

## ПРО ОДИН КЛАС МУЛЬТИАГЕНТНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНИМИ СТРУКТУРАМИ

Вінницький національний технічний університет

*Розроблено математичний апарат для мультиагентних мереж, в яких в якості агентів виступають люди, що приймають рішення або здійснюють вибір, та побудована топологічна класифікація. Побудовано систему алгоритмів для розв'язання сукупності важливих для практичного застосування задач з управління виробничими та організаційними структурами*

### Вступ

Підвищення ефективності управління виробничими та організаційними структурами є потужним напрямком дослідження та практичного застосування інформаційних технологій. Розвиток систем підтримки прийняття рішень, розвиток технологій для підбору працівників призводить до того, що в якості елементів управління виробничими та організаційними структурами, як правило, виступають не тільки люди, які приймають рішення (надалі будемо їх називати агентами), але й окремі фрагменти інтелектуальних технологій, програмного забезпечення та роботів.

Магістральним напрямком розвитку досліджень є розробка понятійного та математичного апарату для моделювання специфічних особливостей управління, яке здійснюється людиною. Причому моделювання управлінської діяльності людини як індивідуальної, так і колективної.

Потужним напрямком моделювання є мультиагентні мережі. В якості агентів можуть виступати: програмне забезпечення та інтелектуальні технології, роботи чи люди.

Дослідження мультиагентних мереж, які складаються із агентів, що зв'язані між собою, є перспективним як для розробки потужного апарату для моделювання, так і для розробки відповідних інформаційних технологій для підтримання управління у виробничих та організаційних структурах.

### Аналіз останніх досліджень

Мультиагентні системи можна використати для колективного управління, яке важко або неможливо здійснити за допомогою єдиного цілого. Вони застосовуються в широкому діапазоні від робототехніки, та до ліквідації надзвичайних подій, управління виробничими, організаційними, соціальними та економічними структурами. Головною особливістю мультиагентних систем є те, що в них можуть проявлятися самоорганізація, а також інші складні парадигми управління навіть за умови, коли індивідуальні стратегії агентів є досить простими. Для прикладу можна привести [1–6].

Однією з найважливіших проблем в мультиагентних системах є розробка математичного апарату для опису спільної діяльності. Багато ускладнюючих факторів, серед яких слід виділити відсутність «центрального контролера» та роззосередження координації діяльності з управління між всіма агентами.

Особливо важливою є ситуація, коли агенти є людьми, які опрацьовують інформацію та приймають рішення. Деякі результати вже отримані. Наприклад для проблеми вибору лідера множиною агентів та подальшого призначення лідером задач агентам на виконання [7]. Також отримано ряд результатів щодо поділу агентів на групи таким чином, що кожен із них знає, в якій групі він особисто перебуває [8]. Для цих задач всі агенти є рівними, а координація здійснюється тільки між агентами, які належать до одного класу.

В останні роки отримано також ряд результатів щодо управління в організаційних та соціальних системах [9,10].

В [11] розглянуто форми та методи діяльності в корпоративних інформаційно-аналітичних системах, запропоновано підхід до опису аналітичної діяльності на основі сценарного підходу та розроблена методика для формування відповідних сценаріїв.

В [12] розглянуто сценарій, за якого лідери повинні підбирати команду за умови наявності певних обмежень. Розроблено ефективний алгоритм для досягнення лідером заданої мети.

Просуванню в розвитку алгоритмів та способів опису мультиагентних систем заважає відсутність достатньо потужної моделі для опису управлінської діяльності людини. Недавно в [13,14] для опису виробничих та організаційних систем запропоновано використовувати властивість людини-оператора (агента) приймати рішення та оцінювати рівень їх виконання. З метою моделювання діяльності людини-оператора вводяться два простори. Перший – це простір  $A$  можливих для вибору стратегій діяльності людини. Другий – це простір простором  $A_0$  результатів діяльності людини (результатів виконання відповідних стратегій). В цьому випадку діяльність людини-оператора може бути представлена певним оператором  $a$ , який діє із простору  $A$  в простір  $A_0$ :  $a: A @ A_0$ .

В [13,14] побудовано математичний апарат для моделювання діяльності людини-оператора, передовсім – управлінської. Для цього розроблено універсальний метод для розбиття простору  $A$  можливих для вибору стратегій та простору  $A_0$  результатів діяльності людини на вісім непересічних класів, які названі компонентами інформаційного простору. Далі побудовано новий клас математичних операторів, що діють в цих просторах  $a: A @ A_0$ . Ці оператори названі двокомпонентними абстрактними інформаційними автоматами (2AIA). Показано, що мінімальна кількість різних операторів, які здат-

ні повністю описати довільну діяльність над просторами  $A$  та  $A_0$  складає 16 різних типів 2AIA.

Таким чином, кожен із типів 2AIA здатний при здійсненні діяльності відбрати стратегії лише із певної підмножини простору можливих стратегій  $A$  та здійснювати діяльність лише в рамках певної підмножини простору  $A_0$ .

В [15] доведено, що між введеними в [13,14] типами 2AIA існують 16 взаємин, в якості яких виступають оператори переведення одного типу 2AIA в інший та здійснено дослідження отриманої некомутативної групи автоморфізмів.

### **Мета**

Розробка математичного апарату для опису мультиагентних систем, в яких 2AIA виступають в якості агентів, та побудова алгоритмів для розв'язання сукупності важливих для практичного застосування задач з управління виробничими та організаційними системами.

### **Постановка задач**

1. Розробити математичний апарат для опису мультиагентних мереж на основі моделювання агентів як двокомпонентних абстрактних інформаційних автоматів.

2. Розробити топологічна класифікація для таких мультиагентних мереж.

3. Побудувати систему алгоритмів для розв'язання сукупності важливих для практичного застосування задач з управління виробничими та організаційними структурами за допомогою мультиагентних мереж.

### **Розв'язання задач: теорія**

Всю сукупність агентів позначимо як  $\{A\}$ . Позначимо тип діяльності агента через  $t_i$ ,  $i=1...16$ , а саму множину типів агентів через  $\{T\}$ . Може мати місце ситуація, коли декілька агентів мають один і той же тип діяльності  $t_i$ , будемо в цьому випадку використовувати позначення  ${}^{n_i}t_i$ , де  $n_i=1...N_i$  – кількість агентів, які мають тип  $t_i$ . Таким чином, агент характеризується параметром  ${}^{n_i}t_i \hat{I} A$ .

Введемо в розгляд пару типів  $({}^{nj}t_j, {}^{ni}t_i)$ . Дамо визначення.

*Визначення 1.* Пару  $({}^{nj}t_j, {}^{ni}t_i)$  будемо називатися зв'язком між відповідними агентами.

*Визначення 2.* Зв'язок називається асиметричним, коли в ньому виділено, який із агентів є початковим, а який – кінцевим. В іншому випадку зв'язок називається симетричним.

*Визначення 3.* Сукупність агентів  $\{A\}$  та сукупність зв'язків між ними будемо називати мережею мультиагентної системи.

В загальному випадку один агент може бути зв'язаний із декількома іншими агентами.

Враховуючи визначення 1 та 2, легко бачити [16], що такий опис мультиагентної мережі еквівалентний завданню певного графа, який має орієнтовані та неорієнтовані ребра. Точками графа є агенти, а ребрами – зв'язки.

Таким чином, довільна мультиагентна мережа в рамках моделювання агента за допомогою 2AIA може бути представлена у вигляді графу із орієнтованими та неорієнтованими ребрами.

Розглянемо спеціальний тип мультиагентної мережі.

*Визначення 4.* Мультиагентна система називається «мультиагентною мережею спеціального типу» (ММСТ), коли агенти із різними типами 2AIA є тотожними і вони мають однакові зв'язки із агентами інших типів.

Для ММСТ справедливі такі теореми.

**Теорема 1.** Всі можливі варіанти ММСТ зводяться до кінцевої кількості варіантів із 16 типів 2AIA.

*Доведення.* Оскільки всі агенти є тотожними, то всі агенти із одним типом 2AIA можуть розглядатися як одна вершина відповідного графу.

**Теорема 2.** Всі можливі типи топологічних структур для ММСТ є такими: без топологічної структури, від одної до чотирьох орбіт включно (всього 15 різних варіантів), одна чи дві діадні орбіти (три

варіанти), одна орбіта та одна діадна орбіта (4 варіанти), соціон.

Кількість варіантів розраховується як кількість сполучень без повторів. Всього може бути 22 варіанти топологічної будови ММСТ (враховуючи без топологічної структури).

Доведення в основному повторює доведення теорем із [14,15]. Нагадаємо [14,15], що соціон є структура, яка складається із всіх 16 типів 2AIA за умови, коли задіяні всі можливі зв'язки між типами. З топологічної точки зору соціон є дискретним представленням букету із шести кіл або двовимірної сфери із сімома вклесними півками Мебіуса.

*Зауваження.* При формулюванні теореми враховано, що зв'язки між агентами можуть бути задані довільно.

*Приклад 1.* Прикладом ММСТ є організаційна чи виробнича структура, в якій функціональні обов'язки виконуються більш ніж одним агентом, а зв'язки між агентами відповідають зв'язкам між робочими місцями. При цьому така структура не розділена на окремі підструктури.

*Визначення 5.* Мультиагентна система називається «мультиагентною мережею загального типу» (ММЗТ), коли агенти із різними типами 2AIA не є тотожними і вони мають не однакові зв'язки із агентами інших типів.

В цьому випадку необхідно враховувати зв'язки не тільки між типами 2AIA, але й між агентами. Для ММЗТ необхідно враховувати вже не тільки тип топологічної структури матриці зв'язків між типами, але й кількість різних типів структур, бо один і той же тип топологічної структури може бути представлений у декількох варіантах. Наприклад, одна орбіта із одних і тих самих типів 2AIA може бути в ММЗТ представлена у декількох різних варіантах (вона буде складатися із різних агентів, які мають однакові типи 2AIA).

Для ММЗТ теорема 2 буде справедлива також, але нею будуть задаватися вже різні види топології зв'язків між агентами.

**Теорема 3.** Всі можливі типи топологічних структур для МAMЗТ є такими: без топологічної структури, від одної до чотирьох орбіт включно (всього 15 різних варіантів), одна чи дві діадні орбіти (три варіанти), одна орбіта та одна діадна орбіта (4 варіанти), соціон. Кожна характеристика включає перелік кількості кожного із варіантів, які реалізовані на різних агентах.

**Приклад 2.** Прикладом МAMЗТ може слугувати організаційна чи виробнича структура, де різні агенти виконують різні функціональні обов'язки. При цьому ця структура може бути розділена на окремі підструктури (наприклад, відділи чи цехи). При цьому кожна підструктура може мати власний тип топології.

### **Прикладні аспекти**

Розроблений формалізм може бути застосовано для розв'язання нових класів задач.

**Задача 1.** Технологія формування оптимальних для управління та спільної діяльності мережі із наявних агентів. Термін «оптимальність» розуміється в смислі найбільш ефективної діяльності кожного агента та їх сукупності у відповідності до [13–15].

Мережі такого типу створюються за виконання таких умов.

1. Чотири симетричні відношення між типами, що різняться за полюсами «узагальнюючий – деталізуючий» не використовуються як неефективні для спільної діяльності та передачі інформації (див. [14]).

2. Використовуються симетричні взаємини передовсім ті, які мають вищий коефіцієнт ефективності за [17].

3. Асиметричні взаємини повинні відповідати технологічному ланцюжку чи алгоритму прийняття рішень (послідовна передача інформації, послідовне прийняття рішення, розпаралелювання прийняття рішень тощо).

**Задача 2.** Використовуючи задану сукупність агентів, знайти оптимальний шлях для передачі інформації від одного

заданого агента до іншого заданого агента (задача про вплив на заданого агента).

Ця задача вирішується за виконання таких умов.

1. Вибирається шлях найкоротшої довжини.

2. Шлях повинен включати мінімальну кількість асиметричних відносин (інформація розповсюджується по орієнтації ребра відповідного графа).

3. Використовуються симетричні взаємини передовсім ті, які мають вищий коефіцієнт ефективності за [17].

4. Чотири симетричні відношення між типами, що різняться за полюсами «узагальнюючий – деталізуючий» не використовуються як неефективні для спільної діяльності та передачі інформації (див. [14]).

**Задача 3.** Використовуючи задану сукупність агентів, створити мережу, яка здатна здійснити найефективніший аналіз інформації та вибір рішення.

**Зауваження.** Може задаватися агент, який приймає остаточне рішення. Може задаватися агент, через якого в мережу поступає інформація. В деяких випадках при розгляді МAMЗТ можуть застосовуватися не всі агенти.

Ця задача вирішується за виконання таких умов.

1. Мережа повинна включати максимальну кількість асиметричних відносин (інформація розповсюджується по орієнтації ребра відповідного графа), орбіт та діадних орбіт. Найбільш ефективним є бідова соціону – одного чи декількох (останнє – для МAMЗТ).

2. Використовуються симетричні взаємини передовсім ті, які мають вищий коефіцієнт ефективності за [17].

3. Чотири симетричні відношення між типами, що різняться за полюсами «узагальнюючий – деталізуючий» не використовуються як неефективні для спільної діяльності та передачі інформації (див. [14]).

**Задача 4.** Оцінити рівень ефективності прийняття рішення (здійснення діяльності) для заданої мережі.

Розв'язок задається теоремою 2 для МАМСТ та теоремою 3 для МАМЗТ. Із цих теорем випливає, що існує найбільш ефективне (оптимальне) рішення, яке реалізується на соціоні (одному для МАМСТ та сукупності для МАМЗТ).

Задача 5. Побудувати мережу із максимальним рівнем ефективності спільного прийняття рішення чи здійснення спільної діяльності.

Задача, по суті, зводиться до вибору одного графу із заданої сукупності можливих (сукупність можливих графів задається умовами функціонування організаційної чи виробничої структури).

Розглядаючи зв'язки між агентами як ребра відповідного графу, можна для неорієнтованих графів побудувати ваги у відповідності із [17]. Тоді задача зводиться до використання алгоритму Л. Форда – Д. Фалкерсона для течій на графах [16]. Результатом задачі є вибір такого графу із сукупності можливих для даної задачі, який має найвищу пропускну здатність.

Дана задача може вирішуватися як для всієї мережі, так і для окремих її ділянок. Наприклад, така задача має сенс для вибору структури мережі агентів при організації зв'язку між окремими підструктурами, відділами чи підрозділами виробничої чи організаційної системи.

Задача 6. Знайти максимальну кількість фрагментів, на яку можна розбити задану мережу агентів з тим, щоб вони мали однаковий рівень ефективності в прийнятті рішень та здійсненні діяльності.

У відповідності до задачі 4, задача зводиться до формування таких фрагментів, які мають однакові топологічні властивості.

Така задача може виникати за необхідності розпаралелювання прийняття рішень. Наприклад, при формування матричної структури управління чи при формуванні колективів для потреб старт-апів.

Задача 7. Виявити умови, за яких можливо здійснити розпаралелювання управління (аналіз, розробку методів та технологій, здійснення управління тощо).

Як слідує із структури соціону [14, 15], існують всього 6 типів 2AIA, які можуть брати участь у розпаралелюванні інформації. Це є один тотожний тип, а також ще п'ять типів, які входять в букет із шести орбіт, що складають соціон. При цьому легко побачити, що діадний тип може слугувати як «початком», так і «закінченням» паралельної обробки інформації. Із чотирьох типів, які залишилися, два можуть слугувати «початком» (у них тотожні «приймальні» блоки із розглянутим типом і його діадним типом [14,15]), а ще два – «закінченням» паралельної обробки інформації (у них тотожні блоки «активності» із розглянутим типом і його діадним типом [14,15]).

Написане вище стосується випадку, коли інформація подається лише на один тип, який і повинен здійснити розпаралелювання.

У випадку, коли сприйняття інформації може бути здійснене декількома типами, подальшу паралельну обробку інформації може ініціювати кожен із типів.

Задача про те, на які типи потрібно подати інформацію, щоб максимально повно задіяти типи 2AIA в мультиагентній мережі, вирішується в залежності як від завдання та мети створеної мережі, так і від її складу.

Задача 8. Виявити умови, за яких переробка інформації та управління (аналіз, розробка методів та технологій, здійснення управління тощо) може бути здійснена тільки в послідовному режимі.

Шість відносин між типами 2AIA, які можуть призводити до паралельної обробки інформації та паралельного управління, наведені в задачі 7. Інші 10 відносин призводять до послідовної обробки інформації та до послідовного управління. Це всі 8 відносин між типами з різними полюсами за дихотомією «узагальнюючий – деталізуючий» та ще дві відносини між типом 2AIA та тими типами 2AIA, які знаходяться «по діагоналі» із розглянутим типом 2AIA в спарених діадних орбітах (термінологію див. в [14,15]).

При цьому чотири асиметричні відносини жорстко визначають *впорядкування* між типами: дві відносини для «входу» та дві – для «виходу» в послідовній мережі. Інші шість відносин є симетричними.

*Зауваження.* В рамках задач 7 і 8 можна поставити задачі про витрати часу на здійснення обробки інформації та управління в заданій мережі. Витрати часу є обов'язковими для асиметричних відносин: вони жорстко фіксують порядок слідування типів і задають саме послідовне управління. Якщо є можливість *вибирати* взаємини між типами (наприклад, при формуванні виробничих чи організаційних структур), то отримані результати надають можливість управляти часом «спрацьовування» управління, яке виконується заданою сукупністю агентів. Управління часом здійснюється за допомогою створення різних мереж, що мають різне співвідношення між паралельним та послідовним управлінням та переробкою інформації.

Задача 9. Врахувати належність агента до заданої підструктури.

Це можна зробити, вводячи для кожного агента маркування, яке визначає його належність до заданої підструктури (відділу, цеху тощо). Тоді виробнича чи організаційна структура буде моделюватися сукупність мереж із агентів, причому зв'язок між мережами буде здійснюватися тільки через заданих (фіксованих) агентів, які мають маркування, що відноситься до двох мереж (чи більшої їх кількості).

*Зауваження.* Умовами задачі 9 фіксуються, фактично, *формальні* взаємини між агентами. Використовуючи отримані результати, можна вирішувати задачі про взаємозв'язок між формальними та неформальними зв'язками (включаючи мотивування [18]) у виробничих та організаційних структурах.

Задача 10. Врахувати інформаційну асиметрію сторін при управлінні в мережі агентів.

Врахування інформаційної асиметрії сторін можна здійснити веденням спеціального маркування для агента. При цьому

*частина* взаємин стають *асиметричними*, бо потрібно врахувати рух інформації від більш інформованого агента до менш інформованого.

При розв'язанні цієї задачі можна виникати необхідність передавати інформацію *проти* напрямку в асиметричних взаєминах. Для цього можна використати такий алгоритм. Більш поінформований агент повинен передати інформацію тому типу, для якого він сам є «входом» для асиметричної взаємини. Для цього найбільш ефективним буде знайти *допоміжного* агента з таким типом, який є «виходом» для агента – «цілі». Неважко довести, що взаємини між інформованим та допоміжним агентами є *симетричними* та досить ефективними (див. задачу 5 та [17]). Інформація передається спочатку *допоміжному* агенту, а вже він передає її агенту – «цілі» для передачі інформації.

*Зауваження.* Описаний вище алгоритм був неодноразово апробований в організаційних структурах. Він довів свою високу ефективність (деталі див. у [14]).

Якщо ж агента із таким *допоміжним* типом 2AIA в мережі немає, то потрібно знайти такого агента, який має найвищий рівень ефективності при *спільній* діяльності (див. задачу 5 та [17]) із агентом – «ціллю».

### **Висновки**

1. Розроблено математичний апарат для опису мультиагентних мереж на основі моделювання агентів як двокомпонентних абстрактних інформаційних автоматів.

2. Розроблена топологічна класифікація для таких мультиагентних мереж.

3. Побудовано систему алгоритмів для розв'язання сукупності важливих для практичного застосування задач з управління виробничими та організаційними структурами за допомогою мультиагентних мереж.

4. Отримані результати описують мультиагентні мережі, в якості агентів яких розглядаються люди, що приймають рішення або здійснюють вибір.

### Список літератури

1. Blondel V.D. Convergence in multiagent coordination, consensus, and flocking / V.D. Blondel, J.M. Hendrickx, A. Olshevsky, J.N. Tsitsiklis // In 44th IEEE Conference on Decision and Control. – 2005. – P.2996-3000.
2. Nedirc A. Convergence rate for consensus with delays / A. Nedirc, A. Ozdaglar // Journal of Global Optimization. – 2010. – V.47(3). – P.437-456.
3. Nedirc A. Constrained consensus and optimization in multi-agent networks / A. Nedirc, A. Ozdaglar, P.A. Parrilo. // IEEE Trans. on Aut. Control. – 2010. – V.55(4). – P.922-938.
4. Olshevsky A. Convergence rates in distributed consensus and averaging / A. Olshevsky, J.N. Tsitsiklis // In 45th IEEE Conference on Decision and Control. – 2006. – P.3387-3392.
5. Tahbaz-Salehi A. A necessary and sufficient condition for consensus over random networks / A. Tahbaz-Salehi, A. Jadbabaie // IEEE Trans. on Aut. Control. – 2008. – V.53(3). – P.791-795.
6. Tahbaz-Salehi A. Consensus over ergodic stationary graph processes / A. Tahbaz-Salehi, A. Jadbabaie // IEEE Trans. on Aut. Control. – 2010. – V.55(1). – P.225-230.
7. Lynch N.A. Distributed algorithms / N.A. Lynch. – New York: Morgan Kaufmann, 1996. – 874 p.
8. Franceschetti M. A group membership algorithm with a practical specification / M. Franceschetti, J. Bruck // IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems. – 2001. – V.12(11). – P.1190-1200.
9. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – М.: Физматлит, 2007. – 584 с.
10. Montanari A., Saberi A. The spread of innovations in social networks / A. Montanari, A. Saberi // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. – 2010. – V.107(47). – P.20196.
11. Додонов А. Г., Бойченко А. В. Разработка сценариев аналитической деятельности // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – Т. 12, № 4. – С.71-82.
12. Coviello L. Distributed team formation in multi-agent systems: stability and approximation [Електронний ресурс] / Coviello L., Franceschetti M. – arXiv:1207.6475. – 31 p. – Режим доступу: <http://arxiv.org/pdf/1207.6475>.
13. Шиян А.А. Информационное пространство и классификация стратегий управленческой деятельности в теории игр и принятия решений / А.А. Шиян // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007. – № 3(10). – С.131-139.
14. Шиян А.А. Теоретико-ігровий аналіз раціональної поведінки людини та прийняття рішень в управлінні соціально-економічними системами / А.А. Шиян. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 404 с.
15. Шиян А.А. Математичне моделювання спільної економічної діяльності людей [Електронний ресурс] / А.А. Шиян // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – №2. – 7 с. – Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.files/uk/08aasaop\\_uk.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.files/uk/08aasaop_uk.pdf).
16. Бондаренко М.Ф. Дискретна математика / М.Ф. Бондаренко, Н.В. Білоус, А.Г. Руткас. – Харків : «Компанія СМІТ», 2004. – 480 с.
17. Шиян А. А. Метод обрахунку ефективності спільної економічної діяльності людей на основі теоретико-ігрового моделювання / А. А. Шиян, Л. О. Нікіфорова // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2008. – № 54(2). – С.10-13.
18. Мороз О.В. Соціально-психологічні чинники мотивування працівників приладобудівних підприємств / О.В. Мороз, Л.О. Нікіфорова, А.А. Шиян. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 252 с.

Статтю подано до редакції 17.12.2013