

ІГРОВИЙ МЕТОД СИНХРОНІЗАЦІЇ ПОДІЙ В МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ

© Кравець П. О., 2014

Розроблено адаптивний ігровий метод синхронізації подій в мультиагентних системах в умовах невизначеності. Суть методу полягає у вирівнюванні затримок настання подій кожним гравцем на основі спостереження дій сусідніх гравців. Виконано формулювання стохастичної гри та розроблено ігровий алгоритм для її розв'язування. За допомогою комп'ютерного експерименту досліджено впливи параметрів на збіжність ігрового методу.

Ключові слова: мультиагентні системи, синхронізація подій, стохастична гра, самонавчальний рекурентний метод, умови невизначеності.

The adaptive game method of events synchronization in multiagent systems in the conditions of uncertainty is developed. The essence of a method consists in alignment of delays of approach of events on the basis of supervision of actions of the next players. The formulation of stochastic game is executed and game algorithm for its solving is developed. Influences of parameters on convergence of a game method are investigated by means of computer experiment.

Key words: multiagent systems, events synchronization, stochastic game, self-learning recurrent method, uncertainty conditions.

Вступ. Проблема синхронізації подій

Задачі та виклики, що постають перед людьми у сучасному інформаційному суспільстві, характеризуються значною складністю, елементами невизначеності, великими потребами у матеріальних та інтелектуальних ресурсах. Для їх розв'язання необхідно об'єднати зусилля багатьох людей та залучати потужні засоби обчислювальної техніки. Така кооперація може призвести до виникнення неконтрольованих або хаотичних режимів роботи системи, критично пов'язаних із людським чинником. У зв'язку з цим актуальним є розроблення та використання інтелектуальних програмних агентів, які можуть працювати в комп'ютерній мережі з мінімальною необхідною взаємодією з оператором, самостійно приймати рішення та діяти від імені свого власника або розробника.

Програмний агент – це автономна програмна система з елементами штучного інтелекту, яка у ході розв'язування задачі може взаємодіяти з іншими агентами та людиною, використовуючи ресурси інформаційної мережі.

Агенти мають такі властивості:

- 1) автономність: агенти повністю або частково незалежні;
- 2) інтелектуальність: можливість самостійно приймати рішення щодо своїх дій у мережевому інформаційному середовищі на основі аналізу поточної інформації;
- 3) спеціалізація: як правило, агенти виконують вузькоспеціалізовані функції;
- 4) децентралізація: кожен з агентів не володіє інформацією про всю систему і, у зв'язку з цим, немає агентів, які керують системою загалом;
- 5) локальність: кожен агент виробляє рішення на основі доступної йому локальної інформації та співпраці між агентами у межах мультиагентної системи.

Мультиагентна система (МАС) – це система, утворена декількома інтелектуальними агентами, що взаємодіють, спільно розв’язуючи поставлену задачу [1–2].

Функціонування МАС, як правило, здійснюється в умовах апріорної невизначеності, зумовленої внутрішніми або зовнішніми факторами [3]. Невизначеність системи може бути:

- 1) структурною – невідомий точний склад системи та зв’язки між її елементами;
- 2) алгоритмічною – невідомий алгоритм функціонування системи;
- 3) інформаційною – нечіткість, відсутність повної інформації, необхідної для прийняття рішень;
- 4) лінгвістичною – неоднозначність висловлювань під час обміну повідомленнями між агентами;
- 5) цільовою – невідома глобальна мета функціонування системи;
- 6) соціальною – зумовлена колективною взаємодією агентів, коли дії одного з агентів впливають на вибір рішень іншими агентами;
- 7) стохастичною – вплив на систему неконтрольованих зовнішніх факторів.

Часткове компенсування невизначеності забезпечується здатністю агентів до самонавчання та адаптивними стратегіями прийняття рішень.

Системотворчий вплив на становлення теорії МАС мали наукові праці з кібернетики, теорії інформації, колективної поведінки автоматів, еволюції систем, штучного інтелекту, стохастичних ігор, планування розподіленого розв’язання задач, організації комунікації між агентами тощо.

МАС використовуються для розподіленого розв’язування задач логістики, електронної комерції, військової справи, геоінформаційних систем, подолання наслідків надзвичайних ситуацій, моделювання соціальних подій, керування трудовими ресурсами, дистанційного навчання, складання розкладів, керування ринком цінних паперів та інвестицій, керування мережевими потоками, керування енергетичними системами, для побудови стратегічних комп’ютерних ігор, ділових ігор, професійних тренажерів, мережевих технологій та розподілених обчислень, пошуку інформації у мережі Internet, організації мобільного зв’язку тощо.

Успішність розподіленого розв’язування задачі залежить від рівня координації дій агентів. Координація – це процес узгодженої та впорядкованої роботи усіх ланок МАС. Координація може бути централізованою або децентралізованою. Зі зростанням структурної та функціональної складності розподіленої системи в умовах невизначеності ефективнішими будуть методи децентралізованої координації агентів.

Координація необхідна для узгодження індивідуальних цілей і варіантів поведінки агентів, за яких кожен агент покращує або не погіршує значення своєї функції корисності, а система загалом покращує якість розв’язування загальної задачі. Методи розв’язування задачі координації ґрунтуються на результатах класичної теорії керування, дослідженні операцій, теорії ігор, плануванні та на результатах інших сфер математики і кібернетики.

Частковим проявом координації є синхронізація дій агентів. Синхронізація – це досягнення об’єктами розподіленої системи єдиного ритму роботи, може спричинятись слабкою взаємодією між об’єктами або дією зовнішньої сили. Ефект синхронізації відкрив Х. Гюйгенс у XVII ст. у результаті спостереження за узгодженим ходом двох маятникових годинників, викликаним слабким впливом власних коливань їх спільної опори.

Явища синхронізації систем поширені у природі, техніці та суспільстві [4–8]. За певних умов вони можуть зумовлюватись простими фізичними чи хімічними законами або колективною взаємодією активних об’єктів (агентів) зі складною динамікою поведінки. Тут під активними розуміємо автономні об’єкти, здатні контролювати стани зовнішнього середовища, виробляти і реалізовувати керуючі сигнали.

Прикладами синхронізації у природі є ритмічне світіння рою комах-світлячків, сюрчання цвіркунів, рух косяків риб, політ зграї птахів тощо. Узгодження біологічних ритмів живих організмів із зовнішніми природними чинниками, формування серцевих ритмів та електричних ритмів мозку є проявами синхронізації у біології та медицині. Синхронізація є центральним механізмом обробки інформації нейронами у різних ділянках мозку та передавання інформації між цими областями.

У фізиці прикладами синхронізації є скоординоване коливання декількох маятників, наведене звучання органних труб, осциляція електричних сигналів.

У радіофізиці, радіотехніці, радіолокації, радіовимірюваннях, радіозв'язку синхронізація використовується для стабілізації частоти електричних, електромагнітних та квантових генераторів, синтезу частот, демодуляції сигналів, керування фазованими антенними решітками, у доплерівських системах, у системах точного часу, за різних способів передавання інформації.

У механіці явище синхронізації використовується для побудови різноманітних вібротехнічних пристроїв.

В енергетиці синхронізація використовується для забезпечення точного збігу частот декількох електрогенераторів змінного струму за умови їх паралельної роботи на загальне навантаження, для просторової орієнтації розподілених площин фотоелементів для збирання сонячного світла та його перетворення на електричну енергію.

В астрономії синхронізація виявляється у встановленні цілочислових співвідношень між середніми кутовими швидкостями обертань небесних тіл навколо своєї осі та швидкостями їх орбітальних рухів.

Синхронізація потоків коду та даних необхідна для забезпечення роботи сучасних розподілених програмних засобів і сховищ даних з мережевою реалізацією, прикладом яких є мультиагентні системи.

У соціальних системах явища синхронізації спостерігаються у русі строю солдат, танцях, хоровому співі, плесканні руками у концертному залі, масових молитвах вірян, злагодженій роботі законодавчих та виконавчих органів влади тощо.

У мультиагентних системах синхронізація необхідна для забезпечення узгодженої роботи їх складових частин, передавання повідомлень між агентами, забезпечення умов самоорганізації, коли розподілена система поводить себе як цілісний, штучно сформований організм. Під самоорганізацією розуміють цілеспрямований процес створення, відтворення, впорядкування або вдосконалення організації (структури та функцій) складної динамічної системи за рахунок внутрішніх факторів, без відповідного зовнішнього впливу [9–12].

Процеси синхронізації в системах різної природи мають багато спільного, їх можна вивчити з використанням загальних математичних та обчислювальних інструментів. Електротехнічними моделями синхронізації системи розподілених об'єктів, як правило, слугують мережі синхронізації осциляторів [8]. Для вивчення синхронізації використовують методи теорії керування, коливань, фазової динаміки, відображень, нелінійних середовищ та мереж, хаосу, фракталів, клітинних автоматів тощо.

У теорії синхронізації виділяють дві основні частини:

1) класичну теорію синхронізації, що вивчає явища у зв'язаних періодичних автоколивних системах;

2) теорію хаотичної синхронізації, яка вивчає кооперативну поведінку хаотичних систем.

Серед систем хаотичної синхронізації виділяють три головних типи:

1) повна (або ідентична) синхронізація – стани зв'язаних об'єктів повністю збігаються;

2) узагальнена синхронізація – виходи об'єктів пов'язані через деяку функцію;

3) фазова синхронізація – встановлення деяких співвідношень між фазами об'єктів, що взаємодіють, результатом чого є збіг їхніх характерних частот або характерних часових масштабів.

Розрізняють такі види синхронізації об'єктів:

1) примусова синхронізація об'єктів за допомогою зовнішнього джерела сигналів, наприклад, генератора тактової частоти;

2) вільна просторово розподілена синхронізація об'єктів між собою.

Враховуючи притаманні колективу агентів фактори конкуренції, взаємодії, кооперації, навчання для дослідження процесів координації та синхронізації МАС в умовах невизначеності, використаємо модель стохастичної гри [13–16].

Ігрова синхронізація подій у МАС є актуальною науково-практичною проблемою, поки що недостатньо вивченою. На відміну від мереж синхронізації осциляторів, що описуються системами

диференційних рівнянь, стохастичні ігри МАС досліджують складну поведінку мереж інтелектуальних агентів з різноманітними моделями прийняття рішень в умовах невизначеності на основі методів штучного інтелекту. У ході стохастичної гри відбувається самонавчання агентів: вибирати оптимальні у середньому чисті стратегії (дії), перебудовуючи власні вектори динамічних змішаних стратегій (умовних імовірностей варіантів дій). За певних умов, які визначаються параметрами середовища, параметрами ігрового методу та критеріями вибору варіантів рішень, самонавчання стохастичної гри приводить до синхронізації стратегій агентів.

Метою цієї роботи є побудова стохастичного ігрового методу ідентичної просторово-розподіленої синхронізації процесів мультиагентних систем. Для досягнення мети сформульована стохастична ігрова задача, запропоновано метод та розроблено алгоритм для її розв'язування, проаналізовано результати комп'ютерного моделювання стохастичної гри.

Постановка ігрової задачі синхронізації подій

Розглянемо множину агентів D , які можуть спостерігати стани один одного. Нехай кожен агент $i \in D$ сигналізує про здійснення деякої події у випадкові моменти часу t_1^i, t_2^i, \dots . Ця подія доступна для спостереження сусідніми агентами з підмножини $D_i \in D \quad \forall i \in D \quad (D = \bigcup_{i \in D} D_i)$ на інтервалі часу $[t_{n-1}^i, t_n^i)$, де $n=1, 2, \dots$ позначає порядковий номер моменту часу. У граничному випадку $D_i = D \quad \forall i \in D$ кожен агент спостерігає події усіх інших агентів. Регулюючи величину проміжку часу $\Delta t_n^i = t_n^i - t_{n-1}^i$ між власними подіями, агенти прагнуть синхронізувати події у межах локальних підмножин D_i . Суть синхронізації полягає у вирівнюванні часу настання події кожного агента з часом здійснення подій його сусідів. Для цього агенти випадково і незалежно вибирають одну із чистих стратегій $U^i = (u^i(1), u^i(2), \dots, u^i(N))$, яка є поточною величиною проміжку часу від моменту реалізації події t_{n-1}^i :

$$u^i(k) = k \Delta t_{\max} / N, \quad k = 1..N,$$

де Δt_{\max} – максимальне значення проміжку часу між подіями.

Спосіб формування моментів часу t_n^i визначає вид стохастичної гри: із синхронним або асинхронним вибором чистих стратегій. У синхронній грі усі агенти одночасно і незалежно вибирають чисті стратегії на кожній ітерації $n=1, 2, \dots$. В асинхронній грі чисту стратегію вибирають лише агенти, для яких $t_n^i = \min_{j \in D} (t_n^j)$.

У момент часу t_n^i агент з номером i обчислює середнє відхилення фронтів часу реалізації подій у підмножині сусідніх агентів D_i від часу реалізації власної події:

$$\delta_n^i = |D_i|^{-1} \sum_{j \in D_i} |t_n^i - t_n^j| + \mu_n^i \quad \forall i \in D, \quad (1)$$

де μ_n^i – білий шум, що імітує неточність вимірювання часу настання подій.

Обчислене відхилення використовується для формування поточного програшу $\xi_n^i \in R^1$:

$$\xi_n^i = \delta_n^i. \quad (2)$$

Бінарний програш $\xi_n^i \in \{0, 1\}$ визначається за знаком диференціала поточного відхилення δ_n^i :

$$\xi_n^i = \begin{cases} 0, & \text{if } \delta_n^i - \delta_{n-1}^i \leq 0 \\ 1, & \text{if } \delta_n^i - \delta_{n-1}^i > 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Поточні програші $\xi_n^i = \xi_n^i(u_n^{D_i})$ є функціями спільних стратегій $u^{D_i} \in U^{D_i} = \times_{j \in D_i} U^j$ агентів з локальних підмножин $D_i \subseteq D, D_i \neq \emptyset \quad \forall i \in D$.

Ефективність синхронізації подій визначається функціями середніх програвів:

$$\Xi_n^i = \frac{1}{n} \sum_{\tau=1}^n \xi_\tau^i \quad \forall i \in D. \quad (4)$$

Метою гри є мінімізація функцій середніх програшів:

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \Xi_n^i \rightarrow \min \quad \forall i \in D. \quad (5)$$

Отже, на основі обчислень випадкових поточних програшів $\{\xi_n^i\}$ гравці повинні вибирати чисті стратегії $\{u_n^i\}$ так, щоб з ходом часу $n=1,2,\dots$ забезпечити виконання системи цілей (5). Залежно від способу формування послідовностей $\{u_n^i \mid \forall i \in D, n=1,2,\dots\}$ багатокритеріальна задача (5) має розв'язки, які задовольняють одну із умов колективної оптимальності: Неша, Парето тощо [13–16].

Для розв'язування гри необхідно розробити такий метод генерування послідовностей чистих стратегій $\{u_n^i\} \forall i \in D$, щоб синхронізація подій агентів у межах локальних підмножин $D_i \in D \quad \forall i \in D$ привела до глобальної синхронізації подій усіх агентів із множини D .

Ігровий метод розв'язування задачі синхронізації подій

Генерування проміжків часу між подіями $\{u_n^i \mid \forall i \in D, n=1,2,\dots\}$ виконаємо на основі дискретних динамічних розподілів $p_n^i = (p_n^i(u_1^i), p_n^i(u_2^i), \dots, p_n^i(u_N^i)) \quad \forall i \in D$, які у термінах теорії ігор називаються змішаними стратегіями. Вектори $p_n^i \in S_\varepsilon^N$ набувають значення на одиничних ε -симплексах:

$$S_\varepsilon^N = \left\{ p^i \in R^N \mid p^i(j) \geq \varepsilon \quad (j=1..N), \sum_{j=1}^N p^i(j) = 1 \right\}, \quad \varepsilon \in (0, \min_i N^{-1}).$$

Нехай випадкові програші $\{\xi_n^i\}$ є незалежними $\forall u_n \in U, \forall i \in D, n=1,2,\dots$, мають постійне математичне сподівання $M\{\xi_n^i(u^{D_i})\} = v(u^{D_i}) = const$ та обмежений другий момент $\sup_n M\{[\xi_n^i(u^{D_i})]^2\} = \sigma^2(u^{D_i}) < \infty$. Стохастичні характеристики випадкових програшів не відомі агентам апіорі.

Визначимо функцію середніх програшів для відповідної матричної гри:

$$V^i(p^{D_i}) = \sum_{u^{D_i} \in U^{D_i}} v^i(u^{D_i}) \prod_{j \in D_i; u^j \in u^{D_i}} p^j(u^j),$$

де $p^{D_i} \in S_\varepsilon^{D_i}, S_\varepsilon^{D_i} = \prod_{j \in D_i} S_\varepsilon^N, u^{D_i} \in U^{D_i}$.

Враховуючи значення градієнта $\nabla_{p^i} V^i = M \left\{ \frac{\xi_n^i}{e^T(u_n^i) p_n^i} e(u_n^i) \mid p_n^i = p^i \right\}$, на основі методу

стохастичної апроксимації [17] отримаємо такий самонавчальний рекурентний метод зміни векторів змішаних стратегій:

$$p_{n+1}^i = \pi_{\varepsilon_{n+1}}^N \left\{ p_n^i - \gamma_n \frac{\xi_n^i e(u_n^i)}{e^T(u_n^i) p_n^i} \right\}, \quad (6)$$

де $\pi_{\varepsilon_{n+1}}^N$ – оператор проектування на одиничний ε -симплекс; $\varepsilon_n > 0$ – параметр розширення ε -симплексу; $\gamma_n > 0$ – параметр кроку навчання; $e(u_n^i)$ – одиничний вектор-індикатор вибору чистої стратегії $u_n^i = u^i$; $e^T(u_n^i)$ – вектор-стовпець.

Параметри γ_t та ε_t у (6) визначають швидкість навчання агентів. Для забезпечення збіжності процесу навчання стохастичної гри ці параметри задаються як додатні, монотонно спадні величини:

$$\gamma_t = \gamma_0 / t^\alpha, \quad \varepsilon_t = \varepsilon_0 / t^\beta, \quad (7)$$

де $\gamma_0, \alpha > 0; \varepsilon_0, \beta > 0$.

Умови збіжності стохастичного ігрового градієнтного методу (6) до точки рівноваги за Нешем з імовірністю 1 та у середньоквадратичному визначено у [14].

Вектори змішаних стратегій використовують для випадкового вибору варіантів рішень:

$$u_n^i = \left\{ u_i[k] \mid k = \arg \left(\min_k \sum_{j=1}^k p_n^i(u_n^i[j]) > \omega \right), k=1..N \right\} \quad \forall i \in D, \quad (8)$$

де $\omega \in [0, 1]$ – дійсне випадкове число з рівномірним розподілом.

Ефективність синхронізації подій оцінюється:

1) функцією середніх втрат:

$$\Xi_n = |D|^{-1} \sum_{i \in D} \Xi_n^i, \quad (9)$$

де Ξ_n^i обчислюється згідно з (4);

2) рівнем синхронізації – середньою кількістю агентів із синхронізованими подіями:

$$K_n = \frac{1}{n} \sum_{\tau=1}^n \sum_{i \in D} \chi(t_\tau^i = t_\tau^{\max}), \quad (10)$$

де $\chi() \in \{0,1\}$ – індикаторна функція події, $t_\tau^{\max} = \max_{i \in D} (t_\tau^i)$ – максимальне значення фронтів часу агентів.

Алгоритм розв'язування задачі синхронізації подій

1. Задати початкові значення параметрів:

$n = 0$ – початковий момент часу;

$L = |D|$ – кількість гравців;

$D_i \forall i \in D$ – множини сусідніх гравців, які визначають структуру взаємодій агентів;

N – кількість чистих стратегій гравців;

Δt_{\max} – максимальне значення проміжку часу між подіями;

$U^i = (u^i(1), u^i(2), \dots, u^i(N))$, $u^i(k) = k \Delta t_{\max} / N$, $k = 1..N$, $i = 1..L$ – вектори чистих стратегій гравців;

$p_0^i(j) = 1/N$, $j = 1..N$, $i = 1..L$ – вектори змішаних стратегій гравців;

$\gamma > 0$ – параметр кроку навчання;

$\alpha \in (0,1]$ – порядок кроку навчання;

ε – параметр ε -симплексу;

$\beta > 0$ – порядок швидкості розширення ε -симплексу;

$d > 0$ – дисперсія завад;

$\mu_n \sim Normal(0, d)$ – гауссівський закон розподілу завад;

n_{\max} – максимальна кількість кроків методу.

2. Виконати випадковий вибір проміжків часу $u_n^i \in U^i$, $i = 1..L$ між подіями згідно з (8).

3. Обчислити наступні моменти часу $t_n^i = t_{n-1}^i + u_n^i$, $i = 1..L$ настання подій агентів.

4. Отримати значення поточних програшів ξ_n^i , $i = 1..L$ згідно з (1)–(3).

5. Обчислити значення параметрів γ_n , ε_n згідно з (7).

6. Обчислити елементи векторів змішаних стратегій p_n^i , $i = 1..L$ згідно з (6).

7. Обчислити характеристики якості прийняття рішень Ξ_n (9) та K_n (10).

8. Задати наступний момент часу $n := n + 1$.

9. Якщо $n < n_{\max}$, то перейти на крок 2, інакше – кінець.

Результати комп'ютерного моделювання

Для дослідження побудуємо мультиагентну модель синхронізації подій у біологічних системах, наприклад, спонтанне виникнення ритмічного світіння рою комах-світлячків із родини Lampyridae. У цій моделі агенти синхронізують зміну своїх станів (світіння та згасання світлячків).

Нехай L агентів розміщуються на прямій лінії. Відстань між агентами може бути довільною у межах доступності спостереження сигналів від сусідніх агентів. Кожен агент $i \in D$ фіксує

моменти часу $t_n^j \forall j \in D_i$ отримання сигналів від сусідніх агентів і обчислює їх поточне відхилення δ_n^i від моменту часу генерування власного сигналу t_n^i . Для прикладу, виберемо різницевий спосіб формування поточного відхилення моментів часу:

$$\delta_n^i = \begin{cases} |t_n^{i-1} + t_n^{i+1} - 2t_n^i|, & \text{if } i > 1 \text{ and } i < L; \\ |t_n^{i+1} - t_n^i|, & \text{if } i = 1; \\ |t_n^{i-1} - t_n^i|, & \text{if } i = L. \end{cases}$$

Поточні відхилення моментів часу зазнають дії білого шуму μ_n^i , який моделює похибку вимірювання, і використовуються як поточні програші гравців:

$$\xi_n^i = \delta_n^i + \mu_n^i.$$

Значення білого шуму обчислюється як гауссівська випадкова величина з нульовим математичним сподіванням та дисперсією $d > 0$:

$$\mu_n^i = \sqrt{d} \left(\sum_{j=1}^{12} \omega_{j,n} - 6 \right),$$

де $\omega \in [0,1]$ – дійсне випадкове число з рівномірним законом розподілу.

Початкові моменти часу виникнення подій набувають випадкових значень $t_0^i \leq 50$, $i = 1..L$. Гра розпочинається з ненавчених змішаних стратегій: $p_0^i[j] = 1/N$, $j = 1..N$, $i = 1..L$. Максимальний проміжок часу між подіями в усіх експериментах дорівнює $\Delta t_{\max} = N$. Моделювання стохастичної гри здійснюється упродовж $n_{\max} = 10^4$ ітерацій або до досягнення заданого рівня $K_n = K$ синхронізації агентів.

На рис. 1 у логарифмічному масштабі зображено графіки функцій середніх програшів та середньої кількості синхронізованих гравців. Тут і далі результати отримано для таких параметрів ігрового методу: $L = 100$, $N = 2$, $\gamma_0 = 1$, $\varepsilon_0 = 0.999/N$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1$, $d = 0.01$ (крім випадків, коли вивчається вплив цих параметрів на збіжність стохастичної гри).

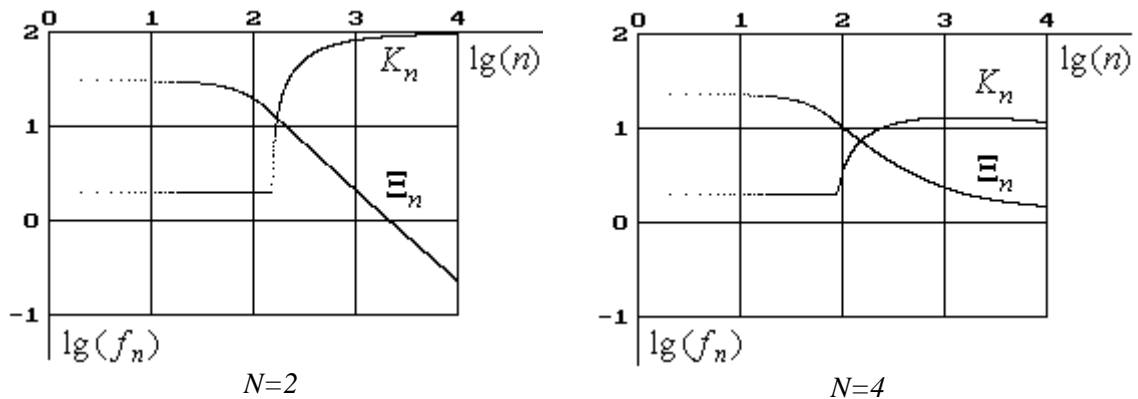


Рис. 1. Характеристики синхронізації стохастичної гри

Зменшення середніх програшів Ξ_n та зростання кількості синхронізованих агентів K_n свідчать про збіжність ігрового методу внаслідок виконання системи критеріїв (5). Зі зростанням кількості стратегій N зменшується кількість синхронізованих агентів та збільшується значення функції поточних програшів.

На рис. 2 зображено часові фронти настання події у МАС для навченої стохастичної гри $L = 50$ агентів. Агенти розпочинають гру із різними затримками t_0^i , $i = 1..L$. Незважаючи на це, за невелику кількість (~ 100) кроків вони входять у режим синхронізації подій.

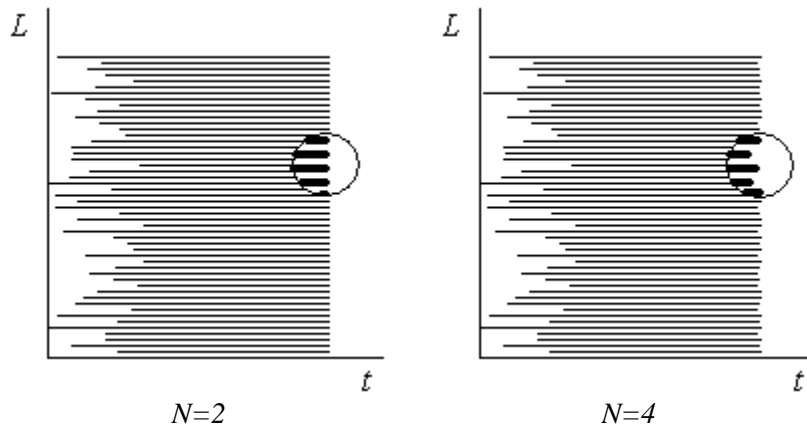


Рис. 2. Часова діаграма синхронізації подій

Як видно на рис. 2, результатом навчання стохастичної гри є вирівнювання часових фронтів настання подій агентів, якщо $N=2$. Зростання кількості чистих стратегій (наприклад, якщо $N=4$) призводить до появи фронтального шуму, зумовленого випадковим вибором проміжків часу між подіями.

Гістограма середніх відхилень $s_n = L^{-1} \sum_{i \in D} \delta_n^i$ фронтів часу синхронізації подій МАС зображена на рис. 3. Частоти значень випадкових відхилень визначаються у ході проведення гри за таким рекурентним процесом:

$$h_{n+1}[k] = h_n[k] + 1, \text{ if } s_n \geq (k-1)\lambda \text{ and } s_n < k\lambda, \quad k=1..M, \quad n=1,2,\dots,$$

де $M=5$; $\lambda=1$.

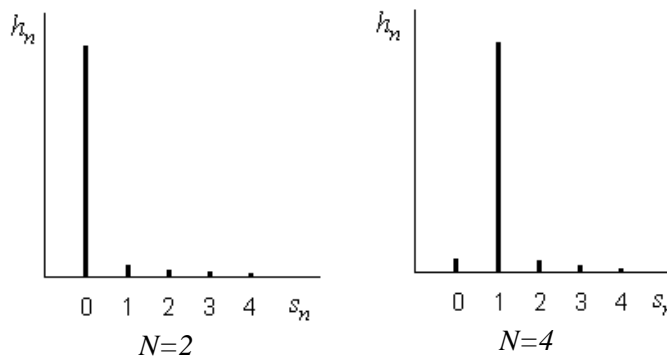


Рис. 3. Гістограма розподілу проміжків часу синхронізації подій навченої гри

У гри L агентів з $N=2$ чистими стратегіями спостерігається найбільша кількість варіантів з нульовим відхиленням фронтів часу настання подій, тобто досягається майже 100 % синхронізація агентів. Зі зростанням кількості стратегій найбільша кількість таких варіантів зміщується вправо і для гри з $N=4$ стратегіями середнє відхилення часу синхронізації подій дорівнює одиниці, що свідчить про виникнення незначної флуктуації фронтів часу настання подій.

Вивчимо залежність часу навчання стохастичної гри агентів від основних параметрів алгоритму. Час навчання визначимо як мінімальну кількість кроків, необхідних для синхронізації подій МАС:

$$n_{out} = (n_{min} | K_n \geq \eta L),$$

де $\eta \in [0,1]$ – коефіцієнт синхронізації агентів.

У зв'язку з випадковим вибором варіантів рішень необхідно виконати усереднення часу навчання агентів для різних послідовностей випадкових величин:

$$\bar{n} = \frac{1}{k_{exp}} \sum_{j=1}^{k_{exp}} n_{out}[j],$$

де k_{exp} – кількість експериментів.

Середня кількість кроків навчання \bar{n} залежить від параметрів алгоритму навчання агентів та початкових значень фронтів часу синхронізації подій. Середня кількість кроків навчання стохастичної гри визначається усередненням за $k_{\text{exp}}=100$ експериментами у разі досягнення значення коефіцієнта синхронізації $\eta=0.9$ (або 90 % синхронізованих агентів).

Параметр γ_0 визначає початкове значення кроку зміни значень імовірностей вибору чистих стратегій гравців. З ходом часу його значення зменшується згідно з (7). Залежність параметра γ_0 від середнього часу синхронізації агентів зображено на рис. 4.

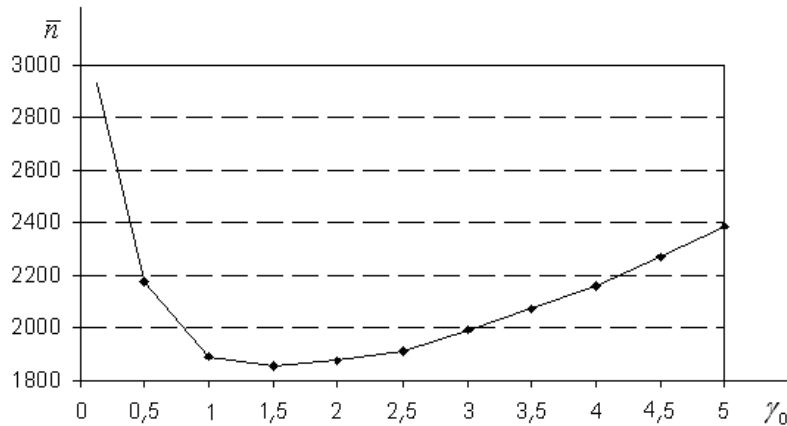


Рис. 4. Вплив початкового значення кроку ігрового методу на час навчання гри

Як видно на рис. 4, для значень $\gamma_0 \in [1, 2]$ досягається мінімальний час синхронізації подій. У всіх експериментах прийемо $\gamma_0 = 1$.

Залежність середнього часу \bar{n} навчання ігрового методу від параметрів ігрового методу α та β на рівні синхронізації $K = 90\%$ агентів зображено на рис. 5 у вигляді стовпчикової діаграми.

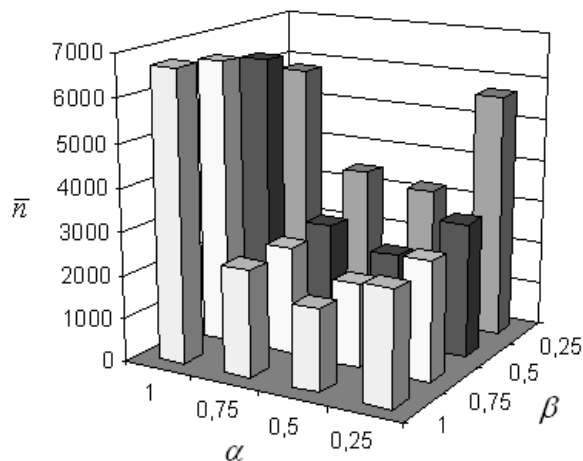


Рис. 5. Діаграма залежності часу навчання від параметрів ігрового методу

Аналіз діаграми показує, що для заданого кроку дискретизації параметрів найменший час навчання стохастичної гри забезпечується для значень $\alpha=0.5$ та $\beta=1$.

Час навчання гри залежить від необхідного значення коефіцієнта синхронізації агентів. Коефіцієнт синхронізації визначається відношенням кількості синхронізованих агентів $K = K_n$ у момент часу $n = n_{\text{out}}$ до загальної кількості агентів L :

$$\eta = K / L.$$

Вплив коефіцієнта синхронізації агентів на середній час навчання стохастичної гри показано на рис. 6.

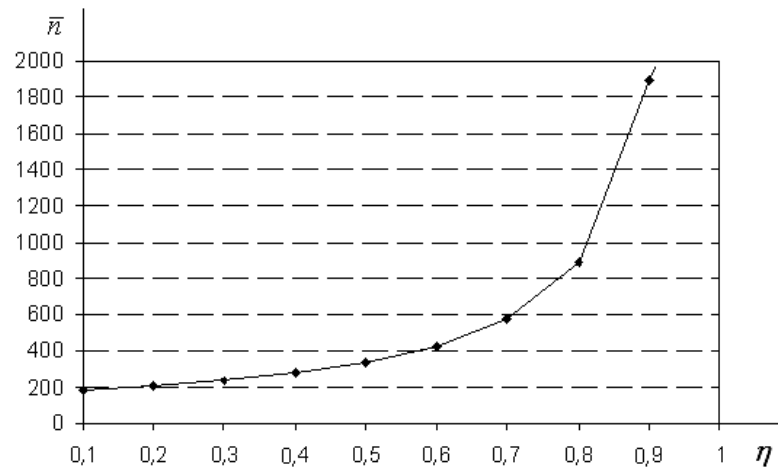


Рис. 6. Залежність часу навчання гри від коефіцієнта синхронізації

Зростання рівня синхронізації агентів призводить до збільшення часу, необхідного для навчання стохастичної гри. Як видно на рис. 6, прийнятний для практичних застосувань коефіцієнт синхронізації $\eta \in [0.8; 0.9]$ досягається за 1–2 тисячі кроків роботи ігрового алгоритму із заданими значеннями параметрів. Вплив дисперсії поточних програшів на середній час навчання ігрового методу зображено у вигляді графіка на рис. 7.

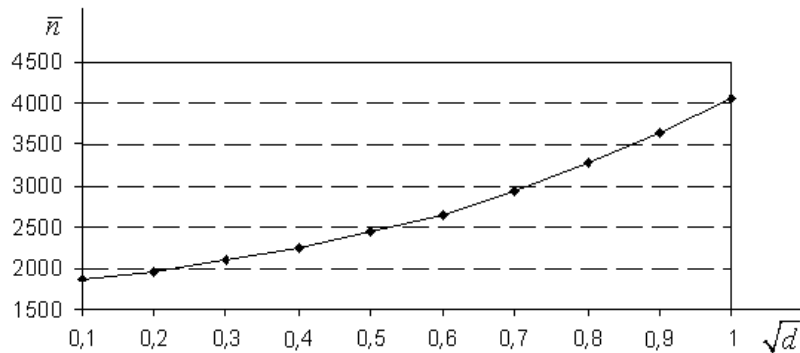


Рис. 7. Залежність часу навчання гри від дисперсії поточних втрат

Зростання дисперсії поточних програшів призводить до збільшення середньої кількості кроків, необхідних для синхронізації агентів. Запропонований ігровий метод стійкий до збільшення кількості агентів, що синхронізують настання подій. На рис. 8 зображено графік залежності середньої кількості кроків навчання стохастичної гри від кількості гравців.

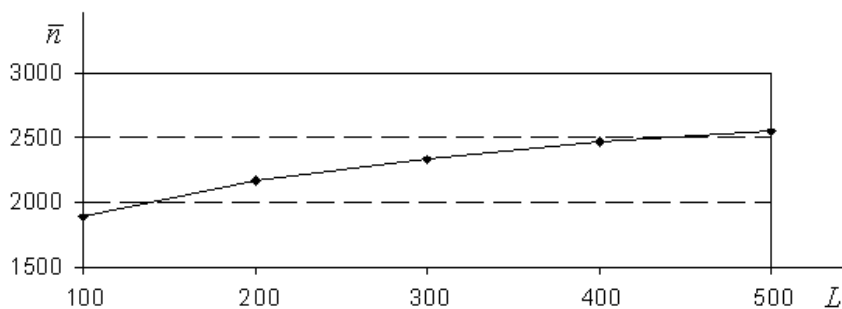


Рис. 8. Залежність часу навчання гри від кількості гравців

Як видно на рис. 8, збільшення кількості агентів призводить до повільного зростання середньої кількості кроків навчання ігрового методу, незначного порівняно із загальним часом моделювання стохастичної гри.

Вплив кількості чистих стратегій на рівень синхронізації агентів зображено на рис. 9. Результати зафіксовано у момент реалізації $n = 10^4$ кроків роботи ігрового методу.

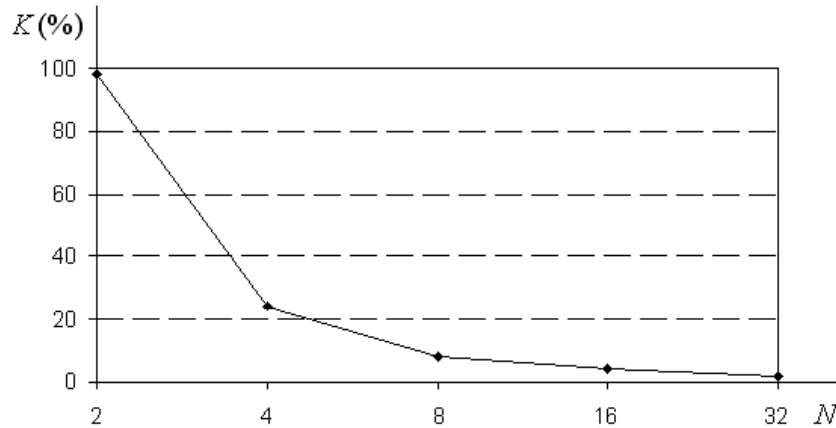


Рис. 9. Залежність кількості синхронізованих агентів від кількості чистих стратегій

Рівень синхронізації (10) визначає кількість точних збігів фронтів часу настання подій агентів. Зменшення рівня синхронізації здійснюється за рахунок зростання фронтального шуму, зумовленого розширенням інтервалу $\Delta t_{\max} = N$ випадкового вибору проміжків часу між двома послідовними подіями агентів. Результатом зростання інтенсивності фронтального шуму є збільшення середніх програшів гравців. Відповідний графік залежності середнього програшу гравців від кількості стратегій вибору варіантів рішень подано на рис. 10.

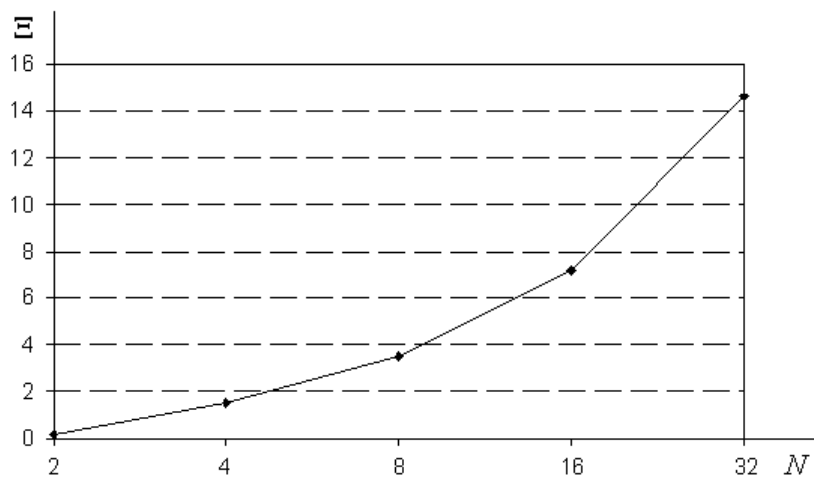


Рис. 10. Залежність похибки навчання гри від кількості чистих стратегій

Причиною зростання функції середніх програшів є те, що зі збільшенням кількості чистих стратегій N зростає інтервал $\Delta t_{\max} = N$ часу між генеруванням подій агентів. У зв'язку з цим, за умови випадкового вибору стратегій, зростає дисперсія проміжків часу між настанням подій, що впливає на значення середніх програшів гравців.

Висновки

Розглянутий ігровий метод за належного налаштування його параметрів забезпечує синхронізацію подій у МАС. Теоретично значення таких параметрів повинні задовольняти базові умови стохастичної апроксимації. На практиці значення параметрів, що забезпечують збіжність ігрового методу до однієї із точок колективної оптимальності, можна уточнити у результаті комп'ютерного моделювання. Проведені дослідження дають підстави стверджувати, що ігровий метод (6)–(8) забезпечує синхронізацію подій для варіантів синхронного та асинхронного вибору чистих стратегій, варіантів небінарних та бінарних програшів.

Отримані у цій статті результати дають змогу встановити оптимальні значення параметрів ігрового методу для розв'язування задачі синхронізації подій МАС за найкоротший час.

Результати роботи доцільно використати для узгодження роботи складових частин мультиагентних систем різного призначення, передавання повідомлень між агентами, побудови протоколів комунікації, забезпечення умов самоорганізації мультиагентних систем.

У запропонованій моделі синхронізації МАС інтелектуальний рівень агентів обмежується можливостями теорії стохастичних автоматів зі змінною структурою. Підвищити інтелектуальність агентів можливо залученням методів штучного інтелекту, наприклад, штучних нейронних мереж, байєсових мереж прийняття рішень, нечіткої логіки, підкріпленого навчання тощо.

1. Weiss G. *Multiagent Systems. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence* / G. Weiss, editor. – Springer Verlag, Berlin, 1996. – 643 pp. 2. Wooldridge M. *An Introduction to Multiagent Systems* / M. Wooldridge. – John Wiley & Sons, 2002. – 366 p. 3. Трухаев Р.И. *Модели принятия решений в условиях неопределенности*. – М.: Наука, 1981. – 257 с. 4. Lindsey W. C. *Synchronization system in communication and control* / W. C. Lindsey. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs. – New Jersey, 1972. 5. Блехман И. И. *Синхронизация в природе и технике* / И. И. Блехман. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 352 с. 6. Варшавский В. И. *Оркестр играет без дирижера: Размышления об эволюции некоторых технических систем и управление ими* / В. И. Варшавский, Д. А. Поспелов. – М.: Наука, 1984. – 207 с. 7. *Устойчивость, структуры и хаос в нелинейных сетях синхронизации* / В. С. Афраймович, В. И. Некоркин, Г. В. Осипов, В. Д. Шалфеев; под ред. А. В. Гапонова-Грехова, М. И. Рабиновича. – ИПФ АН СССР. – Горький, 1989. – 256 с. 8. Осипов Г.В. *Информационная динамика: синхронизация в сложных осцилляторных сетях* / Г. В. Осипов // Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Информационные технологии и компьютерное моделирование в прикладной математике». – Нижний Новгород, 2007. – 102 с. 9. Пригожин И. *Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации* / И. Пригожин, Г. Николис. – М.: Мир, 1979. – 512 с. 10. Хакен Г. *Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам: пер. с англ.* / Г. Хакен. – М.: КомКнига, 2005. – 248 с. 11. *Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации* / В. И. Городецкий // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 92–120. 12. *Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки* / В. И. Городецкий // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 3. – С. 55–75. 13. Доманский В. К. *Стохастические игры* // Математические вопросы кибернетики. – 1988. – № 1. – С. 26–49. 14. Назин А. В. *Адаптивный выбор вариантов: Рекуррентные алгоритмы* / А. В. Назин, А. С. Позняк. – М.: Наука, 1986. – 288 с. 15. Fudenberg D. *The Theory of Learning in Games* / D. Fudenberg, D. K. Levine. – Cambridge, MA: MIT Press, 1998. – 292 p. 16. Мулен Э. *Теория игр с примерами из математической экономики* / Э. Мулен. – М.: Мир, 1985. – 200 с. 17. *Граничин О. Н. Введение в методы стохастической аппроксимации и оценивания: учеб. пособие* / О. Н. Граничин. – СПб.: Издательство СПб. университета, 2003. – 131 с.