

МОДЕЛЮВАННЯ ЕМЕРДЖЕНТНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧОТИРИШАРОВОЇ ПРИХОВАНОЇ МАРКОВСЬКОЇ МОДЕЛІ

Нестеренко С. А., Дадерко О. І., Саух І. А.

1. Вступ

У багатьох додатках людської діяльності зустрічаються ситуації, коли до деякого об'єкта необхідно підібрати пару зі скінченної множини однорідних об'єктів. Підбір повинен бути виконаний шляхом вибору найближчого елемента цієї множини по заданому набору ознак.

Якщо ознаки однозначно вимірювані або обчислювані, то розпізнавання є тривіальним. Якщо ж хоча б одна ознака носить стохастичний або нечіткий характер, то задача нерозв'язна без застосування технологій штучного інтелекту із застосуванням методів виявлення знань в умовах невизначеності.

Найбільш складною є вимога враховувати не тільки сумарний системний ефект від використання двох або більше елементів. У цьому випадку особа, яка приймає рішення про вибір, може зіткнутися із так званим синергетичним ефектом або з його наслідком – емерджентністю, дія якої може перекрити усю вигоду від поєднання цих двох елементів в системі. Найпереконливіший приклад такого явища – несподіваний різкий негативний побічний ефект від додаткового призначення деякому хворому других окремо «невинних» ліків. З цього випливає нагальна необхідність не просто підбирати пару, сумуючи очевидні характеристики (не вистачає тепловиділення з 30 кг урану-235, – візьміть 60 кг!), але й ретельного аналізу різних прихованих обставин такого поєднання, аби не наразитися на атомний вибух (критична маса ^{235}U – 50 кг).

Таким чином, завдання підбору пари є одночасно завданнями розпізнавання образу і завданнями оптимізації, оскільки образ шукається в деякому сенсі найкращий!

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – процес вибору синергетично обумовленої пари для початково заданого елемента складної системи.

Технологічний аудит є способом діагностики інноваційної привабливості пропонованих теоретичних та практичних рішень в галузі комплектації складних систем парними елементами. І дозволяє отримати характеристику інноваційного потенціалу при створенні нових і реконструкції існуючих інформаційних технологій підтримки розв'язання практичних задач в цій галузі.

Проведення технологічного аудиту надає змогу сформулювати стратегію отримання прибутку з результатів інноваційної діяльності на попередніх етапах – плануванні та проектуванні майбутньої вигоди. Передбачається, що розробник використає результати інноваційної діяльності безпосередньо в процесі проектування технічних об'єктів або планування медичного втручання, застосовуючи нові методи в багатьох галузях народного господарства та

соціальної сфери.

В результаті виконаного технологічного аудиту в медичній (призначення пари ліків) та технічній (вибір пари амортизаторів) галузях виявлено, що існуючі моделі взаємодії елементів складних систем не можуть вважатися адекватними. Адже вони не надають можливості враховувати явище емерджентності як додаткового ефекту їхньої взаємодії. Подальший прогрес в цих напрямках можливий лише в разі створення нових моделей, які можуть не тільки виявляти таку емерджентність, але й оцінювати її чисельно.

Інваріантність таких моделей відносно систем «об'єкт – елементи об'єкта – емерджентність взаємодії елементів» дозволяє стверджувати, що такий підхід буде актуальним і в багатьох інших сферах людської діяльності.

3. Мета і задачі дослідження

Мета роботи – створення СППР для інтелектуального підбирання із тих, що є в наявності, синергетично обумовлених пар до існуючих елементів системи, *оптимальних з точки зору параметрів системи в цілому*. Створення та впровадження СППР повинно використовувати метод оцінювання та ранжування системних наслідків (емерджентності) суміщення пар елементів в умовах невизначеності, побудованого на прихованих чотирьохшарових марковських моделях.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити *такі задачі*.

1. Розробити метод підтримки прийняття рішення про застосування одного з елементів-претендентів в парі до вже існуючого елемента системи.
2. Розробити модель емерджентності, засновану на чотиришаровій прихованій марковській моделі.
3. Виконати практичні випробування результатів досліджень та оцінити їхній технічний та соціальний ефект.

4. Дослідження існуючих рішень проблем

Серед основних напрямків усунення цих проблем, виявлених в ресурсах світової наукової періодики, можуть бути виділені такі:

- 1) виявлення безпосереднього використання пар елементів у складі складних систем, які працюють спільно та породжують синергетичні ефекти із небажаною емерджентністю [1–5];
- 2) застосування методів та засобів нечіткого моделювання та багатокритеріального вибору в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень [6–8];
- 3) застосування методів створення та розпізнавання зорових образів як проміжного відображення стану структури складних систем [9–14];
- 4) застосування інтелектуальних методів *Data Mining*, зокрема нейронних мереж або прихованих марковських моделей [15–19].

Розглянемо ці напрямки докладніше.

1. Як зазначено вище, в будь-яких об'єктах будь-якої сфери людської діяльності майже завжди можна знайти парні елементи, які при проектуванні або ремонті (реконструкції) об'єкта бажано ретельно підбирати за певними ознаками, аби не допустити додаткового негативного ефекту та надання великої

шкоди об'єкту в цілому. Можна уявити і протилежну задачу: підібрати пари так, щоб додатковий позитивний ефект від їхньої сумісної роботи був максимальним. Передбачається, що пара об'єктів, яка обирається, буде в подальшому «працювати» спільно. Прикладами таких пар можуть служити парні елементи комп'ютерів та їх аксесуарів [1], радіотехнічних стереосистем [2], метрологічних пристроїв [3] – в техніці, римовані рядки [4] – в поезії, екіпажі космічних експедицій [5] – в психології і багато іншого.

2. Існуючі методи обробки масивів нечітких чисел [6] не призначені для обробки прихованих підмножин останніх. Крім того, існує багато задач і методів їхнього розв'язання, коли пари нечітких чисел не можуть варіюватися окремо [7]. В цих задачах потрібно знайти пари чисел, які найбільш близькі до заданого числа, при цьому треба оцінювати кожне число в парі окремо – чим ближче, тим краще. Така постановка не породжує модель, придатну для оцінювання емерджентності пар. Не підходять до розв'язання задач вибору синергетично обумовлених пар і пропонувані в [8] методи пошуку нечітких повторювань при організації повторного використання елементів, що знаходяться на зберіганні.

3. Існує багато методів, призначених для пошуку близьких елементів в масивах зображень (або в межах одного зображення) [9]. Але для цього складна система, яка розглядається в роботі, повинна попередньо бути перетвореною до зорового образу [10]. Крім того, методи створення та розпізнавання зорових образів як проміжного відображення стану структури складних систем [11] обчислювально складні і потребують потужних комп'ютерів та багато часу [12]. Роль цього негативного фактора значно зростає при обробці багатопотокових прихованих марковських моделей, які працюють в складних комплексах [13]. Не розв'язують завдання «добичі» прихованої інформації і багаточисельні методи розпізнавання текстів, навіть, якщо в них використовуються приховані марковські моделі [14].

4. Застосування існуючих інтелектуальних методів *Data Mining* розглянемо на прикладі побудови прихованих трьохшарових марковських моделей деякої системи Ω вигляду $\lambda_3 = \{\pi, A, B\}$ [15] (рис. 1).

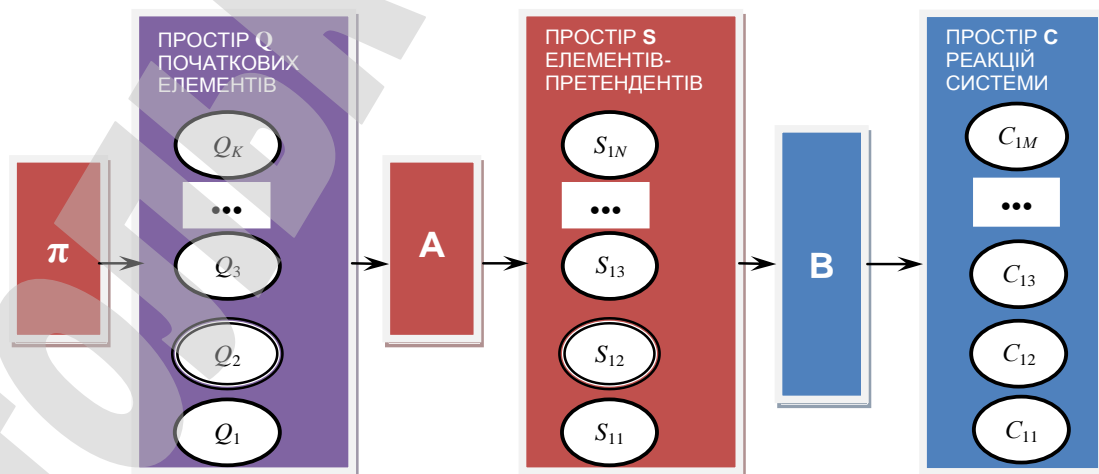


Рис. 1. Схема трьохшарової прихованої марковської моделі ПММ-3

Як видно на рис. 1, модель складається з трьох шарів:

- 1) шар початкових елементів;
- 2) шар елементів-претендентів в пару до початкового;
- 3) шар зовнішніх проявів системи на сукупну дію початкового елементу з шару № 1 та обраного елементу з шару № 2.

Отже, таку «класичну» приховану марковську модель будемо називати трьохшаровою та позначати ПММ-3. Початковий елемент Q_k визначається відповідним можливим набором цих елементів Q та матрицею π , яка містить ймовірності обрання в якості початкового конкретного елемента Q_k з набору Q .

Необхідність в матрицях A і B впливає з того, що «класичні» приховані марковські моделі представлені як результат двох випадкових процесів: з проміжним неявним S і остаточним явним C виходами [16, 17].

Отже матриця A відбиває предметну область і відповідає на питання, яка ймовірність переходу об'єкта, що моделюється за допомогою ПММ-3, від початкового до прихованого станів [18, 19]. Якщо предметна область – ліки і хворий, який їх приймає, то матриця A – це ймовірність призначення у пару до початкових ліків (з множини Q) других ліків із множини претендентів S . Звичайно, початкове значення цієї матриці (без врахування емерджентності) залежить від багатьох факторів: наявність ліків, їхня вартість, строки постачання, психологічний стан хворого, час, який минув після останніх аналізів, прихильність лікаря, тощо.

Матриця B є по суті є відповіддю на питання, як прореагує хворий на таку сполуку ліків? Звичайно, значення елементів цієї матриці залежить у великій мірі саме від хворого, що в багатьох випадках виявляється малопередбачуваним. Чим більше хворих прийняли участь в оцінці ефекту такого лікування, тобто, чим краща статистика в основі навчання ПММ-3, тим точніша модель.

Важливим недоліком ПММ-3 з точки зору моделювання емерджентності є те, що в ПММ-3 тільки один прихований шар – шар № 2, а в об'єкті із емерджентністю таких умовних шарів, принаймні, два. Адже окрім шару елементів-претендентів в пару до початкового необхідно мати ще й шар власне емерджентності. Остання, по-перше, прихована від зовнішнього спостереження, а, по-друге, – може приймати різні, заздалегідь невідомі ані за змістом, ані за значенням форми, для яких необхідно розширити ПММ-3 до ПММ-4 і створювати додатковий шар емерджентності.

5. Методи дослідження

В основу створення методу підтримки прийняття рішення про застосування пари елементів покладено теорію визначення прихованих параметрів стану складних систем в умовах невизначеності.

Для розробки цього методу використовували теорію статистичних марковських моделей, в яких система, що моделюється, розглядається як марковський процес із неспостережуваними (*прихованими*) станами.

Для перевірки адекватності методів, а також точності та достовірності моделей використовували лабораторну та практичну бази Центру

реконструктивної та відновної медицини (Університетської клініки) Одеського національного медичного університету (ОНМУ) та ПАТ «Одеський завод гумових технічних виробів» (Україна).

6. Результати дослідження

6.1. Метод підтримки прийняття рішення про застосування одного з елементів-претендентів в парі до вже існуючого елемента системи

Визначимо терміни, що застосовуються в роботі. Почнемо з такого явища, як «синергія» [20]. Це ефект взаємодії двох або більше факторів, що характеризується тим, що він істотно перевершує просту суму дій кожного із зазначених факторів окремо (явище «емерджентності» – наявність у будь-якої системи особливих властивостей, які не притаманні її елементам) (рис. 2).



Рис. 2. Основний та додатковий ефекти від застосування елементів в якості пари

Наприклад, під синергією в медицині розуміють комбіновану дію лікарських речовин на організм, при якому сумарний ефект перевищує (це й є емерджентність) дію, яка чиниться кожним компонентом окремо.

Якщо є спосіб оцінювати емерджентності від різних ефектів чисельно, то ці прояви можна порівнювати і, навіть, ранжувати, надаючи користувачеві можливість вибирати «найкращу» емерджентність на свій розсуд. Отже, «найкраща емерджентність» – це наявність у будь-якої системи: найбільшої (найменшої) кількості особливих властивостей, які не притаманні окремо її елементам.

Зауважимо, що при чисельному ранжуванні позитивна і негативна з точки зору впливу на систему емерджентність може бути приведена в один ряд зміною знака «негативної» емерджентності на протилежний або навпаки.

Далі введемо поняття «синергетично обумовлена пара» (СОП). Синергетично обумовленими парами назвемо такі сполучення окремих

елементів, які в цьому сполученні демонструють «найкращу» емерджентність серед скінченної множини інших пар, в яких перші елементи однакові, а другі – різні. Належність до СОП в досліджуваному методі є підставою для переваги такої пари перед усіма іншими при здійсненні вибору другого елемента.

Тепер розглянемо наступну задачу вибору синергетично обумовленої пари до елемента за допомогою методів штучного інтелекту та параметрами «найкращої» емерджентності (рис. 3).

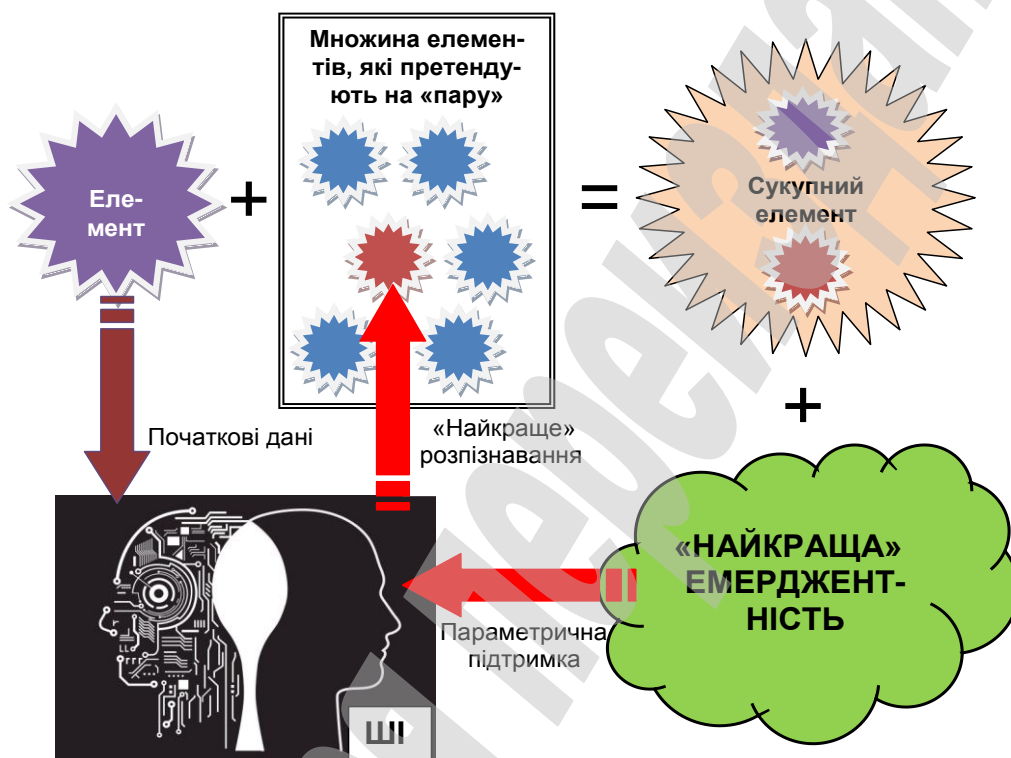


Рис. 3. Схема до задачі вибору синергетично обумовленої пари до елемента системи за допомогою методів штучного інтелекту та параметрами «найкращої» емерджентності (ШІ – система штучного інтелекту)

Нехай є деякий об'єкт і опис його системних властивостей (структура, параметри елементів та зв'язків між ними, вплив останніх на систему в цілому, взаємодія з навколишнім середовищем і т. п.). Є також скінченний набір інших елементів з відповідними описами, які не належать до системи.

Нехай також один з елементів системи вийшов з ладу (зруйновано один з пари амортизаторів) або не виконує свою функцію в системі (ліки проти підвищеного тиску не забезпечують повну нормалізацію останнього). В цьому випадку може виникнути проблема його заміни або додавання до нього синергетично обумовленої пари з числа споріднених елементів (наприклад, використання додаткових ліків одночасно із тими, що вже приймаються). Проблема розв'язується шляхом повного перебору (на комп'ютерній моделі!) усіх пар ліків, які утворюються, якщо до початкових додавати по одному ліки з набору ліків-претендентів і аналізувати ці пари на значення емерджентності (рис. 3). Далі побудована за цим принципом СППР передає ранжований ряд емерджентності до Особи (в досліджуваному прикладі це – лікар), яка приймає

остаточне рішення про перебіг подальшого лікування.

На рис. 3 ШІ – це будь-яка із моделей штучного інтелекту, яка здатна здійснювати *Data Mining* – тобто «добувати» знання з неупорядкованих множин інформації. Прикладом таких моделей можуть бути нейронні мережі або приховані марковські моделі [17]. Зрозуміло, що будь-яку інтелектуальну модель необхідно попередньо навчити робити оцінки на прикладах взаємодії із реальним об'єктом, наприклад, конкретним хворим або групою хворих. Такі навчальні вибірки є безцінним надбанням кожної СППР, оскільки із їх отриманням можуть бути пов'язані особисті трагедії попередніх хворих, що лікувалися без врахування синергетичних ефектів від пар ліків.

В роботі для оцінювання та порівняння емерджентності використовували такий метод. Припустимо, що існує можливість створювати образи (моделі) пар елементів і аналізувати результат їхньої сумісності на рівні цих образів. Тоді інтелектуальна СППР відбирає m «кращих» образів-елементів та пред'являє їх Особі, яка приймає остаточне рішення про обрану пару.

Будемо шукати параметр оцінювання ефекту від використання пари елементів у вигляді сукупного числа, яке, за аналогією з комплексними числами, складається з двох непоєднаних математично частин: чіткої та нечіткої (рис. 4).



Рис. 4. Метод оцінювання та ранжування цілком впорядкованої множини (ЦВМ) сукупних чисел

Далі будували цілком впорядковану множини (ЦВМ) сукупних чисел – тобто лінійно впорядковану множини, в якій для кожної непорожньої підмножини існує найменший елемент відповідно до заданого користувачем порядку.

Оскільки в загальному випадку обидві частини складаються з деяких множин чисел, тому кожну з них необхідно звести до одного числа за будь-якою згорткою. Для цього користувачеві необхідно вибрати *аксіому об'єднання* всіх чітких та окремо нечітких параметрів кожної пари до одного числа, – це

настроювання користувача.

В роботі аксіома об'єднання виглядала таким чином. Спочатку виконували ранжування усіх пар елементів, що аналізуються, за величиною чітких частин. Далі з ранжованого ряду вилучаються ті пари, в яких критерії видалення, розраховані за даними нечіткої частини, перевершують деякий заданий поріг (він також є настроюванням користувача). За найбільшим значенням чіткої частини у пар з тих, що залишилися після всіх вилучень, і вибирали m «найкращих» пар.

Метод підтримки прийняття синергетично обумовлених рішень про вибір пари елементів для деякої системи використовує різноманітні джерела даних, які «не лежать на поверхні»: моделювання, експерименти, експертні оцінки, тощо. Деякі дані можуть відбивати активну протидію хворого або його родичів в застосуванні тих або інших ліків [21].

6.2. Моделювання емерджентності за допомогою чотиришарової прихованої марковської моделі

Чотиришарова прихована марковська модель в нашому випадку є об'єднаним відображенням таких сутностей:

- об'єкт (складна система) Ω в цілому;
- множина елементів Q , які можуть претендувати на потрапляння до простору початкових елементів; потужність множини Q – K елементів;
- множина елементів-претендентів S на об'єднання із елементами з множини Q ; потужність множини S – $K \times N$ елементів;
- множина елементів-емерджентностей E , які можуть виникати (а можуть і ні!) в якості синергетичного ефекту на об'єднання в пару по одному з елементів з множин Q та S ; потужність множини E – $K \times N \times R$ елементів;
- множина C реакцій об'єкта Ω на застосування до нього (в ньому) об'єднаних в пару по одному з елементів з множин Q та S ; потужність множини C – $K \times N \times R \times M$ елементів;

Для моделювання та чисельної оцінки явища емерджентності в роботі використовували чотиришарову приховану марковську модель вигляду $\lambda_4 = \{\pi, A, E, B\}$. Призначення матриць π , A , E та B , які входять до моделі λ_4 , а також приклади їхнього відображення на конкретні параметри медичної галузі наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Призначення матриць та приклад відображення параметрів ПММ-4 на предметну область – визначення «найкращої» пари ліків в медицині

ПАРАМЕТРИ ПММ-4	ПРИКЛАД З МЕДИЦИНИ
1	2
$\pi\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_K\}$ – матриця ймовірностей перебування одного з K елементів в початковому шарі ПММ	Ліки, які вже застосовуються в лікуванні, але їхній лікувальний ефект недостатній
$S(\pi, n)$ – елементи-претенденти на об'єднання із елементами з множини π ; $n=1, \dots, N_\pi$	N_π нових ліків-претендентів на додавання в пару до початкових при лікуванні

Продовження таблиці 1

1	2
\mathbf{A}_π – матриця ймовірностей об'єднання початкового елемента з одним із елементів з множини $S(\pi, n)$	Визначається під час навчання ПММ
$E(\pi, n)$ – емерджентності, які можуть виникнути при об'єднанні початкового елемента з одним із елементів з множини $S(\pi, n)$	Недоступна для спостереження (прихована) зміна характеристик стану хворого при прийманні пари ліків з множини $S(\pi, n)$
$\mathbf{E}_{\pi, A}$ – матриця ймовірностей виникнення емерджентності при об'єднанні початкового елемента з одним із елементів з множини $S(\pi, n)$	Визначається під час навчання ПММ
$C(m)$ – сигнали, що спостерігаються, – властивості об'єкта, доступні для моніторингу; $\{m=1, \dots, M\}$	Доступна для спостереження зміна характеристик стану хворого при прийманні поточної пари ліків з множини $S(\pi, n)$
\mathbf{B} – розподіл ймовірностей появи того або іншого сигналу, що спостерігається, із множини $C(m)$, коли об'єкт знаходиться в m -у стані	Визначається під час навчання ПММ

Схема побудови чотирьохшарової прихованої марковської моделі ПММ-4 вигляду $\lambda_4 = \{\pi, \mathbf{A}, \mathbf{E}, \mathbf{B}\}$ наведена на рис. 5.

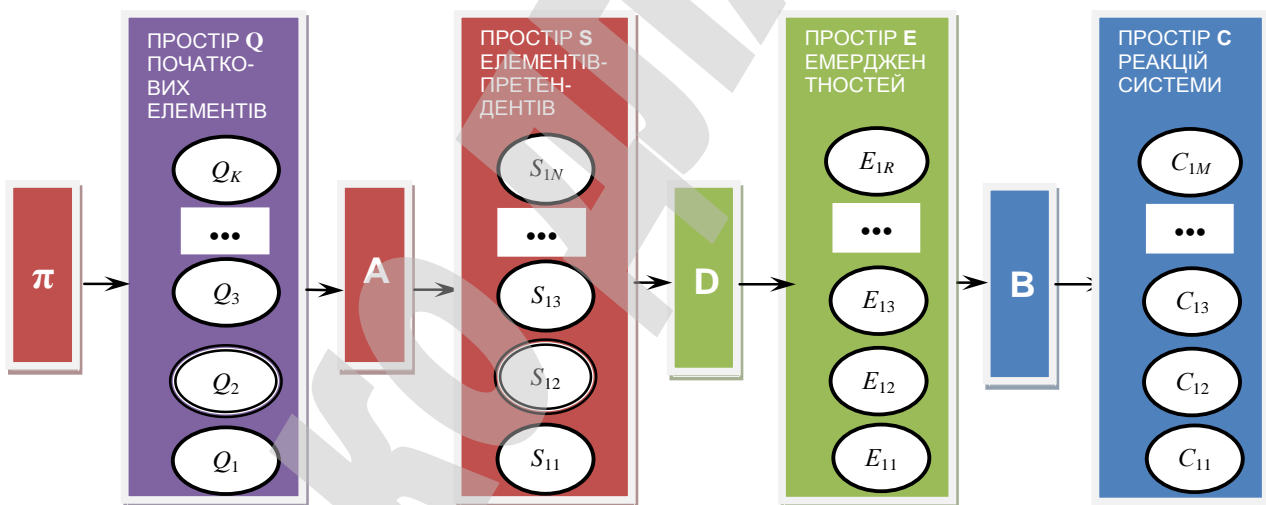


Рис. 5. Схема чотирьохшарової прихованої марковської моделі ПММ-4

Задача навчання параметрів у ПММ-4 полягає в знаходженні для заданої послідовності виходів або набору таких послідовностей найкращого набору ймовірностей переходів станів та виходів. Ця задача зазвичай полягає у виведенні оцінки максимальної правдоподібності цих параметрів ПММ-4 для заданого набору послідовностей виходів. В роботі для цього використовували відомий алгоритм Баума–Велша [17].

6.3. Практичне використання результатів дослідження

Результати, отримані в роботі, дозволили запропонувати загальну схему

інтелектуальної системи підтримки прийняття рішення про вибір синергетично обумовленої пари елементів для складних систем різного призначення: в медицині «SUPREMED» і в техніці «SUTEDECH» (рис. 6).



Рис. 6. Структура систем «SUPREMED» та «SUTEDECH»

В Центрі реконструктивної та відновної медицини (Університетській клініці) ОНМУ були проведені випробування інтелектуальної системи «SUPREMED» підтримки прийняття синергетично обумовлених рішень про призначення ліків, яка надає користувачеві ранжований ряд допустимих для використання суміщень лікарських засобів. Система «SUPREMED» була задіяна для визначення оптимальних комбінацій та дозувань лікарських препаратів, що направлені на корекцію стану згортаючої системи крові у хворих в післяопераційному періоді у відділеннях анестезіології та інтенсивної терапії та хірургії. Випробування системи «SUPREMED» показали, що її використання дозволило досягти таких клінічних результатів:

- зменшилась на 65 % (у 2,3 рази у порівнянні з контрольною групою) частота виникнення тромбоемболій гілок легеневої артерії та глибоких вен стегна та гомілки;
- на 43 % (у 1,8 рази) зменшилась частота післяопераційних кровотеч;
- на 36 % (у 1,6 рази) зменшилась загальна кількість призначаемих лікарських засобів, що спрямовані на корекцію згортаючої системи крові.

В ПАТ «Одеський завод гумових технічних виробів» були проведені випробування інтелектуальної системи «SUTEDECH» підтримки прийняття синергетично обумовлених рішень при обранні пари, яка надає користувачеві ранжований за емерджентністю ряд допустимих для використання суміщень гумових амортизаторів однієї марки. Система «SUTEDECH» була задіяна при

підбиранні пар амортизаторів марки АКСС-300М (Україна), які тестувалися на сумісну роботу в умовах номінального навантаження. Випробування системи «SUTEDECH» показали, що її використання дозволило досягти таких технічних результатів: збільшився на 14,5 % термін експлуатації.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Головним позитивним впливом об'єкта дослідження на свої внутрішні чинники є створена ним можливість прогнозувати звичайно приховану емерджентність і тим самим попередити ускладнення від невідлого вибору пари. Це дозволяє значно покращити ефективність СППР в цілому, зокрема, – при використанні результатів дослідження в медичній галузі.

Weaknesses. Головним негативним впливом об'єкта дослідження на свої внутрішні чинники є необхідність дуже ретельного підходу до обрання навчальної вибірки. Адже додатковий шар ПММ-4 після множення ймовірностей робить статистичний результат кожного елемента спостережуваної матриці **B** незначним, а отже неочевидним для обрання в якості оптимального.

Opportunities. Перспективи подальших досліджень в цьому напрямку пов'язані як з розвитком теоретичної бази в частині покращення структури прихованих марковських моделей, так і з вдосконаленням методів і засобів для їхнього навчання.

Threats. Як в будь-якому випадку, основні загрози для цієї діяльності випливають з швидкості зміни станів складних систем не тільки від обраного рішення, а й від багатьох інших чинників, що не враховані ані моделлю, ані системою ППР в цілому.

Раніше чотиришарові приховані марковські моделі для моделювання емерджентності не використовувалися. Тому повних аналогів пропонує моделей і методів в світовій практиці не існує.

8. Висновки

1. Розроблено метод підтримки прийняття рішення про вибір одного з елементів-претендентів в пару до вже існуючого елемента системи. Метод відрізняється тим, що головним параметром переваги при виборі є сукупне число, яке складається з основної, «паспортної» сумісної дії елементів та з емерджентності, яка при цьому виникає.

2. Розроблена модель емерджентності, заснована на чотиришаровій прихованій марковській моделі. Модель відрізняється тим, що вона містить додатковий четвертий (другий прихований) шар, який в свою чергу складається із множини емерджентностей, що виникають із-за синергетичного впливу на систему в цілому окремих пар окремих її елементів, та матриці ймовірностей такого виникнення.

3. Виконані практичні випробування результатів досліджень. Отримані такі результати випробувань:

– в медичній галузі на 65 % зменшилась частота виникнення тромбоемболій гілок легеневої артерії та глибоких вен стегна та гомілки;

- на 43 % зменшилась частота післяопераційних кровотеч;
- на 36 % зменшилась загальна кількість призначених лікарських засобів, що спрямовані на корекцію згортаючої системи крові;
- в технічній галузі на 14,5 % збільшився термін експлуатації гумометалевих амортизаторів.

Література

1. Skott M. Operativnaya pamyat' // Modernizaciya i remont PK. Moscow: Vil'yams, 2007. P. 499–572.
2. Podbor dinamikov // Audiomania. URL: <https://www.audiomania.ru/content/art-1740.html>
3. Compensation of the spatial deviations of measuring elements in CAD / Stanovskiy O. et al. // Technology audit and production reserves. 2017. Vol. 1, No. 2 (39). P. 52–60. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.123502>
4. Stanovskiy A. L., Pozdnyakov V. Yu. Konceptii sistemy podderzhki avtomatizirovannogo perevoda stihotvornogo teksta // Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta. 2007. No. 2 (28). P. 162–165.
5. Afanas'ev I. B., Baturin Yu. M., Belozerskiy A. G. Mirovaya pilotiruemaya kosmonavtika. Istoriya. Tekhnika. Lyudi. Moscow: RTSOft, 2005. 752 p.
6. Glushan' V. M., Karelin V. P., Kuz'menko O. L. Nechetkie modeli i metody mnogokriterial'nogo vybora v intellektual'nyh sistemah podderzhki prinyatiya resheniy // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2009. P. 106–113.
7. Poisk pary chisel optimal'no blizkikh k zadannomu konstantnomu chislu // MQL5. URL: <https://www.mql5.com/ru/forum/216667>
8. Zadacha poiska nechetkih povtorov pri organizacii povtornogo ispol'zovaniya dokumentacii / Luciv D. V. et al. // Programmirovaniye. 2016. No. 4. P. 39–49.
9. Pimenov V. Yu. Vychislitel'no-effektivniy metod poiska nechetkih dublikatov v kollekcii izobrazheni // Rossiyskiy seminar po Ocenke Metodov Informacionnogo Poiska. Trudy ROMIP 2009. Sankt-Peterburg: NU CSI, 2009. P. 89–107. URL: http://romip.ru/romip2009/09_ifm.pdf
10. Nesterenko S. A., Stanovskiy A. O., Toropenko A. V. Metod diahnozyky stanu struktury skladnogo obiekta mashynobuduvannia // Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. 2013. No. 8. P. 116–123.
11. Transformation of the structure of complex technical systems with partially unusable elements to the visual image / Nesterenko S. A. et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 5, No. 3 (77). P. 30–35. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51186>
12. Nesterenko S. A., Stanovskiy A. O., Oborotova O. O. The wireless computer networks state recognition over the three-dimensional field of directions // Technology audit and production reserves. 2015. Vol. 6, No. 2 (26). P. 28–35. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.56825>
13. Chatzis S. P., Kosmopoulos D. Visual Workflow Recognition Using a Variational Bayesian Treatment of Multistream Fused Hidden Markov Models // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2012. Vol. 22, No. 7. P. 1076–1086. doi: <http://doi.org/10.1109/tcsvt.2012.2189795>
14. Starner T., Pentland A. Real-Time American Sign Language Visual

Recognition From Video Using Hidden Markov Models: master's thesis. MIT, 1995.

15. Blasiak S., Rangwala H. A Hidden Markov Model Variant for Sequence Classification // IJCAI Proceedings-International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2011. P. 1192–1197.

16. Chatzis S. P. Hidden Markov Models with Nonelliptically Contoured State Densities // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2010. Vol. 32, No. 12. P. 2297–2304. doi: <http://doi.org/10.1109/tpami.2010.153>

17. Petropoulos A., Chatzis S. P., Xanthopoulos S. A novel corporate credit rating system based on Student's-t hidden Markov models // Expert Systems with Applications. 2016. Vol. 53. P. 87–105. doi: <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.015>

18. Domingos P. The Master Algorithm: How the Quest for the Ultimate Learning Machine Will Remake Our World. Basic Books, 2015. 352 p.

19. Dempster-Shafer fusion of multisensor signals in nonstationary Markovian context / Boudaren M. E. Y. et. al. // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2012. Vol. 2012, No. 1. doi: <http://doi.org/10.1186/1687-6180-2012-134>

20. Chto takoe sinergiya? // KlubOK.net. URL: <http://www.klubok.net/article2005.html>

21. Intellectual risk management in projects of transportation of large vehicles by the game theory / Stanovska I. et al. // Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser.: New solutions in modern technologies. 2018. No. 9 (1285). P. 147–152. doi: <http://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.09.21>