

8.2 Сукупність математичних моделей управління ресурсами інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень

Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) є невід’ємною складовою всіх сфер суспільної діяльності людства та застосовуються для вирішення широкого кола завдань від розважальних до суто специфічних [178-180].

Основними завданнями, які вирішуються ІСППР є [180-182]:

- вирішення різноманітних обчислювальних завдань в інтересах широкого кола споживачів незалежно від сфери їх застосування;
- зберігання результатів обчислень і також проміжних результатів для потреб користувачів;
- підтримка прийняття рішень, особами які їх приймають;
- забезпечують передумови до інтелектуального прийняття рішень.

Тенденції розвитку сучасних ІСППР спрямовані на вирішення наступних завдань [181-185]:

- підвищення оперативності обробки різнотипних даних та їх достовірності;
- підвищення точності моделювання процесу їх функціонування;
- підтримання балансу між оперативністю та достовірністю процесом вирішення розрахункових завдань та ін.

Разом з тим, наявні наукові підходи до синтезу та функціонування ІСППР мають недостатню точність та збіжність. Зазначене пов’язане з наступними причинами [178-186]:

- суттєва роль людського фактору в процесі первинного налаштування ІСППР;
- велика кількість неоднорідних джерел інформації, які підлягають аналізу та подальшій обробці при функціонуванні ІСППР;
- ІСППР функціонують в умовах невизначеності, що спричиняє затримку на їх обробку;

– наявність великої кількості дестабілізуючих факторів, що впливають на функціонування ІСППР та ін.

Це й спонукає до впровадження різноманітних стратегій для покращення ефективності функціонування ІСППР при вирішенні розрахункових завдань. Один з таких варіантів є удосконалення існуючих (розробка нових) математичних моделей функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Проведення аналізу праць [186-223] показав що спільними недоліками вищезазначених досліджень є:

– моделювання кожного підходу здійснюється лише на окремому рівні функціонування ІСППР;

– при комплексному підході розглядаються як правило дві складові функціонування ІСППР. Зазначене не дозволяє оцінити в повній мірі вплив управляючих рішень на подальше їх функціонування;

– перелічені вище моделі, що є складовими частинами наведених вище підходів, забезпечують слабку інтеграцію одна в одну, що не дозволяє їх об'єднати між собою для спільного функціонування;

– наведені вище моделі використовують різний математичний апарат, що не вимагає відповідних математичних перетворень, які в свою чергу підвищують обчислювальну складність та знижують точність моделювання та ін.

Об'єктом дослідження є інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. Проблема, яка вирішується в дослідженні, є підвищення точності моделювання процесу функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Предметом дослідження є процес функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень за допомогою сукупності математичних моделей їх функціонування. Гіпотезою дослідження є можливість підвищення оперативності та точності функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень за рахунок розроблення сукупності моделей їх функціонування.

8.2.1 Концептуальна модель координації у інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень

У ІСППР координатор виступає особою, що приймає рішення (ОПР), воно редукує складне завдання на серію часткових завдань, видає вихідні дані для експертів та збирає результати рішення. Недолік існуючих ІСППР у цьому, що координація у яких виконується одноразово, наприкінці розв'язання завдання, коли ОПР, виконавши агрегацію результатів рішення часткових завдань в єдине рішення, робить висновок про його придатність. При незадовільній оцінці інтегрованого результату можливості вирішити завдання знову може бути. Тому актуальною є розробка ІСППР, в яких координація йде по ходу вирішення складного завдання.

На основі моделі ІСППР [183], а також моделі складного завдання з координацією побудуємо модель ІСППР із координацією:

$$DSS = \langle PRT, prt^{dm}, R^{dm} \rangle, \quad (1)$$

де $PRT = \{prt_q \mid q=1, \dots, N_{prt}\}$ – множина моделей експертів; prt^{dm} – модель ОПР; $R^{dm} = \{r^{dm,q} \mid q=1, \dots, N_{prt}\}$ – відносини між ОПР та експертами, наприклад, відносини обміну інформацією. Кожен експерт працює суворо у своїй галузі знань $S_{prtq} \in S$, де S – множина всіх галузей знань необхідних для вирішення складного завдання, і не займається ніякими частковими завданнями крім своєї, $S_q \cap S_w = \emptyset$, при $q, w=1, \dots, N_{prt}; q \neq w$. Ґрунтуючись на міркуваннях з [182] та враховуючи, що у реальних завданнях часткові завдання вирішуються експертами поетапно, модель експерта можна висловити:

$$prt_q = \langle B_{prof}, B_{theor}, B_{prec}, B_{facts}, MET_{prtq}, S_{prtq}, In_{prtq}, \Delta t \rangle, \quad (2)$$

де B_{prof} – продукційна база професійних знань; B_{theor} – продукційна база теоретичних знань; B_{prec} – основа прецедентів (досвід); B_{facts} – основа фактів; MET_{prtq} – множина методів міркувань; S_{prtq} – опис галузі знань експерта, наприклад, у математиці опис математичної мови, основних понять, операцій;

In_{prtq} – інтерпретатор, який забезпечує виконання послідовності правил для вирішення задачі на основі фактів та правил, що зберігається в базах даних та знань; Δt – період видачі експертами проміжних рішень.

Модель ОНР може бути побудована за аналогією з (2):

$$prt^{dm} = \langle B_{prof}, B_{theor}, B_{prec}, B_{facts}, B_{ext}, MET_{prtdm}, S_{prtdm}, In_{prtdm}, E, T \rangle, \quad (3)$$

де B_{ext} – продукційна база знань про те, як виконувати редукцію, агрегацію, порівняння та координацію; E – множина координуючих процесів; T – час вирішення складного завдання. Вираз (3) у порівнянні з (2) має суттєві відмінності. Продукційна база знань B_{ext} про те, як ОНР керує вирішенням складного завдання. Ці знання від інших експертів. Множина E описує, як ОНР може координувати роботу експертів. У даній роботі моделі ОНР не враховуються: B_{prof} – база професійних знань; B_{theor} – основа теоретичних знань; B_{prec} – основа прецедентів (досвід).

Розглянемо, як функціонує ІСППР відповідно до (1). Нехай перед ОНР поставлено завдання prb^u , що редукується ним на часткові завдання $prb_1^h, \dots, prb_{N_h}^h$. У традиційних ІСППР, описаних, наприклад, в [179], кожен експерт $prt_q, q = 1, \dots, N_{prt}$, отримавши своє часткове завдання $prt_j^h, j = 1, \dots, N_h$, знаходить її рішення, використовуючи свої професійні B_{prof} та теоретичні знання B_{theor} . Після закінчення процесу рішення він видає результат $sol^h_j \in SOL_j^h$, де SOL_j^h – множина результатів вирішення завдання prt_j^h , що можна записати у вигляді відповідності ψ_4 :

$$\psi_4 : DAT^h \otimes B^U \rightarrow SOL^h, \quad B^U = B_{prof} \cup B_{theor}. \quad (4)$$

Елементи відповідності ψ_4 – кортежі $(\{dat_\sigma^h\}, \{b_\beta^u\}, sol_\gamma^h)$, при $\sigma = 1, \dots, N_{dath}$; $\beta = 1, \dots, N_b$; $\gamma = 1, \dots, N_{sh}$, де перша компонента – двокомпонентний вектор, що складається з переліку вихідних даних $\{dat_\sigma^h\}, dat_\sigma^h \in DAT^h$ і переліку використовуваних експертом $\{b_\beta^u\}, b_\beta^u \in B^U$ (професійних знань – продукційних правил; теоретичних знань – аналітичних залежностей), а друга – результат

$sol_{\gamma}^u \in SOL^h$ вирішення завдання prb^h . Відповідність ψ_4 не є функцією (не може бути записана аналітично або обчислена чисельними методами), оскільки знання експерта та результати вирішення завдання-елемента можуть представлятися природною мовою. Воно неоднозначно, оскільки при неповному наборі вихідних даних, експерт може запропонувати кілька варіантів результатів, сюр'єктивно, тому що кожне рішення завдання prb^h відповідає хоча б одному елементу з $DAT^h \otimes B^U$ і не ін'юктивно, так як не кожному елементу $DAT^h \otimes B^U$ відповідає рішення завдання prb^h .

Кількість етапів, на які експерти розбивають процес вирішення часткових завдань, позначимо N_{sol} , а sol_l^h – результат вирішення часткового завдання на l -му етапі, $l = 1, \dots, N_{sol}$. На етап приділяється інтервал часу Δt , оскільки в практичних завданнях загальний час T на вирішення складного завдання prb^u , суворо обмежений, а час Δt постійний, кількість етапів визначається за формулою:

$$N_{sol} = T / \Delta t. \quad (5)$$

Слід зазначити, що в процесі вирішення часткового завдання prb^h , через координуючі впливи ОПР вихідні дані DAT^h в (4) можуть бути модифіковані – введена додаткова інформація або замінена застаріла інформація на нову. Нехай DAT_l^h вихідні дані для l -го етапу, $l = 1, \dots, N_{sol}$. Тоді DAT_1^h – вихідні дані, отримані від ОПР, причому $DAT_1^h = DAT^h$, а DAT_l^h , $l = 2, \dots, N_{sol}$ – вихідні дані наступних етапів. Індекс l означає номер етапу, на якому використовуються вихідні дані. Визначимо DAT_{l+1}^h – вихідні дані $l+1$ -го етапу, отримані після координуючих впливів ОПР щодо зміни даних l -го етапу.

Схема послідовності етапів роботи експерта з пошуку рішення часткового завдання π^h може бути описана таким чином:

$$DAT_l^h \otimes B^U \otimes \{sol_1^h\} \otimes \dots \otimes \{sol_{l-1}^h\} \Rightarrow \{sol_l^h\}, \quad l = 1, \dots, N_{sol}. \quad (6)$$

Вихідні дані DAT_l^h , $l = 1, \dots, N_{sol}$ на кожному етапі доповнюються координуючими впливами $e^\alpha \in E$, виданими ОПР експерту, які воно визначає на основі інтегрованого результату вирішення завдання prb^u на $l-1$ -му етапі. У

випадку ОПР може дати кілька координуючих впливів кожному експерту. Вважатимемо, що експерту видається один координуючий вплив одного типу. Визначимо відповідність ψ_5 :

$$\psi_5 \{sol_l^u\} \otimes B_{ext} \rightarrow E, \quad l=1, \dots, N_{sol}-1. \quad (7)$$

Максимальне значення l дорівнює $N_{sol}-1$, тому що після N_{sol} етапу вже неможливо використовувати координацію, оскільки отримано кінцевий результат; sol_l^u – інтегрований результат вирішення завдання prb^u на l -му етапі; $E = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{N_e}\}$ – множина векторів виду $(e_1^1, \dots, e_{N_{prt}}^6)$, кожен компонент якого – координуюча дія для експерта, $e_q^\alpha \in E$, $q=1, \dots, N_{prt}$.

Оскільки знання про інтеграцію входять до складу B_{ext} ОПР (3), інтегрований результат sol_l^u вирішення складного завдання prb^u можна записати наступним чином:

$$\{sol_l^{h_1}\} \otimes \dots \otimes \{sol_l^{h_{N_h}}\} \otimes B_{ext} \rightarrow \{sol_l^u\}, \quad (8)$$

де $sol_l^{h_1}, \dots, sol_l^{h_{N_h}}$ – вирішення часткових завдань $prt_1^h, \dots, prt_{N_h}^h$ відповідно.

Елементи відповідності ψ_5 – кортежі $((sol_l^u, \{b_{ext}^\mu\}), \varepsilon_p)$, при $l=1, \dots, N_{sol}$, $\mu=1, \dots, \mu_{N_\mu}$, $p=1, \dots, N_e$ де перша компонента – двокомпонентний вектор, що складається з інтегрованого результату sol_l^u вирішення завдання prb^u на l -му етапі та переліку використаних ОПР знань про те, як виконувати порівняння, а $e \in E$ для експерта.

На N_{sol} -ом етапі ($l = N_{sol}$) вектор координуючих впливів $(e_1^1, \dots, e_{N_{prt}}^6)$, $\alpha = 6$, тобто ОПР не видає координуючих впливів експертам, а лише агрегує (здійснює інтеграцію рішень завдань prt^h в єдине, інтегроване рішення sol_l^u складного завдання prb^u) результати їх роботи. Якщо отриманий інтегрований результат sol_l^u не влаштовує ОПР, воно має переглянути вихідні дані завдання prb^u , тобто змінити DAT_l^h для всіх prt^h або змінити перелік своїх знань B_{ext} і знань експертів B_{prof} (моделі (4) і (3)), а після цього ініціювати повторну роботу ІСППР. Відповідність ψ_5 не є функцією (не може бути записана аналітично та

обчислено), оскільки знання ОПР та інтегрований результат вирішення завдання prb^u можуть бути представлені природною мовою. Воно однозначне, оскільки кожному експерту призначається конкретний координуючий вплив e_q^a і тому відповідність ψ_5 однозначно визначає лише один вектор $e \in E$. Воно сюр'єктивно, тому що кожному вектору $e \in E$ відповідає хоча б один елемент $\{sol_l^u\} \otimes B_{ext}$ і не ін'юктивно, тому що не кожному елементу $\{sol_l^u\} \otimes B_{ext}$ відповідає вектору $e \in E$.

Аналіз даної моделі ІСППР з координацією дозволяє зробити такий висновок. При вирішення складного завдання запропонована ІСППР, на відміну традиційних, навіть за неправильно розпочатому експертами в процесі вирішення часткових завдань prb^h з допомогою самоорганізації, вираженої в координації вирішення часткових завдань ОПР, прагнучиме ідеальному процесу вирішення складного завдання, що підвищує ефективність знаходження прийняттого результату вирішення складного завдання prb^u . При цьому помилки вирішення складного завдання будуть виявлені та виправлені до отримання результату вирішення складного завдання prb^u . Раніше для цього було потрібне її повторне рішення.

8.2.2 Математична модель функціональної гібридної ІСППР з координацією

У [182] наведена наступна концептуальна модель ІСППР, з використанням автоматного підходу [184-186], призначеної для вирішення складного завдання prb^u :

$$\begin{aligned} res_A^u &= R_1^{res\ met} (res_A^u, met^u) \circ R_1^{res\ pr} (res_A^u, pr^{ui}) \circ R_1^{res\ pr} (res_A^u, pr^{uo}) \circ \\ &\circ R_1^{res\ st} (res_A^u, st^u) \circ R_1^{st\ st} (st^u(t), st^u(t+1)) \circ R_1^{pr\ st} (pr^{ui}(t), st^u(t+1)) \circ \\ &\circ R_1^{st\ pr} (st^{up}(t), pr^{uo}(t)) \circ R_1^{res\ res} (RES^e, RES^e) \circ R_1^{pr\ pr} (pr^{ui}, PR^{ei}) \circ \\ &\circ R_2^{pr\ st} (PR^{eo}, pr^{uo}), \end{aligned} \quad (9)$$

де t – модельний час, $t \in \square$; $\circ$ – знак конкатенації; res_A^u – агрегат-ІСППР як ресурс вирішення неоднорідного завдання; met^u – інтегрований метод вирішення неоднорідного завдання; pr^{ui} – вихідні дані DAT^u [182] вирішення складного завдання prb^u , що передаються на вхід одного або декількох елементів res^e , побудованих за схемою (9) відповідно до декомпозиції prb^u завдання prb^u ; pr^{uo} – вихід одного або декількох елементів res^e , побудованих за схемою (9) відповідно до prb^u , що є метою GL^u вирішення завдання prb^u ; $st^u(t)$ – стан ІСППР в момент часу t ; RES^e – непорожня множина, складена з елементів res^e , побудованих відповідно до схеми (9); PR^{ei} , PR^{eo} – множина властивостей «вхід» та «вихід» елементів із RES^e відповідно; $R_1^{st\ st}$, $R_1^{pr\ st}$, $R_1^{st\ pr}$ – відносини функціонування ІСППР; $R_1^{res\ res}$ – відносини інтеграції [182] елементів; $R_1^{pr\ pr}$ – відносини між входами ІСППР та входами елементів; $R_2^{pr\ pr}$ – відносини між виходами елементів та виходами ІСППР. Елемент res^e моделює рішення однорідного часткового завдання або виконує допоміжні операції, будується відповідно до автономного методу met^e і має властивості $PR^e \subseteq PR$, найбільш важливі з яких – «вхід» pr^{ei} , «вихід» pr^{eo} і «стан» st^e .

Концептуальна модель елемента ІСППР:

$$\begin{aligned} res^e = & R_1^{res\ met}(res^e, met^e) \circ R_1^{res\ pr}(res^e, pr^{ei}) \circ R_1^{res\ pr}(res^e, pr^{eo}) \circ \\ & \circ R_1^{res\ st}(res^e, st^e) \circ R_1^{st\ st}(st^e(t), st^e(t+1)) \circ R_1^{pr\ st}(pr^{ei}(t), st^e(t+1)) \circ \\ & \circ R_1^{st\ pr}(st^e(t), pr^{eo}(t)) \end{aligned} \quad (10)$$

де $R_1^{st\ st}$, $R_1^{pr\ st}$, $R_1^{st\ pr}$ – відносини «стан - стан», «вхід - стан», «стан - вихід», відповідно. Серед множини $MET^e = \{met_y^e \mid y = 1, \dots, N_{met}\}$ автономних методів виділятимемо met_1^e – аналітичні обчислення, met_2^e – нейрообчислення, met_3^e – нечіткі обчислення, met_4^e – міркування з урахуванням досвіду; met_5^e – еволюційні обчислення, met_6^e – статистичні обчислення, met_7^e – логічні міркування. Якщо між елементом res^e і автономним методом met_y^e встановлено відношення $R_1^{res\ met}(res^e, met_y^e)$, будемо позначати елемент $res^{e\ y}$. Відносини $R_1^{pr\ pr}$, $R_2^{pr\ pr}$ (10)

задаються на множинах змінних DAT^u , GL^u і множинах змінних DAT^h , GL^h часткових завдань, що входять до складу складного завдання.

У [182] наводиться три можливі випадки:

- 1) множина змінних для prb^u збігається з множиною змінних для prb^h , тобто $DAT^u = DAT^h$, $GL^u = GL^h$;
- 2) множина змінних для prb^h – підмножина відповідної множини prb^u , тобто $DAT^h \subset DAT^u$, $GL^h \subset GL^u$;
- 3) множина змінних підмножини відповідної множини prb^h , тобто $DAT^u \subset DAT^h$, $GL^u \subset GL^h$.

Оскільки для моделювання використано автоматичний підхід, стан автомата впливає лише вхідний сигнал. Вихідний сигнал залежить від стану автомата у попередній момент автоматного часу та вхідного сигналу.

Розширення моделі (9), (10) виконано виходячи з наступних міркувань. У процесі координації контролюються проміжні стани рішення часткових завдань [190]. У прийнятих позначеннях (9), (10) під цими станами розуміються стани (результати вирішення) функціональних елементів res^e , що імітують рішення часткових завдань prb^h . З аналізу цих станів у ході координації змінюються властивості «вхід» pr^{ei} одного чи кількох елементів res^e . Для врахування цього факту введемо в концептуальну модель ІСППР (9), (10) трійку $R_1^{st\ pr}(st^u(t), pr^{ui}(t+1))$. Іншими словами, на підставі стану ІСППР $st^u(t)$ в момент часу t змінюються вихідні дані $pr^{ui}(t+1)$ для ІСППР, але вже в момент часу $t+1$, тобто для наступної ітерації. Багато $R_1^{st\ pr}$ встановлює відносини між станом $st^u(t)$ гібриду res_A^u (9) на даний момент модельного часу t і станом входів одного або декількох елементів res^e на наступному кроці. Щоб зробити необхідну зміну входів pr^{ei} одного або кількох функціональних елементів res^e в (10) введемо трійку $R_1^{st\ act}(st^u, act^{ek})$, де $ACT^{ek} = \{act_1^{ek\ \alpha}, \dots, act_{N_{pr}}^{ek\ \alpha}\}$ – множина понять, що позначають координуючі дії, яке тотожно множині координуючих дій E , де α – тип координуючого впливу, $\alpha = 1, \dots, 6$.

Модифікована концептуальна модель для ІСППР з координацією:

$$res_A^u = res_A^u \circ R_1^{st\ pr} (st^u(t), pr^{ui}(t+1)), \quad (11)$$

а модифікована модель елемента ІСППР:

$$res^e = res^e \circ R_1^{st\ act} (st^u, act^{ek}) \quad (12)$$

Відносини $R_1^{st\ pr}$ і $R_1^{st\ act}$ не задаються заздалегідь, як і $R_1^{st\ st}$, $R_1^{pr\ st}$, $R_1^{st\ pr}$ фіксуються в ході роботи ІСППР і є результатом рішення k -завдання prb^k .

Розглянемо приклад ІСППР з трьох елементів $res_1^{e\ 1}$, $res_2^{e\ 6}$, $res_3^{e\ 7}$ для вирішення часткових завдань, які будемо називати функціональними [182], і одного координуючого (технологічного) елемента $res_k^{e\ 7}$ для вирішення k -завдання, що визначає порядок взаємодії функціональних елементів. На вхід ІСППР подаються вихідні дані DAT^u , розділені між функціональними елементами згідно з декомпозицією $prb^u \in PRB^u$ вирішення складного завдання prb^u . На виході маємо результати роботи функціональних елементів $res_1^{e\ 1}$, $res_2^{e\ 6}$, $res_3^{e\ 7}$, інтегрованих у загальне рішення SOL^u складного завдання prb^u .

У кожен момент часу t_l фіксується (опитується) стану всіх $res_q^{e\ y}$. Після цього $res_k^{e\ 7}$ на підставі стану $st^u(t_l)$ ІСППР видає координуючу дію $act_q^{ek\ \alpha} \in ACT^{ek}$ для кожного елемента $res_q^{e\ y}$. У процесі обробки технологічним елементом $res_k^{e\ 7}$ стану $st^u(t_l)$ ІСППР, тобто рішення k -завдання prb^k змінюється стан $st^{e\ k}$ технологічного елемента $res_k^{e\ 7}$. Причому час τ' , що відводиться на таку обробку, не повинен перевищувати періоду, через який проводиться фіксація стану ІСППР:

$$\tau' \leq T / N_{sol}, \quad (13)$$

де T – час, відведений на вирішення складного завдання prb^u ; N_{sol} – загальна кількість етапів. Переходи між станами функціональних елементів ІСППР відбуваються стрибкоподібно, оскільки між моментами часу t_l цей стан $res_q^{e\ y}$ не змінюється. Нижче представлена концептуальна модель роботи ІСППР, побудованої за (12), (13):

$$\begin{aligned}
 st^{e\ k}(t_0') &\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_0) \\ st^{e\ 2}(t_0) \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_1) \\ st^{e\ 2}(t_1) \end{matrix} \right\} \Rightarrow st^{e\ k}(t_0') \rightarrow st^{e\ k}(t_1') \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_1) \\ st^{e\ 2}(t_1) \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_2) \\ st^{e\ 2}(t_2) \end{matrix} \right\} \Rightarrow st^{e\ k}(t_1') \rightarrow st^{e\ k}(t_2') \Rightarrow \dots \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_{p-1}) \\ st^{e\ 2}(t_{p-1}) \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t_p) \\ st^{e\ 2}(t_p) \end{matrix} \right\} \Rightarrow st^{e\ k}(t_{p-1}') \rightarrow st^{e\ k}(t_p'),
 \end{aligned} \tag{14}$$

де « $\Rightarrow$ » позначають відносини $R^{st\ st}$, які пов'язують стани з різних підпросторів і задають перехід з одного однорідного простору в інші при функціонуванні ІСППР; « $\rightarrow$ » – перехід між станами всередині відповідного підпростору. Переходи « $\Rightarrow$ » з підпростору технологічного елемента $res_q^{e\ 7}$ моделюють видачу координуючих дій від ОПР до експертів. А сукупність переходів « $\Rightarrow$ » та « $\rightarrow$ » дозволяє змодельовати та простежити процес самоорганізації у процесі роботи ІСППР. У (14) фігурні дужки позначають початок та завершення паралельної роботи функціональних елементів. З моделі видно, що після кожної фіксації « $\} \Rightarrow$ » станів, функціональних елементів $res_q^{e\ y}$ відбувається передача управління технологічному елементу $res_q^{e\ 7}$, а після зміни ним свого стану відбувається передача управління групі функціональних елементів ІСППР. Ця модель споріднена з концептуальною моделлю [182]:

$$\left\{ \begin{matrix} st^{e\ 1}(t) \rightarrow st^{e\ 1}(t+1) \rightarrow \dots \rightarrow st^{e\ 1}(t+n) \\ st^{e\ 2}(t) \rightarrow st^{e\ 2}(t+1) \rightarrow \dots \rightarrow st^{e\ 2}(t+n) \end{matrix} \right\}. \tag{15}$$

В основі моделі (14) покладена ідея про те, що те саме однорідне завдання може вирішуватися паралельно різними функціональними елементами ІСППР. Відносини інтеграції елементів виникають як внутрішні невербальні образи в пам'яті користувача, який може порівнювати динаміку моделювання складного завдання з різних точок зору, що дозволяє побачити те, чого не дає моделювання з використанням однієї моделі. У моделі (13) розвинене інше припущення: включення до математичної моделі ІСППР моделі ОПР призводить до виникнення ефекту самоорганізації.

У цьому з'являється можливість взаємопов'язати результати роботи окремих функціональних елементів ІСППР у процесі синтезу вирішення складного

завдання, а чи не після, як у відомих моделях, що забезпечує релевантність ІСППР реальному процесу колективного засудження проблем.

8.2.3 Математичні моделі узгодженості в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень

8.2.3.1 Концептуальна модель узгодженості в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень

Під узгодженістю розуміється ступінь подібності цілей учасників ІСППР. Згідно [190], мета – стан речей, якого прагне досягти ОПР, що має для нього певну суб’єктивну цінність. У [180] мета – ідеальне передбачання результату діяльності, що виступає її регулятором, а в [184] – ситуація чи область ситуацій, яка має бути досягнута при функціонуванні системи за певний час. Узагальнюючи ці визначення, виділимо основні характеристики мети: представляє стан об’єкта управління, регулятор діяльності, має темпоральний характер (функція часу) та суб’єктивно корисна для ОПР. Схема концептуальних моделей мети може бути записана у вигляді:

$$\begin{aligned} pr^{gsu} &= R^{res\ st} (res^{ou}, st^{pou}) \circ R^{res\ pr} (res^{su}, pr^{csu}) \circ R^{res\ act} (res^{ou}, act^{dsu}), \\ act^{dsu} &= R^{act\ act} (ACT^{su}, ACT^{su}) \circ R^{act\ pr} (ACT^{su}, PR^t), \end{aligned} \quad (16)$$

де $R^{res\ st}$ – відносини «ресурс–стан», що ставлять у відповідність об’єкту управління його стан; $R^{res\ pr}$ – відносини «ресурс–властивість», що визначають суб’єктивну корисність стану об’єкта управління для експерта (суб’єкта управління); $R^{pr\ act}$ – відносини «властивість–дія», що ставлять у відповідність цільовому стану послідовність дій act^{dsu} ; ACT^{su} – множина можливих дій експерта; $R^{act\ act}$ – відносини «дія – дія», що визначають порядок дій $act^{dsu} \in ACT^{su}$ у послідовності act^{dsu} ; $R^{act\ pr}$ – відносини «дія – властивість» між діями з ACT^{su} та часом їх виконання PR^t . Стан st^{pou} об’єкта управління res^{ou} визначається значеннями властивостей останнього:

$$st^{pou} = R^{res\ pr} (res^{ou}, PR^{ou}) \circ R^{pr\ val} (PR^{ou}, VAL^{ou}),$$

де $R^{res\ pr}$ – відносини «ресурс – властивість», що задають множина властивостей об'єкту управління, а $R^{pr\ val}$ – відносини «властивість – значення», кожному з властивостей об'єкту управління ставлять у відповідність множина значень. Однією з властивостей у множині PR^{ou} може бути час, пов'язаний із функціонуванням об'єкту управління. При цьому мета експерта також стає динамічною та змінюється у часі.

Якщо властивості представлені різними змінними (наприклад, стохастичною та нечіткою лінгвістичною), оброблюваними різними методами, вибрати одне з рішень буде важко. Однак якщо властивості представлені змінними одного типу, можна задати метрику в двовимірному просторі векторів, що представляють допустимі стани об'єкта управління, і визначити відстань між st_1^{pou} і st_2^{pou} , а також st_2^{pou} і st^{pou} , після чого порівняти їх між собою. Щоб уникнути подібних ситуацій, виберемо один метод представлення всіх властивостей, що визначають стан об'єкта управління, а отже, і використовуваних при описі цілей ОПР та експертів. Аналіз показав, що цьому релевантний апарат теорії нечітких множин [187].

Функція приналежності $\mu^{gsu}(st^{pou})$ приймає значення на множині дійсних чисел в інтервалі [177, с. 1]. При цьому чим більше її значення, тим ближче стан об'єкта управління st^{pou} до мети експерта pr^{gsu} . Стан st^{pou} об'єкта управління описується набором його властивостей $PR^{ou} = \{pr_1^{ou}, \dots, pr_{N_{pr}^{ou}}^{ou}\}$, представлених змінними одного з перерахованих у [182] класів, тобто:

$$\mu^{gsu}(st^{pou}) = \mu^{gsu}(pr_1^{ou}, \dots, pr_{N_{pr}^{ou}}^{ou}) \quad (17)$$

Значення функції належності визначається підстановкою в (17) значень з множини VAL^{ou} властивостей об'єкту управління цього стану, тобто описується виразом $\mu^{gsu}(val_1^{ou}, \dots, val_{N_{val}^{ou}}^{ou})$. Нечітка мета експерта може бути представлена одним із розглянутих у [184] методів побудови функцій належності нечітких множин. Вибір способу – за розробником ІСППР. Нижче для запису причинно-

наслідкових зв'язків між цілями та відносинами взаємодії експертів використовуються прямі методи [184] побудови нечіткої мети. Коли цілі експертів формалізовані, може бути виконано їхнє попарне порівняння та визначено ступінь близькості. Один із варіантів визначення ступеня близькості цілей експертів – розрахунок відстані Евкліда або Хеммінга між нечіткими множинами [181, 182]. Однак їх застосування до визначення ступеня подібності цілей експертів проблематичне: вони обчислюються лише за умови збіжності рядів або інтегралів, що використовуються в них. Інакше при $val_{\min}^{ou} = -\infty$ або $val_{\max}^{ou} = \infty$, де $val_{\min}^{ou}$ і $val_{\max}^{ou}$ – мінімальне та максимальне значення властивості pr^{ou} , що описує стан st^{pou} , відстань буде рівна нескінченності, навіть якщо одна множина включає інше. У цьому пропонується міра подібності нечітких цілей [183, 187, 189]:

$$s(A, B) = 0,5 \cdot \left(\frac{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_{A \cap B}^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})}{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_A^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})} + \frac{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_{A \cap B}^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})}{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_B^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})} \right). \quad (18)$$

Аналіз показує, що, на відміну від відстані Евкліда або Хеммінга, співвідношення (19) слід вважати мірою подібності нечітких множин, а не відстанню між ними, оскільки воно не задовольняє деяким з умов (а саме (18) і (18)), що пред'являються до функції відстані в математиці:

$$d(X, Y) \geq 0$$

$$d(X, Y) = d(Y, X)$$

$$d(X, Z) \leq d(X, Y) + d(Y, Z) \quad (19)$$

$$d(X, X) = 0. \quad (20)$$

Після визначення міри подібності цілей експертів можна визначити тип відносин з поміж них за рівнем узгодженості. Представимо його як нечітких множин на універсумі значень міри подібності цілей s (на множині дійсних чисел в інтервалі [177, с.1]). В роботі виділено три типи відносин за ступенем

узгодженості: конкуренція, нейтралітет та співробітництво. Що значення міри подібності цілей експертів (18), то тісніше взаємодія з-поміж них.

Таким чином, функція належності нечіткої множини «співпраця» повинна набувати максимального значення при $s=1$, а функція належності нечіткої множини «конкуренція» – при $s=0$. Максимум функції належності нечіткої множини «нейтралітет» має бути рівновіддалений від цих максимумів, тобто перебувати у точці $s=0,5$. Функції належності нечітких множин відносин конкуренції $\mu_{\text{конкуренція}}(s) =$, нейтралітету $\mu_{\text{нейтралітет}}(s) = \left(1 + (6 \cdot (s - 0,5))^8\right)^{-1}$ та співпраці $\mu_{\text{співпраця}}(s) = \left(1 + (6 \cdot (s - 0,5))^8\right)^{-1}$.

Представимо відношення між учасниками ІСППР за ступенем узгодженості лінгвістичної змінної cl – «тип відносини»:

$$cl = \langle \beta^{cl}, T^{cl}, U^{cl}, G^{cl}, M^{cl} \rangle, \quad (21)$$

де β^{cl} = «тип відносин» – найменування лінгвістичної змінної; $T^{cl} = \{\text{«конкуренція»}; \text{«нейтралітет»}; \text{«співпраця»}\}$ – множина імен лінгвістичних значень змінної (терм множина), що становлять найменування нечіткої змінної; $U^{cl} = [0;1]$ – область визначення (універсум) нечітких змінних, що входять до визначення лінгвістичної змінної; $G^{cl} = \emptyset$ – синтаксична процедура, що описує процес утворення з елементів множини T нових термів; $M^{cl} = \{\mu_{\text{конкуренція}}(s), \mu_{\text{нейтралітет}}(s), \mu_{\text{співпраця}}(s)\}$ – семантична процедура, що ставить у відповідність кожному терму множини T і термам, утвореним процедурою G , нечітка множина [183, 187, 189].

Значення лінгвістичної змінної cl (тип відносин) – терм із максимальним значенням функції власності. Для її обчислення потрібно визначити значення функції належності до кожної нечіткої множини, що становить відносини, і порівняти їх між собою. Нечітка множина з максимальним значенням функції власності відповідає типу відносин, встановленому між парою експертів. Можна визначити відображення «класифікатор відносин»

$rcl : (prt_i, prt_j) \rightarrow T^{cl}, ag_i, ag_j \in AG^*, i \neq j$, який кожній парі учасників ІСППР (prt_i, prt_j) ставить у відповідність один з термів t_k^{cl} , лінгвістичної змінної cl , тобто тип відношення. Відображення rcl визначається так:

$$rcl : (prt_i, prt_j) = \arg \max_{t_k^{cl} \in T^{cl}} \left(\mu_{t_k^{cl}} \left(s \left(pr_p^{gsu}, pr_q^{gsu} \right) \right) \right), \quad (22)$$

причому $r_1^{res\ pr} (prt_i, pr_p^{gsu}), r_1^{res\ pr} (prt_j, pr_q^{gsu}), i \neq j..$

Багато значень цього відображення формує матрицю **RCL** класифікації відносин між учасниками ІСППР. Рядки та стовпці матриці позначають учасників, а елементи $rcl_{ij} = rcl(prt_i, prt_j)$ – клас відносин між ними. Ця матриця використовується для ідентифікації ситуації колективного вирішення складного завдання.

Залежно від присутніх у ІСППР класів відносин виділимо три ситуації колективного рішення (мікрорівневої моделі ІСППР) завдання:

- 1) ситуація співпраці dss_{coop} , коли ІСППР складається із співробітників та нейтральних учасників і де немає відносин конкуренції;
- 2) ситуація нейтралітету dss_{neut} коли всі відносини в ІСППР нейтральні;
- 3) ситуація конкуренції dss_{comp} , коли в ІСППР є хоча б одна пара експертів із ставленням конкуренції.

У таких ІСППР можуть бути також нейтральні та співпраця учасників. За наявності учасників співробітництва вони розглядаються як єдиний уявний учасник; тоді всі учасники лише конкуруючі чи нейтральні.

Таким чином, процес самоорганізації на основі аналізу цілей можна розділити на дві частини: ідентифікація поточної ситуації колективного рішення (мікрорівневої моделі ІСППР) та вибір із множини можливих бажаної ситуації колективного рішення релевантною умовам поставленого завдання. З урахуванням цього, модель самоорганізації можна переписати так:

$$\begin{aligned} so^{goa} &= r_2^{res\ act} (dss, ACT^{sen}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{sen}, env) \circ R_1^{res\ res} (DSS, DSS) \circ \\ &\circ r_3^{res\ res} (dss, prt^{dm}) \circ r_2^{res\ act} (prt^{dm}, act_{ia}) \circ r_1^{act\ res} (act_{ia}, dss_{cur}) \circ \\ &\circ r_2^{res\ act} (prt^{dm}, act_{ac}) \circ r_1^{act\ res} (act_{ac}, DSS) \circ r_2^{act\ res} (act_{ac}, dss_{des}), \end{aligned} \quad (23)$$

де act_{ia} – дія ОПР «ідентифікація поточної ситуації колективного рішення»; act_{ac} – дія ОПР «вибір бажаної ситуації колективного рішення з множини можливих»; dss_{cur} – поточна ситуація колективного рішення (мікрорівнева модель ІСППР); dss_{des} – бажана ОПР ситуація колективного рішення з погляду параметрів завдання та її знань про ефективність тієї чи ситуації з множини DSS можливих у ІСППР; $r_2^{res\ act}$ – відношення «виконувати», що пов'язує суб'єкт та дію, яку він виконує; $r_1^{act\ res}$ – відношення «мати об'єктом», що зв'язує дію та її ресурс; $r_2^{act\ res}$ – відношення «мати результатом», що зв'язує дію та результат її виконання.

Перший етап ідентифікації act_{ia} (23) ситуації колективного рішення – *формалізація цілей експертів з урахуванням визначення нечіткої мети* (18).

Після того, як визначено нечіткі цілі всіх експертів, виконується наступний етап ідентифікації act_{ia} (23) ситуації колективного рішення – *попарне порівняння цілей та визначення їхнього ступеня узгодженості з використанням міри* (18). Далі визначається тип відносин між експертами за ступенем узгодженості з використанням лінгвістичної змінної cl «тип відносини» (23).

Завершальний етап ідентифікації act_{ia} (23) ситуації колективного рішення – *розпізнавання ситуації колективного рішення з використанням матриці CL'* . Залежно від присутніх у матриці CL' класів відносин виділяється три ситуації колективного вирішення завдання: співпраці dss_{coop} , нейтралітету dss_{neut} та конкуренції dss_{comp} . Після ідентифікації поточної ситуації колективного рішення ОПР вибирає act_{ac} (23) з множини можливих ситуацій колективного рішення, що відповідає умовам поставленого завдання. Залежно від параметрів завдання та своїх знань про ефективність тієї чи іншої ситуації колективного рішення ОПР може прагнути встановити одну з них, щоб підвищити ефективність роботи ІСППР, або намагатися змінити її, якщо обговорення заходить у глухий кут.

8.2.3.2 Модель гібридної інтелектуальної багатоагентної ІСППР із самоорганізацією на основі аналізу узгодженості цілей агентів

Під самоорганізацією ІСППР розуміється процес зміни архітектури ІСППР агентом, що імітує ОПР та входить до її складу, на основі аналізу взаємодії інших агентів з метою підвищення якості рішень. Модель гібридної інтелектуальної багатоагентної ІСППР із самоорганізацією на основі аналізу узгодженості цілей агентів описується наступним чином:

$$himas = (AG^*, env, INT^*, ORG, \{so, sl\}), \quad (24)$$

$$AG^* = \{ag_1, \dots, ag_n, ag^{dm}\}, \quad (25)$$

$$INT^* = \{prot, lang, ont, rcl\}, \quad (26)$$

$$ORG = ORG_{coop} \cup ORG_{neut} \cup ORG_{comp}, \quad ORG_{coop} \cap ORG_{neut} = \emptyset, \quad (27)$$

$$ORG_{coop} \cap ORG_{comp} = \emptyset, \quad ORG_{comp} \cap ORG_{neut} = \emptyset,$$

$$act_{himas} = \left(\bigcup_{ag \in AG^*} act_{ag} \right) \cup act_{ia} \cup act_{ac} \cup act_{col}, \quad (28)$$

$$act_{ag} = (MET_{ag}, IT_{ag}), ag \in AG^*, \left| \bigcup_{ag \in AG^*} IT_{ag} \right| \geq 2, \quad (29)$$

$$ag = ag \vee himas, \quad (30)$$

де AG^* – множина агентів ІСППР, включаючи агента, що приймає рішення ag_{dm} ; n – число агентів-експертів у ІСППР; env – середовище, в якому знаходиться ІСППР; INT^* – множина елементів для структурування взаємодій між агентами; ORG – множина базових організаційних структур ІСППР, що відповідають конкретним функціям (ролям) агентів і встановилися відносинам між ними, що включає підмножини; ORG_{coop} , ORG_{neut} , ORG_{comp} – множина архітектур з співпрацюючими, нейтральними та конкуруючими агентами, відповідно; $prot$ – протокол взаємодії агентів, що визначає формат повідомлень, якими обмінюються агенти; $lang$ – мова обміну повідомленнями, що визначає лексику і синтаксис повідомлень, що передаються; ont – модель предметної області, на основі якої визначається семантика повідомлень, що передаються агентами; rcl

– класифікатор відносин між агентами ІСППР; act_{himas} – функція ІСППР в цілому; act_{ag} – функція агента $ag \in AG^*$; act_{ia} – функція «аналіз взаємодій»; act_{ac} – функція «вибір архітектури»; MET_{ag} – множина методів вирішення завдання, які реалізує агент $ag \in AG^*$; IT_{ag} – множина інтелектуальних технологій, ІСППР [183], у межах яких реалізовано множина методів MET_{ag} .

Як було зазначено, з множини агентів ІСППР (24) виділяється один агент, який приймає рішення. Цей агент, крім іншого, організує взаємодії агентів у ІСППР, використовуючи дві функції (25):

- 1) act_{ia} – функцію «аналіз взаємодій»;
- 2) act_{ac} – функцію «вибір архітектури».

Функція аналіз взаємодії act_{ia} застосовується для моніторингу взаємодії агентів та ідентифікації архітектури ІСППР на основі аналізу узгодженості цілей агентів. За його результатами ОПР за допомогою функції «вибір архітектури» act_{ac} може встановити необхідність заміни типу відносин агентів та коригування їх цілей. Для цього ОПР повинен мати базу знань, що використовується функцією «вибір архітектури» act_{ac} і відображає залежність ефективності роботи ІСППР від узгодженості цілей агентів.

Зміна архітектури означає, що з деякого моменту ІСППР змінює алгоритм функціонування, виявляючи властивість самоорганізації і переходить на базову архітектуру іншого типу. Алгоритми цих функцій будуть детально розглянуті нижче. Багато INT^* доповнено ще одним елементом структурування взаємодій між агентами – класифікатором відносин rcl . Він аналізує нечіткі цілі pr^{gsu} агентів та оцінює ступінь їх узгодженості за допомогою міри $s(A,B)$ (18). Далі, використовуючи відображення (22), будує матрицю **RCL**, відносячи взаємини між агентами до одного з типів: конкуренція, нейтралітет та співробітництво. За цією матрицею визначається узгодженість агентів ІСППР та клас її базової архітектури. Множина базових архітектур ІСППР ORG ділиться за ступенем узгодженості на три попарно непересічні множини (27):

1) архітектура ІСППР із співпрацюючими агентами, яка складається лише з співпрацюючих та нейтральних агентів, і повністю відсутні відносини конкуренції ($ORG_{coop} \subseteq ORG$);

2) архітектура ІСППР з нейтральними агентами, де присутні лише нейтральні відносини ($ORG_{neut} \subseteq ORG$);

3) архітектура ІСППР з конкуруючими агентами, в якій є хоча б одна пара агентів із ставленням конкуренції.

У таких архітектурах ІСППР можуть бути також нейтральні та співпрацюючі агенти; за наявності співпраці агентів вони розглядаються як єдиний «суперагент», і тоді всі агенти стають тільки конкуруючими або нейтральними ($ORG_{comp} \subseteq ORG$).

У процесі роботи ІСППР може переходити від однієї базової архітектури до іншої, з метою підвищення якості рішень за рахунок встановлення між агентами відносин, релевантних умов вирішуваного завдання. Критерії якості рішення задаються розробником ІСППР на етапі її створення або її користувачем у процесі функціонування. Це, проте, значить поява зовнішнього джерела управління. Архітектура ІСППР із самоорганізацією може і повинна змінюватися, навіть якщо критерій якості залишається незмінним.

Відповідно (29) кожна функція агента представляється двокомпонентним кортежем (MET_{ag}, IT_{ag}). Як наслідок (29), у ІСППР має використовуватися не менше двох інтелектуальних технологій, щоб вона могла вважатися ІСППР та бути релевантною складним у моделюванні завдань. Крім того, (28) виділяються дві функції ОПР для управління взаємодією агентів ІСППР: act_{ia} – функція «аналіз взаємодій» і act_{ac} – функція «вибір архітектури». Розглянемо алгоритми цих функцій. Вихідна інформація функції «аналіз взаємодій» – мети агентів pr^{gsu} , де результат – тип базової архітектури ІСППР org за рівнем узгодженості взаємодії агентів як рядка тексту, тобто віднесення поточної архітектури ІСППР $org_i, i=1, \dots, N$, до одного з множин ORG_{coop} , ORG_{neut} або ORG_{comp} , а N – число базових архітектур ІСППР (кількість елементів множини ORG в (27)). В

результаті виконання функції «аналіз взаємодій» ідентифікується базова архітектура ІСППР, що дозволяє ОПР, за допомогою функції «вибір архітектури» f_{ac} визначити необхідність (або відсутність такої) її модифікації для покращення якості рішень. Таким чином, змінюється архітектура ІСППР на одну з множини ORG (29) і відбувається самоорганізація системи.

Після визначення типу архітектури ІСППР агент, який приймає рішення, за допомогою функції «вибір архітектури» act_{ac} може встановити необхідність заміни одного типу відносин агентів на інший та коригування їх цілей. Однак, очевидно, що для ухвалення рішення про заміну однієї архітектури ІСППР на іншу відомостей лише про поточний тип архітектури ІСППР недостатньо. Для такого рішення ОПР необхідна база знань у тому, який із типів архітектур ІСППР ефективніше у тих чи інших умовах, у тому чи іншого класу завдань.

В результаті аналізу методів побудови баз знань для реалізації функції «вибір архітектури» act_{ac} було обрано системи нечіткого висновку.

Вихідні дані функції «вибір архітектури» act_{ac} – умови завдання, що розв'язується. Результат – значення ступеня впевненості [194] у виборі кожної архітектури ІСППР, а також коригування бази знань ОПР. Модель нечіткого виведення АПР mod_{ac} можна сформулювати так:

$$mod_{ac} = \langle RUL, X, Y, F^{\mu}, F^{\gamma}, F^{sl}, I^{fsl} \rangle, \quad (31)$$

де RUL – база знань, як множина символічних правил rul_k , $k=1, \dots, N_{RUL}$, що використовують як посилки та висновки нечіткі множини A_i^k , B_j^k , відповідно, причому такі, що $A_i^k \subseteq X_i$, $B_j^k \subseteq Y_j$, $i=1, \dots, n$, $j=1, \dots, m$; X , Y – множина вхідних та вихідних лінгвістичних змінних відповідно; $F^{\mu} = F_X^{\mu} \cup F_Y^{\mu}$ – множина функцій належності нечітких змінних вхідних та вихідних лінгвістичних змінних відповідно; F^{γ} – множина функцій дефазифікації; F^{sl} – множина функцій коригування параметрів функцій належності нечітких змінних із множини F^{μ} .

Інтерпретатор I^{fsl} визначається таким чином:

$$I^{fsl} = \{I^{fsl1}, I^{fsl2}, I^{fsl3}, I^{fsl4}, I^{fsl5}, I^{fsl6}, I^{fsl7}, I^{fsl8}, I^{fsl9}\},$$

де $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl5}$ – процеси стандартної системи нечіткого виведення Мамдані [182]: I^{fsl1} – фазифікація, I^{fsl2} – агрегування, I^{fsl3} – активація, I^{fsl4} – акумуляція, I^{fsl5} – дефазифікації; I^{fsl6} – вибір архітектури; I^{fsl7} – рішення ІСППР; I^{fsl8} – Визначення помилки; I^{fsl9} – навчання. Процеси $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl9}$ виконуються ітераційно:

$$I^{fsl1} \rightarrow I^{fsl2} \rightarrow I^{fsl3} \rightarrow I^{fsl4} \rightarrow I^{fsl5} \rightarrow I^{fsl6} \rightarrow I^{fsl7} \rightarrow I^{fsl8} \rightarrow I^{fsl9}. \quad (32)$$

Модель (31) – система нечіткого виведення Мамдані із самонавчанням. Процеси самонавчання $I^{fsl6}, \dots, I^{fsl9}$ дозволяють системі модифікувати знання предметної області, щоб, по-перше, скоригувати можливі помилки розробника щодо їх визначенні, а, по-друге, автоматично підтримувати базу знань у актуальному стані з часом і зміною умов завдання.

Крім того, завдяки застосуванню нечіткого виведення Мамдані зберігається прозорість бази знань для інтерпретації людиною на відміну від систем нечіткого виводу Такагі-Сугено або нейронечітких гібридів: ANFIS, GARIC, вентес змінні. Це узгоджується з підходом [178, 179], однак, у запропонованій системі навчання йде за алгоритмом зворотного розповсюдження помилки. Розглянемо зміст процесів $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl9}$ (32).

Нечіткий висновок $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl5}$ виконується з використанням системи Мамдані [178]. На її вхід подаються відомості (розмірність) про завдання, що вирішується у вигляді детермінованої змінної. Результат роботи системи – значення ступенів впевненості у виборі архітектури ІСППР у вигляді детермінованих змінних. У правилах нечіткої бази знань вхідна лінгвістична змінна – «розмірність ІСППР» sz , а вихідні – «ступінь впевненості у виборі ІСППР з співпрацюючими агентами» pcp , «ступінь впевненості у виборі ІСППР з нейтральними агентами» pnt і «ступінь впевненості у виборі ІСППР з конкуруючими агентами» pcn .

Визначимо лінгвістичну змінну sz «розмірність ІСППР»:

$$sz = \langle \rho^{sz}, T^{sz}, U^{sz}, G^{sz}, M^{sz} \rangle,$$

де β^{sz} = «розмірність ІСППР» – найменування лінгвістичної змінної; $T^{sz} = \{\text{«мала»}; \text{«середня»}; \text{«велика»}\}$ – множина її значень (терм-множина), найменувань нечіткої змінної; $U^{sz} = [3; 100]$ – область визначення (універсум) нечітких змінних, що входять у визначення лінгвістичної змінної; $G^{sz} = \emptyset$ – синтаксична процедура, що описує процес утворення з елементів множини T^{sz} нових термів; $M^{sz} = \{\mu_{\text{мала}}^{sz}(u^{sz}), \mu_{\text{середня}}^{sz}(u^{sz}), \mu_{\text{велика}}^{sz}(u^{sz})\}$ – семантична процедура, що ставить у відповідність кожному терму множини T^{sz} , а також кожному новому терму, утвореному процедурою G^{sz} , осмислений зміст за допомогою формування відповідної нечіткої множини.

Функції належності нечітких множин з M^{sz} описуються виразами:

$$\mu_{\text{мала}}^{sz}(u^{sz}) = \left(1 + e^{-a_{sz1}(u_{sz} - c_{sz1})}\right)^{-1}, \text{ де } a_{sz1} = -0,375, c_{sz1} = 15,$$

$$\mu_{\text{середня}}^{sz}(u^{sz}) = e^{-\frac{(u_{sz} - c_{sz2})^2}{2\sigma_{sz2}^2}}, \text{ де } \sigma_{sz2} = 10, c_{sz2} = 30,$$

$$\mu_{\text{велика}}^{sz}(u^{sz}) = \left(1 + e^{-a_{sz3}(u_{sz} - c_{sz3})}\right)^{-1}, \text{ де } a_{sz3} = 0,375, c_{sz3} = 45,$$

де значення параметрів $a_{sz1}, c_{sz1}, \sigma_{sz2}, c_{sz2}, a_{sz3}, c_{sz3}$ задані приблизно і мають бути скориговані в ході самонавчання системи нечіткого виведення.

Визначимо лінгвістичні змінні pcp, pnt, pcn виразами:

$$pcp = \langle \beta^{pcp}, T^{pcp}, U^{pcp}, G^{pcp}, M^{pcp} \rangle,$$

$$pnt = \langle \beta^{pnt}, T^{pnt}, U^{pnt}, G^{pnt}, M^{pnt} \rangle,$$

$$pcn = \langle \beta^{pcn}, T^{pcn}, U^{pcn}, G^{pcn}, M^{pcn} \rangle,$$

де найменування лінгвістичних змінних β^{pcp} = «ступінь впевненості у виборі ІСППР з співпрацюючими агентами org_{coop} »; β^{pnt} = «ступінь впевненості у виборі ІСППР з нейтральними агентами org_{neut} »; β^{pcn} = «ступінь впевненості у виборі ІСППР з конкуруючими агентами org_{conc} »; $T^{pcp} = T^{pnt} = T^{pcn} = \{\text{«низька»}; \text{«середня»}; \text{«висока»}\}$ – множини їх значень (терм-множина), кожне з яких – найменування нечіткої змінної; $U^{pcp} = U^{pnt} = U^{pcn} = [0; 1]$ – області визначення

(універсуми) нечітких змінних, що входять до визначення лінгвістичних змінних; $G^{pcp} = G^{pnt} = G^{pcn} = \emptyset$ – синтаксичні процедури, що описують процеси утворення з елементів множин $T^{pcp}, T^{pnt}, T^{pcn}$ нових термів; $M^{pcp} = \{ \mu_{\text{мала}}^{pcp}(u^{pcp}), \mu_{\text{середня}}^{pcp}(u^{pcp}), \mu_{\text{велика}}^{pcp}(u^{pcp}) \}$, $M^{pnt} = \{ \mu_{\text{мала}}^{pnt}(u^{pnt}), \mu_{\text{середня}}^{pnt}(u^{pnt}), \mu_{\text{велика}}^{pnt}(u^{pnt}) \}$, $M^{pcn} = \{ \mu_{\text{мала}}^{pcn}(u^{pcn}), \mu_{\text{середня}}^{pcn}(u^{pcn}), \mu_{\text{велика}}^{pcn}(u^{pcn}) \}$ – семантичні процедури, що ставлять у відповідність кожному терму множини $T^{pcp}, T^{pnt}, T^{pcn}$, а також кожному новому терму, утвореному процедурою $G^{pcp}, G^{pnt}, G^{pcn}$, осмислений зміст за допомогою формування відповідної нечіткої множини. Розглянуті лінгвістичні змінні зв'язуються множиною RUL правил системи нечіткого виведення Мамдані [178]. Правила мають вигляд: $ant_i \xrightarrow{rul_i} cns_i$, де ant_i – антецедент i -го правила rul_i , cns_i – консеквент i -го правила rul_i , $i = 1, \dots, N_{rul}$, де N_{rul} – число правил нечіткої бази знань агента, який приймає рішення.

Нечіткий висновок Мамдані із самонавчання складається з етапів:

1) *фазифікація* I^{fsl1} для встановлення відповідності між значеннями $u^{sz} \in U^{sz}$ і значенням функції належності відповідного терма лінгвістичної змінної sz : для кожного терма $t^{sz} \in T^{sz}$ обчислюється значення $y_{tsz}^{fuz} = \mu_{tsz}^{sz}(u^{sz})$;

2) *агрегування* I^{fsl2} вироджується, оскільки використовується лише одна вхідна нечітка змінна. Ступінь істинності y_i^{agr} посилки ant_i правила rul_i відповідає значенню ступеня істинності y_{tsz}^{fuz} терма t_{sz} вхідний змінної з ant_i ;

3) *активація* I^{fsl3} – для кожного терма $t_{pcp} \in T_{pcp}$, $t_{pnt} \in T_{pnt}$, $t_{pcn} \in T_{pcn}$ вихідних лінгвістичних змінних pcp , pnp , pcn , що входить у висновок при ступеню при обчисленні cns_i правила rul_i , визначається функція методу min-активації:

$$\mu_{tpcp\ i}^{pcp}(u^{pcp}) = \min(y_i^{agr}, \mu_{tpcp}^{pcp}(u^{pcp})) \quad , \quad \mu_{tpnt\ i}^{pnt}(u^{pnt}) = \min(y_i^{agr}, \mu_{tpnt}^{pnt}(u^{pnt})) \quad ,$$

$$\mu_{tpcn\ i}^{pcn}(u^{pcn}) = \min(y_i^{agr}, \mu_{tpcn}^{pcn}(u^{pcn}));$$

4) *аккумуляція* I^{fsl4} – для кожної вихідної лінгвістичної змінної визначаються підсумкові функції належності μ^{pcp} , μ^{pnt} , μ^{pcn} об'єднанням функцій належності термів $\mu_{tpcp\ i}^{pcp}$, $\mu_{tpnt\ i}^{pnt}$, $\mu_{tpcn\ i}^{pcn}$, активованих на попередньому кроці. Вид функцій

належності визначається за правилами: $\mu^{pcp}(u^{pcp}) = \max_i(\mu_{pcp\ i}^{pcp}(u^{pcp}))$,
 $\mu^{pnt}(u^{pnt}) = \max_i(\mu_{pnt\ i}^{pnt}(u^{pnt}))$, $\mu^{pcn}(u^{pcn}) = \max_i(\mu_{pcn\ i}^{pcn}(u^{pcn}))$;

5) дефазифікація I^{fsl5} . Результати дефазифікації змінних pcp , pnt , pcn – речові числа u^{pcp} , u^{pnt} , u^{pcn} відповідно, які виходять з використанням центроїдного методу дефазифікації:

$$u^{pcp} = \frac{\int_{U^{pcp}} u^{pcp} \mu^{pcp}(u^{pcp}) du^{pcp}}{\int_{U^{pcp}} \mu^{pcp}(u^{pcp}) du^{pcp}}, \quad u^{pnt} = \frac{\int_{U^{pnt}} u^{pnt} \mu^{pnt}(u^{pnt}) du^{pnt}}{\int_{U^{pnt}} \mu^{pnt}(u^{pnt}) du^{pnt}},$$

$$u^{pcn} = \frac{\int_{U^{pcn}} u^{pcn} \mu^{pcn}(u^{pcn}) du^{pcn}}{\int_{U^{pcn}} \mu^{pcn}(u^{pcn}) du^{pcn}}; \text{ or } u_{pcp} = \frac{\int_{U_{pcp}} u_{pcp} \mu_{pcp}(u_{pcp}) du_{pcp}}{\int_{U_{pcp}} \mu_{pcp}(u_{pcp}) du_{pcp}};$$

в результаті обчислюються чіткі значення вихідних лінгвістичних змінних: «ступінь впевненості у виборі ІСППР з співпрацюючими агентами» pcp , «ступінь впевненості у виборі ІСППР з нейтральними агентами» pnt і «ступінь впевненості у виборі ІСППР з конкуруючими агентами» pcn – тобто для кожної архітектури ІСППР визначається значення впевненості у її виборі.

6) вибір архітектури I^{fsl6} . Ступені впевненості вибору архітектур з попереднього кроку нормалізуються, щоб їх сума дорівнювала одиниці: $u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn} = 1$ за правилами: $u^{pcp'} = u^{pcp} / (u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn})$,
 $u^{pnt'} = u^{pnt} / (u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn})$, $u^{pcn'} = u^{pcn} / (u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn})$, та архітектура ІСППР org вибирається випадковим чином серед org_{coop} , org_{neut} , org_{conc} відповідно до нормалізованих значень ступенями $u^{pcp'}$, $u^{pnt'}$, $u^{pcn'}$, відповідно;

7) розв'язання складного завдання I^{fsl7} . Виконується моделювання роботи ІСППР методом пулу мозкового запису [190] з використанням обраної архітектури ІСППР; при цьому ОПР «спостерігає» за ходом вирішення складного завдання і фіксує наявність $syn=1$ або відсутність $syn=0$ прояви синергетичного ефекту, тобто чи отримала ІСППР більш якісне рішення, порівняно з рішеннями окремих експертів;

8) визначення абсолютної помилки нечіткого виведення I^{fs18} . Виконується відповідно до виразу:

$$er = 0,5 \cdot \left((d^{pcp} - u^{pcp})^2 + (d^{pnt} - u^{pnt})^2 + (d^{pcn} - u^{pcn})^2 \right), \quad (33)$$

де er – абсолютна помилка нечіткого висновку;

d^{pcp} , d^{pnt} , d^{pcn} – бажані ОПР значення ступенів впевненості вибору архітектур u^{pcp} , u^{pnt} , u^{pcn} , тобто значення при яких ймовірність вибору архітектури, що викликає синергетичний ефект за даних умов завдання, була б вищою.

9) навчання I^{fs19} системи нечіткого виведення. Тут коригуються параметри функцій приналежності вхідний sz та вихідних pcp , pnt , pcn лінгвістичних змінних; під час навчання використовується метод градієнтного узвозу зі змінним коефіцієнтом навчання [195]:

$$par(t+1) = par(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial par}, \quad (34)$$

де par – будь-який з параметрів функцій належності (a_{sz1} , c_{sz1} , σ_{sz2} , c_{sz2} , a_{sz3} , c_{sz3} , a_{pcp1} , c_{pcp1} , σ_{pcp2} , c_{pcp2} , a_{pcp3} , c_{pcp3} , a_{pnt1} , c_{pnt1} , σ_{pnt2} , c_{pnt2} , a_{pnt3} , c_{pnt3} , a_{pcn1} , c_{pcn1} , σ_{pcn2} , c_{pcn2} , a_{pcn3} , c_{pcn3}), що входять до визначення вхідних або вихідних лінгвістичних змінних; t – порядковий номер завдання, що вирішується (ітерація навчання системи нечіткого висновку); η – крок корекції, $0 < \eta < 1$, $\eta(t) = t^{-1}$; для параметрів par_{pcp} , par_{pnt} , par_{pcn} функції належності вихідних змінних pcp , pnt , pcn вираз (34) записується як:

$$par_{pcp}(t+1) = par_{pcp}(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial u^{pcp}} \frac{\partial u^{pcp}}{\partial par_{pcp}} = par_{pcp}(t) + \eta (d^{pcp} - u^{pcp}) \frac{\partial u^{pcp}}{\partial par_{pcp}},$$

$$par_{pnt}(t+1) = par_{pnt}(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial u^{pnt}} \frac{\partial u^{pnt}}{\partial par_{pnt}} = par_{pnt}(t) + \eta (d^{pnt} - u^{pnt}) \frac{\partial u^{pnt}}{\partial par_{pnt}},$$

$$par_{pcn}(t+1) = par_{pcn}(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial u^{pcn}} \frac{\partial u^{pcn}}{\partial par_{pcn}} = par_{pcn}(t) + \eta (d^{pcn} - u^{pcn}) \frac{\partial u^{pcn}}{\partial par_{pcn}},$$

для параметрів par_{sz} функцій належності вхідної змінної sz вираз (34)

листується:

$$par_{sz}(t+1) = par_{sz}(t) + \eta \left((d^{pcp} - u^{pcp}) \sum_{i=1}^{N_{rul}} \frac{\partial u^{pcp}}{\partial y_i^{agr}} \frac{\partial y_i^{agr}}{\partial par_{sz}} + \right. \\ \left. + (d^{pnt} - u^{pnt}) \sum_{i=1}^{N_{rul}} \frac{\partial u^{pnt}}{\partial y_i^{agr}} \frac{\partial y_i^{agr}}{\partial par_{sz}} + (d^{pcn} - u^{pcn}) \sum_{i=1}^{N_{rul}} \frac{\partial u^{pcn}}{\partial y_i^{agr}} \frac{\partial y_i^{agr}}{\partial par_{sz}} \right); \quad (35)$$

після підстроювання параметрів функцій належності вхідний лінгвістичної змінної етап навчання та робота системи нечіткого виведення закінчується.

При вирішенні нового обчислювального завдання система нечіткого виведення починає роботу з першого етапу з новими значеннями всіх параметрів функцій власності.

Висновки

1. У дослідженні запропоновано математичні моделі управління ресурсами інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Новизна запропонованих математичних моделей полягає у:

у комплексному описі процесі функціонування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Зазначене дозволяє підвищити точність моделювання інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для послідовних управлінських рішень;

описі як статичних так і динамічних процесів, які відбувається в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень;

здатності провести моделювання як окремо взятого процесу, що відбувається в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, так і комплексно проводити моделювання тих процесів, що в них відбуваються;

у встановленні концептуальних залежностей процесу функціонування інтелектуальних системи підтримки прийняття рішень. Це дозволяє описати взаємодію окремих моделей на всіх етапах вирішення розрахункових завдань;

описі процесів координації у гібридних інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, чим досягається підвищення достовірності прийняття управлінських рішень;

моделюванні процесів вирішення складних розрахункових завдань в

інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, за рахунок концептуального опису зазначеного процесу;

узгодженні процесів проведення розрахунків в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, чим досягається зменшення кількості обчислювальних ресурсів систем;

2. Запропоновані математичні моделі доцільно використовувати для вирішення завдання управління ресурсами інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, що характеризуються високим ступенем складності.