

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”

Циганок Віталій Володимирович



УДК 519.816, 681.518.2

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ
ЕКСПЕРТНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
В СЛАБКО СТРУКТУРОВАНІХ СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність 01.05.04 – Системний аналіз і теорія оптимальних рішень

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
заслужений діяч науки і техніки України
Панкратова Наталія Дмитрівна,
Інститут прикладного системного аналізу НТУУ „КПІ”
НАН України та МОН України, заступник директора з
наукової роботи

Офіційні опоненти: академік НАН України, доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Кунцевич Всеволод Михайлович,
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА
України, почесний директор,

доктор фізико-математичних наук, професор,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
заслужений працівник освіти
Наконечний Олександр Григорович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка, завідувач кафедри системного аналізу та теорії
прийняття рішень,

доктор технічних наук, професор
Годлевський Михайло Дмитрович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», завідувач кафедри
автоматизованих систем управління.

Захист відбудеться “19” листопада 2013р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.03 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, Київ-56, пр-т. Перемоги, 37, корп.35, ауд.1.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці НТУУ “Київський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “17” жовтня 2013р.

Виконуючий обов’язки ученого секретаря
спеціалізованої вченої ради, д.т.н., професор



Бідюк П.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Постійне ускладнення процесу прийняття рішень, зокрема, управлінських, разом зі складністю предметних областей та взаємозв'язків факторів, що впливають на рішення, зумовлюють необхідність залучення зовнішніх засобів для підтримки прийняття рішень. У слабо структурованих предметних областях, де немає можливості отримання детермінованої інформації в достатній кількості, експертні технології є основним засобом підтримки прийняття рішень (ППР).

Складність підтримки рішень полягає в тому, що переважно йдеться про унікальні (неповторювані) рішення, тому особа, що приймає рішення (ОПР), не має можливості спиратись на досвід аналогічних попередніх рішень. Моделі предметних областей, зазвичай, характеризуються значною кількістю взаємопов'язаних факторів. Для належного врахування цих факторів необхідний відповідний інструментарій ППР. Адекватне подання та обробка експертної інформації в процесі прийняття рішень обумовлює підвищення достовірності рекомендацій ОПР.

У наявних моделях експертної ППР повнота та адекватність інформації обмежуються за рахунок того, що експертові апріорно пропонується деяка визначена шкала для введення ним своїх оцінок. Хоча і очевидно, що докладність найбільш зручної шкали оцінювання для конкретного експерта визначається рівнем його інформованості в питанні, що розглядається, наявні моделі ППР не надають можливості експертові вільно скористатись тією шкалою для оцінювання, яка найкраще відповідає його інформованості (знанням, досвіду та інтуїції) в кожному конкретному питанні. Це обмеження, фактично, призводить до неадекватного відображення знань експерта у базі знань (БЗ) системи ППР (СППР) при формуванні моделі конкретної предметної області, і як наслідок, до зниження достовірності рекомендацій з прийняття рішень.

Оскільки йдеться, здебільшого, про рішення високих організаційних рівнів, „ціна” невірної рішення на теперішній час виявляється занадто високою, і постійно зростає. Через це, адекватне подання та обробка експертної інформації в процесі прийняття рішень є пріоритетним напрямком наукових досліджень, і нагальні проблеми, пов'язані з цими питаннями, потребують невідкладного вирішення.

Характеризуючи теперішній стан досліджень у цій галузі, варто відзначити результати стосовно класифікації шкал експертного оцінювання, отримані С.Стівенсом, Т.Сааті та В.Ведлі, де основна увага приділяється шкалам відношень. Торкаючись проблеми ефективного отримання інформації від експертів, слід згадати шкалу переваг, запропоновану Сааті, а також дослідження психофізіологічних обмежень людини (експерта), проведені Міллером. Агрегації індивідуальних експертних оцінок (ЕО), заданих в конкретних шкалах, присвячені дослідження багатьох спеціалістів: якщо говорити про ординальні оцінки, варто згадати постулати Ерроу, правила Борда, Кондорсе, Сімпсона, медіану Кемені та їхні модифікації. У контексті агрегації парних порівнянь в кардинальних шкалах основні досягнення належать Т.Сааті, В.Ведлі, Л.Варгасу, С.Липовецькому та іншим.

В Україні дослідження за спорідненими тематиками здійснюються, зокрема, в Інституті прикладного системного аналізу при НТУУ „КПІ” НАН України та МОН України, Інституті проблем математичних машин та систем НАН України, Інституті

космічних досліджень НАН України та ДКА України, Центрі досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г.М.Доброва НАН України.

З-поміж вітчизняних науковців, які проводили та проводять споріднені дослідження, варто згадати В.Г.Тоценка, Б.М.Герасимова, М.З.Згуровського, Н.Д.Панкратову, Ю.П.Зайченка, О.Ф.Волошина, О.А.Павлова, П.І.Бідюка, Г.М.Гнатієнка, В.Є.Снитюка, та ін.

В цілому ж, слід зазначити, що у той час, як для ППР на основі обробки ЕО окремих типів – ординальних та кардинальних, індивідуальних та групових, абсолютних та відносних (у тому числі, заданих у вигляді парних порівнянь), чітких та нечітких – застосовується ціла низка методів, конкретних підходів, які б дозволяли експертам довільно обирати та використовувати шкали оцінювання безпосередньо в процесі експертизи, а організаторам експертиз, з метою подальшої ППР – узагальнювати експертну інформацію, задану в різних шкалах, не розроблялося.

Все це обумовлює необхідність вирішення важливої актуальної проблеми розробки теоретичних та технологічних засад експертної ППР, які б дозволили найбільш ефективно оперувати інформацією, отриманою від експертів, в залежності від рівня їхньої інформованості щодо конкретного питання предметної області, створювати більш адекватні моделі предметних областей та підвищувати достовірність наданих ОПР рекомендацій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконувалося у відповідності до планів науково-дослідних робіт, у рамках виконання держбюджетних тем Інституту проблем реєстрації інформації НАН України:

- “Розробка теоретичних засад підтримки прийняття рішень у конфліктних ситуаціях” (шифр “Рубіж”; державний реєстраційний номер 0106U000434);
- „Розробка наукових засад рейтингування вищих навчальних закладів з урахуванням світового досвіду” (шифр “Рейтинг”; державний реєстраційний номер 0107U009176);
- “Розробка наукових засад створення систем підтримки прийняття рішень ординального типу” (шифр “Ранги”; державний реєстраційний номер 0109U002106).

Автор є одним з відповідальних виконавців вказаних робіт, науковим керівником теми „Ранги”.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення достовірності рекомендацій, наданих ОПР, за рахунок застосування інструментарію ППР, створеного на основі розробки теоретичних та технологічних засад експертної ППР в слабо структурованих складних системах. Досягнення цієї мети потребує виконання таких завдань:

- 1) Аналіз наявних моделей та методів експертної ППР в слабо структурованих складних системах.
- 2) Розроблення теоретичних засад створення інструментарію ППР:
 - побудова моделей отримання ЕО, що враховують рівень інформованості експерта в кожному досліджуваному питанні;
 - розробка методу приведення до уніфікованого вигляду ЕО, заданих у шкалах різного рівня інформативності;

- створення ефективних методів обробки групових кардинальних та ординальних ЕО;
- розробка методу агрегації ЕО, заданих у різних за інформативністю шкалах;
- визначення та обґрунтування показників якості результатів оцінювання варіантів рішень.

3) Розроблення технологічних засад створення інструментарію ППР:

- розробка технології побудови групами експертів БЗ предметної області;
- розробка технології експертного оцінювання, що забезпечує повне та адекватне подання знань експертів в досліджуваному питанні у БЗ СППР;
- розроблення технології експертної ППР в слабо структурованих складних системах на базі запропонованої технології експертного оцінювання;
- створення підсистеми моделювання, призначеної для дослідження параметрів інструментарію ППР;
- визначення умов необхідності врахування компетентності учасників групової експертизи при побудові БЗ предметної області.

4) Реалізація механізму ППР в експертних СППР різноманітного призначення:

- створення програмних засобів для проведення експертного оцінювання;
- розробка програмних засобів групової побудови БЗ;
- розробка СППР різноманітного призначення на базі створених програмних засобів.

Об'єкт дослідження – процес підтримки прийняття рішень в слабо структурованих складних системах.

Предмет дослідження – моделі, методи та технології підтримки прийняття рішень із застосуванням експертного оцінювання.

Методи дослідження. У ході дослідження використовувались: системна методологія, методи та моделі теорії інформації (при визначенні рівня інформативності шкал), методи теорії матриць, графів, множин, методи та моделі „штучного інтелекту” (при розробці методів обробки ЕО), методи математичної статистики (при імітаційному моделюванні експертних суджень та при визначенні узгодженості ЕО), методи теорії ігор (при вирішенні практичних задач ППР у конфліктних ситуаціях), та ін.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації сформульовано й вирішено важливу науково-технічну проблему розробки теоретичних та технологічних засад експертної ППР, які дозволили отримувати від експертів інформацію, що відповідає рівню їхньої інформованості, створювати більш адекватні моделі предметних областей та підвищувати достовірність наданих ОПР рекомендацій.

Наукова новизна результатів, одержаних у ході вирішення даної проблеми, полягає в наступному:

1) Вперше запропоновано нову модель отримання експертної інформації та на основі даної моделі розроблено технологію експертного оцінювання із застосуванням шкал різного рівня інформативності, яка дозволяє уникнути спотворення інформації, отриманої від експерта. Завдяки послідовному підвищенню інформативності оста-

точне оцінювання проводиться в шкалі, що найбільш відповідає інформованості експерта в питанні, що розглядається.

2) Вперше запропоновано метод приведення експертних оцінок, заданих у різних за інформативністю шкалах, до єдиної, найбільш інформативної шкали.

3) Вперше розроблено метод узагальнення групових неповних парних порівнянь, заданих у різних шкалах. Завдяки одно-етапності процедури агрегації метод дозволяє застосувати зворотний зв'язок з експертами для досягнення достатнього рівня узгодженості.

4) Розроблено новий метод визначення достатнього рівня узгодженості ординальних експертних оцінок та методи зі зворотним зв'язком для досягнення цього рівня узгодженості, що дозволило в повній мірі використовувати ординальні експертні оцінки у ході групової експертизи.

5) Запропоновано сімейство авторських методів обробки індивідуальних кардинальних оцінок експертів (комбінаторного типу), що при агрегації парних порівнянь ураховують інформацію кожного з усіх можливих покривних дерев графа, відповідного матриці парних порівнянь.

6) Удосконалено спектральний метод визначення узгодженості експертних оцінок за рахунок значного збільшення кількості складових спектрів, які будуються на основі матриць парних порівнянь, що дозволило підвищити достовірність визначення узгодженості.

7) На основі запропонованих нових моделей та методів розроблено технологію ППР, що дозволяє оцінювати варіанти рішень, ґрунтуючись на побудованій експертним шляхом моделі предметної області. Завдяки використанню моделей предметних областей, більш адекватних до власних уявлень експертів, забезпечується підвищення достовірності наданих ОНР рекомендацій.

8) Вперше розроблено показник якості оцінювання варіантів рішень, пов'язаний зі стійкістю отримуваних оцінок за наявності збурень у вхідних експертних даних та запропоновано шляхи підвищення даного показника.

9) З метою тестування та дослідження параметрів запропонованої технології ППР створено підсистему імітаційного моделювання експертного оцінювання, яка дала можливість визначити мінімальну чисельність експертної групи, при якій немає необхідності враховувати компетентність експертів.

10) Розроблено механізм побудови структури багаторівневих ієрархічних слабо структурованих складних систем, який дозволяє групам експертів, шляхом декомпозиції цілі функціонування системи, визначити компоненти системи та зв'язки між ними, що надає можливість експертам, розподіленим у комп'ютерній мережі, дійти згоди при формулюванні компонентів складної системи та їхніх властивостей, спільно визначитись з наявністю взаємозв'язків між компонентами та визначити узагальнені кількісні параметри складної системи і, тим самим, значно підвищити ефективність проведення групових експертиз.

Практичне значення одержаних результатів.

- Реалізовано у вигляді комплексу програмних засобів для експертного оцінювання шляхом парних порівнянь створену технологію експертного оцінювання.

- Реалізовано технологію побудови БЗ СППР групами експертів у вигляді системи розподіленого збору та обробки експертної інформації.
- На основі розробленої технології ППР програмно реалізовано СППР різноманітного призначення.

Розроблені у дисертаційній роботі технологія експертного оцінювання та основана на ній технологія ППР реалізовані в СППР Солон-3 [38], комплексі програмних засобів для експертного оцінювання шляхом парних порівнянь “Рівень” [40] та в системі оцінки персоналу за кількісними критеріями „Нагляд” [39]. Технологія побудови моделі предметної області групами розподілених у комп’ютерній мережі експертів реалізована як веб-додаток до СППР у вигляді підсистеми розподіленого збору та обробки експертної інформації „Консенсус” [41].

Системи „Консенсус” та „Солон-3” знайшли практичне застосування при проведенні групових експертиз в межах Ситуаційного центру Інституту проблем математичних машин і систем НАН України.

Система „Нагляд” (назва російською мовою „Надзор”) використовується наглядовими органами Російської Федерації „Ростехнадзор” для оцінки персоналу (інспекторів) та структурних підрозділів організації, які пов’язані з екологічним, технологічним та атомним контролем функціонування потенційно небезпечних об’єктів. Результати дослідження, які застосовуються в системі „Нагляд”, впроваджені ТОВ „МККУ-Мережі” в органах державного управління України.

Окрім того, результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій при викладанні навчальних дисциплін „Комп’ютерні системи штучного інтелекту”, „Телекомунікаційні і інформаційні мережі”, „Глобальна інфраструктура”, „Проектування інфокомунікаційних мереж”.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У роботах, виконаних у співавторстві, автору належать: в [1] – алгоритмічні та технологічні засади побудови БЗ розподілених СППР; в [2] – методика проведення експериментального дослідження, визначення об’єктів для експертного оцінювання, обробка та аналіз результатів експерименту; в [3] – формулювання та доведення необхідних і достатніх умов конструктивності методів агрегації групових ЕО при застосуванні неповних парних порівнянь; в [6] – алгоритми обчислення інтегрованих оцінок якості роботи співробітників та відносних оцінок структурних підрозділів, програмна реалізація системи оцінювання персоналу; в [8] – алгоритм розрахунку ефективності ходу гравця та модель взаємодії гравців у грі зі змінною силою відповіді; в [10] – ідея застосування методу визначення вагомості критеріїв за частковими та глобальним ранжируваннями для відбору кандидатів на вакантні посади на основі досвіду ОПР; в [11] – аналіз поведінки коефіцієнта конкордації при здійсненні перестановок у ранжируваннях та метод визначення достатності ступеня узгодженості множини індивідуальних ранжирувань; в [16] – ідея методу імітації індивідуальних ранжирувань, методика та реалізація експериментального дослідження визначення залежності значущості врахування компетенльності експертів від кількості членів експертної групи; в [17] – метод імітаційного моделювання ЕО ординального та кардинального типів, закони розподілу модельо-

ваних ЕО; в [22] – ідея методу організації зворотного зв'язку з експертами групи задля досягнення достатнього рівня узгодженості; в [23] – технологія експертного оцінювання при застосуванні різних шкал, методика проведення порівняльного дослідження, алгоритмічна та програмна реалізація комплексу для проведення експерименту; в [25] – ідея застосування експертної ППР для вибору конфігурації сховищ даних.

Апробація результатів дисертації. Основні ідеї та підходи, викладені в дисертації, доповідались та обговорювались на наступних наукових заходах:

- Науково-практичний семінар “Теоретичні і практичні аспекти підтримки прийняття рішень” (Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, м. Київ, 2007р.);
- Низка семінарів „Системні дослідження та інформаційні технології” (Учбово-науковий комплекс „Інститут прикладного системного аналізу” при НТУУ „КПІ”, м. Київ, 2011–12рр.);
- Щорічна підсумкова наукова конференція Інституту проблем реєстрації інформації НАН України (м. Київ, 2008–12рр.);
- Друга, Четверта, п'ята, шоста, сьома та восьма конференції з міжнародною участю “Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика” СППР – 2006, 2008–2012 (Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м.Київ, 2006, 2008–12рр.);
- Міжнародний форум „Проблеми розвитку інформаційного суспільства” (м.Львів, 2009р.);
- X та XI Міжнародні симпозиуми з методу аналізу ієрархій, ISANP 2009 (м.Пітсбург, США, 2009р.) та ISANP 2011 (м.Сорренто, Італія, 2011р.);
- Міжнародна школа-семінар „Спеціальна сесія щодо прийняття рішень в сфері сталого розвитку: Summer School 2010” (Італія, 2010р.);
- Міжнародна конференція Товариства Дослідження Операцій „Operational Research – 52” (м.Лондон, Великобританія, 2010р.).

Публікації. Результати дисертації викладені в 41 публікації, у тому числі, в 25 статтях у фахових наукових виданнях, серед яких 12 статей одноосібних, тезах 12 доповідей наукових конференцій та 4 свідоцтвах про реєстрацію авторського права на твір.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 217 найменувань, додатків. Обсяг основної частини – 263 сторінки. Робота містить 97 рисунків і 33 таблиці.

Висловлюю щирю вдячність доктору технічних наук, професору Віталію Георгійовичу Тоценку – ініціатору і науковому керівнику цього дослідження. Саме праці цього авторитетного вченого та наукова робота під його керівництвом упродовж двох десятиліть (1988–2007) визначили напрямок дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі**, базуючись на вітчизняних та міжнародних публікаціях в галузі дослідження операцій, визначено клас задач, які вирішуються за допомогою СППР. Показано, що особливості слабо структурованих предметних областей, в яких застосовуються такі системи, не дозволяють у повній мірі вирішувати поставлені проблеми без залучення експертів – спеціалістів, які могли б задіяти свої знання, досвід, інтуїцію для побудови адекватної моделі даної предметної області і, в подальшому, на основі цієї моделі оцінювати варіанти рішень. Наведено достатньо репрезентативний перелік прикладів застосувань СППР у світі за останні роки, що безумовно засвідчує актуальність тематики та розкриває широту можливого застосування таких систем. Сформульовано основні задачі, що вирішуються за допомогою технологій ППР і проблеми, що стають на заваді підвищення якості роботи систем і тим самим, підвищення ефективності рішень, що приймаються.

Подано спрощену схему обробки інформації у процесі ППР. У схему увійшли наступні елементи (відповідно до етапів обробки інформації): відбір експертів для участі в побудові БЗ предметної області, включаючи оцінку їхньої компетентності, отримання від експертів знань про предметну область, обробка і узагальнення знань у процесі побудови БЗ, оцінка варіантів рішень на основі побудованої БЗ, застосування результатів оцінювання. Перший та останній етапи в цьому переліку, хоча і можуть бути частково автоматизовані, все ж лише опосередковано відносяться до самого процесу ППР (вони переважно не включаються до складу СППР при їхньому проектуванні) та можуть бути виділені в окремі задачі і розв'язуватись незалежно.

На основі аналізу наукових публікацій, пов'язаних з проблемою класифікації та вибору шкал експертного оцінювання, окреслено коло шкал і відповідних класів ЕО, які рекомендуються для використання при ППР з метою підвищення ефективності проведення експертиз. Для підвищення достовірності ЕО запропоновано повсякчас застосовувати парні порівняння об'єктів та групову експертизу. Окрім того, оскільки людині-експерту зручніше оперувати нечисловими даними, то пропонується застосування виключно вербальних шкал при експертному оцінюванні. На основі аналізу даної проблематики запропоновано використовувати модель відносних вимірювань і відповідну їй шкалу відношень, як такі, що здатні найбільш повно відобразити різноманіття властивостей об'єктів предметних областей та їхні взаємовідношення при моделюванні предметної області. У зв'язку з вибором зазначеної моделі експертного оцінювання, з урахуванням позиції школи Т. Сааті, зроблено висновки про недоцільність використання у ній класу нечітких ЕО, оскільки модель відносних вимірювань, у якій аксіоматично передбачається, що судження про переваги об'єктів подаються засобами обмеженої вербальної шкали, врешті, сама по собі, є досить нечіткою і подальша її „фазифікація” є недоцільною.

Кількість об'єктів, які подаються експертові для оцінювання, рівно як і кількість поділок шкали оцінювання, прийнято задавати не більшою ніж 7 ± 2 , згідно з психофізичними обмеженнями короткотермінової пам'яті людини щодо одночасного запам'ятовування та відтворення об'єктів.

Проаналізувавши різноманіття шкал експертного оцінювання, відібрані для подальшого застосування шкали запропоновано характеризувати єдиним парамет-

ром, пов'язаним з їхньою інформативністю (або докладністю). Інформативність шкали визначається числом наявних поділок, і пов'язана з кількістю інформації, яку експерт може внести в систему, використовуючи дану шкалу оцінювання. Використання параметру інформативності дозволяє уніфікувати експертні оцінки різного типу: ординальні, кардинальні, повні та неповні парні порівняння.

На основі огляду розроблених у світі СППР та зважаючи на вищезгадані обмеження наявних моделей ППР, постає *актуальна проблема* розробки нових моделей та методів та на їхній основі інструментарію ППР, який дозволить більш ефективно, адекватно отримувати, тлумачити, обробляти, узгоджувати та узагальнювати (агрегувати) індивідуальні ЕО, і тим самим, дозволить підвищити достовірність рекомендацій для ОПР на основі цих експертних даних.

Виходячи із сформульованої актуальної проблеми, для забезпечення адекватного та повного отримання інформації від експерта, пропонується у ході виконання ним парних порівнянь, для кожного парного оцінювання, надати можливість використовувати шкалу, найбільш відповідну його інформованості (компетенції, знанням) про предмет експертизи. Задля цього, також, передбачається можливість для експерта не надавати інформацію у разі його недостатньої впевненості у перевазі якогось одного із елементів пари.

У **другому розділі** розглядаються розроблені дисертантом нові методи обробки групових ЕО, що застосовуються при ППР. У двох окремих підрозділах розкрито методи обробки ЕО двох типів: кардинальних та ординальних.

Методи, призначені для обробки кардинальних ЕО (тобто, оцінок, поданих числовими показниками, що відображають величини співвідношень між об'єктами, на відміну від ординальних, які відображають лише наявність переваги між об'єктами без урахування співвідношень між ними) утворюють сімейство так званих комбінаторних методів, авторство яких належить дисертанту.

Перший із запропонованих методів це – комбінаторний груповий метод обчислення ваг альтернатив, який дозволяє провести розрахунки усереднених ваг об'єктів, що підлягають оцінюванню (альтернатив), на основі експертної інформації, а саме, матриць парних порівнянь (МПП), даних групою експертів. Метод надає можливість враховувати рівень компетентності кожного учасника експертизи.

Задача являє собою стандартну задачу агрегації індивідуальних ЕО, поданих у вигляді матриць – МПП.

Дано: A_i , $i=(1, m)$ – зворотно-симетричні МПП альтернатив розмірністю $n \times n$ кожна, де m – кількість експертів, n – кількість альтернатив. c_j – ступені компетентності експертів відносно питання, пов'язаного з оцінкою даних альтернатив, причому $\forall j | j=(1, m), c_j > 0, \sum_j c_j = 1$.

Визначити: Усереднені значення ваг альтернатив w_k , $k=(1, n)$.

Алгоритм визначення ваг альтернатив умовно розділено на наступні кроки:

1-й крок – генерація на основі реальних МПП, сформованих кожним з експертів, множини ідеально-узгоджених МПП (ІУМПП). При цьому ІУМПП формуються на основі визначених *інформаційно-значимих* множин елементів МПП мінімальної потужності. Інформаційно-значима (інформаційно-вагома) множина елементів ІУМПП ω – це така множина мінімальної потужності, що складається з елементів

матриці, яка несе інформацію про всю ІУМПП загалом. Причому, $\omega \subset \Omega$, де Ω – множина всіх елементів МПП і коли $|\Omega| = n^2$, то $|\omega| = n - 1$. Таким чином, для будь-якої ІУМПП за множиною елементів ω можна відтворити множину всіх елементів Ω , визначивши значення відсутніх в ω елементів через ті, що належать цій множині.

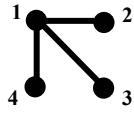


Рис. 1 Приклад зображення графа, що відповідає ІУМПП

На рис. 1 показано вигляд графа, який використовуються для графічного подання інформаційно-вагомих множин елементів МПП, розмірністю 4 x 4. Кожне ребро в графі поставлене у відповідність одному з інформаційно-вагомих елементів, на базі яких формується ІУМПП.

2-й крок – кожній із сформованих ІУМПП ставиться у відповідність ваговий коефіцієнт, котрий відображує вагомість інформації, що міститься в даній ІУМПП, та її вплив на шукані ваги альтернатив. Кожний такий ваговий коефіцієнт враховує як ступені компетентності експертів, які брали участь у формуванні ІУМПП, так і рівень відмінностей реальних експертних МПП від ідеально узгодженої. Формальний запис цієї залежності зручно подати у вигляді функції f :

$R_{inj} = f(c_i, c_j, \Delta_{inj})$, де R_{inj} – ваговий коефіцієнт (рейтинг) ІУМПП, сформованої на основі реальної матриці, заданої i -м експертом, на базі n -ї інформаційно-вагомої множини елементів, при порівнянні цієї ІУМПП з реальною матрицею, заданою j -м експертом; c_i, c_j – ступені компетентності відповідних експертів; Δ_{inj} – величина, що характеризує ступінь відмінності ІУМПП, сформованої на базі n -ї інформаційно-вагомої множини елементів та на основі заданої i -м експертом реальної МПП від заданої j -м експертом реальної матриці.

Оскільки, коефіцієнт R_{inj} має відображувати ступінь вагомості впливу відповідної ІУМПП на усереднений результат, величину Δ_{inj} пропонується обчислювати, наприклад, для випадку адитивних парних порівнянь, як зворотну величину від суми модулів різниць між однойменними елементами відповідних матриць. Крім того, щоб знаменник функції був більшим одиниці, запропоновано взяти логарифм від цієї суми, збільшеної на число e , наприклад:

$$\Delta_{inj} = 1 / \ln\left(\sum_{k,l} |a_{kl}^{in} - a_{kl}^j| + e\right).$$

Здоровий глузд підказує, що рейтинг ІУМПП R_{inj} має зростати зі зменшенням відмінностей цієї матриці від реальних експертних матриць, а значимість цих відмінностей має бути прямо пропорційною компетентності експертів, що формували ці матриці. Виходячи з цього, функцію обчислення коефіцієнта R_{inj} природно вибрати з-поміж функцій мультиплікативного типу, такою, що забезпечує зростання рейтингу при зменшенні суми модулів різниць між однойменними елементами матриць або/та при збільшенні ступенів компетентності відповідних задіяних експертів:

$$R_{inj} = c_i c_j \Delta_{inj} = c_i c_j / \ln\left(\sum_{k,l} |a_{kl}^{in} - a_{kl}^j| + e\right).$$

3-й крок – за кожною із сформованих ІУМПП однозначно знаходяться проміжні значення ваг альтернатив (це можна зробити, наприклад, базуючись на будь-якому одному із стовпчиків або рядків ІУМПП). Для прикладу візьмемо перший рядок ІУМПП, сформованої на основі n -ї інформаційно-вагомої множини елементів заданої i -м експертом реальної матриці, при порівнянні її з реальною матрицею, за-

даною j -м експертом, тоді ваги альтернатив w_m^{inj} за цією матрицею будуть визначені, для адитивних порівнянь, як різниця між максимальним значенням у рядку – $a_{1\max}^{inj}$ і кожним елементом даного рядка – a_{1m}^{inj} відносно безпосередньо оціненого значення ваги альтернативи, що відповідає максимальному елементу рядка – w_{\max}^{inj} :

$$w_m^{inj} = w_{\max}^{inj} + a_{1\max}^{inj} - a_{1m}^{inj}.$$

Для мультиплікативних порівнянь цей вираз має вигляд:

$$w_m^{inj} = a_{1\max}^{inj} / a_{1m}^{inj}.$$

4-й крок – результуючі значення ваг альтернатив знаходяться як сума добутків ваг, визначених за ІУМПП, та нормованих значень рейтингів цих матриць:

$$w_m = \sum_{i,j,n} (w_m^{inj} \cdot R_{inj} / \sum_{k,l,s} R_{ksl}).$$

Переваги запропонованого методу:

- найбільш повно використовує експертну інформацію кожного з елементів МПП;
- існує можливість застосування методу як при адитивних, так і при мультиплікативних парних порівняннях;
- вхідними даними можуть слугувати заповнені експертами як повні квадратні МПП, так і трикутні пів-матриці (обернено-симетричні відносно головної діагоналі);
- може застосовуватись без змін для неповністю заповнених МПП;
- обчислювальний процес добре підлягає розпаралелюванню.

До недоліків можна віднести:

- трудомісткість алгоритму, хоча при його застосуванні за призначенням, коли розмірність МПП не перевищує 7 ± 2 і кількісний склад групи експертів – до 5-7 осіб, метод має прийнятні показники тривалості розрахунків на сучасних ПК;
- можливість виникнення порушень ранжирування ваг наявних раніше альтернатив у разі додавання елемента до множини альтернатив або у разі вилучення деякого елемента з неї (феномен реверсу рангів), які притаманні переважній більшості методів експертного оцінювання.

З метою виключення останнього із зазначених недоліків, коли збереження рангів є важливою умовою задачі ППР, запропоновано метод, що уникає реверсу рангів. Спосіб уникнення реверсу рангів базується на усуненні причин його виникнення, які впливають із суті самих парних порівнянь.

Доцільність застосування парних порівнянь при експертному оцінюванні альтернатив зумовлюється підвищенням достовірності отримуваних оцінок за рахунок деякої надлишковості інформації, одержаної від експерта. А саме, при розрахунках ваг, окрім безпосереднього порівняння альтернатив деякої пари, зазвичай, враховується інформація ще й про опосередковані співвідношення між альтернативами цієї пари, наприклад, при визначенні співвідношення між альтернативами i та j , крім елемента МПП a_{ij} , у розрахунках усереднених ваг альтернатив урахують ще й наступні ланцюжки (послідовності) елементів: $\langle a_{ik}, a_{kl}, \dots, a_{nj} \rangle$, де $i \neq k \neq l \neq \dots \neq n \neq j$.

Виходячи з цього, розкрито причини виникнення реверсу рангів при розрахунках ваг альтернатив. Так, при додаванні деякої альтернативи до множини, реверс виникає внаслідок урахування додаткової інформації про взаємодію базових (тих, що були наявні перед додаванням) альтернатив, при виключенні ж деякої альтернативи з множини, реверс рангів відбувається через втрату (не врахування при розрахунках) частини інформації про взаємодію (взаємний вплив) тих альтернатив, що

залишаються в згаданій множині. Тому, для збереження ранжирування (щоб уникнути реверсу рангів) необхідно при розрахунках ваг альтернатив залишати без змін (не доповнювати і не вилучати) інформацію про взаємовплив базових альтернатив.

Формальна постановка задачі для випадку додавання альтернативи наступна:

Дано: $A_i = (a_{pq})$, $i \in M$, $p, q \in n$ – МПП альтернатив розмірністю $n \times n$ кожна, де $M = \{1..m\}$ – множина індексів експертів, $n = \{1..n\}$ – множина індексів альтернатив. $A_i^+ = (a_{pq}^+)$, $i \in M$, $p, q \in n^+$ – МПП альтернатив розмірністю $(n+1) \times (n+1)$, де $n^+ \supset n$, $|n^+| = |n| + 1$. Причому A_i^+ – це A_i , доповнена одним рядком і стовпчиком, які відповідають парним порівнянням $(n+1)$ -ї альтернативи з рештою n альтернатив. $c_j, j = (1, m)$ – ступені компетентності експертів відносно питання, пов'язаного з оцінкою даних альтернатив. $w_k, k \in n$ – усереднені значення ваг альтернатив, обчислені на основі матриць $A_i, i \in M$.

Визначити: Усереднені значення ваг альтернатив $w_k^+, k \in n^+$ при умові збереження ранжирування альтернатив, визначеного вагами $w_k, k \in n$.

Пропонується покрокове вирішення задачі визначення ваг альтернатив:

1-й крок – генерація множини ІУМПП на основі реальних матриць парних порівнянь A_i^+ , сформованих кожним з m експертів (так само, як і в попередньому методі).

2-й крок – задля збереження ранжирування альтернатив з індексами $k \in n$ – вибираємо із множини всіх ІУМПП, сформованих на основі реальних МПП $A_i^+, i \in M$ тільки ті, які без доданих стовпчика і рядка співпадають з наявними в множині ІУМПП, які були сформовані на основі МПП $A_i, i \in M$.

3-й крок – за кожною із обраних на 2-му кроці ІУМПП, однозначно знаходяться проміжні значення ваг альтернатив (це можна зробити, наприклад, за першим рядком ІУМПП).

4-й крок – ці проміжні значення ваг, для кожної ІУМПП, множаться на ступені компетентності тих експертів, на основі чийх МПП сформовані відповідні ІУМПП.

5-й крок – для визначення результуючих усереднених значень ваг альтернатив знаходяться середні арифметичні значень добутків, отриманих на 4-му кроці.

Запропоновані методи експериментально перевірені на багатьох прикладах та оцінені їхні параметри, такі як середня тривалість визначення оцінок, ефективність агрегації, коефіцієнт узгодженості отримуваних оцінок, тощо.

Ординальні (рангові, порядкові) ЕО, на відміну від кардинальних, несуть менше інформації про предмет експертизи, і тому вимагають від експерта меншої компетентності (інформованості) в питанні, що розглядається. Згідно з цим, логічно припустити, що і тривалість експертизи (а отже і її вартість) є меншою при застосуванні ординальних оцінок ніж у випадку кардинальних. Для групових експертиз завжди актуальною є проблема узгодження оцінок від різних експертів, адже знаходити (обчислювати) усереднені значення індивідуальних оцінок, які значно відрізняються (або й, навіть, суперечать одна одній) не має сенсу. Тому, постають дві очевидні задачі: визначення міри достатності узгодження групових ординальних ЕО для доцільності їхньої подальшої агрегації та організація зворотного зв'язку з експертами для підвищення узгодженості цих оцінок у випадку її недостатності.

Пропонується вважати множину індивідуальних ранжирувань достатньо узгодженою для їхньої агрегації, у тому випадку, якщо отримане за правилом Кондорсе

підсумкове відношення також є ранжируванням (тобто відношенням лінійного порядку). Така вимога, здається природною при груповому прийнятті рішень, оскільки виключає появу протиріч у підсумковому відношенні (порушення його транзитивності). Тим самим виключається можливість прояву т.зв. парадоксу Кондорсе, внаслідок якого може ставитися під сумнів можливість здійснення однозначного й конструктивного групового вибору.

Формальна постановка задачі може бути наступною:

Дано: $R^{(m)} = \{r_i\}, i = (1, m)$ – множина m індивідуальних строгих ранжирувань експертами n об'єктів, тобто $r_i = \{r_i^j\}, j = (1, n)$, де $\forall k \neq l \Rightarrow r_i^k \neq r_i^l, r_i^j \in \mathbb{N}$ – ранг j -го об'єкта в i -ому ранжируванні.

Визначити: чи достатній рівень узгодженості множини ранжирувань $R^{(m)}$ для побудови на її основі агрегованого ранжирування.

Хід розв'язку:

1) Індивідуальні ранжирування $r_i, i = (1, m)$ подаються у вигляді матриць відношень $\|A^k\| = \{a_{ij}^k\}, [k = (1, m), i, j = (1, n)]$, де $a_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } r_k^i \succ r_k^j \\ -1, & \text{якщо } r_k^i \prec r_k^j \end{cases}$, символ « \succ » означає відношення «переважати», а символ « \prec » – «поступатись». Передбачається, що краща альтернатива в ранжируванні переважає гіршій, і, відповідно, їй присвоюється менший порядковий номер або ранг.

Відзначимо, що побудовані в такий спосіб відношення є відношеннями лінійного порядку (або ранжируваннями) і, отже, задовольняють властивостям рефлексивності, антисиметричності, транзитивності та зв'язності.

2) Підсумкова матриця відношення $\|\tilde{A}\| = \{\tilde{a}_{ij}\}$ будується за правилом Кондорсе, а саме: $\forall i \neq j \tilde{a}_{ij} = \text{sign}\left(\sum_{k=1}^m a_{ij}^k\right)$. У цьому випадку кожен індивідуальну матрицю можна вважати множиною якихось індивідуальних елементарних рішень експерта, що відображають результати ординальних парних порівнянь об'єктів. Кожне таке елементарне рішення відповідає недіагональному елементу матриці. При цьому, підсумкова матриця містить множину елементарних групових рішень сформованих за принципом більшості.

3) Підсумкова матриця $\|\tilde{A}\|$ аналізується на предмет її несуперечності (відсутності порушень транзитивності між елементами матриці). Зі способу побудови матриць відношень індивідуальних ранжирувань $\|A^k\|$ і побудови підсумкової матриці $\|\tilde{A}\|$ видно, що для неї завжди виконуються три властивості відношення лінійного порядку (а саме, властивості рефлексивності, антисиметричності й зв'язності). Таким чином, наявність порушень транзитивності у $\|\tilde{A}\|$ свідчить про протиріччя в судженнях членів групи експертів, і рівень узгодженості множини ранжирувань $R^{(m)}$ пропонується вважати недостатнім для побудови агрегованого ранжирування на основі даної множини індивідуальних ранжирувань. Логічним підтвердженням даного положення є той факт, що у разі порушення транзитивності в матриці $\|\tilde{A}\|$, відповід-

не її відношення, фактично, не є відношенням лінійного порядку (тобто не є ранжируванням).

Для визначення кількості порушень транзитивності (кількості циклічних тріад елементів матриці) у $\|\tilde{A}\|$ пропонується попередньо розрахувати рядкові суми її позитивних (у цьому випадку рівних одиниці) елементів: $s_i = \sum_{j, \tilde{a}_{ij} > 0} \tilde{a}_{ij}$, знаючи число

об'єктів n , зробити розрахунок за формулою: $t = C_n^3 - \sum_i C_{s_i}^2$ або еквівалентною:

$$t = \frac{n(n-1)(n-2)}{6} - \sum_i \frac{s_i(s_i-1)}{2}.$$

Таким чином, у ході розв'язку ми приходимо до висновку, що за умови $t=0$ досягається достатній рівень узгодженості множини ранжирувань $R^{(m)}$, і на основі цієї множини можна будувати підсумкові ранжирування будь-яким із відомих методів агрегації. У випадку невиконання умови (при $t>0$) пропонується організувати зворотний зв'язок з експертами з метою приведення t до нуля.

Слід зазначити, що при парних значеннях m може виникати ситуація, коли принцип більшості при формуванні елементів підсумкової матриці $\|\tilde{A}\|$ не виконується через паритет думок, тоді пропонується домагатися виконання цього принципу так само, за допомогою зворотного зв'язку з експертами (звертання до деяких з них із пропозицією змінити їхню початкову оцінку).

Окрім того, застосування зворотного зв'язку не повинне спричиняти будь-який тиск на експерта; виконання цієї умови гарантується постійною наявністю у експерта можливості приймати чи відхилити пропозиції щодо зміни ранжирування.

Пропонується наступна постановка задачі організації зворотного зв'язку:

Дано: Множина $A = \{A_i; i = 1..m\}$ альтернатив, що оцінюються; множина R строгих ранжирувань цих альтернатив, виконаних n експертами, де $R = \{r_{ik}; i = (1, m); k = (1, n)\}$; підсумкове відношення D , у загальному випадку, не транзитивне, задане у вигляді матриці, побудованої шляхом агрегації індивідуальних ранжирувань за правилом

Кондорсе: $D = \{d_{ij} | i, j = 1..m, i \neq j\}$, $d_{ij} = \text{sign}\left(\sum_{k=1}^n d_{ij}^{(k)}\right)$, $d_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1, & A_i \succ A_j \\ -1, & A_i \prec A_j \end{cases}$ (символи

« \succ » та « \prec » означають відношення «домінування» відповідної альтернативи).

Потрібно організувати зворотний зв'язок з експертами з метою перетворення підсумкового відношення D на транзитивне відношення (ранжирування).

Тобто, потрібно послідовно визначати, до кого саме із групи експертів потрібно звернутися, і які саме альтернативи запропонувати переставити в їхніх індивідуальних ранжируваннях. Критерієм якості зворотного зв'язку повинна бути мінімізація кількості звертань до експертів у процесі діалогу, який дозволить зробити підсумкове відношення транзитивним.

Оскільки кількість звертань до експертів із пропозиціями про зміну їхніх попередніх оцінок залежить від суті самих відповідей (тобто від того, погоджується експерт на пропозицію, чи ні), мінімізувати їхню кількість в класичному вигляді не вдається. У зв'язку із цим, пропонується, крім загальної кількості питань, що задаються, групі експертів у процесі діалогу, враховувати також і ймовірність позитив-

них відповідей на задані питання. Адже специфіка зворотного зв'язку така, що відмови експертів змінити раніше висловлену думку ведуть до наступного пошуку інших варіантів перетворення підсумкового відношення в транзитивне, і, тим самим, до нових пропозицій до експертів із приводу зміни їхніх початкових ранжирувань.

В основу методу покладені наступні евристичні припущення, що характеризують логіку роботи експерта: 1) Експерт більш охоче погоджується змінювати менш важливі, на його погляд, оцінки, аніж більш важливі. Виходячи із цього, наприклад, експерт імовірніше погодиться переставити у своєму ранжируванні 5-у альтернативу з 6-ю, ніж 1-у з 2-ю (за умови, що розглянуті альтернативи ранжировані в порядку зниження їхньої ваги). 2) Імовірність наявності хоча б однієї негативної відповіді (відмови) в послідовності пропозицій/питань до експертів, зростає із числом таких пропозицій. Тобто, чим більше змін пропонується прийняти експертові, тим менше ймовірність одержати від нього загальне схвалення. Тому, наприклад, експерт із більшою ймовірністю погодитися переставити у своєму ранжируванні 3-ю альтернативу з 4-ю, ніж 3-ю з 6-ю, оскільки в останньому випадку зміниться взаємне розташування не тільки 3-ї і 6-ї альтернатив, а також і розташування 4-ї і 5-ї альтернатив відносно 3-ї і 6-ї.

На основі вищевикладених постулатів пропонується наступна процедура організації зворотного зв'язку, покликана мінімізувати число звертань до експертів. Ідея методу полягає в такій зміні набору строгих ранжирувань, даних експертами, що при їхній агрегації за правилом Кондорсе підсумкове відношення переваг утворює ранжирування.

Для реалізації даної процедури пропонується здійснювати пошук на множині всіх можливих варіантів строгих ранжирувань експертів такого набору ранжирувань, який на конкретному етапі є найближчим за кількістю та важливістю змін (а, отже, таким, що максимізує ймовірність згоди експертів здійснити дані зміни) до набору вихідних експертних ранжирувань, що дозволяють отримати підсумкове ранжирування при агрегації за правилом Кондорсе. Для реалізації такого виду пошуку пропонується використати один із еволюційних методів – Генетичний алгоритм (ГА), який дозволяє досить ефективно знаходити „хороші” рішення в задачах пошуку екстремуму функції багатьох змінних.

Зупинимося докладніше на вигляді функції корисності ГА. У запропонованому алгоритмі передбачається пошук варіанту рішення, що відповідає мінімуму функції корисності. Варіант рішення в цьому випадку являє собою набір строгих експертних ранжирувань, агрегація яких дає ранжирування. На додаток, є можливість звести до цього варіанту рішення набір початкових експертних ранжирувань, використовуючи мінімальну на поточний момент кількість звертань до експертів. Саму функцію корисності пропонується будувати, беручи до уваги викладені вище постулати логіки роботи експерта й вимогу збереження ваг еквівалентних перестановок у ранжируваннях.

З огляду на вищевикладене, функція корисності F представляється як сума компонентів F_u : $F = \sum_{u=1}^n F_u$. Кожний такий компонент відповідає експертному ранжируванню й має вигляд: $F_u = (2d - 1)(m - h + 1) - d^2$, де m – кількість альтернатив у

ранжируванні, h – менший із двох рангів альтернатив, задіяних у перестановці, d – відстань між альтернативами, що переставляються (абсолютне значення різниці рангів альтернатив, що переставляються). $d = |r_1 - r_2|$, r_1, r_2 – ранги альтернатив вихідного ранжирування експерта, що переставляються.

У кожному компоненті F_u ураховується кількість, так званих елементарних перестановок альтернатив, тобто перестановок сусідніх альтернатив (при $d = 1$), яка необхідна для здійснення довільної перестановки в експертному ранжируванні. Також, в цій формулі враховується вага кожної елементарної перестановки залежно від її віддаленості від кінця ранжирування. Так, перестановка менш значимих для експерта альтернатив буде мати меншу вагу, і, отже, більше шансів бути запропонованою експертові. Крім того, вигляд F_u передбачає, що вага однієї перестановки не сусідніх альтернатив дорівнює сумі ваг послідовності елементарних перестановок сусідніх альтернатив, які в сукупності приводять до цієї однієї перестановки (тобто, є еквівалентною послідовністю перестановок).

Окрім викладеного, пропонується ще один підхід до вирішення вище сформульованої задачі, який виключає перебір (у тому числі направлений) всіх можливих варіантів послідовних перестановок альтернатив в індивідуальних ранжируваннях. В основу підходу покладено умову Кендала та Сміта, виконання якої забезпечує збіжність процедури зворотного зв'язку. Відповідно до цієї умови, якщо на множині альтернатив $A = \{A_k, k=1..m\}$ задане не транзитивне відношення переваг, а пара альтернатив A_i і A_j із цієї множини, така що $A_i \succ A_j$, входить в хоча б один 3-цикл, то внаслідок перестановки альтернатив у парі (зміни переваги на $A_j \succ A_i$) кількість циклів у відношенні зменшиться тоді, й тільки тоді, коли $\alpha \leq \beta$, де α і β – кількість альтернатив, над якими домінують, відповідно альтернативи A_i і A_j .

Розглянуті методи обробки кардинальних та ординальних ЕО є невід'ємною складовою технологій ППР, а також розроблених на основі таких технологій СППР.

У **третьому розділі** пропонується технологія ППР, в основу якої покладений принцип надання кожному експерту можливості проводити кожне окреме порівняння у вербальній шкалі, докладність якої найкращим чином відповідає його особистій інформованості в поточному питанні експертизи. Розв'язано низку задач, пов'язаних з розробкою даної технології ППР: вибір шкали оцінювання експертом, приведення індивідуальних ЕО до єдиної шкали, узгодження уніфікованих оцінок, організація зворотного зв'язку з експертами, агрегація індивідуальних експертних оцінок, та ін.

У наявних технологіях ППР при проведенні експертного оцінювання, експертові пропонується використовувати деяку, наперед визначену, шкалу. Це негативно впливає на ефективність отримання інформації від експерта, оскільки ступінь інформативності шкали, що застосовується, має відповідати рівню інформованості даного експерта в конкретному питанні. Інакше, на експерта буде спричинятись тиск, пов'язаний з необхідністю надання інформації, у якій він не упевнений, або інформація про предмет експертизи, якою він володіє, буде отримана від нього не в повній мірі. Тому пропонується нова, вільна від цих недоліків технологія експертного оцінювання, в основу якої покладено метод парних порівнянь. Експертові надається можливість використовувати при порівнянні об'єктів вербальну шкалу оцінювання з кількістю градацій, яка адекватно відображає його інформованість в питанні, що ро-

розглядається. Тим самим, метод дозволяє експертові зробити обґрунтований вибір відповідного значення лінгвістичної змінної (поділки вербальної шкали), яка найбільш повно відповідає його уявленню про співвідношення між альтернативами у заданій парі.

Пропонується характеризувати шкали експертного оцінювання за їхньою інформативністю, яка визначається кількістю градацій (поділок). Прийняте обґрунтоване рішення обмежитись застосуванням шкал з кількістю поділок від 3-х до 9-ти. Кожна з поділок відповідає визначеному ступеню переваги однієї альтернативи над іншою, та їхні числові еквіваленти визначаються у залежності від типів шкал. Окрім найбільш відомої та популярної цілочислової шкали, де „Слабкій” перевазі відповідає перевага в 2 рази, „Середній” – в 3, „Більше ніж середній” – в 4, „Сильний” – в 5 разів і т.д., передбачено можливість застосування інших відомих шкал для експертного оцінювання: „Ординальної”, „Збалансованої”, „Степеневої”, „Ма-Чженга” та „Донеган-Додд-МакМастера”. Кожна з цих кардинальних шкал має свої числові відповідники, і експертові надається можливість для кожного окремого порівняння використовувати шкалу, яка найбільше відповідає його уявленню про переваги між альтернативами, що оцінюються, і, окрім того, використовувати прийнятну кількість градацій цієї шкали. Числові відповідники позначок шкал з 9-ти поділками зведено в наступну таблицю.

Шкала \ Значення лінгвістичної змінної	Немає переваги	Слабка перевага	Середня перевага	Більше ніж середня	Сильна перевага	Більше ніж сильна	Дуже сильна перевага	Дуже, дуже сильна	Надзвичайна перевага
Цілочислова	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Збалансована	1	11/9	3/2	13/7	7/3	3	4	17/3	9
Степенева	1	1,316	1,732	2,28	3	3,948	5,196	6,839	9
Ма-Чженга (9/9-9/1)	1	9/8	9/7	9/6	9/5	9/4	3	9/2	9
Донеган-Додд-МакМастера	1	1,132	1,287	1,477	1,720	2,06	2,6	3,732	9

Варто зазначити, що подана технологія експертного оцінювання не передбачає наявності у шкалі позначки „Рівнозначність”. Фактично, рівнозначність при порівнянні пари альтернатив відповідає не-розрізненню цих альтернатив експертом внаслідок його недостатньої інформованості саме у цьому питанні і є еквівалентною пропуску (не виконанню) даного парного порівняння.

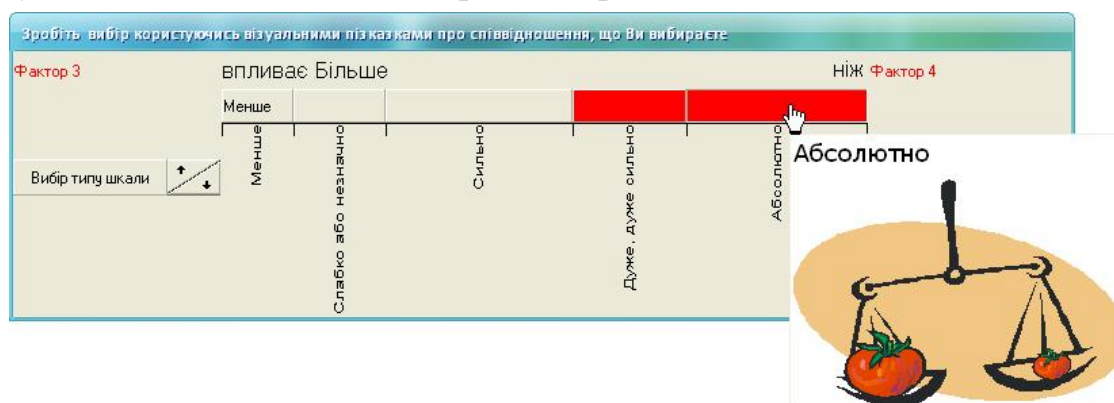


Рис. 2 Приклад інтерфейсу користувача для виконання парних порівнянь

Вибір найбільш прийнятної шкали проводиться з використанням візуальних підказок, які наочно вказують на рівень переваги, закладений у тому, чи іншому значенні лінгвістичної змінної (див. екранну форму на рис.2).

Проведено порівняльне експериментальне дослідження запропонованої технології експертного оцінювання з технологіями, в яких застосовується єдина шкала оцінювання з 5-ма та 9-ма поділками. Метою дослідження було порівняння ступенів адекватності уявлень експерта про реальні співвідношення між об'єктами предметної області, яка обиралася самими експертами, співвідношенням, визначеним за допомогою різних технологій експертного оцінювання. Розраховано необхідну кількість експериментів для досягнення бажаної статистичної достовірності результатів. За отриманими даними, запропонована технологія переважає інші технології, взяті для порівняння.

Для агрегації експертних оцінок, отриманих за допомогою описаної технології, пропонується метод, який враховує різну важливість оцінок, отриманих у різних шкалах. Формальна постановка задачі визначення узагальнених ваг – наступна:

Дано: - A_i , $i=(1,m)$ – індивідуальні експертні МПП розмірністю $n \times n$, які мають наступні властивості: 1) матриці зворотно-симетричні, тому використовуються елементи, що лежать вище головної діагоналі; 2) матриці мультиплікативні, тобто кожен елемент a_{ij} показує у скільки разів об'єкт з індексом i переважає за деяким критерієм об'єкт з індексом j ; 3) у загальному випадку, матриці неповні, оскільки експерт, за рядом причин, може не виконати (відмовитись виконувати) деякі з парних порівнянь; 4) кожен окремий елемент МПП отримано в деякій шкалі, яка має ваговий коефіцієнт $s_j, j \in [0..8]$; - $c_l, l=(1,m)$ – відносна компетентність експертів у групі.

Знайти: усереднений підсумковий вектор ваг об'єктів $w_k, k=(1,n)$.

Для вирішення поставленої задачі пропонується метод, у якому задля досягнення достатнього ступеня узгодженості індивідуальних парних порівнянь застосовується зворотний зв'язок з експертами.

На початковому етапі вбачається доцільним привести оцінки, дані різними експертами в різних шкалах, до єдиної, найбільш інформативної (деталізованої) шкали. Приведення (перетворення) ЕО до менш інформативних шкал вбачається недоречним, оскільки, в такому разі, можлива втрата інформації, представленої в шкалах з більшою кількістю градацій (в більш інформативних шкалах). Формула для приведення ЕО для шкал з довільною кількістю градацій у загальному випадку виглядає наступним чином:

$$M_i^n = l + \left(i - \frac{1}{2}\right) \frac{r-l}{n}, \text{ де } M_i^n - \text{числовий відповідник для } i\text{-ої із } n \text{ наяв-$$

них градацій шкали; l, r – відповідно, ліва і права границі шкали.

Окрім задачі уніфікації ЕО, поданих у різних шкалах, у процесі агрегації важливою задачею є обробка уніфікованих оцінок з метою отримання деякої узагальненої оцінки. Ідея, покладена в основу обробки уніфікованих оцінок, полягає в присвоєнні різної ваги оцінкам, визначеним в різних шкалах. Причому, оцінка, задана в шкалі з більшою кількістю градацій, має більшу вагу ніж оцінка, що визначена експертом з використанням шкали з меншою кількістю градацій. Це положення ґрунтується на тому, що використання шкали з більшою кількістю градацій при оцінюван-

ні, вимагає від експерта вищої компетентності в питанні, що розглядається. Застосований спрощений розрахунок показника інформативності шкали, з припущенням, що вибір будь-якої з поділок шкали оцінювання є рівно-ймовірним, передбачає визначення кількості інформації за формулою Хартлі:

$$I = \log_2 N, \text{ де } N - \text{кількість поділок шкали експертного оцінювання.}$$

Доведено, що необхідною і достатньою умовою можливості визначення вектора ваг об'єктів w_k є зв'язність графа, який відповідає результуючій МПП, побудованій на основі матриць експертів A_i . У цьому випадку можна говорити про конструктивність множини ЕО для визначення за ними узагальнених ваг об'єктів.

Для визначення зв'язності вищезгаданого графа, поелементно визначається результуюча матриця суміжності D^* за МПП експертів A_i :

$$d_{uv}^* = \bigvee_{i=1}^m (a_{uv}^i \neq *), \text{ де } a_{uv}^i = *, \text{ якщо значення парного порівняння не ви-}$$

значено i -м експертом. Для перевірки зв'язності графа, утвореного за матрицею суміжності, користуємось алгоритмом так званого „пошуку в ширину”. У випадку, якщо алгоритм виявляє незв'язність графа, передбачається процедура звернення до експертів з метою досягнення конструктивності множини їхніх оцінок. Ця процедура передбачає повторне звернення до ряду експертів з пропозицією надати оцінку, яку було пропущено (проігноровано) на початковому етапі експертизи, тобто експертам пропонується зробити парне порівняння деяких об'єктів.

Для визначення узгодженості групових ЕО на основі уніфікованих індивідуальних матриць парних порівнянь з урахуванням компетентності експертів і неповноти їхніх оцінок, пропонується застосувати удосконалений спектральний коефіцієнт узгодженості. Удосконалення методу визначення узгодженості полягає у отриманні складових відносних оцінок альтернатив не лише за рядками МПП, а за кожним покривним деревом графу, відповідного такій матриці. Це удосконалення дозволило підвищити достовірність визначення узгодженості при груповій експертизі за рахунок більш повного використання інформації кожної МПП, що особливо корисним є у випадках неповних парних порівнянь, коли кількість складових у відповідних спектрах альтернатив може значно скорочуватись при традиційному підході.

За умови недостатнього рівня узгодженості індивідуальних ЕО, з метою його підвищення, передбачається ітераційний процес. На кожному кроці процесу пропонується визначати усереднену ідеально узгоджену МПП (ІУМПП), до якої слід наблизити індивідуальні МПП експертів.

Елементи такої ІУМПП обчислюються на основі усереднених ваг альтернатив ($a_{ij} = w_i/w_j$), які, у свою чергу, знаходяться за допомогою комбінаторного методу агрегації групових експертних парних порівнянь, що дозволяє враховувати компетентність експертів і обробляти неповні індивідуальні МПП.

Процес зворотного зв'язку полягає у зверненні до експертів з пропозицією змінити раніше введені ними значення парних порівнянь, і покликаний підвищити узгодженість цих порівнянь до обґрунтовано необхідного рівня. Умовою початку цього процесу є недостатній рівень узгодженості індивідуальних ЕО, який характеризується значенням спектрального коефіцієнта узгодженості нижчим за поріг застосування. Умова завершення процесу зворотного зв'язку – це або досягнення кое-

фіцієнтом узгодженості рівня порогу застосування, або, у разі численних відмов експертів, висновок про неможливість отримання достовірних узагальнених оцінок у складі даної експертної групи.

Після знаходження усередненої ІУМПП, на наступному кроці пропонується розташувати елементи початкових експертних матриць у порядку зменшення модулів різниць з відповідними елементами знайденої ІУМПП. Таке упорядкування пропонується виконати з метою подальшого використання цих елементів саме у такій послідовності у діалогах з експертами. У першу чергу пропонується змінювати елементи індивідуальних МПП експертів, найбільш віддалені від відповідних елементів знайденої ІУМПП, яка є певним усередненням МПП експертів.

У **четвертому розділі** досліджено особливості застосування технології ППР, а саме проведено дослідження поведінки відомих та запропонованих методів групового експертного оцінювання при розподіленій роботі експертів у глобальній мережі, а також, завдяки імітаційному моделюванню ЕО, без залучення експертів, з'ясовано умови необхідності врахування компетентності експертів при груповій ППР.

При впровадженні технології ППР, яка передбачає територіальну віддаленість робочих місць членів експертної групи, виникла нагальна потреба в проведенні експериментального дослідження, яке б дало відповідь на ряд питань: як і наскільки зміняться показники групових методів експертного оцінювання при реалізації їх у мережі Internet, у порівнянні з показниками звичайних (немережевих) групових методів; чи варто надавати експертові для перегляду оцінки, дані іншими експертами з групи, і як це може вплинути на показники методів; чи варто надавати групі інформацію про те, хто з експертів персонально бере участь у груповому експертному оцінюванні.

Для того щоб одержати відповіді на вищезгадані й деякі інші питання, було проведено експериментальне дослідження з залученням експертів. У якості таких експертів виступили групи студентів, компетентність яких у кожному поточному питанні вважалась однаковою. У спеціально створеній для проведення експерименту програмній системі було реалізовано наступні методи групового експертного оцінювання: «Безпосереднє оцінювання», «Лінія», «Трикутник» та «Квадрат». Експеримент проводився двічі, коли експерти працювали на ізольованих робочих місцях, зв'язаних через мережу Internet, і при поза-мережевій роботі експертів, коли їм надавалася можливість вільного спілкування.

За підсумками експерименту отримані наступні результати:

- Узгодженість оцінок, даних експертами, які працюють в Internet, менша для всіх досліджуваних методів, ніж при роботі поза мережею. Це можна пояснити тим, що живий контакт дає можливість обговорення й ухвалення загального рішення вже в процесі оцінювання. Цю гіпотезу підтверджує і те, що переважна більшість повторних звертань до експертів із пропозиціями про зміну їхньої попередньої думки для досягнення необхідного рівня узгодженості відбувається саме при застосуванні Internet.
- Точність агрегованих оцінок, отриманих усіма дослідженими методами (за винятком методу «трикутник») при роботі в Internet, є вищою, ніж точність оцінок, отриманих аналогічними методами при роботі поза мережею.
- Тривалість процесу одержання узгоджених оцінок при використанні Internet ви-

явилася меншою, аніж при застосуванні аналогічних методів в умовах позамережевої роботи.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновки про те, що використання Internet створює більш комфортні умови для роботи експертів внаслідок можливості побудувати власний графік роботи та для залучення до побудови БЗ СППР більш кваліфікованих експертів, яких організаційно важко зібрати разом в одному й тому ж самому місці й в один і той самий час для позамережевої групової роботи.

Слід зазначити, що залучення експертів як джерел інформації до процесу експериментального дослідження є високовартісною, а тому, часом, і зовсім нездійсненною процедурою. У такій ситуації, якщо є можливість, варто замінювати реальну участь експертів в дослідженнях моделюванням їхніх суджень. Зважаючи на те, що під час досліджень такі моделі експертних суджень, зазвичай, потрібно «програвати» (повторювати) багато разів, найбільш придатним для цього є метод імітаційного моделювання.

Запропонована модель поведінки експертів базуються на припущенні, що експерти виконують оцінювання з деякими похибками (відхиленнями від істинних значень), і експерт розглядається як деякий особливий «прилад» із властивими йому метрологічними характеристиками. Оцінки групи експертів розглядаються як сукупність незалежних однаково розподілених випадкових величин зі значеннями у відповідному просторі об'єктів числової або нечислової природи. Слушно припустити, що експерт вибирає правильну (тобто адекватну реальності) відповідь частіше, ніж неправильну. У математичній моделі це виражається в тому, що щільність розподілу випадкової величини – відповіді експерта – монотонно спадає зі збільшенням відстані від центра розподілу – істинного значення оцінюваного параметру.

Виділено наступні задачі моделювання ЕО:

- 1) при безпосередньому оцінюванні;
- 2) при оцінюванні в ординальній (порядковій) шкалі;
- 3) при задаванні оцінок у вигляді матриць кардинальних парних порівнянь.

Окрім першої задачі, яка раніше вирішувалась для визначення значимості врахування компетентності джерел інформації при груповому безпосередньому оцінюванні, коли вважалось, що кожний експерт групи дає одну єдину оцінку, як випадкову величину, розподілену за рівномірним, нормальним чи експоненційним законом, решту задач моделювання запропоновано вирішити в рамках дослідження.

Одразу слід зауважити, що для імітації ординальних ЕО та кардинальних парних порівнянь недоцільно застосовувати рівномірний розподіл, оскільки, при досить великій кількості повторень (імітацій оцінок), через наявність численних «протилежних» думок / суджень експертів, отримуються дуже нестійкі агреговані оцінки. У зв'язку з цим, експертна група вважається досить компетентною, і її оцінки перебувають у достатній близькості від деяких «істинних» оцінок, котрі є математичними сподіваннями множини імітованих випадкових ЕО. Таким чином, досліджуються випадки, коли відхилення індивідуальних ЕО від заданої істинної оцінки розподілене за експоненційним ($f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x}$, $x \geq 0$) та за півнормальним (Half-normal:

$f(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$, $x \in [0; \infty)$) законами у діапазоні заданих припустимих відхилень.

Для того, щоб уникнути невизначеності при узагальненні індивідуальних ранжирувань пропонується змодельовати їх шляхом імітації – випадкового вибору ранжирування віддаленого від деякого довільно заданого ранжирування (еталонної ЕО) на вибрану випадковим чином відстань. Для ординальних оцінок у якості такої відстані запропоновано обрати відстань Кемені, і задавати її, як випадкову величину, розподілену за експоненційним або за півнормальним законом.

Відстань Кемені між двома відношеннями A та B (ранжируваннями) приймає значення із діапазону $[0; 2m(m-1)]$ (де m – кількість об'єктів у ранжируванні) і обчислюється за формулою $D_K(A, B) = \sum_{i,j} |\alpha(i, j) - \beta(i, j)|$, де $\alpha(i, j)$ та $\beta(i, j)$ – елементи матриць відношень A та B відповідно.

Отже, імітацію експертного ранжирування, як деякої випадкової індивідуальної ЕО, пропонується здійснювати у декілька наступних етапів:

- 1) генерування еталонного ранжирування;
- 2) генерування відстані Кемені (кількості перестановок), як випадкової величини, розподіленої за експоненційним, чи півнормальним законом;
- 3) формування множини можливих ранжирувань з заданою відстанню від довільно обраного ранжирування;
- 4) випадковий вибір ранжирування із сформованої множини.

Для моделювання ЕО при кардинальних парних порівняннях пропонується задати набір т.зв. еталонних ваг $w_i, i = \overline{1, m}$ для m об'єктів і на базі цього набору побудувати ідеально узгоджену еталонну МПП.

Як зазначає Сааті, для адекватного виконання парних порівнянь, ваги об'єктів мають бути величинами одного порядку (об'єкти не можуть бути занадто віддаленими, інакше експерт не буде в змозі їх адекватно порівняти, користуючись діапазоном фундаментальної шкали переваг). Не втрачаючи загальності, а також, виходячи з міркувань зручності викладення матеріалу, можна припустити, що ваги об'єктів розташовані у порядку спадання, і об'єкти перенумеровані відповідним чином. Присвоївши довільну вагу 1-му об'єкту (наприклад, $w_1 = 10$), та задавши ваги інших об'єктів, виходячи з припущення, що вони мають відрізнятися хоча б на 5 %, та враховуючи, що ваги об'єктів – величини одного порядку, запропоновано наступну рекурентну формулу для задання ваг:

$$w_{i+1} = w_i / \text{random} \left[1.05; {}^{(m-i)}\sqrt{10 \prod_{k=1}^{i-1} \frac{w_{k+1}}{w_k}} \right], \text{ де } \text{random} - \text{функція, що пове-}$$

ртає випадкове значення із заданого діапазону, $i = \overline{1..(m-1)}$, m – кількість об'єктів.

На основі побудованої таким чином множини еталонних ваг формується обернено-симетрична ІУМПП A , виходячи із співвідношень: $a_{ij} = w_i / w_j$ та $a_{ij} = 1 / a_{ji}$, і аналізуються лише елементи МПП, які лежать над її головною діагоналлю ($a_{ij} > 1 \mid i < j$). До того ж, фундаментальна шкала парних порівнянь вважається неперервною, тобто елементи ІУМПП можуть бути не лише цілими, а й дійсними числами ($a_{ij} \in \mathbb{R}$).

Для моделювання ЕО пропонується зашумляти побудовану ІУМПП відповідним чином, а саме: помножити або поділити кожний елемент матриці на деяку випадкову

величину Δ (конкретна із двох вказаних арифметичних дій визначається також випадковим чином).

Відхилення Δ від еталонних значень задаються у шкалі відношень, тобто виконується рівність: $\Delta = (a_{\Delta+}/a_e) = (a_e/a_{\Delta-})$, де a_e є елементом ідеально узгодженої матриці, який піддається флуктуації, $a_{\Delta+}$ – значення вказаного елемента у випадку його збільшення, а $a_{\Delta-}$ – значення після зменшення. Випадкове значення Δ обирається згідно з одним із вищевказаних законів розподілу (експоненційним чи півнормальним). Оскільки функція розподілу ймовірності в обох випадках визначена у додатному діапазоні (справа від нуля), а відхилення – мультиплікативне, слід збільшити згенероване випадкове значення на 1 ($\Delta = \Delta + 1$). Фактично, функції щільності розподілу ймовірностей, що зображені на рис.3 зсунуті на 1 вправо для того, щоб була можливість використовувати згенеровані згідно з даними законами випадкові величини, як множники при формуванні результуючих значень ЕО, що моделюються. Значення цих множників, як видно з вигляду законів розподілу, у своїй більшості, близькі до одиниці.

Напрямок відхилення (позитивний ($a_{\Delta+} = a_e \Delta$) чи негативний ($a_{\Delta-} = a_e / \Delta$)) обирається випадково, отже, на базі вищезгаданих розподілів, визначених на позитивній півосі, отримуються симетричні закони розподілу. І, оскільки елементи змодельованих індивідуальних експертних МПП належать до множини значень фундаментальної шкали переваг Сааті, дійсні значення, отримані вказаним способом, апроксимуються найближчими поділками фундаментальної шкали. Таким чином, елементи індивідуальних МПП можуть приймати значення з множини: $\{1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 8, 9\}$.

Отже, розподіл випадкової величини Δ обирається аналогічно розподілу відстані Кемені для ординальних ЕО, з тією відмінністю, що $\Delta \geq 1$, тому функції законів розподілу зсунуті на 1 вправо, і математичні сподівання змодельованої випадкової величини Δ для законів розподілу приводяться до єдиного заданого значення.

На основі наведеного вище моделювання ЕО, проведено експериментальне дослідження, метою якого було визначити умови необхідності врахування компетентності експертів при груповому оцінюванні. Тобто, планувалось визначити розмір експертної групи, при якому доцільно враховувати індивідуальну відносну компетентність кожного експерта під час групової експертизи.

Дослідження проводилось для різної кількості n експертів в групі, де $n \in [3; 200]$ та різної кількості m оцінюваних альтернатив, де $m \in [3; 9]$ (значення m було обмежено відповідно до психофізичних можливостей людини-експерта).

Для забезпечення статистичної достовірності результатів моделювання, для кожної пари значень n та m , експеримент повторювався не менше N разів ($N \geq D_\xi(P_\beta/\beta)$), де D_ξ – дисперсія змодельованої випадкової величини D_K ; P_β – ймовірність попадання випадкової величини у заданий інтервал β . В рамках даного дослідження $N=300$ при $D_\xi \approx 15\%$ та при обраних $\beta = \pm 5\%$ і $P_\beta = 95\%$.

Дослідження проводилось для двох типів ЕО: ординальних і кардинальних. Для ординального оцінювання експеримент включав процедуру підрахунку кількості збігів двох підсумкових ранжирувань: ранжирувань, отриманих, відповідно, з урахуванням та без урахування компетентності експертів. Якщо ранжирування спів-

падають, можна говорити, що значущість врахування компетентності втрачається, і, відповідно, зникає необхідність визначення індивідуальної компетентності кожного члена експертної групи. Для визначення узагальненого групового ранжирування на основі ранжирувань експертів застосовувались два широко відомих методи, що мають не значну обчислювальну складність у порівнянні з аналогами, це метод Борда – ранжирування зважених сум рангів індивідуальних експертних ранжирувань та Кондорсе – по-елементне знаходження результуючої (групової) матриці домінування за більшістю переваг серед однойменних елементів індивідуальних експертних матриць домінування. Як результат, знаходився відсоток розбіжностей (не збігів) від загальної кількості повторів експерименту між груповими ранжируваннями, визначеними з урахуванням компетентності експертів та без урахування такої для двох типів агрегації окремо.

Для кардинального оцінювання, коли ЕО задаються у вигляді МПП, елементами яких є значення із фундаментальної шкали переваг Сааті, при агрегації індивідуальних МПП було вирішено скористатися методом середнього геометричного:

$$a'_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n a_{ijk}} \quad \text{— без урахування компетентності експертів;}$$

$$a''_{ij} = \left(\sum_{x=1}^n c_x \right) \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n a_{ijk}^{c_k}} \quad \text{— з урахуванням компетентності експертів. Компете-}$$

нтність i -го експерта c_i , так само, як і для ординальних ЕО, моделювалася як рівномірно розподілена випадкова величина. На основі двох отриманих агрегованих матриць методом власного вектора обраховувалися відносні ваги об'єктів: w'_i та w''_i , $i = \overline{1, m}$. Величина відношення $\xi = \max_i (\max(w'_i, w''_i) / \min(w'_i, w''_i))$ відображає розходження у результатах агрегації ЕО, отриманих з урахуванням та без урахування компетентності експертів.

Отримані експериментальні результати засвідчують спадання відносної кількості розбіжностей між ранжируваннями, а також зменшення відношення ξ для кардинальних ЕО для заданого числа об'єктів $m \in [3; 9]$. Серед узагальнених ранжирувань, що отримані при агрегації індивідуальних ранжирувань двома способами (з урахуванням та без урахування відносної компетентності експертів у групі) зі збільшенням чисельності групи експертів зменшується відсоток не однакових ранжирувань (збільшується частка ранжирувань, що співпадають). Якщо у групі більше декількох десятків експертів, кількість не однакових ранжирувань не перевищує порогу значимості 5%. Причому ця тенденція суттєво не залежить ані від обраного методу агрегації індивідуальних ранжирувань, ані від ймовірнісного розподілу, що застосовувався при моделюванні цих ранжирувань.

Отримані залежності максимальних розбіжностей між результатами агрегації кардинальних ЕО від кількості експертів у групі при агрегації з урахуванням та без урахування компетентності не перевищують рівня 5% при кількості експертів 50-60 осіб. Причому, ця тенденція, знов-таки, практично не залежить від кількості об'єктів, що оцінюються та від виду ймовірнісного розподілу індивідуальних експертних оцінок (експоненційного чи півнормального).

Таким чином, за результатами експерименту показано, що якщо до складу експертної групи входять лише декілька експертів, при агрегації будь-яких типів ЕО, існує нагальна необхідність враховувати компетентність її членів. У той же час, якщо група налічує кілька десятків експертів, то витратити зусилля на визначення індивідуальної компетентності кожного з них – недоцільно.

П'ятий розділ присвячено визначенню кількісних показників якості ППР та методам підвищення рівня цих показників. Основну увагу приділено показнику ефективності методів агрегації ЕО, отриманих у результаті парних порівнянь та показнику стійкості отримуваних оцінок варіантів рішень.

Запропоновано механізм оцінювання ефективності методів агрегації МПП, оснований на моделюванні можливих відхилень оцінок експертів від еталонних значень (їхніх похибок) при парних порівняннях. Відповідний показник якості характеризує виконання методами свого основного призначення – підвищення достовірності, а, отже, і точності експертного оцінювання.

Запропонований показник ефективності характеризує потенційну здатність методу утримувати свої результати в деяких межах, ідея його визначення полягає в наступному. Задаються довільні позитивні значення ваг об'єктів/альтернатив w_i , $i=(1,n)$, де $n \leq 7 \pm 2$ – кількість об'єктів при експертному оцінюванні. Проводиться нормування цих ваг до одиниці: $w_i = w_i / \sum_{j=1}^n w_j$ (після нормування $\sum_{i=1}^n w_i = 1$). За цими

(далі – „еталонними”) вагами формально будується ІУМПП A на основі співвідношення $a_{ij} = w_i / w_j$, де a_{ij} – елемент матриці A . Після цього матриця A «зашумлюється», таким чином, що кожен її елемент, крім діагональних, може бути змінений за законом: $a'_{ij} = a_{ij} \pm a_{ij} \cdot \delta / 100\%$, де $\delta > 0$ – наперед задана величина, яка характеризує максимальне відносне відхилення результатів парних порівнянь експерта (елементів матриці A) у відсотках від еталонних значень. Тим самим, здійснюється моделювання наявності відхилень (погрешностей) при експертному оцінюванні. Величина δ , у даному випадку, є еквівалентом відносної похибки експерта при проведенні парних порівнянь. Далі, «зашумлена» МПП (позначимо її A'), піддається обробці кожним з методів агрегації з метою одержання узагальнених ваг об'єктів w'_i . Якість (ефективність) методу агрегації ЕО пропонується обчислювати як максимальне можливе відносне відхилення отриманої в результаті розрахунку ваги об'єкта від еталонної ваги цього ж об'єкта $\Delta = \max_i \left| \frac{w'_i - w_i}{w_i} \right| \cdot 100\%$. Для пошуку таких відхилень застосовується

Генетичний алгоритм. Зауважимо, що отримані таким чином значення показника ефективності є детермінованими, і тому гарантованими, значеннями, а не стохастичними, які можливо було б отримати при застосуванні статистичних підходів.

Доцільно припустити, що обчислені значення показника Δ залежать як від заданої величини δ , так і від відносних значень самих заданих еталонів. Тому, отримані значення показника подаються у вигляді графіків залежності $\Delta(\delta)$ для кожного з варіантів характерних значень еталонних ваг (рис.3). Залежність $\Delta(\delta)$ має сенс визначати для кожного з досліджуваних методів на інтервалі $\delta \in (0; 100]$, виходячи з логічного припущення, що відносна похибка оцінювання при парних порівняннях експертів

перта не перевищує 100%. Хоча, звичайно, функція $\Delta(\delta)$ визначена в більш широкому діапазоні – $\delta \in [0; \infty)$.

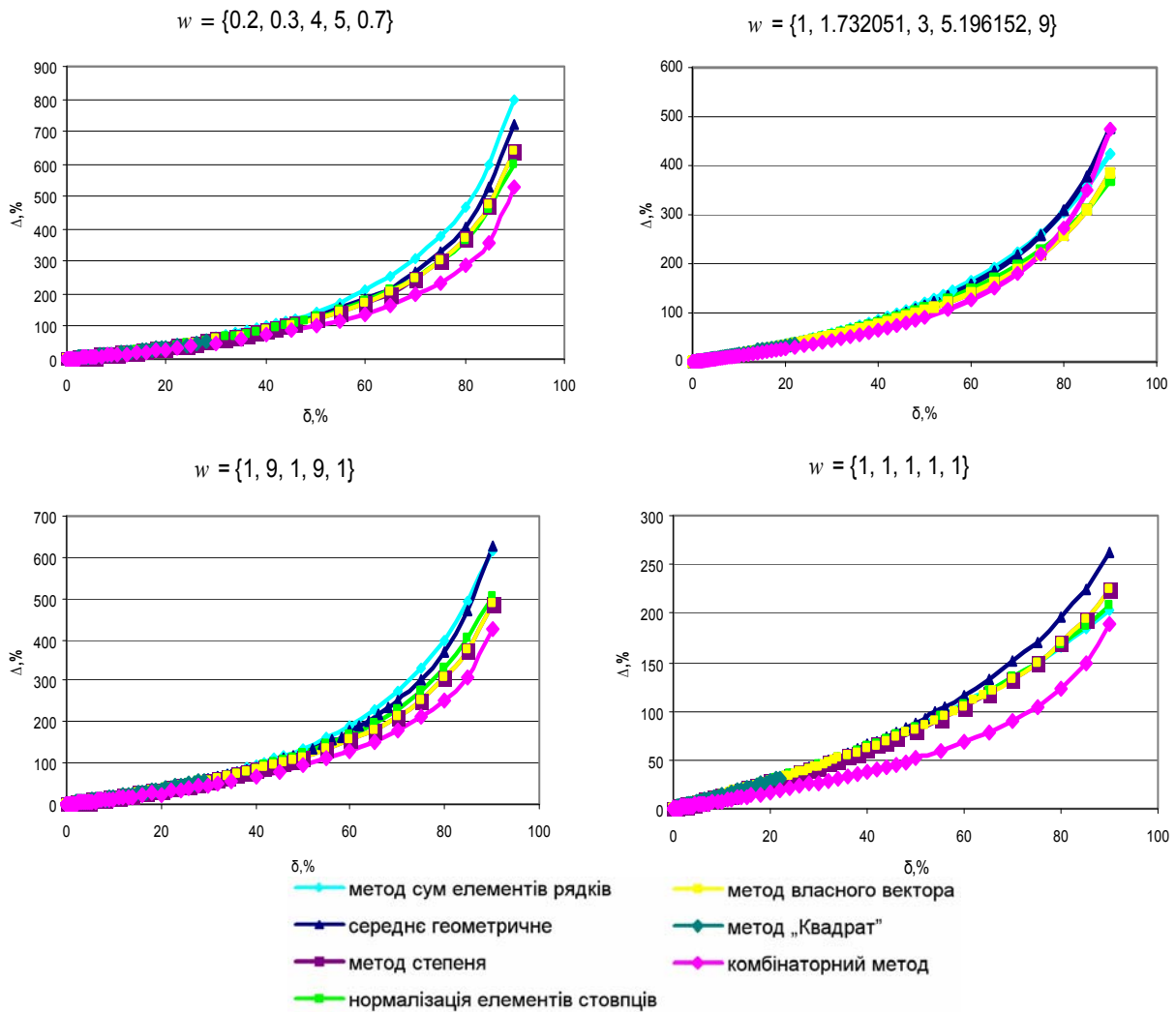


Рис. 3 Результати дослідження методів агрегації парних порівнянь

За результатами експерименту, проведеного для різних заданих наборів ваг об'єктів – w , сформульовано наступні висновки:

- підтверджено, що метод власного вектора відзначається вищими показниками за точністю, ніж знаходження ваг як геометричного середнього за рядками МПП;
- показники методу степеня, в більшості випадків, практично співпадають з показниками методу власного вектора при однакових вхідних даних;
- агрегація методом „квадрат” має сенс тільки при досягненні деякої обчисленої мінімальної узгодженості, а при $\delta > 22..30\%$ в процесі експерименту вже генеруються МПП, які не відповідають даній умові, тому область визначення функції $\Delta(\delta)$ для цього методу обмежено справа цими значеннями;
- при відносних похибках експертних парних порівнянь, менших 75%, тобто в найбільш імовірній ситуації при експертному оцінюванні, при всіх варіантах значень еталонних ваг спостерігається значна перевага ефективності методу комбінаторної обробки МПП у порівнянні з іншими методами, які представлені в експерименті;
- тільки один метод з досліджуваних (а саме, комбінаторний метод), і тільки при близьких значеннях заданих еталонних ваг (при $w = \{1, 1, 1, 1, 1\}$) і при відносних

похибках парних порівнянь менших 50%, – дозволяє одержати ваги об’єктів з відносною похибкою меншою, ніж вихідна похибка парних порівнянь.

Окрім того, запропоновано кількісний показник якості ППР. Зважаючи на відсутність еталонів оцінювання і неможливість застосування традиційних точнісних показників, це – показник стійкості оцінок варіантів рішень (незалежності їх від похибок експертів). Відповідно до двох основних класів задач ППР – ранжирування альтернатив та їх кардинального (числового) оцінювання, пропонуються два означення стійкості:

Означення 1 Під *стійкістю* отримуваних рішень *при ранжируванні* будемо розуміти властивість збереження порядку ранжирування альтернатив при наявності природних погрешностей в процесі експертного оцінювання.

Означення 2 *Стійкість* отримуваних рішень *при оцінюванні альтернатив*, – це здатність утримання отриманих оцінок у діапазоні, обмеженому наперед заданою відносною похибкою.

Для першого класу задач показником стійкості може служити ймовірність збереження порядку ранжирування, для другого – може бути ймовірність „утримання” оцінки в межах допустимого діапазону відхилення. Характерно, що незалежно від розглянутих класів, сам процес визначення показників є одним, і тим самим.

На основі аналізу методів визначення оцінок варіантів рішень та проведення відповідного дослідження, зроблено висновок, що складність мережевої структури БЗ СППР (ієрархії цілей), а, відтак, і стійкість оцінок, отриманих на її основі, залежить від довжин шляхів, що існують в ієрархії цілей від будь-якої вершини нижнього рівня в ієрархії до кореневої вершини (головної цілі). Стосовно числових показників БЗ, слід відзначити проведений аналіз залежності стійкості рішень від похибок експертів при оцінюванні ступенів впливу одних цілей на інші, тобто при визначенні часткових коефіцієнтів впливу (ЧКВ). Для забезпечення бажаної достовірності отримуваних рішень запропоновано визначити вимоги до точності методів експертного оцінювання, що застосовуються для визначення ЧКВ.

У контексті визначення показників якості ППР, особливо актуальною вбачається задача вибору методу експертного оцінювання, який має достатню точність для забезпечення заданої стійкості отримуваних оцінок варіантів рішень. Пропонується наступна постановка задачі:

Дано: сформована БЗ (ієрархія цілей) з набором ЧКВ $k_i, i \in \{1..n\}$;

Знайти: точність методу експертного оцінювання (математичне сподівання відносної похибки - M_δ), необхідну для того, щоб виконувалась умова перебування в заданих межах показника стійкості оцінок варіантів рішень.

Похибки експертів, що виникають при визначенні ЧКВ $k_i, i \in \{1..n\}$, зручно моделювати, задаючи *девіацію* ЧКВ для БЗ. В цьому випадку, девіація – це межа випадкового відхилення кожного з ЧКВ (у відсотках) від їх поточних значень. БЗ вважається підданою впливу девіації, коли кожен з її ЧКВ змінено за законом: $k_i^* = k_i + R_i \cdot k_i \cdot \Delta / 100$, де R_i – випадкова величина, рівномірно розподілена в діапазоні $[-1; 1]$.

Очевидно, що для того, щоб отримати необхідну точність для методів експертного оцінювання, що застосовуються при визначенні ЧКВ, в ієрархії цілей потрібно

знайти таку *максимальну* девіацію ЧКВ – Δ , при якій отримані оцінки варіантів рішень залишаться стійкими (тобто не виникне порушення ранжирування, або, для іншого класу задач, відхилення отриманих оцінок не перевищить задану похибку). Величину Δ для заданої БЗ запропоновано визначати методом половинного ділення (дихотомії), як відносну величину, що вимірюється відсотками. Це – ітеративний процес, який зупиняється при досягненні бажаної точності визначення девіації ЧКВ.

Виходячи з того, що порушення стійкості виникають, насамперед, при максимальних відхиленнях ЧКВ, з метою суттєвого звуження області пошуку, запропоновано обмежитись перебором лише крайніх значень ЧКВ: $k_i^* = k_i \pm k_i \Delta / 100$. Для виявлення порушень стійкості результатів при заданій девіації ЧКВ, пропонується застосування ГА з наступною постановкою задачі.

Дано: сформовану експертним шляхом БЗ, яка містить n ЧКВ; девіацію ЧКВ δ .

Знайти: таку множину значень ЧКВ, при якій спостерігається максимальне порушення стійкості результатів оцінки варіантів рішень під впливом девіації δ .

Саме при виконанні останньої умови у ході пошуку, виявлення порушення стійкості буде гарантованим. Для цього, функція корисності ГА має приймати тим більше значення, чим більше порушення стійкості спостерігається. Для задачі, що розглядається, визначення цієї функції пов'язано з виконанням алгоритму обчислення оцінок варіантів рішень з подальшим визначенням максимального відхилення отриманих значень оцінок від їхніх стабільних значень (обчислених за відсутності девіації ЧКВ – при $\delta = 0$).

Визначення максимального відхилення результатів від стабільних значень розглядається окремо для двох згаданих класів задач: пов'язаних з ранжируванням та з оцінюванням альтернатив. У першому випадку як функцію корисності в ГА запропоновано використати емпіричну функцію виду:

$$f_1 = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{a_{i+1} - a_i}{b_{i+1} - b_i}, \text{ де } a_i - \text{кардинальна оцінка альтернативи з } i\text{-м ран-}$$

гом, що отримана при відсутності девіації ЧКВ, а b_i – кардинальна оцінка альтернативи з i -м рангом, отримана при заданій множині значень ЧКВ, які були піддані впливу девіації δ , k – кількість альтернатив – цілей нижнього рівня в ієрархії цілей. Для іншого класу задач – оцінювання альтернатив, повністю задовольняє вимогам функція визначення максимальної відносної похибки:

$$f_2 = \max_i \left(\frac{|a_i - b_i|}{a_i} \right), \text{ де } a_i \text{ та } b_i - \text{кардинальні оцінки } i\text{-ї альтернативи,}$$

отримані при відсутності та при наявності девіації ЧКВ, відповідно.

Відмінністю від класичної реалізації ГА є те, що в процесі цілеспрямованого пошуку проводиться перевірка на наявність порушення стійкості оцінок варіантів рішень, і пошук припиняється, якщо таке порушення виявлено. У випадку, якщо роботу ГА завершено, і протягом пошуку порушення стійкості не виявлено, робиться висновок про стійкість рішень при заданій девіації ЧКВ δ . Отже, пошук за допомогою ГА є складовою (однією ітерацією) більш загальної задачі знаходження необхідної точності методу експертного оцінювання.

Таким чином, знайдене методом половинного ділення максимальне значення девіації ЧКВ, при якому зберігається стійкість отриманих оцінок, порівнюється з раніше експериментально визначеним математичним сподіванням відносної похибки методів експертного оцінювання – M_δ . Всі методи експертного оцінювання, у яких M_δ не перевищують знайдене значення девіації ЧКВ, є придатними в подальшому для визначення ЧКВ даної ієрархії цілей.

У випадку, якщо для даної БЗ жоден з методів експертного оцінювання не задовольняє вимогам до стійкості оцінок варіантів рішень, передбачається зробити деякі зміни в самій БЗ. Запропоновано декілька способів підвищення стійкості отримуваних оцінок варіантів рішень, пов'язаних як зі структурними змінами в БЗ (виключення лінійних ділянок з ієрархії) так і зі змінами кількісних параметрів БЗ (збільшення відмінностей між ЧКВ у ході діалогу з експертами).

У **шостому розділі** описується практичне застосування розробленого інструментарію експертної ППР, яке зводиться до розробки СППР різних класів. Оскільки ефективне застосування СППР може мати сенс лише при груповому експертному оцінюванні, одним із перших розглянутих аспектів практичного застосування технології ППР є побудова БЗ групою експертів, які дистанційно працюють у розподіленій комп'ютерній мережі. Згадану технологію реалізовано у вигляді веб-серверного програмного додатку [41].

Наступною практичною задачею ППР є оцінювання персоналу за кількісними критеріями, що реалізована у вигляді СППР «Нагляд» [39]. Дана система орієнтована як на оцінювання роботи персоналу при наявності об'єктивних документальних даних про діяльність кожного співробітника, так і на оцінювання підрозділів в рамках структур невиробничої сфери діяльності.

В рамках підходу до прийняття кадрових рішень запропоновано метод відбору кандидатів на вакантні посади, який використовує досвід ординального оцінювання персоналу. Даний метод дозволяє, на основі апарату лінійного програмування, визначити область допустимих значень коефіцієнтів вагомості критеріїв оцінки співробітників організації, і побудувати ранжирування претендентів на вакантну посаду.

Для вирішення практичних задач ППР у конфліктних ситуаціях пропонується побудова моделі протистояння (гри) із змінною силою реакції, за умови, що замість заданої платіжної матриці використовується алгоритм розрахунку ефективності ходу гравця з урахуванням передісторії ходів. Дана модель більш адекватно відображає реальні ситуації протистояння, ніж моделі ігор зі сталою силою реакції гравців, яка не залежить від поведінки гравця-суперника й фази гри. Розглянуто практичний приклад використання запропонованої моделі прийняття рішень у конфліктних ситуаціях і алгоритму вибору оптимального ходу.

Для практичного застосування в складі СППР „Солон-3” [38] реалізовано розв'язання задачі розподілу обмежених ресурсів між проектами. Задача після дискретизації вирішується за допомогою модифікованого Генетичного алгоритму. Результати роботи методу при коректному налаштуванні його параметрів співпадають з результатами прямого перебору, що перевірено на численних прикладах з обмеженою кількістю проектів та при незначній кількості заданих елементарних одиниць в загальному обсязі ресурсів.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову проблему створення інструментарію експертної ППР в слабо структурованих складних системах на основі запропонованих моделей та методів, що надає можливість підвищити достовірність рекомендацій для ОПР, шляхом наближення моделі предметної області, сформованої на основі експертної інформації, до власних уявлень експертів про дану предметну область.

У рамках виконання завдань дисертаційного дослідження отримано наступні нові наукові результати:

1. Розроблено нову модель отримання експертної інформації та на основі даної моделі – технологію експертного оцінювання, яка базується на послідовності інтерактивних діалогів з експертами, та дозволяє кожному з них досягти максимальної відповідності використовуваної ним шкали оцінювання до рівня його інформованості (компетентності) в питанні, що розглядається.
2. Для обробки групових ординальних експертних оцінок запропоновано метод визначення достатнього рівня їхньої узгодженості, та методи організації зворотного зв'язку для досягнення цього рівня узгодженості, що дозволило конструктивно використовувати ординальні ЕО у груповій експертизі.
3. Для обробки групових кардинальних експертних оцінок запропоновано сімейство авторських методів (комбінаторного типу), що базуються на урахуванні інформації про кожне з усіх покривних дерев графа, відповідного матриці парних порівнянь. Використання принципів, закладених у сімействі згаданих методів, дало змогу удосконалити визначення спектрального коефіцієнта узгодженості кардинальних ЕО та розробити метод, що дозволяє уникнути негативного явища „реверсу” рангів.
4. Розроблено метод агрегації неповних експертних індивідуальних парних порівнянь, заданих у різних за докладністю шкалах, який використовує зворотний зв'язок з експертами. Метод є узагальненням комбінаторного методу зі зворотним зв'язком з експертами для парних порівнянь, виконаних у шкалах різної докладності, з визначенням спектрального коефіцієнта узгодженості за удосконаленим алгоритмом та можливістю підвищення узгодженості групових ЕО. На основі даного методу розроблено відповідну технологію ППР.
5. Запропоновано спосіб визначення показника ефективності методів агрегації матриць парних порівнянь, який характеризує потенційну здатність методу утримувати результати в певних межах.
6. Запропоновано та обґрунтовано показник якості ППР, пов'язаний зі стійкістю отримуваних оцінок варіантів рішень. Відповідно до задач ППР отримано два варіанти цього показника: стійкість оцінок при ранжируванні – збереження порядку ранжирування альтернатив за наявності природних погрішностей у ході експертного оцінювання, та стійкість при кардинальному оцінюванні альтернатив – утримання оцінок в межах деякої заданої максимальної відносної похибки. Встановлено, що стійкість оцінок варіантів рішень залежить як від структури БЗ, так і від самих числових значень коефіцієнтів впливу, що містяться в даній БЗ. Запропоновано шляхи підвищення показника стійкості шляхом корегування числових показників і/або структури БЗ.

7. Створено імітаційну моделюючу підсистему, яка дозволяє досліджувати параметри технології ППР без залучення реальних експертів до процесу моделювання. Розроблено методи для імітації як ординальних ЕО (ранжирувань), так і кардинальних – у вигляді матриць парних порівнянь. На основі даних експерименту показано, що під час роботи в „малих” експертних групах урахування компетентності є обов’язковим.
8. Розроблено технологію побудови експертами, рознесеними територіально, моделі предметної області у вигляді БЗ СППР. Проведено експериментальне дослідження технології, яким виявлено зміну параметрів групових методів експертного оцінювання при реалізації їх у мережі Internet, у порівнянні з параметрами звичайних (немережевих) групових методів.
9. На основі розробленого інструментарію ППР реалізовані та знайшли практичне застосування ряд програмних систем різноманітного призначення: СППР „Солон-3” у складі з підсистемою розподілу ресурсів та комплексом програмних засобів для експертного оцінювання шляхом парних порівнянь „Рівень”; система розподіленого збору та обробки експертної інформації „Консенсус” – для побудови бази знань групами експертів, розподіленими в глобальній мережі; система оцінки персоналу за кількісними критеріями „Нагляд”. На базі СППР „Солон-2” реалізовано моделі ППР у конфліктних ситуаціях та прийняття кадрових рішень на основі досвіду ординального експертного оцінювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тоценко В.Г. Побудова баз знань систем підтримки прийняття рішень групами розподілених експертів / В.Г.Тоценко, В.В.Циганок, А.А.Дєєв, І.Д.Олійник // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2002. – т.4, №4. – С.120-128.
2. Тоценко В.Г. Исследование методов группового экспертного оценивания экспертами, работающими в INTERNET / В.Г.Тоценко, В.В.Цыганок, Н.В.Ивашкевич // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2004. – т.6, №2. – С.81-87.
3. Zgurovsky M.Z. Group Incomplete Paired Comparisons with Account of Expert Competence / M.Z.Zgurovsky, V.G.Totsenko, V.V.Tsyganok // Mathematical and Computer Modelling. – February 2004. – v.39, №4-5. – P.349-361.
4. Циганок В.В. Методика досліджень стійкості рішень, отримуваних цільовим методом / В.В.Циганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2007. – т.9, №4. – С.140-151.
5. Циганок В.В. Метод обчислення ваг альтернатив на основі результатів парних порівнянь, проведених групою експертів / В.В.Циганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2008. – т.10, №2. – С.121-127.
6. Тоценко В.Г. Методы реализации систем поддержки принятия решений для оценивания персонала по количественным критериям / В.Г.Тоценко, В.В.Цыганок, П.Т.Качанов, А.В.Александров // Электронное моделирование. – 2008. – Т.30, №6. – С.89-98.
7. Циганок В.В. Дослідження феномену реверсу рангів при застосуванні методів парних порівнянь / В.В.Циганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2008. – т.10, №3. – С.96-101.

8. Цыганок В.В. Об одном подходе к принятию решений в конфликтных ситуациях / В.В.Цыганок, Е.А.Егорова // Электронное моделирование. – 2009. – т.31, №1. – С.67-78.
9. Цыганок В.В. Визначення ефективності методів агрегації експертних оцінок при використанні парних порівнянь / В.В.Цыганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2009. – т.11, №2. – С.83-89.
10. Каденко С.В. Про один підхід до прийняття кадрових рішень / С.В.Каденко, В.В.Цыганок // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. – 2009. – т.11, №3. – С.66-74.
11. Цыганок В.В. О достаточности степени согласованности групповых ординальных оценок / В.В.Цыганок, С.В.Каденко // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». – 2010. – №4. – С.107-112. (Tsyganok V.V. On Sufficiency of the Consistency Level of Group Ordinal Estimates / V.V.Tsyganok, S.V.Kadenko // Journal of Automation and Information Sciences. – 2010. – v.42, issue 8. – P.42-47.)
12. Tsyganok V.V. Investigation of the aggregation effectiveness of expert estimates obtained by the pairwise comparison method / V.V.Tsyganok // Mathematical and Computer Modelling. – August 2010. – v.52, #3-4. – P.538-544.
13. Цыганок В.В. Проблема розподілу ресурсів, як розширення можливостей систем підтримки прийняття рішень / В.В.Цыганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – т.12. – №2. – С.232-237.
14. Цыганок В.В. Повышение устойчивости баз знаний систем поддержки принятия решений к погрешностям экспертного оценивания / В.В.Цыганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – т.12, №4. – С.90-96.
15. Tsyganok V. About one approach to AHP/ANP stability measurement / Vitaliy Tsyganok // International Journal of the Analytic Hierarchy Process. – 2011. – v.3, is.1. – P.46-55. (Retrieved from <http://ijahp.org/index.php/IJAHp/article/download/50/56>)
16. Цыганок В.В. Врахування компетентності експертів при визначенні групового ранжирування / В.В.Цыганок, О.В.Андрійчук // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2011. – т.13, №1. – С.94-105.
17. Цыганок В.В. Имитационное моделирование экспертных оценок для тестирования методов обработки информации в системах поддержки принятия решений / В.В.Цыганок, С.В.Каденко, О.В.Андрейчук // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». – 2011. – №6. – С.84-94. (Tsyganok V.V. Simulation of Expert Judgements for Testing the Methods of Information Processing in Decision-Making Support Systems / V.V.Tsyganok, S.V.Kadenko, O.V.Andriichuk // Journal of Automation and Information Sciences. – 2011. – v.43, issue 12. – P.21-32.)
18. Цыганок В.В. Концепція створення систем підтримки прийняття рішень, що адаптивні до рівня компетентності експертів / В.В.Цыганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2011. – т.13, №2. – С.106-114.
19. Цыганок В.В. Вибір шкали оцінювання експертом у процесі виконання ним парних порівнянь в системах підтримки прийняття рішень / В.В.Цыганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2011. – т.13, №3. – С.92-105.

- 20.Циганок В.В. Агрегація групових експертних оцінок, що отримані у різних шкалах / В.В.Циганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2011. – т.13, №4. – С.74-83.
- 21.Tsyganok V.V. Significance of Expert Competence Consideration in Group Decision Making using AHP / V.V.Tsyganok, S.V.Kadenko, O.V.Andriichuk // International Journal of Production Research. – 2012. – v.50, issue 17. – P.4785-4792.
- 22.Каденко С.В. Метод повышения согласованности индивидуальных экспертных ранжирований при их агрегации / С.В.Каденко, В.В.Цыганок // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». – 2012. – №2. – С.31-38. (Kadenko S.V. A Method for Improving the Consistency of Individual Expert Rankings during Their Aggregation / S.V.Kadenko, V.V.Tsyganok // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. – v.44, issue 4. – P.23-31.)
- 23.Циганок В.В. Експериментальний аналіз технології експертного оцінювання / В.В.Циганок, П.Т.Качанов, С.В.Каденко, О.В.Андрійчук, Г.А.Гоменюк // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2012. – т.14, №1. – С.91-100.
- 24.Циганок В.В. Елементи комбінаторного підходу при визначенні спектрального коефіцієнта узгодженості експертних парних порівнянь / В.В.Циганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2012. – т.14, №2. – С.98-105.
- 25.Andriichuk O.V. An Approach to Decision Support System Usage for Data Storage Configuration Variant Selection / O.V.Andriichuk, S.V.Kadenko, V.V.Tsyganok // Qualitative and Quantitative Methods in Libraries. – 2012. – v.1, issue 3. – P.327-333.
- 26.Цыганок В.В. Комбинаторный алгоритм парных сравнений с обратной связью с экспертом / В.В.Цыганок // СППР. Теория і практика: Збірник доповідей наук.-практ. конф. з міжнар. участю / НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем. – Київ, 2006. – С.166-169.
- 27.Циганок В.В. Оцінка стійкості рішень, отримуваних цільовим методом / В.В.Циганок // СППР. Теория і практика: Збірник доповідей наук.-практ. конф. з міжнар. участю // НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем. – Київ, 2008. – С.27-31.
- 28.Цыганок В.В. Определение эффективности методов агрегации экспертных оценок при использовании парных сравнений / В.В.Цыганок // СППР. Теория і практика: Збірник доповідей наук.-практ. конф. з міжнар. участю // НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем. – Київ, 2009. – С.47-50.
- 29.Tsyganok V. AHP/ANP stability measurement and its applications / Vitaliy Tsyganok // [Електронний ресурс]: Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. Multi-criteria Decision Making. Pittsburgh, PA, USA. 29/07 – 1/08/2009 / ISSN 1556-8296. – Режим доступу: http://www.isahp.org/2009Proceedings/Final_Papers/88_Tsyganok_Stability_Measurement_REV_FIN.pdf
- 30.Березін Б.О. Підтримка прийняття рішень при побудові систем довготермінового зберігання інформації / Б.О.Березін, П.Т.Качанов, В.В.Циганок, О.В.Андрійчук // Матеріали міжнародного форуму „Проблеми розвитку інформаційного суспільства” (Львів, 7-9 жовтня 2009р.). – К. УкрІНТЕІ, 2009. – С.145-153.
- 31.Циганок В.В. Про одну стратегію організації зворотного зв'язку з експертами при груповому ординальному оцінюванні / В.В.Циганок // СППР. Теория і практика: Збірник доповідей наук.-практ. конф. з міжнар. участю / НАН України, Інститут

32. Tsyganok V. A method for providing sufficient strict individual rankings' consistency level while group decision-making with feedback / Vitaliy Tsyganok // OR-52 Keynotes and Extended Abstracts, Operational Research Society Ltd., Royal Holloway University of London, UK (September 7-9, 2010). – London, 2010. – P.142-147.
33. Kadenko S. Decision-making Support System for Multi-criteria Personnel Evaluation / Sergey Kadenko & Vitaliy Tsyganok // Special Session on Decision Making for Sustainability: Summer School 2010, Italy. – 4 pages. – Режим доступу: http://www.ciao.it/Sustainable_development_industrial_practice_education_research_Quaderni_della_XV_Summer_School_Francesco_Turco_impianti_3243702
34. Циганок В.В. Ключові аспекти створення СППР, адаптивних до рівня компетентності експертів / В.В.Циганок // СППР. Теорія і практика: Збірник доповідей наук.-практ. конф. з міжнар. участю / НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем. – Київ, 2011. – С.42-45.
35. Tsyganok V.V. Significance of Expert Competence Consideration while Group Decision Making using AHP / V.V.Tsyganok, S.V.Kadenko, O.V.Andriychuk // Proceedings of the 11-th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process. (Sorrento, Naples, Italy. June 15-18, 2011). – Access mode: http://204.202.238.22/isahp2011/dati/pdf/154_078_Tsyganok.pdf
36. Циганок В.В. Підхід до експертного оцінювання та розробка на його основі технології підтримки прийняття рішень / В.В.Циганок // Реєстрація, зберігання і обробка даних: зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової конференції 01-02 березня 2012 року / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. – К: ІПІ НАН України, 2012. – С.148-154.
37. Панкратова Н.Д. До розробки технології підтримки прийняття рішень на рівні великих підприємств і регіонів / Н.Д.Панкратова, В.В.Циганок // СППР. Теорія і практика: Збірник доповідей наук.-практ. конф. з міжнар. участю // НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем. – Київ, 2012. – С.9-12.
38. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №8669. МОН України Державний департамент інтелектуальної власності. Комп'ютерна програма "Система підтримки прийняття рішень СОЛОН-3" (СППР СОЛОН-3) / В.Г.Тоценко, П.Т.Качанов, В.В.Циганок // зареєстровано 31.10.2003.
39. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №23927. МОН України Державний департамент інтелектуальної власності. Комп'ютерна програма „Система оцінки персоналу за кількісними критеріями «Нагляд»” / В.Г.Тоценко, В.В.Циганок, П.Т.Качанов, О.В.Александров // від 11.03.2008.
40. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №44521 Державної служби інтелектуальної власності України. Комп'ютерна програма „Комплекс програмних засобів для експертного оцінювання шляхом парних порівнянь «Рівень»” / В.В.Циганок, О.В.Андрійчук, П.Т.Качанов, С.В.Каденко // від 03.07.2012.
41. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №45894 Державної служби інтелектуальної власності України. Комп'ютерна програма „Система розподіленого збору та обробки експертної інформації для систем підтримки прийняття рішень – «Консенсус»” / В.В.Циганок, П.Т.Качанов, О.В.Андрійчук, С.В.Каденко // від 03.10.2012.

АНОТАЦІЯ

Циганок В.В. Моделі та методи експертної підтримки прийняття рішень в слабо структурованих складних системах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.04 – Системний аналіз і теорія оптимальних рішень. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” МОН України, Київ, 2013.

Дисертацію присвячено розробці теоретичних та технологічних засад експертної підтримки прийняття рішень та створенню відповідного інструментарію для застосування у слабо структурованих предметних областях (складних системах). Такі системи характеризуються недостатністю об’єктивної інформації для прийняття рішень, коли єдиним джерелом інформації є експерти – компетентні спеціалісти, наділені знаннями, досвідом, інтуїцією. На основі запропонованих моделей та методів розроблено інструментарій, який дозволяє підвищити достовірність рекомендацій для осіб, що приймають рішення, за рахунок поліпшення відповідності моделей предметних областей власним уявленням експертів, залучених до побудови цих моделей. Поліпшення відповідності забезпечується шляхом надання експертам можливості використовувати для кожного окремого парного порівняння шкалу, яка найкращим чином відповідає рівню їхньої інформованості (компетентності) у питанні, що розглядається. Розроблено ефективні методи отримання, обробки, узагальнення інформації при проведенні таких експертиз, та показник якості прийняття рішень, який ґрунтується на стійкості одержаних оцінок.

Ключові слова: слабо структурована складна система, база знань предметної області, підтримка прийняття рішень, експертні оцінки, парні порівняння, шкали експертного оцінювання.

АННОТАЦИЯ

Цыганок В.В. Модели и методы экспертной поддержки принятия решений в слабо структурированных сложных системах. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 01.05.04 – Системный анализ и теория оптимальных решений. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт” МОН Украины, Киев, 2013.

Диссертация посвящена разработке теоретических и технологических основ экспертной поддержки принятия решений (ППР) для применения в слабо структурированных предметных областях (сложных системах). Для таких систем характерным является недостаток объективной информации для принятия решений, когда единственным источником информации являются эксперты – компетентные специалисты, наделенные знаниями, опытом, интуицией.

Создан инструментарий ППР, позволяющий повысить достоверность рекомендаций лицам, принимающим решения, за счет улучшения соответствия моделей предметных областей собственным представлениям экспертов, привлекаемых к построению этих моделей. Уровень соответствия повышается за счет предоставления эксперту возможности избегать искажений информации при ее вводе в базу знаний. Искажения исключаются благодаря обеспечению строгого соответствия между

уровнем осведомленности эксперта в рассматриваемом вопросе и степенью информативности используемой шкалы экспертного оценивания.

В основу технологии ППР положена разработанная модель получения экспертной информации и, созданная на ее основе, технология группового экспертного оценивания, предоставляющая экспертам возможность использовать для каждого отдельного парного сравнения вербальную шкалу, наилучшим образом соответствующую уровню их информированности (компетентности) в рассматриваемом вопросе. В результате проведенного экспериментального исследования подтверждены преимущества предложенной технологии перед другими, используемыми для сравнения.

Разработан ряд эффективных методов обработки групповых ординальных и кардинальных экспертных оценок, которые нашли свое применение в технологии ППР. Среди них – метод определения уровня достаточной согласованности ординальных экспертных оценок (ранжирований) для возможности их последующего агрегирования. Метод основан на обнаружении нарушений транзитивности в итоговом отношении. Также, разработаны методы, использующие обратную связь с экспертами для улучшения согласованности индивидуальных ранжирований и достижения достаточного ее уровня, что позволило в полной мере использовать аппарат ординального оценивания при экспертной ППР.

Предложено семейство авторских методов комбинаторного типа для обработки индивидуальных кардинальных экспертных оценок – результатов парных сравнений, включая метод, позволяющий избежать негативного явления «реверса» рангов, присущего большинству методов агрегации парных сравнений. Используя идею, положенную в основу комбинаторных методов, об учете информации обо всех остовных деревьях графа, отвечающего матрице парных сравнений, разработан метод агрегации неполных индивидуальных парных сравнений, заданных в шкалах различного уровня информативности, который использует обратную связь с экспертами для достижения уровня согласованности их оценок, достаточного для агрегации. Кроме того, предложен механизм оценивания методов агрегации матриц парных сравнений на предмет выполнения ими (методами) своего основного назначения – повышения достоверности экспертного оценивания. Соответствующий показатель эффективности методов агрегации характеризует потенциальную способность метода удерживать свои результаты в некоторых пределах.

Усовершенствован спектральный метод определения уровня согласованности матриц парных сравнений. За счет более полного использования информации, заложенной в матрицах, удалось повысить достоверность определения уровня их согласованности, что позволило сократить количество повторных обращений к экспертам при организации обратной связи.

Разработан показатель качества принятия решений, основанный на устойчивости полученных оценок вариантов решений. В соответствии с задачами ППР предложено два варианта этого показателя: устойчивость при ранжировании альтернатив – сохранение ранжирования при наличии естественных погрешностей в процессе экспертного оценивания, и устойчивость при кардинальном оценивании альтернатив – удержание оценок в пределах некоторой заданной максимальной относительной погрешности. Предложены пути повышения данного показателя.

Создана имитационная моделирующая подсистема, позволяющая исследовать параметры технологии ППР без привлечения реальных экспертов к процессу моделирования. В рамках подсистемы разработаны методы имитации как ординальных, так и кардинальных экспертных оценок.

Разработан механизм построения модели предметной области и, на его основе, создана технология группового, территориально распределенного построения баз знаний систем ППР. Технология предоставляет участникам экспертизы возможность дистанционной работы и самостоятельного планирования рабочего графика, что существенно повышает эффективность проведения экспертиз.

На основе предложенных в диссертационном исследовании методов и моделей реализовано ряд систем разнообразного назначения, среди которых: система ППР «Солон-3» в составе с подсистемой распределения ресурсов и комплексом программных средств для экспертного оценивания путем парных сравнений «Ривэнь», подсистема распределенного сбора и обработки экспертной информации «Консенсус» для построения базы знаний распределенными в глобальной сети группами экспертов, система оценки персонала за количественными критериями «Нагляд». На базе системы ППР «Солон-2» реализована модель ППР в конфликтных ситуациях и модель принятия кадровых решений на основе опыта ординального экспертного оценивания. Созданные программные системы нашли практическое применение в Украине и за рубежом.

Ключевые слова: слабо структурированная сложная система, база знаний предметной области, поддержка принятия решений, экспертные оценки, парные сравнения, шкалы экспертного оценивания.

ANNOTATION

Tsyganok V.V. Models and methods of expert decision-making support for weakly-structured complex systems. – Manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of engineering sciences, specialty 01.05.04 – System analysis and optimal decisions theory. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” of MES of Ukraine, Kyiv, 2013.

The dissertation is focused on development of theoretical and technological principles for creating decision support tools to be used in weakly structured domains (complex systems). Such systems are intended for usage under lack of objective information for decision-making, when experts, competent professionals endowed with knowledge, experience and intuition, are the only information source. Developed tools enhance the reliability of recommendations given to decision-makers through improving the compliance of domain models with individual judgments of experts involved in these models creation. Compliance is enhanced through providing experts with an opportunity to use the scale that best fits the level of their competency in the issue under consideration for each specific pair comparison. Efficient methods for collection, processing and aggregation of information during carrying out of such expert examinations, and decision-making quality indicator, based on estimate stability, are developed.

Keywords: weakly structured complex system, knowledge base of subject domain, decision-making support, expert estimates, paired comparisons, expert evaluation scales.