та є характеристикою окремого РКА. Загальну модель нейрона зображено на рис. 5.

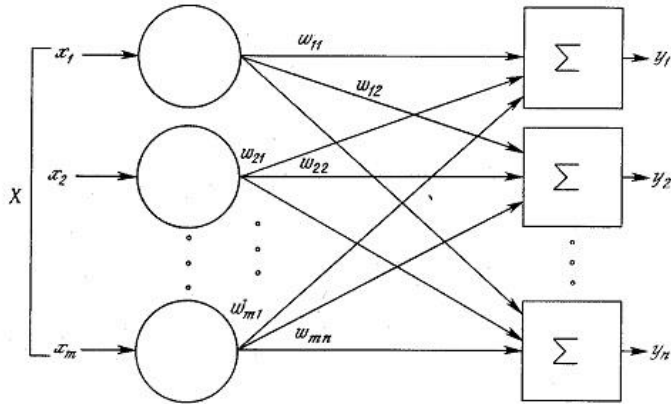


Рис. 5. Загальна модель нейронної мережі

Алгоритм змін вагових коефіцієнтів та порядку розташування умовних операторів у формулі (1) — еволюційний. Як відомо, довільний еволюційний алгоритм передбачає випадкові зміни (мутації) параметрів та оцінку впливу цих змін на динаміку системи згідно встановленого критерію. Якщо критерій задовольняється, зміни закріплюються, в іншому випадку — відхиляються, що є повним аналогом природного відбору. Критерієм еволюційного відбору, у нашому випадку, є мінімізація змін вихідних значень нейронів при максимальній швидкості руху черв'якоподібного організму. Зміни вихідних значень нейронів $\Delta y = |y_{t+1} - y_t|$ відображають енергію $E(y, t)$, яку витрачає організм:

$$E = \frac{m_0 S^2(y)}{t^2}, \quad (2)$$

де m_0 — коефіцієнт, що відображає числове значення маси модельованого об'єкта; $S(y)$ — переміщення клітини у просторі, що залежить від вихідного сигналу y , що вимірюється у відносних одиницях — пройдений шлях, поділений на відстань між РКА у стані спокою; $t = l/n$, де l — кількість РКА взаємодій, n — кількість РКА у модельованому об'єкті.

Очевидно, що чим частіше будуть скорочуватись м'язи, тим більше енергії буде витрачатися організмом. Таким чином, природнім є прямування до зменшення енергетичних витрат при досягненні цілі — максимально можливої швидкості руху.

$$E(y, t) \rightarrow \min \text{ при } V(y, t) \rightarrow \max. \quad (3)$$

При цьому, окремим аспектом реалізації динаміки організму під керуванням потоків нейронних сигналів, є введення поняття інерційності, тобто деякого часового параметру, який визначає швидкість стиснення м'язів при переключенні відповідних керуючих сигналів.

Цей параметр по суті визначає та обмежує максимально можливу швидкість руху.

При цьому слід відмітити, що описана вище елементарна еволюційна стратегія ефективно працює при невеликій кількості клітинних автоматів, з яких складається черв'якоподібний організм. При збільшенні кількості автоматів починає виникати проблема слабкої чутливості еволюційного алгоритму відносно визначення впливу однієї зміни (мутації) нейронної функції клітинного автомата на поведінку системи в цілому. Виходом з цієї ситуації може бути організація взаємних впливів нейронних функцій сусідніх клітин, результатом яких є деяка кластеризація, тобто самовільне утворення деяких областей (доменів), у межах яких сусідні автомати функціонують схоже (синхронно). Взаємний вплив передбачає деякий рівень дублювання вихідних реакцій нейронних частин двох сусідніх взаємодіючих автоматів. Тут можна навести деяку аналогію із «зараженням» одного автомата іншим. З іншого боку, ці домени не є стаціонарними та піддаються руйнівному хаотичному впливу у випадку, якщо функціонування домену не відповідає еволюційному критерію. При цьому, чим більше відхилення макродинаміки черв'якоподібного організму від найбільш оптимальної, тим більший ступінь хаотизації та руйнування. Тобто відбувається протидія процесу самоорганізації однотипних кластерів клітинних автоматів.

Для реалізації описаного алгоритму введено відповідний індексний масив, який містить наступні параметри клітинних автоматів:

- 1) тип клітинного автомата (пограничний, внутрішній, тощо);
- 2) координати РКА у просторі;
- 3) стан сигнального нейрона;
- 4) індекси сусідніх РКА (механічна підсистема);
- 5) індекси віддалених РКА (нейронна підсистема);
- 6) параметри формули (1).

Проведені дослідження у програмному середовищі показали, що з довільного початкового хаотичного стану (рис. 6), організм прямує до стану максимально ефективного руху (мінімум енергії при максимальній швидкості), що обумовлене самоорганізацією сигналів у хаотичній нейронній мережі.

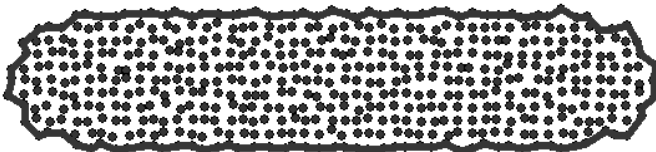


Рис. 6. Початковий стан черв'якоподібного організму у середовищі моделювання

Динаміку еволюційного процесу для k ітерацій зображено на графіку (рис. 7).

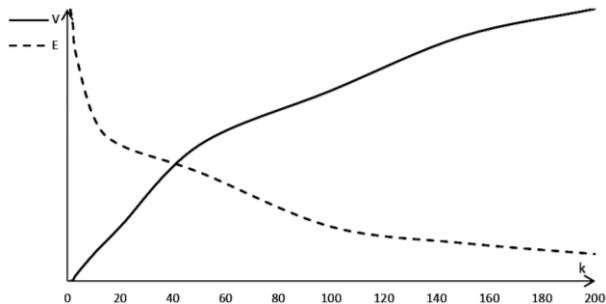


Рис. 7. Динаміка еволюційного процесу пошуку оптимальних параметрів нейронної мережі

При цьому слід зауважити, що існує певний набір стійких шаблонів кінцевої оптимальної поведінки, наприклад, рух «нематода» (рис. 8), половинне стиснення (рис. 9), сегментне стиснення (рис. 10) тощо.

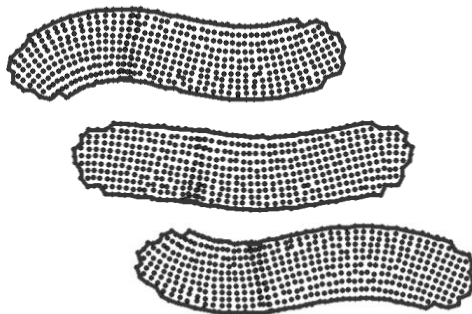


Рис. 8. Візуалізація руху типу «нематода»

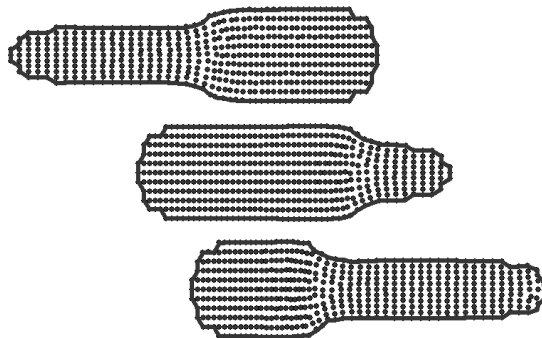


Рис. 9. Результат моделювання руху типу «половинне стиснення»

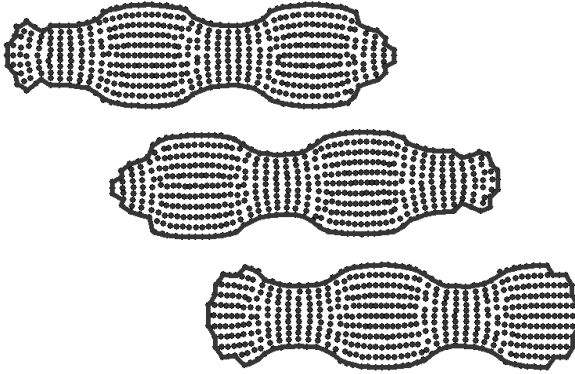


Рис. 10. Візуалізація руху типу «сегментне стиснення»

Зауважимо, що найбільш оптимальним є переміщення «пружиною» — повне скорочення всього тіла з наступним повним розтяганням (рис. 11).

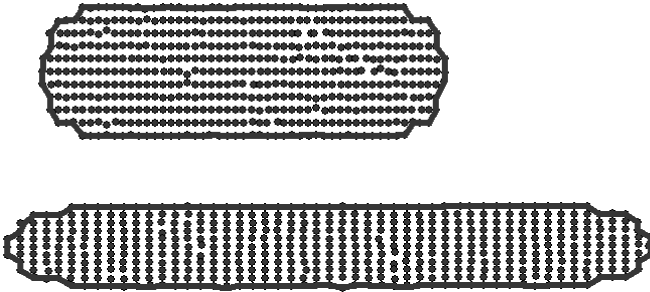


Рис. 11. Візуалізація руху типу «сегментне стиснення»

Висновки. У статті застосовано метод рухомих клітинних автоматів до моделювання локомоції черв'якоподібного організму, істотними перевагами якого є можливість переходу від статичної сітки до концепції сусідства. Розглянуті основні принципи локомоції, на підставі яких побудована модель. Знайдено правила клітинно-автоматних взаємодій згідно з концепцією сусідства. В результаті отримана комп'ютерна модель, що імітує черв'якоподібну локомоцію.

Новизна досліджень полягає в використанні істотно нового підходу до моделювання локомоції багатоклітинного організму, який досить точно відтворює процес локомоції в живих організмах.

Надалі планується моделювати як прості, так і більш складні багатоклітинні організми, збирати дані і вивчати їх поведінку, ембріогенез, самоорганізацію, самореплікацію, їх нервову систему, м'язову

систему і т.д. Звичайно, це можливо тільки при більш докладному біологічному аналізі предметної області і з розвитком програмної інженерії. Подальший розвиток апаратного забезпечення дозволить моделювати набагато складніші приклади і отримувати швидкість передачі сигналу на рівні нейронної мережі людини.

Список використаних джерел:

1. Brenner S. The genetics of *Caenorhabditis elegans* / S. Brenner // *Genetics*. — 1974. — № 77. — P. 71–94.
2. Brenner S. Excerpts from proposal to the Medical Research Council / S. Brenner. — 1963.
3. Internet service Open source project dedicated to creating the world's first virtual organism in a computer, a *C. elegans* nematode [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.openworm.org/index.html>.
4. Rose J. K. Analyses of Habituation in *Caenorhabditis elegans* / J. K. Rose, C. H. Rankin // *Learning & Memory*. — 2001. — P. 63–69.
5. Bandman O. L. Parallel implementation of cellular automata algorithms for simulation of spatial dynamics / O. L. Bandman // *Sib. Zh. Vychisl. Mat.* — 2007. — Vol. 10, № 4. — P. 335–348.
6. Bäck T. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice* / T. Bäck. — New York : Oxford University Press, 1996.
7. Goldberg D. E. *Genetic Algorithms in Search / D. E. Goldberg // Optimization, and Machine Learning*. — Massachusetts : Addison-Wesley 1989.

APPLICATION OF THE MOVABLE CELLULAR AUTOMATA METHOD TO SIMULATION THE WORM-LIKE ORGANISM'S LOCOMOTION

The object of the study of this work is the simulation of a rainwater worm subsystem, which controls its locomotion. As a method for modeling, the method of movable cellular automata (MCA) is chosen, which is successfully used for modeling of different systems, where there is a change of volume — from elastic deformations to ruptures. In this case, the system is divided into fragments, presented in the form of separate discrete elements — automata. The mechanical subsystem reflects the corresponding body fragments and simulates muscle contractions: transverse and longitudinal. By reducing transverse muscles, the corresponding body fragments should be increased in length and compressed, and with the reduction of longitudinal vice versa — decrease in length and expand. The signal for muscle contraction is the state of the corresponding «nerve ending» of the neural subsystem, which is associated with the corresponding MCA. The work of the cellular automaton algorithm is asynchronous. This involves random selection of one MCA from the set and an appropriate modification of its state and the state of its nearest neighbors in accordance with the rules of interaction. In the simulation of the neural subsystem, elemental analogs of artificial neurons (perceptron) are implemented. For each individual MCA, the coordinates of the re-

mote fragments of the simulated organism, the states of which are the input signals for the corresponding neuron, are indicated. To provide the optimal motion, an evolutionary algorithm based on a neural subsystem with the use of analogues of elementary artificial neurons is proposed. The computer model, simulating worm-like locomotion, is obtained. The conducted studies in the software environment showed that from an arbitrary initial chaotic state the organism goes to the state of maximum effective motion (minimum energy at maximum speed) due to the self-organization of signals in a chaotic neural network.

Key words: *movable cellular automata, computer simulation locomotion, neighborhood scheme.*

Отримано: 23.05.2018

УДК 517.946

А. П. Громик, канд. техн. наук

Подільський державний аграрно-технічний університет,
м. Кам'янець-Подільський

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВНИХ ПРОЦЕСІВ У КУСКОВО-ОДНОРІДНОМУ КЛИНОВИДНОМУ ЦИЛІНДРИЧНО-КРУГОВОМУ ПРОСТОРИ З ПОРОЖНИНОЮ

Актуальність теорії крайових задач для диференціальних рівнянь з частинними похідними, яка інтенсивно розвивається, обумовлена як значимістю її результатів для розвитку багатьох розділів математики, так і численними застосуваннями її досягнень при математичному моделюванні різних процесів і явищ фізики, механіки, біології, медицини, економіки, техніки.

Добре відомо, що складність досліджуваних крайових задач суттєво залежить від коефіцієнтів рівнянь та геометрії області в якій розглядається задача. На цей час досить детально вивчено властивості розв'язків крайових задач для лінійних, квазілінійних та певних класів нелінійних рівнянь в однозв'язних областях.

Водночас багато важливих прикладних задач теплофізики, термомеханіки, теорії пружності, теорії електричних кіл, теорії коливань приводять до крайових задач для диференціальних рівнянь з частинними похідними не тільки в однорідних областях, коли коефіцієнти рівнянь є неперервними, але й в кусково-однорідних та неоднорідних областях, коли коефіцієнти рівняння є кусково-неперервними.

У пропонованій роботі методом інтегральних і гібридних інтегральних перетворень у поєднанні з методом головних розв'язків (матриць впливу та матриць Гріна) за найбільш загальних припущень побудовано точні аналітичні розв'язки ма-