ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 519.7 : 517.9

О.С. Макаренко, Д.А. Крушинський,
Б.І. Гольденгорін

МОДЕЛЬ КЛІТИННОГО АВТОМАТА З АНТИСИПАЦІЄЮ

Вступ

Нині, мабуть, всім, хто має відношення до обчислювальної техніки, відомі моделі з класу клітинних автоматів (найвідомішою з них є комп'ютерна гра Дж. Конвея "Життя" [1]). У найпростішому варіанті ця гра є комп'ютерною реалізацією алгоритмів з класу клітинних автоматів (КА) (див., наприклад, [2–4]). Для розуміння подальшого матеріалу наведемо короткий опис даного алгоритму у двовимірному випадку (численні модифікації наведені в літературі з клітинних автоматів), а також опис самої моделі Дж. Конвея та її модифікацій.

Зазначимо, що як клітинні автомати (зокрема, гра "Життя") загалом вивчалися багатьма дослідниками із застосуванням різних підходів кількісно, аналітично та якісно. Розвиток теорії і прикладних аспектів привів до створення того, що зараз називається клітинно-автоматним підходом. Для демонстрації можливостей КА можна згадати моделювання руху потоків автомобілів та скупчень пішоходів, поширення епідемій, моделювання в галузі гідродинаміки, біології, квантової механіки та астрофізики. Більше того, останнім часом з'явилися гіпотези, що клітинні автомати можна розглядати взагалі як одну з парадигм у поясненні побудови Всесвіту (див., зокрема, [4]).

Однак, звертаючись до витоків КА-підходу, слід зауважити, що напочатку було дослідження живих організмів, особливо їх колективної дії в мозку людини (наприклад, Мак Каллок, Піттс) і, паралельно, – кібернетика у вигляді теорії автоматів і машин Тюрінга [5], логічних досліджень та спроб моделювання інтелектуальної поведінки. Особливу цікавість становить історичний огляд виникнення КА [6], тобто першоджерела появи та розвитку КА, пов'язані значною мірою з вивченням живих систем. Однак на цьому дослідження живих систем ще не вичерпано. Так, останнім часом виникло розуміння того, що врахування поведінки індивідів у великих соціальних системах, особливо їх ментальних якостей, може призводити до виявлення непередбачуваних властивостей (наприклад, в моделях [7]). Кількість таких якостей досить значна [8], і вони поступово починають з'являтися в дослідженнях з клітинних автоматів [9]. Однак серед ментальних якостей є така, врахування якої призводить до далекосяжних наслідків, а саме властивість передбачення, сутність якої полягає в тому, що при переході на наступний часовий крок зміною станів елементів враховуються прогнозовані відомості про стан системи в наступні моменти часу [10].

Однією з можливостей розвитку теорії клітинних автоматів є спроба адекватно відобразити ментальні властивості у схемі клітинних автоматів, і в першу чергу – антисипацію.

Постановка задачі

Метою даного дослідження є спроба ввести одну з ментальних властивостей у КА-модель та виявити, який вплив на поведінку останньої вона матиме.

Зокрема, в статті як приклад вивчення таких властивостей наведено результати дослідження гри "Життя", модифікованої для врахування властивості антисипації (назвемо таку модифікацію "ЖиттяА", тобто "Життя" з антисипацією).

Короткий опис моделі

Формально опис моделі у класі клітинних автоматів має відповідний вигляд.

Нехай Z_2 – двовимірна решітка, S – скінченна множина станів елементів решітки (клітин), s_i з S – стан i-ї клітини Z_2. Під конфігурацією на решітці Z_2 будемо розуміти множину станів всіх клітин в окремий момент часу. Всі можливі конфігурації утворюють простір конфігурацій C на Z_2. Нехай $T = \{0, 1, 2, ...\}$ – дискретні моменти часу, $C(t)$ – конфігурація в момент часу t (t = 0, 1, 2, ...). Локальне правило зміни стану клітини k на Z_2 є задане перетворення T_k, що переводить клітину з поточного стану в стан у наступний дискретний момент часу. Правила зміни станів клітин локальні. Це означає, що стан k-ї клітини залежить лише від станів клітин у деякому її околі N_k. Множина всіх перетворень $\{T_k\}$ клітин на решітці визначає клітинний автомат на решітці Z_2 з простором станів клітин S.

Реалізація моделі життя тоді має такий вигляд. У класичній грі "Життя" Конвея [1] кожна клітина може мати тільки два стани (позначимо їх 0 і 1, тобто $S = \{0,1\}$). Окіл, який використовується в локальних правилах зміни стану – це так званий окіл Мура, що складається з восьми найближчих сусідів. У більшості описів гри "Життя" два стани клітин 0 і 1 інтерпретують відповідно до біологічних асоціацій як "мертву" та "живу" клітини. Тоді зміни станів клітин можна описати відповідним простим правилом.

Нехай у момент часу t деяка непорожня підмножина клітин з Z_2 знаходиться в "живому" стані. Тоді в момент часу $t+1$ "живими" будуть лише ті клітини, які в момент часу t задовольняли такі умови:

1) якщо жива клітина має два або три живих сусіда у своєму околі, то вона залишається живою в наступний момент часу;

2) якщо мертва клітина має рівно три живих сусіда у своєму околі, то вона стає живою в наступний момент часу.

Всі "народження" і "смерті" відбуваються одночасно, тобто автомат функціонує в так званому синхронному режимі.

Опишемо тут моделі, які дають можливість розглянути основні ідеї дослідження.

Функція переходу. Розглянемо правила функціонування класичної гри "Життя". Для формалізації цих правил запровадимо дві функції f_0 і f_1, значення яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Значення допоміжних функцій f_0 та f_1

x	f_0	f_1
0	0	0
1	0	0
2	0	1
3	1	1
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0

Будемо вважати (це знадобиться в подальшому), що ззовні відрізку [0; 8] обидві ці функції набувають нульових значень. Крім того, якщо аргумент не ціле число, то він округлюється до найближчого цілого. При таких позначеннях функція переходу для k-ї клітини матиме вигляд

$$F_k = F(S_k) = \begin{cases} f_0(S_k), C_k = 0, \\ f_1(S_k), C_k = 1, \; F_k \in \{0,1\}, \end{cases} \qquad (1)$$

де S_k – кількість сусідів (ненульових) k-ї клітини; C_k є {0; 1} (0, якщо k-а клітина "мертва", 1 – "жива").

Функціонування автомата з N клітин тоді можна подати у вигляді

$$C_k^{t+1} = F_k^t = F(S_k^t), \; k = 1,\ldots,N, \qquad (2)$$

де t — дискретний час.

Передбачення. Для запровадження ефекту передбачення необхідно побудувати таку функцію переходу, яка б залежала від майбутніх (очікуваних) станів клітин автомата. У нашому випадку функцію переходу класичної гри "Життя", яка має вигляд

$$F_k^t = F(S_k^t),$$

було замінено на таку:

$$1) \;\; F_k^t = F((1-\alpha)S_k^t + \alpha S_k^{t+1}), \; \alpha \in [0;1], \qquad (3)$$

$$2) \;\; F_k^t = F(S_k^t + \alpha S_k^{t+1}), \; \alpha \in IR. \qquad (4)$$

Далі ці два варіанти функції переходу будуть називатися відповідно зваженим та адитивним. Було реалізовано автомати, що використовують обидві дані функції.

Топологія прикладу. Як і в класичній грі "Життя", окіл кожної клітини складається з її восьми сусідів, тобто це окіл Мура з видаленим центром (рис. 1). Значення стану даної центральної клітини (C_k) враховується безпосередньо у функції переходу (див. рівняння (1)).

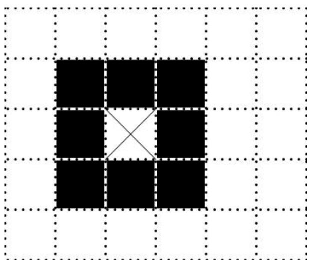


Рис. 1. Окіл Мура клітини

Для того щоб уникнути неоднорідностей, пов'язаних із крайовими умовами, було взято циклічні крайові умови, які нерідко використовуються в дослідженнях клітинних автоматів. У такому випадку поле КА можна розглянути як згорнуте в тор. При цьому, якщо клітини пронумеровано як це показано на рис. 2, то сусідами клітини 2 будуть клітини 1, 3, 5, 6, 7, 13, 14, 15.

12	15	14	13	12	15
0	3	2	1	0	3
4	7	6	5	4	7
8	11	10	9	8	11
12	15	14	13	12	15
0	3	2	1	0	3

Рис. 2. Нумерація клітин 16-клітинного автомата, використана під час симуляцій

Результати обчислювальних експериментів

Для первинного вивчення властивостей запропонованої моделі було створено програмне забезпечення, за допомогою якого проведено обчислювальні експерименти з різними значеннями параметра α та різними початковими умовами. За результатом тестування було побудовано графіки на основі двох типів подання даних.

Перший тип – дерево розв'язків, отриманих при еволюції автомата. Вздовж осі абсцис тут відкладено дискретний час (кроки), по осі ординат – числа, що відповідають конфігураціям автомата (поле КА складається з 16 клітин, кожна з них набуває одного з двох значень. Отже, кожній конфігурації можна однозначно співставити 16-бітне число від 0000 до FFFF).

Розглянемо, наприклад, графік одного з варіантів розрахунків.

З рис. 3, *а* видно, що на першому кроці отримуються три розв'язки, тобто три співіснуючі конфігурації. На другому кроці два з них роздвоюються, в той час як третій розв'язок виявляється тупиковим. На подальших кроках подібним чином відбувається розгалуження та "вмирання" розв'язків. На рис. 3, *б* зображено ті самі дані, але не відображено породжувальні зв'язки між конфігураціями. Недоліком такого типу зображення даних є те, що шкала осі координат має межі від 0 до FFFF (десяткове 65535), тому близько розташовані розв'язки можуть перекриватися на рисунках.

Другий тип зображення даних відображає зміну кількості "живих" клітин від кроку до кроку. Вздовж осі абсцис тут, як і в попередньому випадку, відкладено часові кроки, а по осі ординат – кількість "живих" клітин (від 0 до 16). Розглянемо для прикладу один з отриманих графіків (рис. 4).

З рис. 4 видно, що на кожному кроці, починаючи з першого, отримуємо розв'язки з трьома і шістьма "живими" клітинами, однак останній з них виявляється тупиковим. Із врахуванням попереднього рисунка, де помітна періодичність поведінки, можна зробити висновок, що від кроку до кроку кількість "живих" клітин залишається постійною, змінюється лише їх взаємне розміщення в межах решітки КА.

На рис. 5–6 показано випадок розвинутої множинності розв'язків моделі "ЖиттяА".

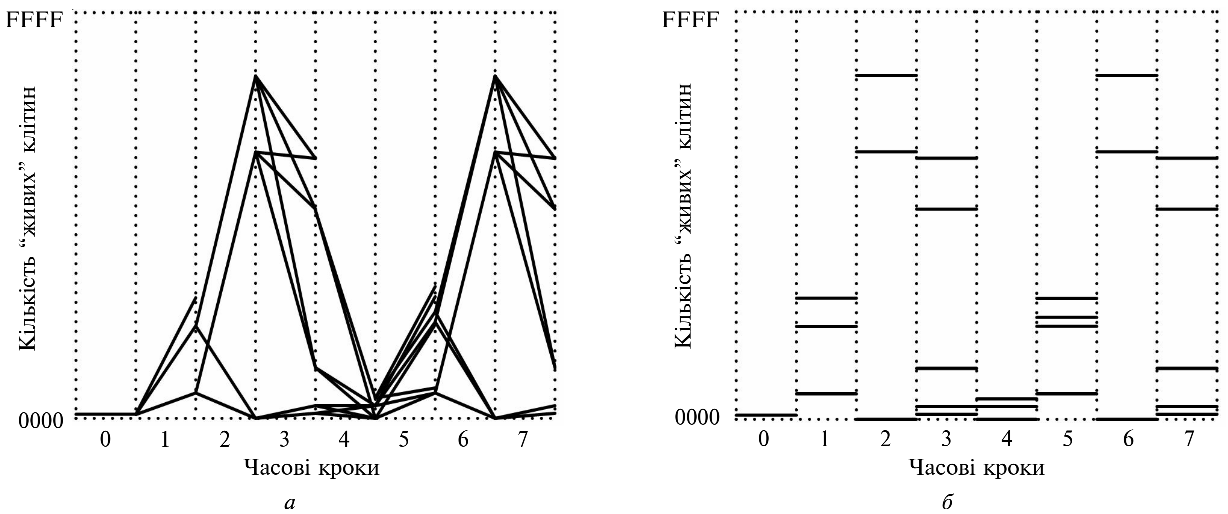
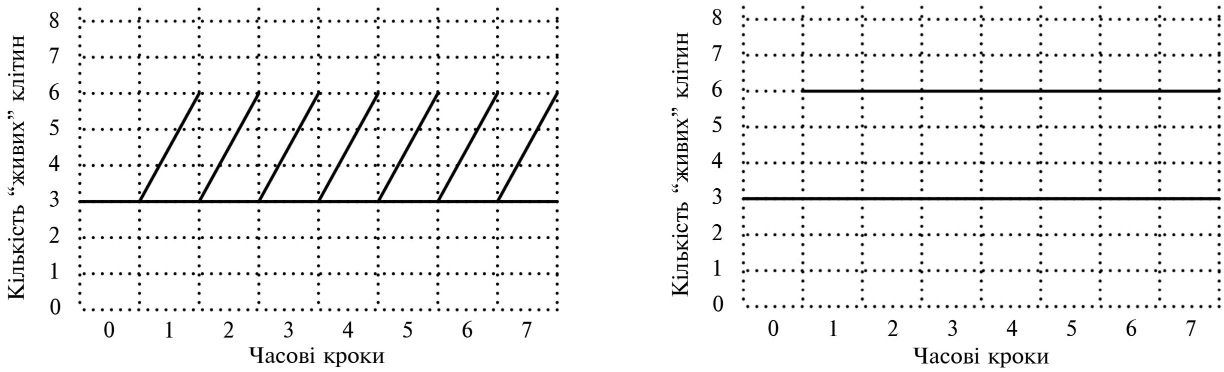


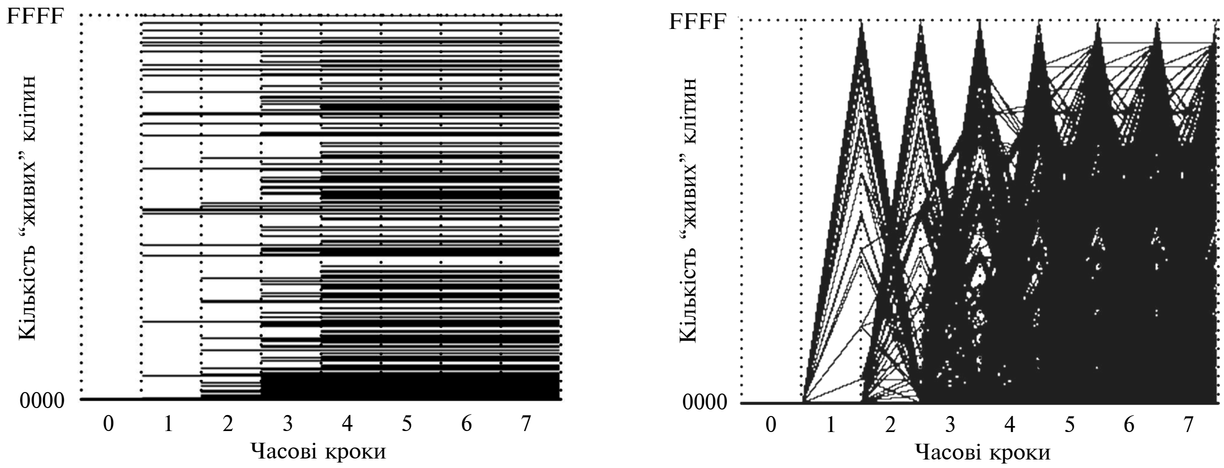
Рис. 3. Виникнення кількох конфігурацій у моделі "ЖиттяА" (графік побудовано для адитивної функції переходу, α = 1,0, початковий стан 0007)

Загальним для всіх проведених експериментів виявилося те, що після деякої кількості кроків кількість розв'язків досягає свого максимального значення (що залежить від вихідних даних) і в подальшому не змінюється (див. рис. 6). При цьому клітинний автомат потрапляє в стаціонарний стан, однак стаціонарність тут виявляється на рівні множин розв'язків, які або змінюються періодично, або залишаються незмінними від кроку до кроку (див. рис. 3 і 5, відповідно).



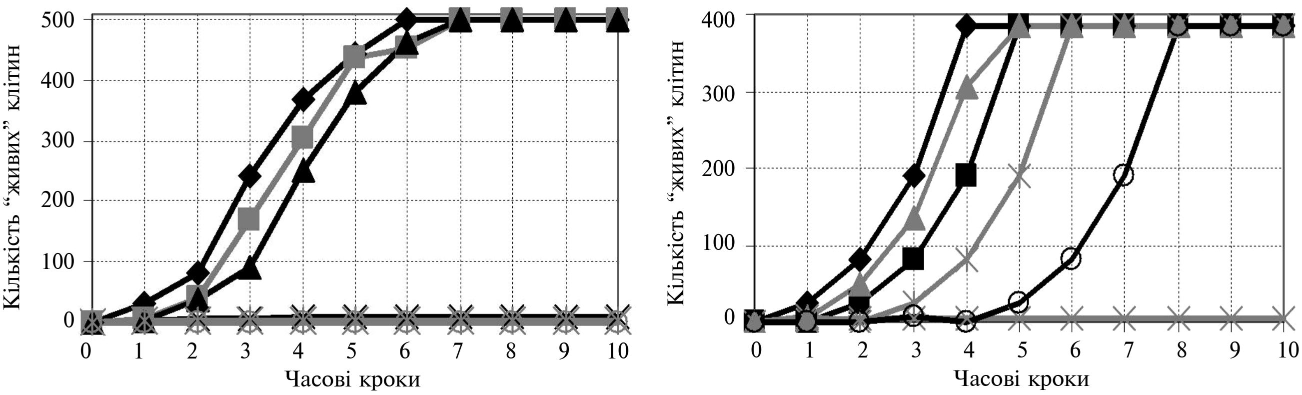
а *б*

Рис. 4. Дві одночасні конфігурації. Вихідні дані такі, як і на рис. 3



а *б*

Рис. 5. Велика кількість конфігурацій, які співіснують у системі (адитивна функція переходу, $\alpha = 0{,}5$, початковий стан 0000)



а *б*

Рис. 6. Залежність кількості розв'язків від номера кроку для різних вихідних конфігурацій (адитивна функція переходу: *а* – $\alpha = 0{,}5$; *б* – $\alpha = 1{,}0$); – 0000; – 0001; – 0003; – 0007; – 000F; – 0E24

Примітка. Дані, наведені на рис. 3–6, було отримано при використанні адитивної функції переходу. Використання зваженого варіанта функції дає подібні результати. Отже, вибір функції переходу в кожному конкретному випадку залежить від специфіки застосування (іноді краще мати обмежену параметричну множину).

Висновки

Основна особливість, виявлена при симуляції моделей із наведеного класу (в тому числі і гри "ЖиттяА") полягає в появі та прояві багатозначності станів даної системи. Така нова поведінка дає можливість по-новому розглянути вже відому для класичних клітинних автоматів загалом (і для класичної гри "Життя" зокрема) проблему, хоч у всій повноті це буде предметом майбутніх досліджень та окремих публікацій. Власне, навіть вже усталені в теорії КА поняття можуть бути піддані узагальненню і перегляду (особливо те, що стосується інтерпретації розв'язків).

У межах цієї статті ми лише намітили деякі відповідні можливості. Так, під час експериментів можна виділити об'єкти, які за аналогією з класичним випадком досить природним чином можна позначити як "цикл певного періоду", "хаос", "складна поведінка" тощо. Наприклад, одна можливість – це розширення математичних визначень. З іншого боку, це допоможе в постановці відповідних задач у теорії самоорганізації. Крім того, подібні моделі з класу клітинних автоматів можуть бути корисні і в прикладних галузях (насамперед у моделюванні поведінки водіїв та пішоходів [9] і в економіці). В той же час можна припустити, що одним із головних напрямків їх дослідження будуть можливі прояви таких явищ у біології.

Відкритими залишаються також питання про обчислювальні властивості антисипуючої моделі, оскільки вихідна модель – "Життя" – здатна до універсальних обчислень і з цієї точки зору еквівалентна детермінованій машині Тюрінга. Можна припустити, що модель "ЖиттяА" з її деревоподібною динамікою буде еквівалентна недетермінованій машині Тюрінга, однак це потребує подальших досліджень. Зокрема, відповідь на дане питання тісно пов'язана з наявністю так званих "планерів" ("gliders") – стійких структур, що здатні рухатися по решітці автомата. В межах цієї статті розглядалися КА, розмір решітки яких був недостатній для виникнення "планера", тому в подальшому доцільно провести експерименти на більших решітках. Крім того, доцільно дослідити вплив антисипації при введенні її в більш складні КА-моделі (наприклад, моделі руху пішоходів).

А.С. Макаренко, Д.А. Крушинский, Б.И. Гольденгорин

МОДЕЛЬ КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА С АНТИСИПАЦИЕЙ

Рассмотрен механизм введения антисипации в клеточно-автоматные модели. В качестве основы для исследований была выбрана общеизвестная игра "Жизнь" Дж. Конвея. Даже в пределах этой простой модели введение антисипации приводит к существенным изменениям в поведении системы, результатом которых является появление нескольких сосуществующих решений. Типы поведения, присущие классической игре "Жизнь", справедливы и для антисипационной версии, хотя тут они проявляются на уровне множеств конфигураций. Проведены численные эксперименты с предложенной моделью, приведены типичные результаты.

O.S. Makarenko, D.A. Krushinsky, B.I. Goldengorin

A MODEL OF CELLULAR AUTOMATON WITH ANTICIPATION

In this paper, we consider the mechanisms for endowing the cellular automata (CA) models with the anticipation property. On the experimental side, we apply a widely known Conway's game 'Life'. The research results show that even within this simple model, the introduction of anticipation has a crucial impact on the behavior of the system, resulting in emergence of multiple co-existing solutions. Furthermore, the inherent behavioral templates of classical 'Life' (fixed point, cycle, chaos) are valid for its anticipatory version; however, they develop at a level of configurations' sets. Finally, we make the extensive computational simulations and present the most significant research results.

1. *Gardner M.* The fantastic combinatika of John Conway's new solitaire game "Life" // Scientific American. – 1970. – **223(4)**. – P. 120–123.
2. *Von Neumann J.* Theory of self-reproducing automata // Burks A. (ed.). – Urbana: Univ. of Illinois, 1966.
3. *Тоффоли Т., Марголус Н.* Машины клеточных автоматов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 278 с.
4. *Wolfram S.* A new kind of science // Wolfram Media Inc. – USA, 2002. – 1280 p.
5. *Turing A.* The chemical basis of morphogenesis // Phil. Trans. Roy. Soc. of London. – London, 1952. – Ser. B 237. – P. 37–72.
6. *Vollmar R.* John von Neumann and cellular automata // Invited Lecture at ACRI. – Amsterdam, 2004. http://www.science.uva.nl/research/scs/events/ACRI2004/movie_VollmarLA.html
7. *Makarenko A.* Anticipating in modeling of large social systems – neuronets with internal structure and multivaluedness // International Journal of Computing Anticipatory Systems. – 2002. – **13**. – P. 77–92.
8. *Gilbert N., Troitzsch K.* Simulation for the social scientist. – Surrey: Open University Press, 1999.
9. *Goldengorin B., Makarenko A., Smilianec N.* Some applications and prospects of cellular automata in traffic problems // El S. Yacoubi, B. Chopard, S. Bandini (eds.) ACRI 2006. LNCS. – Springer, Heidelberg. – 2006. – Vol. 4173. – P. 532–537.
10. *Makarenko A., Stashenko A.* Some two-steps discrete-time anticipatory models with "boiling" multivaluedness // Daniel, M.D. (ed.) AIP Conference Proceedings. – 2006. – Vol. 839. – P. 265–272.

Рекомендована Радою
Навчально-наукового комплексу
"Інститут прикладного системного
аналізу" НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
8 вересня 2008 року