

Міністерство освіти і науки України
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Роїк Павло Дмитрович



УДК 519.816, 004.9

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ УЗГОДЖЕНОСТІ ЕКСПЕРТНИХ
ОЦІНОК ПРИ ПІДТРИМЦІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ**

Спеціальність 05.13.06 – Інформаційні технології

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Циганок Віталій Володимирович,
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України,
завідувач відділу інтелектуальних технологій підтримки
прийняття рішень

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Недашківська Надія Іванівна,
Інститут прикладного системного аналізу Національного
технічного університету «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри математичних методів системного аналізу

кандидат технічних наук
Гнатієнко Григорій Миколайович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
заступник декана з наукової роботи факультету
інформаційних технологій.

Захист відбудеться 07 березня 2024 року об 11 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.861.05 у Державному університеті інформаційно-комунікаційних
технологій за адресою: 03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7, конференц-зал.

З дисертацією можна ознайомитись на офіційному сайті <https://duikt.edu.ua> та у
бібліотеці Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій за
адресою: 03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.861.05
кандидат педагогічних наук, доцент



В.О. Корецька

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

При підтримці прийняття рішень (ППР) для забезпечення належного рівня їх якості важливо, щоб адекватність моделей слабо структурованих предметних галузей, на основі яких генеруються рішення, була високою. Для забезпечення достатнього рівня адекватності таких моделей складних систем, при їх побудові, неможливо нехтувати експертними знаннями, частка яких для будь-якої галузі дуже значна. У ході експертної ППР адекватність моделей забезпечується завдяки належній достовірності експертних оцінок, що отримуються у ході експертиз. Необхідний рівень достовірності досягається шляхом узагальнення надлишкової експертної інформації. Надлишковість інформації притаманна як груповим експертизам, де оцінка більше ніж одного експерта характеризує оцінюваний об'єкт, так і індивідуальним експертним оцінюванням, коли єдиний експерт виконує попарні порівняння об'єктів (альтернатив) і відносна вага кожного об'єкта визначається більше ніж одним попарним порівнянням.

Результатами експертизи, які отримуються внаслідок агрегації надлишкової експертної інформації є нові знання, що лягають в основу моделі певної предметної галузі (складної слабо структурованої системи). Проблемна ситуація полягає в тому, що узагальнювати (агрегувати, усереднювати) інформацію доцільно лише, якщо множина оцінок є у достатній мірі узгодженою. Інакше, при наявності значної кількості протиріч, може виникати ситуація на кшталт «середньої температури пацієнтів у лікарні», коли ця усереднена величина є неінформативною і не відображає суть процесів у системі.

Отже, у ході експертної ППР повсякчас постає завдання забезпечення достатнього рівня узгодженості експертних оцінок перед їх агрегацією, що безпосередньо впливає на достовірність експертиз і опосередковано – на якість рекомендацій, що генеруються системами підтримки прийняття рішень (СППР) та надаються особам, що приймають рішення (ОПР). Тому, дуже важливим аспектом проведення експертиз є визначення узгодженості суджень експертів, а також визначення рівня узгодженості, достатнього для агрегації експертних оцінок. Визначення цих величин є необхідним для того, щоб у випадку недостатньої узгодженості була б можливість організувати процес підвищення узгодженості експертних оцінок до бажаного рівня.

Характеризуючи теперішній стан досліджень у цій галузі за кордоном, варто відзначити результати таких учених, як T.Saaty, P.Harker, L.Vargas, F.Liu, J.Xu, W.Zhang, H.Li, U.Dong, Y.Iida, W.Koczkodaj, G.Kou, D.Ergu, M.Brunelli, M.Fedrizzi, S.Siraj, L.Mikhailov, J.Keane, L.Csató, J.Szybowski, J.Aguarón та ін. стосовно визначення (не)узгодженості експертних оцінок, отриманих у ході попарних порівнянь, зокрема при застосуванні методу аналізу ієрархій. Питання визначення порогів достатньої узгодженості для попарних порівнянь піднімались S.Bozóki, J.Aguarón, J.M.Moreno-Jiménez, F.Liang, M.Brunelli, J.Rezaei, Z.Wu, B.Jin, H.Fujita, J.Xu та ін. Щодо узгодженості при застосуванні експертних оцінок різних типів дослідження проводились J.LeBreton, J.Senter, L.James, M.Lindell, B.Klemens, R.Brown, N.Hauenstein, M.Burke, L.Finkelstein, M.Dusig, L.James, R.Demaree, G.Wolf, A.Olenko та ін.

В Україні дослідження за спорідненими тематиками здійснюються, зокрема, в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка та в Інституті прикладного системного аналізу при НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» НАН України та МОН України. З-поміж вітчизняних науковців, які проводили та проводять споріднені дослідження, варто згадати В.Г.Тоценка, М.З.Згуровського, Н.Д.Панкратову, Н.І.Недашківську, О.Ф.Волошина, Г.М.Гнатієнка, В.Є.Снитюка, В.В.Циганка та ін.

На сьогодні наявна велика кількість різних індексів узгодженості експертних оцінок. Багато з них базуються на використанні статистичних показників, але такий підхід вбачається не досить доцільним для експертиз у малих групах та з обмеженням максимальної кількості одноразово оцінюваних об'єктів (альтернатив) до 7 ± 2 , оскільки, у таких випадках, множина оцінок не є репрезентативною вибіркою у статистичному сенсі. Ряд інших показників узгодженості пристосовані для визначення узгодженості оцінок лише певного типу, наприклад, оцінок у дискретних шкалах, або не пристосовані для вимірювань серед порядкових (ординальних) оцінок, чи не можуть застосовуватись для відносних оцінок, які характерні для попарних порівнянь. Особливої важливості приймають відповідні властивості показників, що дають змогу визначення узгодженості експертних оцінок, які задані в різних (вербальних, відносних, адитивних, ординальних тощо) шкалах, що приведені до єдиної чисельної шкали та/або мають різний рівень довіри до них (наприклад, через різний рівень компетентності експертів, що їх надали). Важливо також, щоб підходи до визначення узгодженості, при необхідності, дозволяли організувати зворотний зв'язок з експертом та підвищити узгодженість оцінок без їх спотворення та без спричинення тиску на експерта.

В цілому ж, слід зазначити, що у той час, як у ході ППР на основі обробки експертних оцінок окремих типів – ординальних та кардинальних, абсолютних та відносних (зокрема заданих у вигляді повних та неповних матриць попарних порівнянь), мультиплікативних та адитивних, чітких та нечітких, індивідуальних та групових – застосовується ціла низка методів визначення узгодженості, конкретних методів, які б задовольняли усім вище згаданим вимогам і дозволяли експертам підвищувати перед агрегацією узгодженість своїх оцінок, – не розроблялося.

Все вищенаведене обумовлює необхідність вирішення важливого актуального **науково-технічного завдання** – розробки методу підвищення рівня узгодженості експертних оцінок без їх спотворення та спричинення тиску на експертів, з можливістю урахування рівня їхньої компетентності (інформованості) щодо конкретного питання експертизи, що дає можливість створювати більш адекватні моделі предметних областей та підвищувати достовірність рекомендацій, наданих ОПР.

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:

- «Теоретичні та технологічні засади експертної підтримки прийняття рішень при побудові стратегічних планів» (Шифр «Стратегія»); державний реєстраційний номер 0115U002075;
- «Розробити методи отримання, обробки та застосування знань різної природи при

підтримці прийняття рішень у соціотехнічних системах» (Шифр «Трансфер»); державний реєстраційний номер 0118U000055.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення якості наданих СППР рекомендацій, що формуються на основі побудованих експертним шляхом моделей слабо структурованих предметних галузей, що є складними системами. Адекватність таких моделей досягається шляхом підвищення достовірності узагальненої експертної інформації, яка, у значній мірі, залежить від узгодженості експертних оцінок перед їх агрегацією.

Досягнення цієї мети потребує виконання наступних завдань:

- 1) Проаналізувати наявні методи визначення та підвищення узгодженості експертної інформації.
- 2) Сформулювати вихідні положення, на основі яких має бути розроблений індекс узгодженості експертних оцінок та метод його підвищення.
- 3) Розробити метод визначення узгодженості, що задовольняє поставленим вимогам.
- 4) Розробити та дослідити метод визначення рівня узгодженості, достатнього для агрегації експертних оцінок.
- 5) Розробити та дослідити метод підвищення узгодженості, що передбачає діалог з експертами для досягнення достатнього її рівня за умови недопущення спотворення експертних оцінок та зменшення тиску на експертів.

Об'єкт дослідження – процеси експертного оцінювання та узгодження оцінок.

Предмет дослідження – методи визначення узгодженості та рівня достатньої узгодженості для агрегації експертних оцінок, а також, методи підвищення узгодженості.

Методи дослідження: системна методологія (використовується в рамках інформаційної технології групової побудови моделі предметної галузі), методи теорії матриць, графів, множин (застосовуються при розробці методів визначення узгодженості експертних оцінок), оптимізації, математичної статистики (застосовуються при дослідженні розроблених методів на предмет їх задоволення поставленим вимогам), та ін.

Наукова новизна результатів, одержаних у ході вирішення науково-технічного завдання, полягає в наступному:

- 1) Удосконалено метод визначення узгодженості експертних оцінок, що ґрунтується на мінімізації суми відстаней між попарно взятими оцінками та на відміну від наявних методів є інваріантним по відношенню до параметрів експертизи (кількості експертів, типів оцінок, діапазонів шкал оцінювання та самих значень оцінок) та дозволяє застосовувати поряд із дискретними і неперервними чисельними шкалами оцінювання.
- 2) Розроблено новий метод визначення порогу узгодженості, необхідного для агрегації експертних оцінок, який ґрунтується на імітації експертних оцінок та, на відміну від класичного підходу, дозволяє визначати поріг у залежності від заданого необхідного рівня достовірності результатів експертизи.
- 3) Розроблено метод підвищення узгодженості експертних оцінок для досягнення достатнього для їх агрегації рівня узгодженості, визначеного за допомогою запропо-

нованого нового методу. Запропонована процедура повторного звернення до експерта, на відміну від існуючих застосувань, не інформує експерта про напрямок бажаної для підвищення узгодженості зміни його попередньої оцінки, що дозволяє зменшити на нього тиск, спричинений прагненням експерта до швидшого результативного завершення сеансу експертизи.

Практичне значення одержаних результатів.

Запропонований метод реалізовано у складі інтелектуальної інформаційної технології моделювання предметної галузі групами експертів, розподілених у глобальній комп'ютерній мережі реалізована як веб-додаток до СППР у вигляді підсистеми розподіленого збору та обробки експертної інформації «Консенсус-2» [6].

Система «Консенсус-2» знайшла практичне застосування при проведенні групових експертиз в межах навчальних курсів для аналітиків Военної академії імені Євгенія Березняка.

Результати дисертації застосовувались у ході наукових досліджень та при формуванні заключних звітів про науково-дослідні роботи у 2018 році шифр «Економіка-20» та шифр «Плановик» Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України.

Окрім того, результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі факультету інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка при курсовому та дипломному проектуванні, для систематизації отриманих знань, застосовуючи систему «Консенсус-2» при викладанні навчальних дисциплін «Високопродуктивні обчислення» та «Стратегічний бізнес аналіз».

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У роботах, виконаних у співавторстві, автору належать: в [1] – реалізація інструментарію узгодження оцінок для підтримки прийняття рішень, алгоритму оптимального розподілу ресурсів; в [2] – виконано реалізацію процедури узгодження для підтримки прийняття рішень, інтерфейсу та логіки роботи системи стратегічного планування; в [3] – ідея визначення узгодженості експертних оцінок та організації зворотного зв'язку з експертами для підвищення узгодженості. Реалізація методу в рамках системи «Консенсус-2»; в [4] – проведено експериментальне дослідження порівняння наявних методів з запропонованим, визначено аксіоматику та доведено основні положення щодо визначення узгодженості експертних оцінок; в [6] внесок дисертанта – інтерфейс системи, реалізація технології розподіленої роботи експертів; в [7] аналіз технології на предмет необхідності вимірювання узгодженості; в [8] – реалізація методу визначення узгодженості та дослідження в системі підтримки прийняття рішень; в [9] – реалізація методу підвищення узгодженості для застосування в рамках платформи трансферу знань; в [12] – ідея методу визначення узгодженості для групових оцінювань та урахування компетентності; в [13] – визначення узгодженості оцінок в рамках методу агрегації неповних групових парних порівнянь; в [14] – визначення узгодженості при оцінюванні комбінаторного методу агрегації попарних порівнянь; в [15] – реалізація прототипу програмної системи відтворення технології генерування сценаріїв та визначення узгодженості при організації експертиз, в [16] – реалізація апарату когнітивних карт при визначенні адекватності моделей, в

[17] – експериментальний аналіз збіжності методу цільового динамічного оцінювання альтернатив.

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

- VIII міжнародна школа-семинар «Теорія прийняття рішень» (м. Ужгород, 2016 р.);
- 20-а міжнародна конференція Системний аналіз та інформаційні технології – САІТ 2018 (м. Київ, 2018 р.);
- IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing – SAIC 2018 (м. Київ, 2018 р.);
- Низка семінарів «Системні дослідження та інформаційні технології» (Учбово-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу» при НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2017-21 рр.);
- Щорічна підсумкова наукова конференція Інституту проблем реєстрації інформації НАН України (м. Київ, 2016-23 рр.);
- Міжнародна науково-практична конференція Інформаційні технології та безпека, – ІТБ-2017–ІТБ-2022 (м. Київ, 2017-22 рр.) .

Публікації. Результати дисертації викладені в 17 публікаціях, зокрема в 5 статтях у фахових наукових виданнях (з них 1 – в іноземному виданні, що включене до міжнародної наукометричної бази Scopus), тезах 11 доповідей наукових конференцій (з них 2 включені до міжнародної наукометричної бази Scopus) та 1 свідоцтві про реєстрацію авторського права на твір.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 128 найменувань, додатків. Обсяг основної частини – 109 сторінок. Робота містить 48 рисунків і 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дана загальна характеристика роботи, висвітлено стан наукової проблеми, обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета і завдання дослідження. Показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, відображено наукову новизну, практичне значення роботи й отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведені дані про структуру дисертації, апробацію її результатів і публікації.

У **першому розділі** «Аналіз наукових джерел та постановка завдання дослідження», базуючись на вітчизняних та міжнародних публікаціях в галузі дослідження операцій, експертної підтримки прийняття рішень визначено клас задач, які вирішуються за допомогою СППР. Подано спрощену схему обробки інформації у ході ППР. У схему увійшли наступні складові (відповідно до етапів обробки інформації): відбір експертів для участі в експертизі, включаючи оцінку їхньої компетентності, отримання від експертів знань про предметну галузь, обробка і узагальнення знань у ході побудови моделі предметної області – складної системи, оцінка варіантів рішень на основі цієї моделі, застосування результатів оцінювання. Саме етап отримання експертних знань є предметом розгляду дисертаційного дослідження.

Зважаючи на ряд особливостей слабо структурованих предметних областей, де застосовуються СППР та спираючись на факт, що значна частка знань, на основі яких створюються моделі є неформалізованими і не зареєстровані на носіях інформації, а є лише в уяві вузько профільних спеціалістів, немає можливості створити адекватну модель предметної галузі і у повній мірі вирішувати поставлені задачі ППР без залучення експертів.

Для підвищення достовірності оцінок експертів шляхом надання деякої надлишкової інформації передбачається застосовувати попарні порівняння об'єктів та групу експертизу. Окрім того, при експертному оцінюванні, пропонується застосування виключно вербальних шкал, оскільки людині-експерту зручніше оперувати нечисловими даними. Як кількість об'єктів, які подаються експертові для оцінювання, так і кількість поділок шкал оцінювання, прийнято обмежувати значенням 7 ± 2 , згідно з психофізичними обмеженнями короткотермінової пам'яті людини щодо одночасного запам'ятовування та відтворення об'єктів.

Зазначена модель експертного оцінювання, з урахуванням позиції творця методу аналізу ієрархій Томаса Сааті та його школи, в рамках даного дослідження, обумовлює застосування чітких оцінок. Оскільки ця модель відносних вимірювань, у якій аксіоматично передбачається, що судження про переваги об'єктів подаються засобами обмеженої вербальної шкали, врешті решт, сама по собі, є досить нечіткою, то подальша її фазифікація (fuzzification) є недоцільною. Хоча, засоби експертного оцінювання з використанням вербальних шкал різної докладності, що запропоновані у докторській дисертації наукового керівника В.В.Циганка, можуть описуватись в термінах нечіткої логіки.

На основі аналізу наукових літературних джерел показано, що при експертній ППР на основі цільових методів ієрархічної декомпозиції та методів багатокритеріального аналізу рішень потрібно узагальнювати експертні оцінки різних типів. Для отримання достовірних результатів при агрегації необхідно, щоб оцінки були достатньо узгодженими, в іншому випадку, потрібно перед агрегацією підвищити узгодженість експертних оцінок до заздалегідь визначеного рівня.

Підвищення узгодженості може здійснюватися різними способами, наприклад, шляхом виключення найбільш віддалених оцінок, так званих «викидів», шляхом доповнення відсутньої експертної інформації значеннями оцінок, що найбільш узгоджуються з наявними оцінками. В рамках даного дослідження ці способи вважаються неприйнятними, оскільки вони або спотворюють інформацію надану експертами, або додають оцінки, що не належать жодному із них.

Практика застосування групових експертиз показує, що оцінювання здебільшого проводяться в рамках малих груп, що представлені декількома спеціалістами-експертами в певній області. У багатьох випадках оцінки експертів (їхні переваги, судження, тощо) можуть бути між собою недостатньо узгодженими для того, щоб у результаті їхнього подальшого узагальнення (агрегації) можливо було б отримати достовірні результати. Окрім того, у ході проведення експертиз при застосуванні попарних порівнянь також може виникати узгодженість між окремими порівняннями (оцінками) певного експерта, таку (не)узгодженість прийнято називати внутрішньою. Обидва види узгодженості впливають на достовірність оцінювань і, тим самим, на якість рекомендацій, що генеруються СППР та надаються ОПР.

Проведений аналіз публікацій свідчить про те, що попри наявну велику кількість методів визначення рівня узгодженості, всі вони містять істотні недоліки, ряд з яких призводять до неможливості застосування, інші – суттєво знижують достовірність результатів експертних оцінювань. Неможливість застосування деяких методів стається через їхню пристосованість до визначення узгодженості оцінок лише певного типу. Серед недоліків, що характерні певним методам і знижують достовірність експертних оцінювань, слід зазначити наступні: високу розбіжність значень для різних вибірок оцінок без гарантії однорідного визначення узгодженості та безперервності; неочікувану поведінку при зміні розміру шкали; неможливість розрізнити деякі характерні розподіли експертних оцінок; неможливість масштабування; немонотонність функції рівня узгодженості; залежність рівня узгодженості від зсуву оцінок на шкалі тощо.

Найбільш обґрунтованим підходом до визначення узгодженості експертних оцінок в задачах, пов'язаних з застосуванням методів системної декомпозиції при побудові моделей складних систем є застосування спектрального підходу і розробленого на його основі коефіцієнта узгодженості, запропонованих В.Г.Тоценком. Підхід полягає в застосуванні індексу (коефіцієнта) узгодженості, що є згорткою суми відхилень від середнього арифметичного оцінок – складових «спектра» (аналога дисперсії сигналу) і ентропії Шеннона, обчисленої за цією самою множиною оцінок. Значним досягненням цього підходу є обґрунтованість граничних значень узгодженості – так званих порогів виявлення та застосування. Досягнення порогу застосування дозволяє агрегацію експертних оцінок, а рівні індексу, що є нижчими порогу виявлення – не несуть інформації, тому потребують проведення повторного оцінювання.

На противагу обґрунтованості цього підходу, значної критики зазнав в літературі підхід до визначення узгодженості, що застосовуються в методі аналізу ієрархій: індекс узгодженості (Consistency Index – CI) та коефіцієнт узгодженості (Consistency Ratio – CR) зі своїм емпіричним правилом 10%, і навіть сам автор – Сааті пізніше запропонував додаткові порогові значення 5% і 8% для 3 і 4 критеріїв відповідно, хоча це не додало обґрунтованості.

Хоча підхід Тоценка набув значного розповсюдження завдяки роботам вітчизняних науковців з його школи: розширення для оцінювань з урахуванням компетентності, побудова спектру оцінок на основі перебору покривних дерев та варіант застосування для нечітких експертних оцінок, деякі вади спектрального коефіцієнта були виявлені А.Оленком та В.Циганком. З їх пропозиції було внесене коригування, що залишає значення індексу узгодженості в допустимих границях при будь-яких вхідних значеннях, але немонотонна залежність індексу від суми відхилень (дисперсії) оцінок залишилась серед недоліків.

Спектральний підхід до визначення узгодженості було взято за основу згаданими науковцями при створенні індексу подвійної ентропії (double entropy index), цей індекс враховує міру інформації (ентропію) оцінок, а також їхніх частот. Немонотонність теж стала його головним недоліком, тобто при віддаленні однієї оцінки у спектрі від основної множини оцінок індекс може спочатку зменшуватись, а далі починає зростати.

Виходячи з аналізу наукових джерел, в основу розробки методу було покладено спектральний підхід до визначення узгодженості, що є найбільш обґрунтованим та

пристосованим для вирішення задачі дослідження.

Постановку задачі можна подати наступним чином:

Дано множини експертних оцінок, що попередньо приведені до єдиної чисельної шкали з урахуванням ваг оцінок, яка представлена у вигляді відповідного спектрального розподілу оцінок.

Потрібно визначити рівень узгодженості множини оцінок, поріг узгодженості, достатній для агрегації множини оцінок і у випадку недостатньої узгодженості – підвищити узгодженість множини оцінок за допомогою зворотного зв'язку з експертом.

У другому розділі «Визначення та підвищення узгодженості експертних оцінок», розглядаються розроблені дисертантом нові методи узгодження експертних оцінок, що застосовуються при ППР. У цьому дослідженні пропонується використати спектральний підхід до подання експертних оцінок. Сутність цього підходу полягає у формуванні множини оцінок та поданні її у вигляді складових на обмеженій з обох кінців дискретній шкалі. Кожну цю складову можна поставити у відповідність оцінці, наданій деяким експертом при груповій експертизі. Набір таких складових зручно зображати у вигляді, так званого, спектру оцінок. Приклад зображення спектру, що відповідає множині оцінок $\{2,2,2,2,3,4,4,4,4,4,4,4,4,5,5,5\}$, наданих різними експертами,

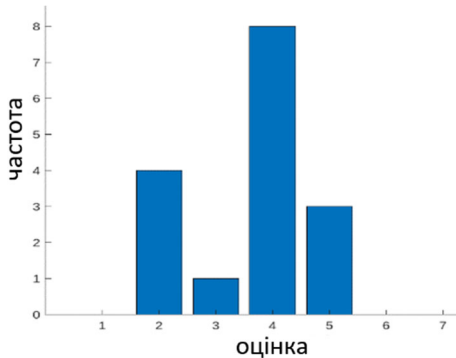


Рис. 1. Спектр оцінок

показано на рис.1.

При розробці методу визначення ступеня узгодженості взято до уваги наступні базові постулати:

1. При експертному оцінюванні завжди існує деяка «істинна» оцінка, визначення якої є метою проведення групової експертизи.
2. Ця «істинна» оцінка відповідає деякому усередненому значенню множини індивідуальних оцінок експертів.
3. Множину індивідуальних експертних оцінок можливо подати на обмеженій з обох сторін чисельній неперервній або дискретній шкалі.
4. Максимальний рівень узгодженості (1.0) досягається тоді, і тільки тоді, коли всі експерти вибрали одну й ту ж саму оцінку.
5. Індекс узгодженості повинен бути незалежним від зсувів оцінок, тобто множина оцінок $\{1,2,5\}$ матиме той самий індекс, що й $\{4,5,8\}$.
6. При одній, і тій самій множині оцінок, збільшення розміру шкали приводить до підвищення індексу узгодженості, і навпаки.
7. Незалежність від розміру шкали: якщо деяка множина оцінок більш узгоджена, ніж інша в певній шкалі, то вона є більш узгодженою і в будь-якій іншій шкалі.
8. Індекс має мати властивість масштабованості: при лінійних змінах (одночасному пропорційному збільшенні/зменшенні) розмірів шкали і значень усіх оцінок індекс узгодженості залишається незмінним.

Пропонується індекс узгодженості подати у вигляді наступного виразу:

$$I = 1 - \frac{\sum_{i \neq j} f(|x_i - x_j|)}{M}, \quad (1)$$

де x_i – оцінка i -го експерта, M – значення для найбільш неузгодженого випадку, тобто максимальне значення $\sum_{i \neq j} f(|x_i - x_j|)$.

Отже, індекс узгодженості – це одиниця мінус нормована сума функцій від відстані між оцінками для усіх можливих пар оцінок експертів. Функція f має мати таку властивість: $f(x) > 0$, якщо $x > 0$ та $f(x) = 0$, якщо $x = 0$. Розглядаються функції $f(x) = x^2$ та $f(x) = |x|$. За викладених вище умов, $I \in [0,1]$ і мінімум досягається тоді, і тільки тоді, коли всі змінні (оцінки) рівні. Окрім того, для обох цих функцій максимум I досягається тоді, коли половина оцінок лежить на одному кінці шкали, інша – на іншому. У випадку, коли кількість оцінок непарна, «зайва» оцінка може бути на будь-якому з кінців інтервалу.

Визначення цього максимуму в певному сенсі йде врозріз із підходами тих авторів, які вважають, що максимум повинен досягатися, коли всі оцінки рівномірно розподілені за всією шкалою. Але на практиці не дуже важливо, де функція досягає максимуму, оскільки всі випадки високої неузгодженості, описані вище (та інші), не можуть використовуватися для подальшої агрегації оцінок експертів. Узгодженість у цих випадках необхідно підвищувати; важливо лише, щоб функція задовольняла базовим постулатам.

Тепер визначимо формально, який саме набір оцінок є найбільш неузгодженим для запропонованого індексу узгодженості. Для цього, очевидно, потрібно знайти максимум $\sum_{i \neq j} f(|x_i - x_j|)$. Оскільки, в залежності від функції f , максимум буде різним, проведемо аналіз, коли $f = x^2$ (варто одразу зазначити, що для функції $f = |x|$ результат буде таким самим).

Отже, визначимо максимум функції $F = \sum_{i \neq j} (x_i - x_j)^2$.

Нехай маємо n експертів, що дають оцінки на шкалі $[1, s]$, нехай $x_i, x_i \in [1, s], i = \overline{1..n}$ – оцінка i -го експерта. Без втрати загальності будемо вважати, що $x_i \leq x_{i+1}, i = \overline{1..n-1}$.

Розглянемо наступну задачу:

$$\sum_{i \neq j} (x_i - x_j)^2 \rightarrow \max_{i, j = \overline{1..n}} \quad (2)$$

$$x_i \leq x_{i+1}, i = \overline{1..n-1} \quad (3)$$

$$x_1 \geq 1 \quad (4)$$

$$x_n \leq s \quad (5)$$

Перепишемо задачу у наступному вигляді:

$$\sum_{i \neq j} (x_i - x_j)^2 \rightarrow \max_{i, j = \overline{1..n}} \quad (6)$$

$$x_{i+1} - x_i \geq 0, i = \overline{1..n-1} \quad (7)$$

$$x_1 - 1 \geq 0 \quad (8)$$

$$s - x_n \geq 0 \quad (9)$$

Лагранжیان має наступний вигляд:

$$L = \sum_{i \neq j} (x_i - x_j)^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \mu_i (x_{i+1} - x_i) + \alpha (x_1 - 1) + \beta (s - x_n). \quad (10)$$

Тепер знайдемо умови оптимальності:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 2 \sum_{i=1}^n (x_1 - x_i) + \alpha - \mu_1 = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_k} = 2 \sum_{i=1}^n (x_k - x_i) + \mu_{k-1} - \mu_k = 0, k = \overline{2..n-1} \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_n} = 2 \sum_{i=1}^n (x_n - x_i) - \beta + \mu_{n-1} = 0 \quad (13)$$

$$\alpha(x_1 - 1) = 0 \quad (14)$$

$$\beta(s - x_n) = 0 \quad (15)$$

$$\mu_i(x_{i+1} - x_i) = 0, i = \overline{1..n-1} \quad (16)$$

$$x_i \leq x_{i+1}, i = \overline{1..n-1} \quad (17)$$

$$x_1 \geq 1 \quad (18)$$

$$x_n \leq s \quad (19)$$

$$\alpha \geq 0, \quad \beta \geq 0, \quad \mu_i \geq 0, i = \overline{1..n-1}. \quad (20)$$

Додаючи перші n рівнянь, ми отримуємо, що

$$2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_j) + \alpha - \mu_1 + \sum_{k=2}^{n-1} \left(2 \sum_{i=1}^n (x_k - x_i) + \mu_{k-1} - \mu_k \right) + 2 \sum_{i=1}^n (x_n - x_i) - \beta + \mu_{n-1} = 0 \quad (21)$$

$$2 \left(n \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n n x_i \right) + \alpha - \beta = 0 \quad (22)$$

$$\alpha - \beta = 0 \quad (23)$$

$$\alpha = \beta. \quad (24)$$

Розглянемо випадок, коли $\alpha = \beta = 0$.

У цьому випадку перші n рівнянь матимуть вигляд:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 2 \sum_{i=1}^n (x_1 - x_i) - \mu_1 = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_k} = 2 \sum_{i=1}^n (x_k - x_i) + \mu_{k-1} - \mu_k = 0, k = \overline{2..n-1} \quad (26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_n} = 2 \sum_{i=1}^n (x_n - x_i) + \mu_{n-1} = 0. \quad (27)$$

З рівняння $2 \sum_{i=1}^n (x_1 - x_i) - \mu_1 = 0$ (оскільки x_1 найменше, а $\mu_1 \geq 0$) випливає, що $x_1 = x_i, i = \overline{2..n-1}$, але цей випадок мінімізує функцію, тому він не підходить.

Розглянемо тепер випадок, коли $\alpha = \beta \neq 0$. У цьому випадку $x_1 = 1, x_n = s$.

Рівняння набувають наступного вигляду:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 2 \sum_{i=1}^n (1 - x_i) + \alpha - \mu_1 = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_k} = 2 \sum_{i=1}^n (x_k - x_i) + \mu_{k-1} - \mu_k = 0, k = \overline{2..n-1} \quad (29)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_n} = 2 \sum_{i=1}^n (s - x_i) - \beta + \mu_{n-1} = 0 \quad (30)$$

$$\mu_i(x_{i+1} - x_i) = 0, i = \overline{1..n-1} \quad (31)$$

$$x_i \leq x_{i+1}, i = \overline{1..n-1}. \quad (32)$$

Розв'язуючи цю систему нелінійних рівнянь числовим методом з допомогою програмних засобів, отримуємо, що коли n парне, то розв'язок має вигляд

$$\left\{ \underbrace{1 \dots 1}_{\frac{n}{2}}, \underbrace{s \dots s}_{\frac{n}{2}} \right\}, \text{ а якщо } n \text{ непарне – то } \left\{ \underbrace{1 \dots 1}_{\frac{n+1}{2}}, \underbrace{s \dots s}_{\frac{n-1}{2}} \right\} \text{ або } \left\{ \underbrace{1 \dots 1}_{\frac{n-1}{2}}, \underbrace{s \dots s}_{\frac{n+1}{2}} \right\}.$$

Тепер для отримання достовірних результатів при агрегації оцінок потрібно, щоб рівень узгодженості був достатньо високим. Таким чином, постає актуальна задача визначення цього граничного значення узгодженості (порогу), при якому агрегація є припустимою і доцільною.

Припустімо, що експерт дає оцінки навмання, і припустімо, що розподіл оцінок відбувається згідно з трикутним законом, приклад якого зображено на рисунку зліва, тобто експерт має тенденцію до центрування оцінок.

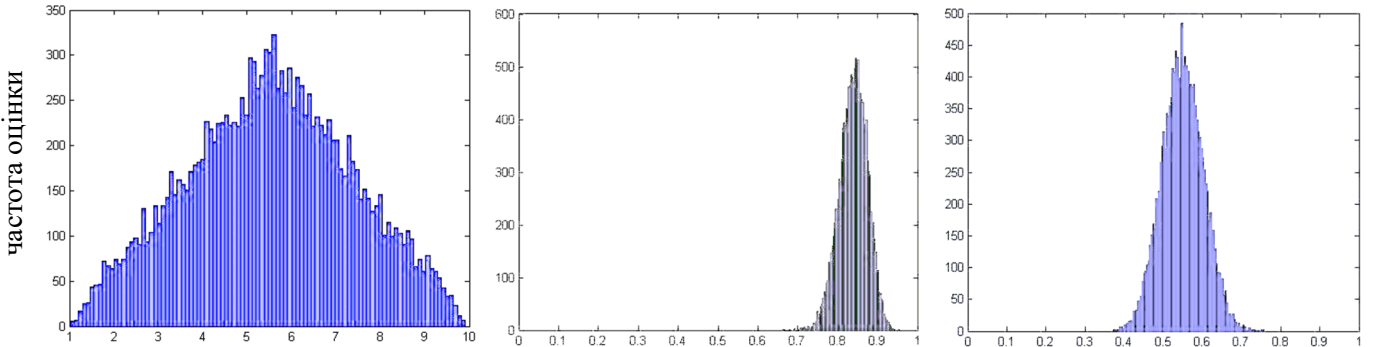


Рис. 2. Вигляд розподілу оцінок – зліва направо: трикутний, x^2 , $|x|$

Для перевірки результатів застосування різних функцій візьмімо до уваги ситуацію, коли 30 експертів навмання надають оцінку 15 000 разів.

I , в залежності від f , відповідає різним законам розподілу.

Якщо $f = x^2$, то закон розподілу має вигляд, як на рисунку по центру.

Як можна побачити з наведеного графіка, за $f = x^2$ розподіл виразно тяжіє правобіч на горизонтальній осі. Тенденція до тяжіння праворуч свідчить про те, що представлені навмання 30 експертами 15 000 оцінок демонструють дуже високий рівень узгодженості.

Для визначення порогу у рамках даного дослідження пропонується взяти пороговий індекс, що дорівнює 0.95 квантилі (0.95 вибрано шляхом емпіричних дослі-

джень). Для наведеного вище розподілу порогове значення дорівнює 0.94. Таким чином, за $f = x^2$ отримуємо дуже високе порогове значення, якого важко досягнути за нормальних умов, коли експерти ставлять реальні оцінки відповідно до своїх уподобань, а не діють навмання.

Також можемо констатувати, що для $f = x^2$ досягається високе значення індексу узгодженості при рівномірному розподілі оцінок: 0.57. В умовах реального експертного оцінювання таке високе значення вбачається малоймовірним, що ще раз підтверджує низький рівень придатності такої функції для вирішення практичних завдань в межах поставленої задачі.

Отже, розглянемо інший варіант функції, який краще задовольнятиме встановлені вимоги. Для $f = |x|$ закон має вигляд як на рисунку справа. Як можна побачити з графіка, для $f = |x|$ досягається набагато більш рівномірний розподіл, який тяжіє до центру, а не до периферії на горизонтальній осі. Порогове значення (0.95 квантиль) дорівнює 0.73. Таким чином, можна стверджувати, що порогове значення для $f = |x|$ істотно нижче за відповідне значення для $f = x^2$ (0.94 проти 0.73), а це вказує на те, що набір вибраних навмання оцінок матиме менший індекс узгодженості у порівнянні з можливим розподілом експертних оцінок, отриманих в умовах реального оцінювання.

Крім того, за такого рівномірного розподілу досягається істотно нижче значення узгодженості: 0.26 для $f = |x|$ проти 0.57 для $f = x^2$. Це може слугувати підтвердженням більшої адаптованості функції до умов реальних статистичних досліджень, а тому свідчить про кращу придатність функції для використання в межах встановлених задач.

Проведемо порівняльний аналіз з метою вибору функції із двох, що розглядалися: $f = |x|$ та $f = x^2$. Функція $f = |x|$ вбачається більш прийнятною, оскільки:

- 1) рівномірний розподіл повинен мати якомога менший індекс узгодженості, для $|x|$ це 0.26, для x^2 це 0.57;
- 2) поріг застосування множини експертних оцінок для x^2 вищий (0.94 проти 0.73).

Таким чином, функція $f = |x|$ утворює розподіл, більш придатний для ґрунтовного практичного застосування у складі індексу узгодженості.

Як зазначалось раніше, задля достовірності експертиз, у багатьох випадках, важливо враховувати компетентність (інформованість) експертів у питанні, що розглядається. Вимоги до індексу узгодженості в цьому випадку залишаються попередні, але також додаються нові, що стосуються урахування компетентності:

1. Індекс узгодженості для однієї з двох однакових множин оцінок більший, якщо усі оцінки першої множини дані експертами, у яких компетентність не менша, ніж компетентність експертів, що надали відповідні оцінки другої множини та хоча б у одного експерта вона строго більша.
2. Чим вищий рівень відносної компетентності експерта, що надав певну оцінку, тим більшим є вплив цієї оцінки на загальний рівень узгодженості.

Тепер, спираючись на загальний перелік вимог, сформулюємо постановку задачі цього дослідження.

Нехай ми маємо n експертів, кожен з яких дав оцінку $x_i, i = \overline{1..n}$ на шкалі $[1, s]$.

Позначатимемо це як $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}_{[1,s]}$. Позначимо компетентність (вагу) i -го експерта через $w_i, i = \overline{1..n}$ – рівень відносної компетентності i -го експерта групи у питанні, що розглядається. Позначатимемо таке оцінювання (множину оцінок експертів) наступним чином: $\{x_1|w_1, x_2|w_2, \dots, x_n|w_n\}_{[1,s]}$. Будемо вважати, що вага експерта – це додатне число, що задовольняє умову нормування $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

При визначенні ваги експерта будемо використовувати мультиплікативне відношення – наприклад, якщо $w_1 = 0.1, w_2 = 0.2$, то другий експерт в два рази компетентніший ніж перший у питанні, що розглядається.

Потрібно визначити індекс узгодженості I множини оцінок $x_i, i = \overline{1..n}$ з урахуванням компетентності $w_i, i = \overline{1..n}$ експертів, що надали ці оцінки.

Запропоновано і досліджено два варіанти вирішення задачі. Одним із варіантів вирішення поставленої задачі є підхід, що застосовувався, при агрегації ранжирувань наданих різнокомпетентними експертами. При цьому підході пропонується замінити оцінку кожного експерта, що має вагу w_i , кількістю оцінок експертів $v_i = \left\lfloor \frac{w_i}{w_0} \right\rfloor$ з од-

наковою вагою w_0 . Тобто, множина оцінок стає $\left\{ \underbrace{x_1 \dots x_1}_{v_1}, \underbrace{x_2 \dots x_2}_{v_2}, \dots, \underbrace{x_n \dots x_n}_{v_n} \right\} = \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_{\sum_{i=1}^n v_i}^0\}$. Фактично, у результаті відбувається перехід до випадку визначення узгодженості рівнокомпетентними експертами, який вже розглядався вище.

Таким чином, індекс узгодженості має наступний вигляд:

$$I = 1 - \frac{\sum_{i \neq j} f(|x_i^0 - x_j^0|)}{M}, \quad (33)$$

де x_i^0 – оцінка i -го «розкладеного» експерта, M – значення для найбільш неузгодженого випадку, яке визначається як розглянуто вище, максимізуючи $\sum_{i \neq j} f(|x_i^0 - x_j^0|)$. У результаті виходить, що найбільш неузгоджений випадок – випадок, коли половина оцінок експертів лежить на лівій границі шкали, а половина на правій.

На прикладі можна бачити, що точність визначення узгодженості для такого підходу залежить від визначення ваги w_0 – елементарної ваги експерта, тобто від підбору одиниці дискретизації для вимірювання компетентності. Це може виявитись досить суттєвим недоліком, оскільки у деяких випадках може призводити до значного росту кількості елементарних ваг експертів, що задіюються при рішенні задачі, а як наслідок, до зростання розмірності задачі. Наприклад, якщо ваги експертів 0.127, 0.634, та 0.239 відповідно, то елементарна вага експерта – 0.001. Тоді задача зводиться до задачі з 1000 експертами. Для такої кількості експертів розрахунок індексу стає трудомістким і вимагатиме побудови спектру з 1000 компонентів та обробки $\frac{1000 \cdot 999}{2} = 499500$ порівнянь.

Отже, існує сенс запропонувати до розгляду інший варіант рішення. При цьому підході пропонується подати індекс узгодженості у вигляді

$$I = 1 - \frac{\sum_{i \neq j} w_i w_j f(|x_i - x_j|)}{M}, \quad (34)$$

де x_i – оцінка i -го експерта, M – значення для найбільш неузгодженого випадку.

У цьому випадку, індекс узгодженості – це сума відстаней між оцінками для усіх можливих пар оцінок експертів, помножених на добуток ваг відповідних експертів. Запропонована функція f має таку властивість: $f(x) > 0$, якщо $x > 0$ та $f(x) = 0$, якщо $x = 0$.

За викладених вище умов: $I \in [0,1]$, максимум досягається тоді, і тільки тоді, коли всі змінні (оцінки) рівні. Мінімум досягається у найбільш неузгодженому випадку. Для того, щоб визначити M , максимізуємо $\sum_{i \neq j} w_i w_j f(|x_i - x_j|)$. На жаль, в залежності від коефіцієнтів, розподіл оцінок при найбільш неузгодженому випадку буде змінюватися, тому M потрібно виконувати розрахунки для кожного конкретного випадку окремо. Проаналізуємо цей варіант вирішення задачі. Можливе виникнення наступних запитань.

Що означає доданок $w_i w_j f(|x_i - x_j|)$? Фактично це відстань між оцінками i -го та j -го експертів, «посиленими» їхньою вагою. Таким чином і відбувається врахування компетентності обох експертів, причетних до надання кожної пари оцінок.

Чому використовується $w_i w_j$, а не $w_i + w_j$? Тут доцільно керуватись принципом, що множення – це еквівалент логічної операції «і», а додавання – це «або». Враховуючи те, що ваги i -го та j -го експертів – відносні, а при їх визначенні керуються принципом мультиплікативності, тому при визначенні узгодженості також доцільно використовувати мультиплікативність.

Отже, із двох проаналізованих варіантів вирішення задачі, перевагу надано останньому, оскільки він позбавлений вище описаного недоліку, внаслідок якого може зростати розмірність задачі.

Окрім того, слід акцентувати увагу на деяких співвідношеннях при розрахунках індексу узгодженості. Вбачається доцільним вважати, що рівень довіри до оцінки одного експерта є вищим, ніж до оцінок, наданих декількома експертами, якщо вага (компетентність) першого є не меншою, ніж сума ваг цієї групи з декількох експертів. Так, наприклад, індекс узгодженості для $\{2|0.25, 2|0.25, 3|0.25, 5|0.25\}_{[1,10]} = 0.72$, у той час як $\{2|0.5, 3|0.25, 5|0.25\}_{[1,10]} = 0.67$.

Далі, у розділі запропонований новий метод до визначення порогу узгодженості експертних попарних порівнянь, достатнього для виконання агрегації цих оцінок та отримання відносних ваг альтернатив із заданою достовірністю. В основі підходу лежить постулат про існування «фундаментальної істини» (ground truth), який констатує можливість проведення експертного оцінювання. Цей постулат дає підстави припустити наявність еталонних (істинних) ваг альтернатив, що мають бути визначені у ході експертизи. Отже, пропонується задати довільні ваги альтернатив (припускаємо, що вони апріорі відомі).

Імітаційне моделювання попарних порівнянь здійснюється наступним чином:

- За заданими вагами $w_i, i \in \{1..n\}$, де $n \in \mathbb{N}$ – кількість альтернатив, будується повністю (ідеально) узгоджена матриця попарних порівнянь $M = \{m_{ij}\}$, $i, j \in \{1..n\}$, де $m_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$, причому, M є мультиплікативною, зворотно-симетричною: $m_{ij} = \frac{1}{m_{ji}}$.
- Матриця M зашумлюється шляхом надання кожному елементу матриці деякого збурення δ , наприклад, $m_{ij} = m_{ij} \pm m_{ij} \cdot \delta$. По суті, δ виступає у якості відносної похибки оцінювання, притаманної експерту при виконанні попарних порівнянь.

За імітованими таким чином матрицями попарних порівнянь різними методами агрегації визначаються вектори пріоритетів, а також визначається їхня узгодженість. Метод до визначення порогу узгодженості використовує цілеспрямований пошук (як приклад, Генетичний алгоритм), з допомогою якого, серед змодельованих матриць попарних порівнянь знаходять такі, що спричиняють при агрегації найбільше відхилення ваг альтернатив від еталонних значень Δ або представляють найбільш неузгоджений випадок попарних порівнянь (найменший індекс узгодженості I).

Результати обчислень за допомогою Генетичного алгоритму подані у графічному вигляді на рис 3. Графік (1) – залежність $\Delta(\delta)$, розрахована для Комбінаторного методу

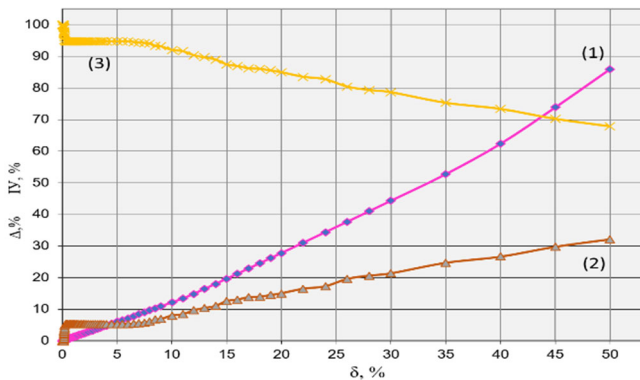


Рис. 3. Графіки залежностей $\Delta(\delta)$, $I(\delta)$

від δ і (3) – залежність індексу узгодженості від відносної похибки оцінювання: $I(\delta)$. По суті, відображені на рисунку значення індексу узгодженості залежності (3) $I(\delta)$ відповідають порогу узгодженості для відповідних значень заданої якості агрегації $\Delta(\delta)$ Комбінаторним методом при проведенні експертизи. Звідси нескладно визначити залежність $I(\Delta)$ – поріг узгодженості для заданого Δ – допустимого відхилення

результуючої відносної ваги альтернативи від гіпотетичного еталонного значення.

Визначення порогу узгодженості саме відповідного заданому допустимому відхиленню результуючої відносної ваги альтернативи від гіпотетичного еталонного значення дозволяє більш ефективно здійснювати процес підвищення узгодженості та заощадити високовартісні експертні ресурси.

Далі, запропоновано метод, що передбачає діалог з експертом для підвищення узгодженості до рівня порогу визначеного порогу. У випадку, якщо індекс узгодженості менший ніж поріг необхідної для виконання агрегації експертних оцінок, пропонується процедура зворотного зв'язку з експертом для її підвищення. Варто зазначити, що у ході підвищення узгодженості, окрім того, переслідуються іще дві цілі: питання до експерта повинні бути ненав'язливими (тобто, не має спричинитись тиск на експерта) та кількість питань повинна зводитись до мінімуму.

Отже, нехай n експертів дали свої оцінки x_i^* , $i = \overline{1..n}$, та індекс їхньої узгодженості виявився нижче порогу узгодженості. Тоді, для кожного експерта i фіксуємо оцінки всіх інших експертів, а оцінку i -го експерта варіюємо, та знаходимо, за якого значення індекс узгодженості становиться максимальним, тобто розв'язуємо задачу мінімізації функції $F(x_i) = \sum_{i \neq j} f(|x_i - x_j|)$.

У випадку, якщо $f(x) = x^2$, то $F(x_i) = \sum_{i \neq j} (x_i - x_j)^2$, і мінімум досягається, коли $F'(x_i) = 2 \sum_{i \neq j} (x_i - x_j) = 0$, $j = \overline{1..i, i+1..n}$, тобто коли $x_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n x_j}{n-1}$ (середнє арифметичне оцінок інших експертів).

Аналогічно, мінімум знаходимо при $f = |x|$, тоді $F(x_i) = \sum_{i \neq j} f(|x_i - x_j|)$. Сума модулів має вигляд неперервної ламаної лінії, і з властивостей модуля впливає,

що найбільший нахил функція має справа, а найменший – зліва. Нахил буде нульовим якраз на медіані значень, отже мінімум досягається на медіані оцінок інших експертів.

Далі визначаємо, оцінка якого експерта найбільше максимізувала індекс узгодженості. Звертаємось із запитанням до цього експерта, чи бажає він змінити свою оцінку? Якщо відповідь – «ні», переходимо до наступного за ним експерта, оцінка якого є наступною у порядку зменшення максимізації індексу узгодженості. Якщо відповідь – «так», то просимо експерта надати нову оцінку. Якщо надана ним оцінка збільшила індекс узгодженості, то замінюємо його попередню оцінку новою, якщо ні – то запам'ятовуємо цю ситуацію для подальшого аналізу.

Описаний вище алгоритм скінченний, оскільки звернення до кожного експерта може відбуватися лише один раз.

Алгоритм закінчує свою роботу у випадку, коли попередньо визначений достатній рівень (поріг) узгодженості досягнуто, або коли неможливо досягти цього порогу.

Наголосимо, що цей метод підвищення узгодженості, на відміну від тих, що застосовувались раніше, може пропонувати експертові лише змінити попередньо надану ним оцінку, не вказуючи бажаного для підвищення узгодженості напрямку її змінювання. Тим самим, «тиск» на експерта значно зменшується у порівнянні з методами зі зворотним зв'язком, що досліджувались раніше. Тобто, «тиск» на експерта при зверненні з питанням типу «Чи не погодитесь *змінити* свою попередню оцінку?» є меншим, ніж у випадку запитання «Чи не погодитесь *зменшити/збільшити* свою попередню оцінку?», оскільки в першому випадку експертові не «нав'язується» напрямок зміни його/її оцінки. Крім того, запропонований алгоритм зводить до мінімуму кількість звернень до експертів, оскільки лише один раз може відбуватися звернення до кожного експерта про зміну його оцінки, в той час як у альтернативних методах кількість звернень до певного експерта з проханням змінити одну й ту ж саму його оцінку в бік збільшення або зменшення, може бути значною.

Акцентуймо увагу на випадку, коли після всіх запланованих звернень до експертів необхідний рівень узгодженості все ж не досягнуто. У такому випадку, передбачається не бажана процедура виключення оцінок деяких експертів з розгляду, при цьому втрачається (не береться до уваги) судження деяких експертів, проте ця процедура є вимушеною і проводиться заради успішного завершення експертизи. Звичайно ж, такий процес може спричинити зменшення достовірності результату групової експертизи, і щоб її сенс не було втрачено, попередньо емпірично було введено обмеження на мінімальну кількість експертних оцінок – 3. Тобто, у випадку недосягнення порогу узгодженості при трьох оцінках, що залишилися, робиться висновок про недостатню узгодженість суджень експертів у групі та необхідність проведення повторної експертизи.

Отже, сутність цієї процедури полягає в послідовному знаходженні та виключенні з розгляду оцінки, яка вносить найбільший вклад у мінімізацію індексу узгодженості. Після кожної такої ітерації виконується перерахунок індексу узгодженості для скороченої множини. У певному сенсі ця процедура є досить логічною, оскільки, в першу чергу, виключаються так звані «викиди» – оцінки, що є найбільш віддалені від середньо-групового значення.

Збіжність алгоритму цієї процедури є очевидною, оскільки шляхом виключення оцінок, у кінці кінців, завжди отримаємо вироджений випадок множини експертних оцінок, що складається з єдиної оцінки, і ця множина має найбільший із можливих індекс узгодженості, рівний одиниці.

У **третьому розділі** «Апробація запропонованих методів та підходів у ході експериментального дослідження», випробувано розроблені методи у ході експериментальних досліджень. Через відсутність еталонних значень в слабко структурованих областях визначення точності запропонованих методів є неможливим, тому апробація здійснювалась у ході експерименту проведення порівняльного дослідження методів агрегації попарних порівнянь, а саме декількох модифікацій комбінаторного методу [13, 14].

Мета такого експерименту полягає в порівняльному оцінюванні ефективності агрегації комбінаторного методу з урахуванням ваг покривних дерев та без урахування таких при груповому експертному оцінюванні з використанням вербальних шкал різної докладності. Далі, суть експерименту подається у спрощеному вигляді.

Задаються довільні позитивні значення ваг альтернатив $w_i, i = \overline{1..n}$. Число альтернатив n при експертному оцінюванні не перевищує 7 ± 2 . Проводиться нормування цих ваг до одиниці $w_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}$, щоб отримати $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. Надалі ці ваги вважаються еталонами. За цими еталонними вагами формально будується мультиплікативна ідеально узгоджена матриця попарних порівнянь (МПП) A виходячи зі співвідношення $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$, де a_{ij} – елемент матриці A . Далі, проводиться «зашумлення» матриці A , таким чином, що кожен елемент матриці A , крім діагональних, може бути змінений за наступним законом $a'_{ij} = a_{ij} \pm a_{ij} \cdot \delta / 100\%$, де $\delta > 0$ – наперед задана величина, що характеризує максимальне відносне відхилення елементів матриці A у відсотках від еталонних значень. Тим самим, здійснюється імітаційне моделювання похибок при експертному оцінюванні. Величина δ представляє собою відносну похибку експерта при проведенні парних порівнянь. На цьому етапі визначається узгодженість експертних оцінок (елементів неповної МПП) запропонованим у дисертації методом. Після визначення індексу і порога узгодженості до розгляду приймаються лише МПП, узгодженість яких вища порога. Далі, «зашумлена» МПП A' обробляється одним з методів агрегації з метою одержання узагальнених ваг альтернатив w'_i . Ефективність методу агрегації експертних оцінок пропонується обчислювати як максимальне відносне відхилення отриманої у результаті розрахунку ваги альтернативи від еталонної ваги для цієї ж альтернативи $\Delta = \max_i \left| \frac{w'_i - w_i}{w_i} \right| \cdot 100\%$. При цьому, обчислені значення показника Δ залежать як від заданої δ , так і від відносних значень самих заданих еталонів. Тому, визначені значення показника представляються у вигляді графіків залежності $\Delta(\delta)$ для кожного з варіантів характерних значень еталонних ваг. Залежність $\Delta(\delta)$ визначається для кожного з досліджуваних методів на інтервалі $\delta \in (0, 100)$, виходячи з припущення, що відносна похибка оцінювання при парних порівняннях експерта не перевищує 100%.

Отже, у ході описаного експерименту, запропонований метод визначення узгодженості був апробований на великій кількості прикладів множин експертних оцінок

поданих у різних шкалах. Що стосується апробації процедури зворотного зв'язку з експертом для підвищення узгодженості, то це тестування проводиться у рамках усіх прикладів практичного застосування системи розподіленого збору та обробки експертної інформації для СППР – «Консенсус-2» [6], де цю процедуру реалізовано.

У **четвертому розділі** «Практична реалізація запропонованих методів у складі інформаційної технології», досліджено особливості застосування технології ППР, зокрема досліджено поведінку методів групового експертного оцінювання при розподіленій роботі експертів у глобальній мережі. У рамках системи розподіленого збору та обробки експертної інформації для СППР – «Консенсус-2» [6] реалізовані і застосовуються запропоновані методи визначення та підвищення узгодженості у складі цілої низки методів експертного оцінювання. У розділі надано опис функціонування системи за етапами збору та обробки експертної інформації із зазначенням місця використання запропонованих методів визначення та підвищення узгодженості.

В системі «Консенсус-2», одним із авторів якої є дисертант, реалізація методу та процедури використовується на декількох етапах групової побудови моделі предметної області: у ході групової декомпозиції, при експертному виборі кращого формулювання із множини ідентичних за змістом формулювань; у ряді методів експертного оцінювання при визначенні відносних ваг складових декомпозиції – відносних впливів між компонентами системи; на етапі взаємної оцінки при визначенні відносної компетентності експертів групи у питанні, що розглядається тощо.

Розроблена система «Консенсус-2» знайшла своє практичне застосування при вирішенні цілої низки задач, пов'язаних зі спільною роботою експертів, аналітиків, інженерів знань щодо колективної побудови моделей слабо структурованих систем. Такі моделі у вигляді баз знань застосовуються при побудові дорожніх карт та стратегічних планів [1, 2, 7], при генеруванні сценаріїв у різних галузях [15].

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання розробки методу підвищення узгодженості, що без спотворення оцінок та спричинення тиску на експертів, з можливістю урахування рівня їхньої компетентності (інформованості) щодо конкретного питання експертизи дає можливість створювати у рамках інтелектуальної інформаційної технології більш адекватні моделі предметних областей і, тим самим, підвищити достовірність рекомендацій, що надаються ОПР.

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

1. Розроблено новий метод підвищення узгодженості різних видів експертних оцінок, що на основі запропонованого індексу узгодженості та зворотного зв'язку, без спотворення оцінок та уникаючи спричинення тиску на експертів, з можливістю урахування рівня їхньої компетентності (інформованості) щодо конкретного питання експертизи дає можливість створювати більш адекватні моделі предметних галузей та підвищувати достовірність рекомендацій, що генеруються СППР на основі цих моделей.
2. Розроблено новий метод визначення порогу узгодженості, необхідного для агрегації експертних попарних порівнянь, який ґрунтується на імітаційному моделюванні цих експертних оцінок і цілеспрямованому пошуку найбільш неузгоджених

матриць попарних порівнянь у ході імітації, що, на відміну від класичного імітаційного підходу, дозволяє визначати поріг у залежності від заданого бажаного рівня достовірності результатів експертизи.

3. Удосконалено метод підвищення узгодженості матриць експертних попарних порівнянь, зокрема неповних, який дозволяє визначати неузгоджені елементи матриці та у ході групового або індивідуального опитування звертатись до експерта з пропозицією їх зміни задля досягнення достатнього для агрегації, визначеного за допомогою нового підходу, рівня узгодженості матриці. Метод зводить до мінімуму кількість повторних звернень до експерта та, на відміну від методу, що застосовувався раніше, не інформує експерта про напрямок бажаної для підвищення узгодженості зміни його попередньої оцінки, що дозволяє зменшити можливі спотворення оцінок, спричинені прагненням експерта до швидшого результативного завершення сеансу експертизи.
4. У результаті експериментального дослідження підтверджено, що розроблення та удосконалення методів підвищення узгодженості дає можливість підвищити достовірність отриманих агрегованих оцінок у порівнянні із застосуванням методів агрегації без урахування узгодженості.
5. Розроблені методи знайшли практичне застосування у рамках програмної реалізації інформаційної технології розподіленого збору та обробки експертної інформації системи «Консенсус-2», а саме у ході проведення експертиз при колективній побудові моделей предметних галузей.
6. Підхід до визначення рівня узгодженості експертних оцінок, достатнього для їх агрегації, доцільно застосувати для визначення порогових значень широковідомих індексів узгодженості, наприклад, у методі аналізу ієрархій Т.Сааті.
7. Застосування розроблених методів може бути розширено з області експертних оцінок ще і на область інформації різної природи, отриманої із різних джерел для аналізу її на предмет суперечливості.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. Циганок В. В., Каденко С. В., Качанов П. Т., Андрійчук О. В., Роїк П. Д. Інструментарій підтримки прийняття рішень як засіб стратегічного планування. *Озброєння та військова техніка*. 2015. 3(7). С. 59–66.
2. Tsyganok V., Kadenko S., Andriychuk O., Roik P. Usage of multicriteria decision-making support arsenal for strategic planning in environmental protection sphere. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 2017. Vol. 24. P. 227–238. (включено до міжнародної наукометричної бази Scopus)
3. Роїк П. Д., Циганок В. В. Метод поліпшення узгодженості оцінок експертів у ході діалогу. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2018. т. 20. № 2. С. 85–95.
4. Циганок В. В., Роїк П. Д. Метод визначення та підвищення узгодженості експертних оцінок при підтримці прийняття групових рішень. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2018. № 3. С. 110–121.
5. Роїк П. Д. Визначення індексу узгодженості оцінок експертів з урахуванням їх компетентності при підтримці прийняття групових рішень. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2018. т. 20. № 3. С. 90–97.

Свідоцтва про авторське право

6. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №75023. Комп'ютерна програма «Система розподіленого збору та обробки експертної інформації для систем підтримки прийняття рішень – „Консенсус-2“» / Циганок В. В., Роїк П. Д., Андрійчук О. В., Каденко С. В. // від 27/11/2017.

Тези та матеріали наукових конференцій

7. Циганок В. В., Роїк П. Д. Технологія підтримки прийняття рішень при стратегічному плануванні. *«Теорія прийняття рішень»* : праці VIII міжнародної школи-семінару 26 вересня – 1 жовтня 2016 р. – Ужгород, УжНУ. 2016. С. 262–265.
8. Циганок В. В., Роїк П. Д. Про визначення узгодженості експертних оцінок шляхом подвійного застосування формули ентропії. *Реєстрація, зберігання і обробка даних* : зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової конференції / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. (м. Київ, 16-17 травня 2016 р.) Київ, 2016. С. 128–130.
9. Tsyganok V. V., Borokhvostov I. V., Roik P. D. Problem-oriented knowledge transfer platform for decision making support in socio-technical systems (reprint) *CEUR Workshop Proceedings*, 2017. Vol. 2067 Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security (ITS 2017) Kyiv, November 30, 2017. P. 112–117. (включено до міжнародної наукометричної бази Scopus)
10. Роїк П. Д. Задача визначення узгодженості суджень групи експертів у системах підтримки прийняття рішень. *Реєстрація, зберігання і обробка даних* : зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової конференції 16-17 травня 2017 року / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. К: ІПРІ НАН України, 2017. С. 77–79.
11. Роїк П. Д. Про метод визначення узгодженості суджень групи експертів у системах підтримки прийняття рішень. *Реєстрація, зберігання і обробка даних* : зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової конференції 17-18 травня 2018 року / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. К: ІПРІ НАН України, 2018. С. 67–68.
12. Циганок В. В., Роїк П. Д. Визначення узгодженості оцінок експертів при підтримці прийняття групових рішень. *20-th International conference on System Analysis and Information Technology SAIT 2018*, May 21–23, 2018 Institute for Applied System Analysis of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine SAIT 2018. С. 96–97.
13. Tsyganok Vitalii, Kadenko Sergii, Andriichuk Oleh, Roik Pavlo Combinatorial Method for Aggregation of Incomplete Group Judgments. *Proceedings of 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)*. “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine. 08-12 October, 2018. P. 25–30. (включено до міжнародної наукометричної бази Scopus)
14. Циганок В. В., Роїк П. Д. Вибір способу для оцінювання модифікацій комбінаторного методу агрегації попарних порівнянь. *Реєстрація, зберігання і обробка даних* : зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової

- конференції 15-16 травня 2019 року / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. К: ІПРІ НАН України, 2019. С. 121–123.
15. Циганок В. В., Роїк П. Д. Технологія генерування сценаріїв в умовах невизначеності. *Реєстрація, зберігання і обробка даних* : зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової конференції 28 вересня 2020 року / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. К: ІПРІ НАН України, 2020. С. 119-121.
16. Роїк П.Д., Циганок В.В. Застосування апарату когнітивних карт для визначення адекватності моделей слабо структурованих предметних областей. *Реєстрація, зберігання і обробка даних* : зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової конференції 18-19 травня 2021 року / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. К: ІПРІ НАН України, 2021. С. 124–125.
17. Циганок В.В., Роїк П.Д. Дослідження збіжності методу цільового динамічного оцінювання альтернатив / *Реєстрація, зберігання і обробка даних*: зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової конференції 27-28 вересня 2022 року / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. – К: ІПРІ НАН України, 2022. с.77–78.

АНОТАЦІЯ

Роїк П. Д. Метод підвищення узгодженості експертних оцінок при підтримці прийняття рішень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій МОН України, Київ, 2024.

Дисертацію присвячено розробці методу підвищення узгодженості експертних оцінок, що застосовується у ході експертиз для поліпшення адекватності моделей складних систем на основі яких здійснюється підтримка прийняття рішень в слабо структурованих предметних галузях. Метод включає визначення індексу узгодженості, порогового значення індексу, яке необхідно досягти для агрегації експертних оцінок і процедуру зворотного зв'язку з експертами для досягнення достатньої узгодженості. Програмна реалізація методу знайшла практичне застосування в інформаційній технології підтримки прийняття рішень у рамках системи розподіленого збору та обробки експертної інформації для систем підтримки прийняття рішень – «Консенсус-2».

Ключові слова: підтримка прийняття рішень, експертні оцінки, узгодженість, достатня узгодженість для агрегації, підвищення узгодженості.

ANNOTATION

Roik P. D. Method for improving consistency of expert estimations in decision-making support. – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of engineering sciences, specialty 05.13.06 – Information technologies. – State University of Information and Communication Technologies of MES of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the development of a method for increasing the consistency of expert assessments, which is used in the course of examinations to improve the

adequacy of models of complex systems on the basis of which decision-making support is provided in poorly structured subject areas. The solution to the important scientific and technical task of creating a method involves determining and achieving the level of consistency of both individual and group assessments required for aggregation, which can be set in continuous or discrete scales. The goal is to obtain reliable aggregated ratings without distorting the assessments received from experts and without causing pressure in case of possible repeated appeals to them, which contributes to the creation of more adequate models of subject areas and, thereby, improves the quality of recommendations provided by decision support systems.

The first step in solving the problem is to determine the requirements that the consistency index should meet in order to be used for practical purposes, namely to apply (conduct) the consistency improvement procedure. Since this procedure involves feedback from an expert and the possibility of changing the previously provided assessment, the properties of the index “not to react” to the shift of assessments, to the scaling of their distribution and the property of index change monotonicity when changing a particular assessment to a neighboring value on the assessment scale are of particular importance.

The author analyzes a number of existing consistency indices used in expert evaluations and rating surveys and identifies certain shortcomings of these indices that do not contribute to their use in decision support. Particular attention is paid to the properties necessary for organizing feedback, i.e. asking an expert to change his or her preliminary assessment in order to increase the consistency index. Given the presence of certain shortcomings in all the studied indices and the fact that none of them satisfies all the conditions set forth, it is concluded that there is an urgent need to develop a new consistency index that would not have the identified shortcomings and would meet the requirements.

It is proposed to present the consistency index as a complement to the unit normalized sum of the distances between the ratings for all possible pairs of expert ratings. The maximum of the function corresponds to the complete/highest consistency of the ratings and is achieved if and only if all the ratings are equal. In addition, the minimum of the index is achieved when a half of the ratings are at one end of the scale and the other half are at the other end. If the number of scores is odd, the “extra” score can be at either end of the interval. The definition of this minimum in a certain sense contradicts the approaches of those authors who believe that the minimum should be achieved when all the scores are evenly distributed across the scale. In practice, however, it does not really matter where the function reaches the minimum, since all the cases of high inconsistency described above (and others) cannot be used for further aggregation of expert assessments. The consistency in these cases should be improved; it is only important that the function meet the basic requirements.

For the developed consistency index, we analyzed it and determined the threshold value below which the data is considered inconsistent. For this purpose, arbitrary sets of expert assessments are considered, consistency indices are calculated, and the threshold value is found for which 5% of the percentages are above this consistency index.

A more general case is considered when experts have different competence (awareness, information) in the issue under consideration and therefore the assessment of one expert may be weightier than the assessment of another expert. In this case, the index is calculated taking into account the relative weights of the experts.

A procedure for feedback to experts has been developed with the aim of possibly increasing the consistency index of their assessments and achieving sufficient consistency for further aggregation. It is concluded that this goal, namely increasing the consistency index, should not be explicitly presented to the expert, so that it would not encourage the expert to agree to change (increase or decrease) the assessment in the direction of increasing the consistency index in order to complete the examination session faster. The feedback procedure involves asking the expert to change his or her previous assessment without specifying the direction of changes desired to increase consistency, which distinguishes this procedure from those used previously and makes it make much less pressure on the expert. In addition, this procedure has a number of other advantages over the existing procedures: it is finite and involves significantly fewer steps (iterations) on the way to improving consistency, because the expert is asked to change the valuation only once, it finds the fastest way to achieve consistency. The disadvantages of this procedure may include, perhaps, more frequent conclusions about the inability of the expert or the relevant expert group to reach a consensus and, thus, successfully complete the examination with an aggregated assessment as a result. However, this very property of the procedure prevents the acceptance of insufficiently reliable expert assessments, so it is not a disadvantage, but rather an advantage that allows for an increase in the reliability of expert assessments.

The developed methods were tested in the course of experimental studies. Due to the absence of reference values in poorly structured areas, it is impossible to determine the accuracy of the proposed methods, so the testing was carried out in the course of a comparative study of methods of aggregating pairwise comparisons, namely several modifications of the combinatorial method. In order to save expensive expert resources and the time required to organize the experiment, the study was conducted by simulating expert assessments using the author's own methodology.

It is convenient to describe the essence of the methodology for modeling expert assessments using the example of individual pairwise comparisons. The modeling process begins with setting arbitrary reference weights of alternatives – objects evaluated by one expert. These weights formally and absolutely unambiguously form a fully (perfectly) consistent matrix of pairwise comparisons. Next, this matrix is “noised” so that each element of the matrix, except for the diagonal ones, could be linearly changed by a value proportional to the specified value of the maximum relative deviation as a percentage of the reference values represented by the elements of the perfectly matched matrix. This is how errors in expert evaluation are modeled. The value of the maximum relative deviation in this case represents the possible relative error of the expert when making pairwise comparisons. Further, the “noisy” matrix is input to one of the aggregation methods in order to obtain generalized weights of alternatives in the form of a vector of priority weights. The quality (effectiveness) of the pairwise comparison aggregation method is calculated as the maximum possible relative deviation of the weight of an alternative obtained as a result of the calculation (aggregation) from the reference weight of the same alternative.

The aggregation methods tested in the experimental study include methods that include determining and improving consistency. For such methods, spectra (distributions) of scores for each alternative are built on the basis of a “noisy” matrix of pairwise comparisons. In order to make the most complete use of the information on the ratio of alternatives contained in the pairwise comparison matrix, the construction of the distribution of scores for each

alternative is based on the decomposition of the graph corresponding to the pairwise comparison matrix into spanning trees. The information contained in the set of matrix elements corresponding to the spanning tree uniquely determines the weights of the alternatives – simulated expert assessments, each of which becomes a component of the spectrum corresponding to the alternative of the distribution of ratings. These simulated spectra of estimates serve as input data used to test consistency methods without the need to involve real, expensive experts.

Consistency-based aggregation methods calculate the minimum required value of the consistency index for each achieved value of the quality indicator, which is the consistency threshold. The value of the consistency threshold depends on the required level of quality (efficiency) for the aggregation method.

On the basis of the created methodology, the developed methods for determining consistency were tested and compared both with and without taking into account the competence of experts, and the corresponding thresholds for consistency indices were determined. As a result of the experiment, it is confirmed that the application of the developed method for determining and improving consistency increases the reliability of the aggregated estimates obtained compared to the application of the aggregation method without taking into account consistency.

The software implementation of the method has found practical application within the framework of the system of distributed collection and processing of expert information for decision support systems – Consensus-2, for which the copyright certificate for the work has been obtained. The developed software system implements a number of mechanisms for group construction of a subject area model. Among these mechanisms are group decomposition, which is successfully used to obtain collective knowledge about a certain component of a poorly structured complex system, group expert evaluation of the characteristics of the links between the system components, which involves the use of a number of methods for obtaining and processing expert assessments. It is precisely the last-mentioned set of software tools implemented within the framework of the Consensus-2 system that requires the use of methods for determining and improving the consistency of expert assessments in order to achieve the required level of reliability of group expert assessments.

The methods proposed in this dissertation are implemented and used both in the group expert assessment of the impact of system components in the subject area model and in the mode of individual work of experts when they use the method of pairwise comparisons. In addition, these methods are used in the group selection of the best formulation from a set of formulations of the same content, as well as in all the implemented methods that provide for the aggregation of expert assessments to substantiate the possibility and feasibility of its implementation.

Keywords: decision-making support, expert judgment, consistency, sufficient consistency for aggregation, improving consistency.