Інститут проблем реєстрації інформації
Національної академії наук України
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РОЇК ПАВЛО ДМИТРОВИЧ

УДК 519.816, 004.9

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ УЗГОДЖЕНОСТІ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК ПРИ ПІДТРИМЦІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.
_____ П.Д. Роїк

Науковий керівник Циганок Віталій Володимирович,
доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Роїк П.Д. Метод підвищення узгодженості експертних оцінок при підтримці прийняття рішень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертація присвячена розробці методу підвищення узгодженості експертних оцінок, який використовується в інтелектуальній інформаційній технології при моделюванні предметних галузей в ході проведення експертиз для підвищення адекватності створюваних моделей, на основі яких здійснюється підтримка прийняття рішень. Вирішення важливого науково-технічного завдання створення методу полягає у визначенні та досягненні необхідного для агрегування рівня узгодженості як індивідуальних, так і групових оцінок, які можуть бути задані в неперервній або дискретній шкалах. Метою є отримання достовірних агрегованих рейтингів без викривлення оцінок, отриманих від експертів, і без спричинення тиску при можливих повторних зверненнях до них, що сприяє створенню більш адекватних моделей предметних областей і, тим самим, підвищує якість рекомендацій, які надаються системами підтримки прийняття рішень.

Першим кроком у вирішенні завдання є визначення вимог, яким має відповідати індекс узгодженості для того, щоб його можна було використовувати для практичних цілей, а саме для застосування (проведення) процедури підвищення узгодженості. Оскільки ця процедура передбачає зворотній зв’язок з експертом та можливість зміни раніше наданої оцінки, особливого значення набувають властивості індексу бути інваріантним до зсуву оцінок, до масштабування їх розподілу та властивість монотонності зміни індексу при зміні певної оцінки до сусіднього значення на шкалі оцінювання.

Проаналізовано низку наявних індексів узгодженості, що

використовуються в експертних оцінюваннях і рейтингових опитуваннях, та виявлено певні недоліки цих індексів, які не сприяють їх використанню при підтримці прийняття рішень. Особливу увагу приділено властивостям, необхідним для організації зворотного зв'язку, тобто прохання експерта змінити свою попередню оцінку з метою підвищення індексу узгодженості. Враховуючи наявність певних недоліків у всіх досліджених індексів і той факт, що жоден з них не задовольняє всім поставленим умовам, зроблено висновок про нагальну необхідність розробки нового індексу узгодженості, який би не мав виявлених недоліків і відповідав би поставленим вимогам.

Індекс узгодженості пропонується представити як доповнення до одиниці нормованої суми відстаней між оцінками для всіх можливих пар експертних оцінок. Максимум функції відповідає повній/найвищій узгодженості оцінок і досягається тоді і тільки тоді, коли всі оцінки є рівними. Крім того, мінімум індексу досягається тоді, коли половина оцінок знаходиться на одному кінці шкали, а інша половина – на іншому. Якщо кількість оцінок непарна, то «зайва» оцінка може бути на будь-якому кінці інтервалу. Визначення цього мінімуму в певному сенсі суперечить підходам тих авторів, які вважають, що мінімум має бути досягнутий, коли всі оцінки рівномірно розподілені по шкалі. На практиці, однак, питання досягнення мінімуму не має особливого значення, оскільки випадки низької узгодженості не можуть бути використані для агрегування експертних оцінок, а вимагають подальшого підвищення узгодженості.

Для запропонованого індексу узгодженості статистично визначено порогове значення, нижче якого дані вважаються неузгодженими і непридатними для агрегування. При розрахунку розглядались довільні набори експертних оцінок, розраховувались індекси узгодженості та знаходилось порогове значення, для якого 5% відсотків наборів перевищують цей індекс узгодженості. Також, розроблено новий метод визначення порогу узгодженості, необхідного для агрегації експертних оцінок, який ґрунтується на імітаційному моделюванні експертних матриць попарних порівнянь і

цілеспрямованому пошуку серед них найбільш неузгоджених та, на відміну від класичного статистичного підходу, дозволяє визначати поріг у залежності від заданого необхідного рівня достовірності результатів експертизи.

Окрім того, розглянуто і більш загальний випадок, коли експерти мають різну компетентність (обізнаність, поінформованість) у конкретному питанні експертизи, і тому оцінка одного експерта може бути більш вагомою, ніж оцінка іншого експерта. У цьому випадку індекс розраховується з урахуванням відносних ваг експертів.

Розроблено процедуру зворотного зв’язку з експертами з метою можливого підвищення індексу узгодженості їхніх оцінок та досягнення достатньої узгодженості для подальшого агрегування. Зроблено висновок, що ця мета, а саме підвищення індексу узгодженості, не повинна бути явно представлена експерту, щоб не спонукати експерта погодитися змінити (збільшити або зменшити) оцінку в бік підвищення індексу узгодженості для того, щоб швидше завершити сеанс експертизи. Запропонована процедура зворотного зв’язку полягає в тому, що експерту пропонується змінити його попередню оцінку без зазначення напряму змін, бажаного для підвищення узгодженості, що відрізняє цю процедуру від тих, що використовувалися раніше. Через те, що експерту невідомий бажаний напрямок зміни попередньо наданої ним оцінки, на нього не тисне прагнення досягнути достатнього рівня узгодженості і швидшого завершення експертизи. Крім того, ця процедура має низку інших переваг над існуючими процедурами: вона є скінченною і передбачає значно меншу кількість кроків (ітерацій) на шляху до підвищення узгодженості, оскільки експерта просять змінити оцінку лише один раз, він знаходить найшвидший шлях до досягнення узгодженості. До недоліків цієї процедури можна віднести, можливо, більш часті висновки про нездатність експерта або відповідної групи експертів досягти консенсусу і, таким чином, успішно завершити експертизу з агрегованою оцінкою в результаті. Однак саме ця властивість процедури унеможливлює прийняття недостатньо надійних експертних оцінок, тому є не недоліком, а скоріше перевагою, яка

дозволяє підвищити достовірність експертних оцінок.

Розроблені методи були апробовані в ході експериментальних досліджень. Через відсутність еталонних значень у слабко-структурованих областях неможливо визначити точність запропонованих методів, тому апробація проводилася в ході порівняльного дослідження методів агрегування парних порівнянь, а саме декількох модифікацій комбінаторного методу. З метою економії високовартісних експертних ресурсів, необхідних для організації експерименту, дослідження проводилося шляхом імітації експертних оцінок за авторською методикою.

Суть методології моделювання експертних оцінок зручно описати на прикладі індивідуальних парних порівнянь. Процес моделювання починається із задання довільних еталонних ваг альтернатив, що оцінюються одним експертом. Ці ваги формально і абсолютно однозначно утворюють повністю (ідеально) узгоджену матрицю парних порівнянь. Далі ця матриця «зашумлюється» таким чином, щоб кожен елемент матриці, крім діагональних, можна було лінійно змінити на величину, пропорційну заданому значенню максимального відносного відхилення у відсотках від еталонних значень, представлених елементами ідеально узгодженої матриці. Таким чином, моделюються похибки експертних оцінок. Значення максимального відносного відхилення, в цьому випадку, представляє можливу відносну похибку експерта при проведенні попарних порівнянь. Далі «зашумлена» матриця подається на вхід одного з методів агрегування з метою отримання узагальнених ваг альтернатив у вигляді вектора вагових коефіцієнтів пріоритетності. Якість (ефективність) методу агрегування парних порівнянь розраховується як максимально можливе відносне відхилення ваги альтернативи, отриманої в результаті розрахунку (агрегування), від еталонної ваги цієї ж альтернативи.

Серед методів агрегування, що були протестовані в експериментальному дослідженні, є методи, які передбачають визначення та підвищення узгодженості. Для таких методів спектри (розподіли) оцінок для кожної

альтернативи будуються на основі «зашумленої» матриці парних порівнянь. З метою найбільш повного використання інформації про співвідношення альтернатив, що міститься в матриці парних порівнянь, побудова розподілу оцінок для кожної альтернативи ґрунтується на декомпозиції графа, що відповідає матриці парних порівнянь, на покривні дерева. Інформація, що міститься в наборі елементів матриці, яка відповідає покривному дереву, однозначно визначає ваги альтернатив – змодельовані експертні оцінки, кожна з яких стає складовою розподілу оцінок, що відповідає альтернативі. Ці імітовані спектри оцінок слугують вхідними даними для тестування методів узгодженості без необхідності залучення реальних, високовартісних експертів.

Методи агрегування на основі узгодженості розраховують мінімально необхідне значення індексу узгодженості для кожного досягнутого значення показника якості, що є порогом узгодженості. Значення порогу узгодженості залежить від необхідного рівня якості (ефективності) для методу агрегування.

На основі створеної методології проведено апробацію та порівняння розроблених методів визначення узгодженості як з урахуванням, так і без урахування компетентності експертів, а також визначено відповідні порогові значення індексів узгодженості. В результаті експерименту підтверджено, що застосування розробленого методу підвищення узгодженості дозволяє отримати більш достовірні агреговані оцінки, порівняно із застосуванням методу агрегування без врахування узгодженості.

Програмна реалізація методу знайшла практичне застосування в рамках системи розподіленого збору та обробки експертної інформації для систем підтримки прийняття рішень «Консенсус-2», на яку отримано авторське свідоцтво на твір. Ця система у складі інтелектуальної інформаційної технології реалізує ряд механізмів групової побудови моделі предметної області. Серед цих механізмів – групова декомпозиція, яка успішно використовується для отримання колективних знань про певний компонент слабко-структурованої складної системи, групова експертна оцінка

характеристик зв’язків між компонентами системи, яка передбачає використання низки методів отримання та обробки експертних оцінок. Саме останній згаданий комплекс програмних засобів, реалізований в рамках системи «Консенсус-2», вимагає використання методів визначення та підвищення узгодженості експертних оцінок з метою досягнення необхідного рівня достовірності групових експертиз.

Запропоновані в дисертації методи реалізовані та використовуються в рамках інтелектуальної інформаційної технології моделювання предметних галузей як при груповому експертному оцінюванні впливу компонентів системи в моделі, так і в режимі індивідуальної роботи експертів при використанні ними методу попарних порівнянь. Крім того, ці методи використовуються при груповому виборі найкращого формулювання з множини формулювань однакового змісту, а також у всіх реалізованих методах, що передбачають агрегування експертних оцінок.

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 estimations, which is used in intellectual information technology in the modelling of subject domains in the course of expertise to improve the adequacy of the models created, which are used to decision-making support. 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.

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 слабко 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.

ЗМІСТ

ВСТУП 19

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ 27

1.1 Місце дослідження 27

1.2 Стан досліджень узгодженості експертних оцінок 30

1.3 Аналіз наявних досліджень 42

1.4 Вимоги до індексу узгодженості 47

1.5 Аналіз наявних індексів узгодженості експертних оцінок 48

1.6 Постановка задачі 56

1.7 Висновки до розділу 1 56

РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ УЗГОДЖЕНОСТІ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК 57

2.1 Індекс узгодженості оцінок 57

2.2 Визначення найбільш неузгодженого випадку 58

2.3 Визначення індексу узгодженості оцінок експертів з урахуванням їх компетентності 61

2.3.1 Формальна постановка задачі 61

2.3.2 Запропоновані варіанти вирішення задачі 62

2.4 Визначення порогового рівня узгодженості 65

2.5 Підвищення узгодженості експертних оцінок 68

2.5.1 Підхід до визначення рівня узгодженості експертних оцінок, достатнього для їх агрегації 70

2.5.2 Метод підвищення узгодженості та його переваги 72

2.5.3 Приклад роботи алгоритму 76

2.6 Висновки до розділу 2 78

РОЗДІЛ 3. АПРОБАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ ТА ПІДХОДІВ У ХОДІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ..... 79

3.1 Сутність методики моделювання експертних оцінок 79

3.2 Хід експериментального дослідження запропонованих методів80

3.3 Формування розподілів оцінок для визначення узгодженості... 82

3.3.1 Спосіб побудови розподілу..... 82

3.3.2 Приклад формування розподілів при моделюванні оцінок... 83

3.4 Визначення узгодженості змодельованих оцінок..... 87

3.5 Визначення порогу узгодженості змодельованих оцінок..... 87

3.6 Знаходження результуючих показників 88

3.7 Реалізація експерименту..... 89

3.7.1 Наявний інструментарій для проведення експерименту 89

3.7.2 Доопрацювання програмного інструментарію 91

3.7.3 Отримані результати розрахунків 91

3.7.4 Застосування результатів 93

3.7.5 Графічний спосіб визначення порогу узгодженості 96

3.7.6 Табличні значення порогу узгодженості..... 96

3.7.7 Аналітичний вираз визначення порогу узгодженості..... 97

3.8 Висновки до розділу 3 98

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ У СКЛАДІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ 99

4.1 Настанова щодо використання системи розподіленого збору та обробки експертної інформації..... 100

4.2 Опис програмної системи..... 100

4.2.1 Склад системи 100

4.2.2 Особливості реалізації системи 100

4.2.3 Функціонування програмної системи 101

4.3 Діаграма варіантів використання системи 121

4.3.1 Актори в системі 121

4.3.2 Варіанти використання системи 123

4.4 Висновки до розділу 4 124

ВИСНОВКИ 126

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 128

ДОДАТОК А Список опублікованих праць за темою дисертації 144

ДОДАТОК Б Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір..... 147

ДОДАТОК В Акти впровадження результатів дисертації 148

ВСТУП

Актуальність теми.

При підтримці прийняття рішень (ППР) для забезпечення належного рівня їх якості важливо, щоб адекватність моделей слабко 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 слабко 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 слабко 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 неперервні чисельні шкали 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 запропонованого 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 Воєнної 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-семінар «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 49 рисунків і 4 таблиці.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Місце дослідження

При ППР у різних сферах життєдіяльності людини все більш важливим стає фактор якості рекомендацій, що надаються СППР. На схемі (рис.1.1) зображено основні фактори, що впливають на якість рекомендацій, серед них є взаємопов'язані. Адекватність моделей предметних галузей та якість вхідних даних – це основні чинники, що розглядаються в даному дослідженні.

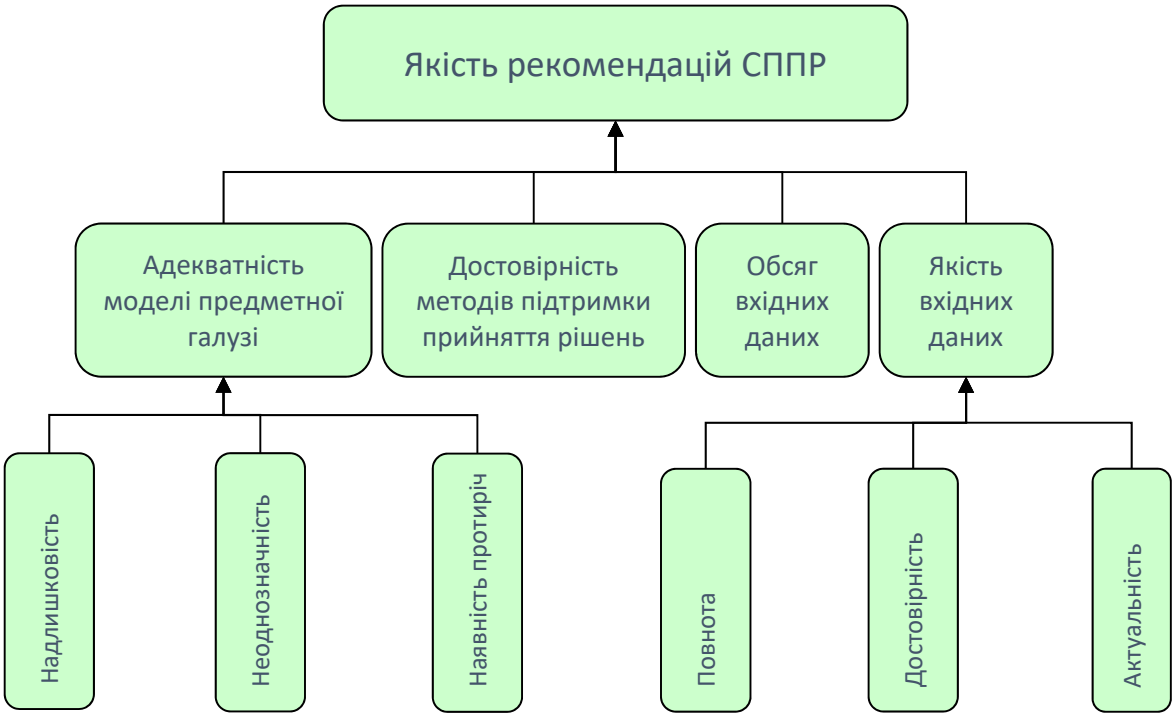


Рис. 1.1. Фактори, що впливають на якість рекомендацій СППР

На адекватність моделей, на основі яких генеруються рекомендації для ОПР, беззаперечно, впливає повнота та несуперечливість інформації та знань, що закладені у ці моделі. Виходячи з цього, адекватність моделей, а, як наслідок, і якість рекомендацій ОПР, залежить у першу чергу від повноти використання наявних знань у тій чи іншій області застосування. Приймати ж важливі рішення потрібно на основі усіх доступних знань про предметну галузь. Дослідження про розподіл видів знань, що використовуються у

повсякденній діяльності певними організаціями проводились в США. На рисунку 1.2 показано результати досліджень Delphi Group [18, 19, 20].

Рис. 1.2. Результати досліджень Delphi Group (США)

Із результатів дослідження можна бачити, що левова частка усіх знань, що використовуються (42%) не є формалізованими чи якимось чином зареєстрованими на носіях інформації, вони можуть бути отримані лише від фахівців-експертів. Саме це обумовлює необхідність залучення експертних знань для генерації якісних рекомендацій ОПР при ППР.

Окрім цього, слід зазначити, що у переважній більшості випадків недоцільно покладатися на знання лише єдиного, хоч і надкомпетентного експерта. Груповим рішенням здебільшого віддається перевага завдяки вищій достовірності результатів у таких експертизах. Отже, достатній рівень адекватності моделей предметних областей може досягатися шляхом підвищення повноти використання знань у цих областях у ході залучення груп експертів до процесу побудови моделей.

Іншим згаданим аспектом, що значно впливає на якість сформованих для ОПР рекомендацій, є несуперечливість інформації. Причому несуперечливість стосується в тому числі і експертної інформації, яка в даному випадку виступає як узгодженість оцінок, наданих експертами. Основна мета

визначення узгодженості експертних оцінок – це вирішення питання, чи достатньою є узгодженість для того, щоб після агрегування цих оцінок був би отриманий достовірний результат. Адже, якщо оцінки узгоджені недостатньо, то після їхньої агрегації може статися ситуація, схожа на випадок стрільби по мішені, коли в результаті усереднення двох промахів справа та зліва від центру мішені, можна отримати середнє значення в центрі мішені. Звичайно, такий отриманий результат агрегації не є інформативним і достовірним, і таких ситуацій бажано уникати при проведенні експертиз. У зв'язку з цим, виникають закономірні питання: 1) «яким чином можливо підвищити узгодженість оцінок?» і 2) «до якої міри це потрібно здійснювати у ході експертизи?».

Інформаційна технологія ППР передбачає ряд етапів обробки потоків інформації, необхідних для прийняття обґрунтованого рішення. На рисунку 1.3 представлено спрощену схему обробки інформації при ППР.

Рис.1.3. Схема обробки інформації при ППР

У схему увійшли наступні елементи (відповідно до етапів обробки інформації):

1) відбір експертів для участі в побудові моделі предметної галузі;
2) отримання від експертів знань про предметну галузь (проведення експертизи);
3) обробка знань у процесі побудови моделі;
4) узагальнення знань;
5) оцінка варіантів рішень на основі побудованої моделі;
6) застосування результатів оцінювання.

Етап обробки знань вносить значний вклад у підвищення якості рекомендацій для ОПР і є предметом дисертаційного дослідження. необхідні методи обробки експертної інформації: Визначення узгодженості експертних оцінок Визначення рівня достатності узгодженості Досягнення достатнього рівня узгодженості

Питанням визначення узгодженості присвячені роботи ряду іноземних і вітчизняних учених: Т. Сааті [21], В. Кочкодайа [22], В.Г. Тоценка [23], М.З. Згуровського [24], Н.Д. Панкратової, Н.І. Недашківської [25], А. Оленка [26], С. Сірайа, Л. Міхайлова, Дж.А. Кіна [27] та ін. Ці та інші роботи будуть розглянуті у наступному підрозділі дисертації.

1.2 Стан досліджень узгодженості експертних оцінок

Аналіз наукових публікацій за тематикою проведення експертиз, експертного оцінювання при ППР та визначення узгодженості експертних оцінок показує наступний, описаний нижче, стан речей. Перш за все, слід зауважити, що в області ППР при проведенні експертиз переважна кількість досліджень пов’язана із застосуванням методу попарних порівнянь, який забезпечує більшу достовірність результатів експертиз ніж безпосереднє оцінювання, хоча і вимагає більше витрат, пов’язаних з високовартісною працею експертів. У зв’язку з цим і переважна більшість наявних досліджень узгодженості стосуються узгодженості матриць попарних порівнянь (МПП),

хоча метою даного дослідження є узгодженість експертних оцінок у загальному вигляді, як порівнянь, так і абсолютних. Розглянемо останні дослідження у цій області.

У значній частині досліджень застосовується аксіоматичний підхід, який є досить ефективним при аналізі та формалізації процесів, пов’язаних з узгодженістю експертних оцінок.

У статті В. Кочкодая та Р. Шварца «Про аксіоматизацію індикаторів неузгодженості попарних порівнянь» [28] представлено аксіоматичний апарат для опису індикаторів неузгодженості для матриць попарних порівнянь. Запропоновано два індикатори неузгодженості – локальний індикатор на основі тріадних відстаней та глобальний індикатор на основі матричних записів. Доведено, що індекс неузгодженості на основі власних значень, який використовується в методі аналізу ієрархій, може допускати як завгодно великі похибки при збільшенні розміру матриці. Проаналізовано два приклади матриць, де цей індекс узгодженості не може належним чином виміряти неузгодженість. Аналіз показує, що індекси неузгодженості на основі власних значень не є надійними порівняно з індексами на основі відстаней, де є можливість локалізувати помилки (оцінювання, що вносять дисонанс у систему оцінок і спричиняють зростання неузгодженості).

У роботі М. Брунеллі та М. Федріззі «Аксіоматичні властивості індексів неузгодженості для попарних порівнянь» [29] представлено п'ять аксіом, спрямованих на характеристику індексів неузгодженості для матриць попарних порівнянь. Проаналізовано кілька найпоширеніших індексів неузгодженості на предмет того, чи задовольняють вони запропонованим аксіомам. Аксіоми включають існування єдиного значення узгодженості, інваріантність при перестановці, монотонність при інтенсифікації переваг, монотонність від узгоджених значень та неперервність. Доведено, що такі індекси, як індекс узгодженості Сааті та індекс геометричної узгодженості, задовольняють усі п'ять аксіом, тоді як інші індекси, такі як індекс гармонічної

узгодженості, не задовольняють деяким аксіомам. Автори стверджують, що аксіоми необхідні для обґрунтованого вимірювання узгодженості.

У М. Брунеллі «Вивчення набору властивостей індексів неузгодженості для попарних порівнянь» [30] досліджено набір властивостей, запропонованих для визначення обґрунтованих індексів неузгодженості для матриць попарних порівнянь. Автор розширює цей набір, додаючи та обґрунтовуючи нову властивість інваріантності при інверсії переваг. Подальший аналіз перевіряє, чи відомі індекси задовольняють цим властивостям, і виявляє, що два з них не повністю відповідають. Для задоволення вимог пропонується скоригована версія одного індексу. Загалом, формальний підхід допомагає зрозуміти, як правильно вимірювати неузгодженість, і відкинути сумнівні індекси. Подальший аксіоматичний аналіз може дати уявлення про раціональне прийняття рішень за допомогою попарних порівнянь.

У Л. Ксато «Аксіоматизація показників неузгодженості для тріад» [31] та у більш ранньому дослідженні [32] також досліджено аксіоматичні підходи до визначення властивостей індексів неузгодженості МПП. Зосереджуючись на множині тріад, показано, що для доповнення попередніх систем потрібні дві нові аксіоми. Загалом, обговорення аксіоматики допомагає зрозуміти, як правильно вимірювати неузгодженість. Автор робить певний внесок у дослідження аксіоматичних підходів до індексів неузгодженості. У цій статті автор пропонує дві нові аксіоми, які додаються до існуючого набору аксіом для індексів неузгодженості для матриць попарного порівняння. Вона показує, що існуючі аксіоми Брунеллі [30] не є вичерпними навіть для тріад (матриць 3x3). Додавання аксіом однорідної обробки альтернатив та інваріантності масштабу робить набір аксіом таким, що характеризує ранжування неузгодженості, індуковане індексом неузгодженості Кочкодая на тріадах. Це означає, що будь-який розумний індекс неузгодженості тріад повинен бути тісно пов’язаний з індексом Кочкодая.

Окрім того, що переважна більшість публікацій за даною тематикою включають у себе порівняльні дослідження індексів (не)узгодженості поряд з

пропозиціями нових підходів та індексів визначення узгодженості, все ж серед них важливе місце посідають публікації, основною метою яких є саме порівняльне дослідження.

Деякі роботи присвячені дослідженню наявних технологій визначення узгодженості. Так, у статті Дж. Агуарона, Х. М. Морено-Хіменес «Індекс геометричної узгодженості: наближені порогові значення» [33] формалізовано індекс геометричної узгодженості як міру неузгодженості для матриць попарного порівняння при використанні методу середнього геометричного рядків. Аналітично показано, що індекс геометричної узгодженості та коефіцієнт узгодженості Сааті є приблизно пропорційними для добре узгоджених матриць. Розраховано приблизні порогові значення, за якими запропонований індекс можна інтерпретувати аналогічно до коефіцієнта узгодженості Сааті. Індекс геометричної узгодженості надає міру неузгодженості для методу середнього геометричного значень рядків, аналогічну до коефіцієнта узгодженості Сааті для методу власного вектора.

У статтях Н. Панкратової та Н. Недашківської [25, 34] досліджуються методи оцінки та підвищення узгодженості експертних суджень в МПП. За допомогою комп’ютерного моделювання досліджено різні коефіцієнти узгодженості та алгоритми підвищення без участі експертів. Їхня ефективність залежить від кількості суттєво порушених елементів – алгоритми ефективні, коли мало елементів є викидами.

У статті «Технічна примітка щодо двох індексів неузгодженості для відношень переваги: випадок функціонального відношення» М. Брунеллі [35] досліджуються два типи відношень переваги – зворотні та мультиплікативні – та індекси неузгодженості, визначені в їх рамках. Показано, що два основні індекси неузгодженості функціонально пов’язані за допомогою логарифмічної функції, тобто, що ці індекси не є незалежними, хоча і вводяться окремо.

У статті В. Чернянової, В. В. Кочкодая, Дж. Сжибовскі «Неузгодженість особливих випадків матриць парних порівнянь» [36] проаналізовано два індикатори неузгодженості для спеціальних випадків матриць парних

порівнянь – індекс неузгодженості на основі власних значень та індикатор неузгодженості Кочкодая на основі відстаней. Розглянуто МПП – це матриці з елементами 1, x та $1/x$. Показано, що для великих розмірностей матриць індекс на основі власних значень прямує до 0, тоді як індикатор неузгодженості Кочкодая залишається високим, що свідчить про те, що перший не може належним чином виміряти неузгодженість. Аналіз надає додаткові докази того, що індекси неузгодженості на основі власних значень не є надійними порівняно з індексами на основі відстаней.

У статтях В. В. Кочкодай, Дж. Сжибовскі «Границя зменшення неузгодженості в попарних порівняннях» [37] та В. В. Кочкодай, Р. Урбан «Аксіоматизація показників неузгодженості для попарних порівнянь» [38] досліджується з формальним доведенням, що межею процесу зменшення неузгодженості на основі відстані для матриць попарних порівнянь є матриця, індукована вектором геометричних середніх рядків. Алгоритм зменшення неузгодженості ітеративно перетворює найбільш неузгоджену тріаду в узгоджену за допомогою ортогонального проектування. Показано, що вектор геометричних середніх є інваріантним на кроках зменшення неузгодженості. Для розміру матриці, більшого за 3, вектор геометричного середнього та головний власний вектор є лінійно незалежними, хоча вони стають тотожними при нормуванні на узгоджену матрицю. Ці результати допомагають спростити процес ранжування об’єктів з неузгодженої матриці попарних порівнянь за допомогою інваріантного вектора геометричного середнього.

У статті М. Брунеллі «Огляд індексів неузгодженості для попарних порівнянь» [39] розглядаються різні індекси неузгодженості, запропоновані для матриць попарних порівнянь. Вводиться поняття неузгодженості та індексів неузгодженості, а потім представляється автономний огляд 16 відомих індексів. Підсумовуються нещодавні порівняльні дослідження, які аналізують подібність між індексами та оцінюють їхню теоретичну обґрунтованість. Обговорюються інші застосування індексів неузгодженості, такі як робота з неповними матрицями, розширення для нечітких парних

порівнянь та прийняття групових рішень. Загалом, багато індексів кількісно оцінюють неузгодженість по-різному, відображаючи альтернативні точки зору, хоча існує ядро подібних індексів.

У статті Ф. Лян, М. Брунеллі, Дж. Резаї, «Проблеми узгодженості в методі Найкращого-найгіршого: вимірювання та порогові значення» [40] розглядаються питання узгодженості в так званому методі Найкращого-найгіршого (Best-Worst method). Це дослідження починається з пропозиції вимірювання кардинальної узгодженості для забезпечення негайного зворотного зв'язку, яке назване вимірюванням узгодженості на основі вхідних даних, після чого пропонується вимірювання порядкової узгодженості для перевірки узгодженості порядку результатів (ваг) з порядком попарних порівнянь, наданих експертом. Також, пропонується метод збалансування кардинального коефіцієнта узгодженості за умов узгодженості з порядком та неузгодженості з порядком для визначення порогових значень для запропонованого та вихідного коефіцієнтів узгодженості.

У статті М. Брунеллі та М.Федріцці «Загальне формулювання для деяких індексів неузгодженості парних порівнянь» [41] запропоновано загальне формулювання для вираження деяких відомих індексів неузгодженості для парних порівнянь як окремих випадків. Показано, що ці індекси можна розглядати як агрегації локальних потрійних неузгодженостей за допомогою функцій, подібних до операторів впорядкованого зваженого усереднення. За розумних припущень, сформовані таким чином індекси задовольняють бажаним властивостям, таким як ефективність за Парето. Це пропонує об'єднавчу перспективу і дозволяє налаштовувати поведінку індексу між усередненням і фокусуванням на найбільшій неузгодженості. Загалом, зроблено висновок, що гнучкість системи поєднує різні погляди на індекси неузгодженості та пов'язана з теорією агрегації. Приклади ілюструють, як балансування внесків локальних неузгодженостей впливає на матричні рейтинги.

Поряд з аналізом наявних мір узгодженості експертних оцінок

розглядається цілий ряд пропозицій нових індексів, підходів, методів, моделей та процедур, пов’язаних з визначенням узгодженості.

У [42] пропонується нова модель прийняття групових рішень з використанням інтервальних мультиплікативних МПП, які представляють нечіткі експертні судження у вигляді інтервалів. Вона визначає індекс геометричної узгодженості (GCI) для вимірювання неузгодженості інтервальних матриць і пов’язує його з індексом узгодженості Сааті.

У [43] пропонується інструмент для аналізу порядкової узгодженості в МПП, який виявляє всі три-цикли, що вказують на логічні невідповідності, та оцінює зміни для усунення циклів і створення узгодженої матриці.

У статті [44] запропоновано індекс узгодженості на основі знань для вимірювання узгодженості нечітких матриць парних порівнянь. Цей індекс кількісно оцінює сумісність між прямими експертними знаннями (оцінками, вираженими в порівняннях) та непрямими (отриманими внаслідок застосування аксіоми транзитивності експертних оцінок). Експерименти порівнюють запропонований індекс із існуючим, показуючи схожі оцінки узгодженості, але запропонований індекс є швидшим в обчисленні та дозволяє отримати чітку, ідеально узгоджену МПП та вектор пріоритетів з нечіткої матриці.

У статті [45] введено новий індекс неузгодженості для турнірних матриць, заснований на порівнянні парних порівнянь з вектором пріоритетів. Також визначено два турнірні індекси неузгодженості для мультиплікативних МПП, які перетворюють МПП на турнірну або використовують вектор пріоритетів для порівняння фактичних порівнянь з теоретичними. Приклади показали, що між порядковими та кардинальними рейтингами можуть існувати неузгодженості. Запропоновано нові індекси неузгодженості, засновані на порівнянні порівнянь із загальним рейтингом.

У статті [46] запропоновано адаптовані версії існуючих індексів неузгодженості, які дозволяють використовувати їх з неповними матрицями попарних порівнянь та проаналізовано робастність (стійкість) цих індексів.

Адаптовані індекси порівнюються в експерименті Монте-Карло, який аналізує їхню робастність, коли деякі порівняння випадково вилучаються.

У статті [47] представлено новий підхід, у якому використовується машинне навчання для обробки неузгодженостей щодо нечіткого відношення. Підхід створює гранульовану апроксимацію нечіткої множини, яка є максимально наближеною до вихідної нечіткої множини, усуваючи при цьому неузгодженості.

У статті [48] запропоновано нову міру неузгодженості для матриць попарних порівнянь на основі max-плюс алгебри. Вона перетворює матрицю в логарифмічний простір, розв'язує задачу на власні значення для знаходження найбільш значущого неузгодженого циклу, а власне значення відображає неузгодженість. Міра враховує неузгодженості для всіх довжин циклів (поліад), на відміну від типових мір, що базуються на тріадах. Показано, що вона задовольняє властивостям, зазначеним у літературі, і є робастною в чисельних експериментах.

Питанням підвищення узгодженості приділяється значна увага дослідників, оскільки метою будь-якої експертизи є отримання узагальненої оцінки, достовірність якої може бути задовільною лише у випадку агрегації достатньо узгоджених оцінок. Вирішити питання забезпечення достатнього для агрегації рівня узгодженості дослідники пропонують або за допомогою зворотного зв'язку з експертами шляхом зміни попередньо наданих ними оцінок, або без залучення експертів зменшенням кількості оцінок задіяних у агрегації, наприклад, відкидаючи найбільш неузгоджені оцінки.

Найбільш неузгоджені оцінки, що вносять дисонанс у множину оцінок і є, так званими викидами, займають увагу дослідників, здебільшого, через те, що для підвищення узгодженості ефективно змінювати або відкидати саме такі оцінки.

У статті [49] запропоновано метод для виявлення та коригування неузгоджених суджень у МПП. Метод може виявляти як кардинальні неузгодженості, де $a_{ij} \neq a_{ik} \cdot a_{kj}$, так і порядкові неузгодженості з

неперехідними перевагами. Він використовує матричну математику для побудови матриці зміщення, яка виявляє найбільш суперечливі судження. Метод покладається лише на вихідні дані порівняння і не залежить від методів визначення пріоритетів, він визначає невідповідності, рекомендує скориговані значення і підвищує коефіцієнт узгодженості.

У статті [50] пропонується методологія аналізу ефективності методів пошуку найбільш неузгоджених суджень у матрицях парних порівнянь. Слабкі неузгоджені матриці парних порівнянь генеруються там, де відомий найбільш неузгоджений елемент. Кілька методів тестуються, щоб побачити, чи правильно вони ідентифікують цей елемент. Результати показують, що запропонований у статті метод працює найкраще у порівнянні з розглянутими, правильно знаходячи неузгоджений елемент у 95% випадків. Наведено алгоритм для підвищення узгодженості МПП без залучення експертів шляхом ітеративного виправлення найбільш неузгоджених суджень.

У статті [51] запропоновано метод підвищення коефіцієнта узгодженості матриць попарних порівнянь (МПП), що використовуються в аналітичних мережевих процесах (ANP). Він визначає неузгоджені елементи, зберігаючи при цьому більшу частину вихідної інформації для порівняння, наданої експертами. Метод використовує матричну математику і методи зменшення порядку для точного визначення проблемних елементів.

У статті [52] досліджуються методи підвищення узгодженості МПП. Запропоновано інтерактивний метод з’ясування для перевірки та виправлення проблем транзитивності за участю експерта. Евристичне правило пропонує значення найближчого сусіда для підвищення кардинальної узгодженості, зберігаючи при цьому вподобання експерта.

У статті [53] запропоновано евристичні алгоритми для підвищення узгодженості та досягнення консенсусу для мультиплікативних відношень переваг при прийнятті групових рішень. Алгоритм підвищення узгодженості змінює переваги локально, щоб досягти заздалегідь визначеного порогу.

У статті О.Олецького [54] розглядається підвищення узгодженості матриць попарних порівнянь для ранжування альтернатив за допомогою методу аналізу ієрархій. Тут автор застосовує алгебраїчний підхід, запропонований і досить широко впроваджений Г.Гнатієнком [56], де підвищує узгодженість шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь, що представляють експертні судження та кардинальні вимоги до узгодженості.

Визначення узгодженості між оцінками, даними різними експертами з'являються в численних наукових та прикладних дослідженнях, різних типів завдань аналізу даних. Публікації [57-61] дають розуміння та описи застосувань в області прикладної психології. Деякі прикладні результати та бібліографію можна знайти в [62-66].

Індекси узгодженості між експертами були використані і вивчені в ряді ситуацій. Наприклад, стаття К. Сміт-Кроу, М. Дж. Берк, М. Кучакі та С.М. Сігнал [67] повідомляє, що майже половина з статей, опублікованих в різних наукових журналах в галузі прикладної психології використовують індекси узгодженості між експертами. Останнім часом такі показники часто застосовувались для обґрунтування агрегування даних нижнього рівня в багаторівневих та ієрархічних моделях. Деякі статистичні характеристики таких показників були отримані та обговорювались для конкретних сценаріїв (наприклад, [68-72]).

Показники узгодженості також можна використовувати для визначення наявності консенсусу у поглядах експертів. За допомогою цих показників можна визначити чи подібні оцінки дають експерти при оцінюванні одного і того ж самого об'єкта. Особливо цікаві випадки багаторівневих і ієрархічних моделей, де кожна підсумкова оцінка є результатом узагальнення різних відповідей (оцінок). У таких ситуаціях, методи визначення узагальненої оцінки можуть мати достатньо складну для дослідження структуру.

Інша, потенційно цікава область – це коли людей-експертів замінюють деяким автоматичним процесом вибору, так наприклад, методи інтелектуального аналізу даних, які вибираються з великої кількості

потенційно придатних методів. Більш докладно про застосування показників узгодженості можна прочитати в [66, 67] та в [60].

Показники узгодженості також широко застосовуються при оцінюваннях де не задані чіткі варіанти відповідей (запитаннях відповіді на які формулюються в довільній формі самими експертами), особливо коли різні експерти використовують дещо різні критерії. В таких випадках дані, отримані від експертів можуть мати ієрархічну структуру (див. [73]). В іншому важливому додатку оцінювання творів досліджується збільшення консенсусу експертів при оцінюванні до і після проведення відповідного тренінгу.

Окремо слід відзначити наукову школу Інституту проблем реєстрації інформації Національної академії наук України, започатковану професором Тоценком Віталієм Георгійовичем, яка внесла вагомий вклад в розвиток теорії узгодженості експертних оцінок. Вирішення задач даного дисертаційного дослідження у значній мірі спирається на здобуті результати цією науковою школою.

Перш за все – спектральний підхід до визначення узгодженості, започаткований професором Тоценком [23], який передбачає подання множини експертних оцінок у вигляді розподілу (спектру) значень – графічного представлення на дискретній лінійній шкалі оцінювання. Цей підхід дуже добре узгоджується із застосуванням вербальних шкал у ході експертних оцінювань та з оцінюваннями у складі груп експертів. На основі цього, досить обґрунтованого підходу було розроблено ряд методів визначення та підвищення узгодженості, починаючи зі спектрального коефіцієнта узгодженості з його пороговими значеннями [23] і продовжуючи методами підвищення узгодженості зі зворотним зв’язком як для індивідуальних експертиз [74, 75], так і для групових [76].

Спектральний підхід до визначення узгодженості експертних оцінок був розширений публікацією [77], де запропоновано в якості складових спектру використовувати значення, отримані не лише за рядком чи стовпцем МПП, а й за кожним покривним деревом графу, відповідного даній МПП.

Виявлені певні недоліки спектрального коефіцієнта узгодженості, що проявлялись при організації зворотного зв'язку з експертом, що необхідний для підвищення узгодженості, спонукали авторів [26] до створення індексу узгодженості на основі подвійного визначення ентропії. Це дослідження дозволило розширити застосування поняття узгодженість на сферу не лише експертних оцінок, але й оцінок, так званих, оцінювачів – рейтерів (англійською: Raters). Рейтери приймають участь у рейтингуваннях і відрізняються від експертів тим, що виражають лише своє відношення до об'єктів загалом, а не оцінюють їхні певні властивості, якості. При роботі рейтерів, зазвичай, немає тієї «фундаментальної істини», яку прагнуть виявити шляхом проведення експертизи, пов'язаної з отриманням знань. У зв'язку з цим, немає жодного сенсу питання підвищення узгодженості оцінок рейтерів при рейтингуванні, оскільки не доречно впливати на відношення рейтера до об'єкта чи спонукати змінити це відношення.

Питання узгодженості ранжирувань – порядкових (ординальних) оцінок на основі підходів, відомих іще з XVIII століття [78, 79], визначення коефіцієнтів рангової кореляції Кендала [80] і Спірмана [81]), а також коефіцієнтів конкордації [80] та, крім того, визначення достатнього рівня узгодженості таких оцінок розглядалось у роботі [82]. Достатність узгодженості ранжирувань тут розглядається в контексті вимог особи, що приймає рішення (ОПР), до точності визначення узагальненого ранжирування, тобто, пропонується дізнатися у ОПР про припустиме значення відхилень індивідуальних ранжирувань від узагальненого ранжирування. У [83] було розвинено цей підхід і запропоновано вважати множину індивідуальних ранжирувань достатньо узгодженою для їхньої агрегації, у тому випадку, якщо отримане на їхній основі підсумкове відношення також є ранжируванням, тобто, відношенням лінійного порядку. Відомо, що відношення лінійного порядку задовольняють властивостям рефлективності, антисиметричності, транзитивності та зв'язності, і, саме, кількість порушень транзитивності свідчить про рівень узгодженості ранжирувань.

Метод агрегації попарних порівнянь зі зворотним зв'язком з експертом, а також алгоритмічна реалізація цього методу представлені в [75]. Цей метод дозволяє за матрицею попарних порівнянь (МПП), у загальному випадку – не повною, визначити вектор пріоритетів (ваги альтернатив), причому, у ході роботи методу в МПП визначаються найбільш неузгоджені елементи – порівняння і надається пропозиція експертові змінити ці попередньо надані оцінки (попарні порівняння) для підвищення узгодженості. У методі запропоновано оригінальний підхід до агрегації попарних порівнянь, який полягає у декомпозиції графа, відповідного МПП, на покривні дерева з подальшою агрегацією векторів пріоритетів, визначених за кожним таким деревом. Ефективність агрегації такого підходу була підтверджена експериментальним імітаційним дослідженням [84], яке показало переваги даного підходу та, окрім того, у подальшому, було аналітично доведено оптимальність за (логарифмічними) найменшими квадратами результатів агрегації попарних порівнянь [85]. Актуальність представленого підходу в деякій мірі була підтверджена появою «перевідкриття» методу у 2012 році [86] з подальшою публікацією виправлення [87] до цієї статті у наступному номері журналу.

Цей перелік досліджень ще далеко не вичерпаний.

1.3 Аналіз наявних досліджень

Як видно з поверхневого опису лише останніх досліджень, тематика узгодженості експертних оцінок є затребуваною і актуальною. Більшість досліджень стосується узгодженості при застосуванні в експертизах методу попарних порівнянь, де визначається узгодженість МПП.

Фактично, перелічені дослідження вирішують питання визначення узгодженості, і деякі з них торкаються питання її підвищення. Крім того, запропоновані показники визначення узгодженості за вхідні дані переважно беруть лише експертні оцінки у вигляді повністю заповнених МПП і не розглядають, наприклад, безпосередні оцінки експертів і неповні МПП.

Що стосується методів, які передбачають підвищення узгодженості шляхом застосування зворотного зв'язку з експертом, то такі методи досліджувалися колективом вітчизняних учених на початку минулого десятиліття [88]. Ці дослідження започаткували аналіз цілого ряду методів, які дозволяють досягати бажаної достовірності результатів у експертизах. До таких методів, що описані в [88] і отримали назву «зі зворотним зв'язком з експертом», слід віднести наступні: методи отримання кардинальних експертних оцінок шляхом парних порівнянь «трикутник» і «квадрат»; з попереднім упорядкуванням альтернатив і без нього; із застосуванням як мультиплікативних, так і адитивних порівнянь.

Основним джерелом критики, яка має місце стосовно згаданого сімейства методів зі зворотним зв'язком, є наявність тиску на експерта при зверненні до нього з пропозицією про зміну своєї попередньої оцінки. Незважаючи на те, що експерту завжди надається можливість відмовитися змінювати свою попередню оцінку, все ж наявність такого звернення деякою мірою спонукає експерта погоджуватися з наданими системою пропозиціями. Мотивацією такої поведінки експерта, а саме – переважно погоджуватися на певну зміну своєї попередньої оцінки, може слугувати бажання якомога швидше завершити експертизу.

У дослідженнях [12] розглядається ряд проблем визначення рівня узгодженості оцінок у разі групової експертизи. Проведений аналіз публікацій свідчить про те, що попри наявну велику кількість запропонованих методів визначення рівня узгодженості, всі вони містять істотні недоліки, які суттєво знижують достовірність результатів експертних оцінювань. Серед цих недоліків, які характерні певним методам, 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.

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 слабко структуровану предметну область, 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 слабко 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 групову 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 (так зване число Міллера) [89], 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 є недоцільною. Хоча, засоби експертного оцінювання з використанням вербальних шкал різної докладності, що запропоновані у докторській дисертації В.В.Циганка [90], можуть описуватись в термінах нечітких оцінок.

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 неузгодженість 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 [23, 91]. Підхід полягає в застосуванні індексу (коефіцієнта) узгодженості, що є згорткою суми відхилень від середнього арифметичного оцінок – складових «спектра» (аналога дисперсії сигналу) і ентропії Шеннона [92], 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 нижчі 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 [21]: 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 Оленком та Циганком [26]. 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.

1.4 Вимоги до індексу узгодженості

Сформулюємо вимоги до індексу узгодженості, які накладаються необхідністю його використання для підвищення достовірності експертиз та із розуміння здорового глузду щодо узгодженості.

Отже, щоб розробити метод визначення ступеня узгодженості, вирішено взяти до уваги наступні базові вимоги:

Вимога 1. При експертному оцінюванні завжди існує деяка «істинна» оцінка, визначення якої є метою проведення групової експертизи.

Вимога 2. Ця «істинна» оцінка відповідає деякому усередненому значенню множини індивідуальних оцінок експертів.

Вимога 3. Множину індивідуальних експертних оцінок можливо подати на обмеженій з обох сторін чисельній неперервній або дискретній шкалі.

Вимога 4. Максимальний рівень узгодженості (1.0) досягається тоді, і тільки тоді, коли всі експерти вибрали одну й ту ж саму оцінку.

Вимога 5. Індекс узгодженості повинен бути незалежним від зсувів оцінок, тобто множина оцінок {1,2,5} матиме той самий індекс, що й {4,5,8}.

Вимога 6. При одній і тій самій множині оцінок, збільшення розміру шкали приводить до підвищення індексу узгодженості, і навпаки.

Вимога 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.

Вимога 8. Індекс має мати властивість масштабованості: при лінійних змінах (одночасному пропорційному збільшенні/зменшенні) розмірів шкали і значень усіх оцінок індекс узгодженості залишається незмінним.

1.5 Аналіз наявних індексів узгодженості експертних оцінок

Провівши вторинний аналіз бібліографічних джерел, можна стверджувати, що у спеціалізованій літературі чимало уваги приділено окресленій задачі. Дослідниками запропоновано цілу низку індексів для визначення рівня узгодженості експертних оцінок. Такі індекси мають свої переваги та недоліки, однак, як виявилось, жоден з них не гарантує необхідного рівня достовірності для застосування в практичних умовах на статистичних вибірках різного масштабу. Отже, варто коротко проаналізувати такі запропоновані інструменти та їхню специфіку.

Нехай маємо n експертів, кожний з яких надав оцінку $x_i, i = \overline{1..n}$ на шкалі $[1, s]$. Позначатимемо їхній індекс узгодженості як $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}_{[1,s]}$.

Також, для того щоб емпірично визначати набори оцінок, що мінімізують та максимізують індекси узгодженості, будемо генерувати усі вибірки оцінок для n експертів на шкалі $[1, s]$. Позначатимемо мінімум як $m^n_{[1,s]}$, а максимум як $M^n_{[1,s]}$.

Розглянемо існуючі індекси узгодженості, проаналізуємо їх недоліки та чи виконуються для них вищеописані вимоги.

1) Стандартне відхилення вибірки (sample standard deviation), Шмідт і Гантер [93].

– Він визначається як $I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - M)^2}{n-1}}$, де $M = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$.

– Цей інструмент оцінює рівень узгодженості через дисперсію від середнього значення. Індекс демонструє високу розбіжність значень для різних вибірок і не гарантує однорідного визначення узгодженості.

До того ж не виконуються наступні вимоги:

- Не виконується вимога 4. Найбільш узгоджений випадок має індекс узгодженості рівним нулю. І сам індекс не є нормованим, тобто його значення виходять за інтервал [0,1], наприклад, $M^{10}_{[1,5]} = \{1,1,1,1,1,5,5,5,5,5\}_{[1,5]} = 2.11$.
- Варто зазначити, що він не враховує зміну шкали при одних і тих самих оцінках, тобто $\{1,2,5\}_{[1,5]} = \{1,2,5\}_{[1,10]} = 2.08$. Таким чином, не виконується вимога 6.

2) Коефіцієнт варіації (coefficient of variation).

– Індекс визначається як $I = \frac{1}{M}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - M)^2}{n-1}}$, де $M = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$.

– Цей індекс визначає узгодженість через дисперсію стандартного відхилення вибірки. У ньому присутні такі ж самі недоліки, як і для індексу стандартного відхилення. В доповнення, оскільки в ньому з'явився множник $\frac{1}{M}$, то для «дзеркальних» оцінок (коли зображення їхнього розподілу має осьову, тобто дзеркальну, симетрію) отримуються різні значення: $\{1,3,5,5\}_{[1,5]} = 0.55 \neq \{1,1,3,5\} = 0.77$.

– Окрім того, якщо проаналізувати найбільш неузгоджений випадок для 8-ми експертів $M^{8}_{[1,8]} = \{1,1,1,1,1,1,1,8\}_{[1,8]} = 1.32$, то можемо виявити, що індекс не є монотонним (наприклад, набір оцінок $\{1,1,1,1,1,1,1,8\}$ менш узгоджений ніж $\{1,1,1,1,1,1,8,8\}$). До того ж, це йде в розріз з визначенням найбільш неузгоджених випадків розподілу експертних оцінок.

3) Індекс скоригованого середнього відхилення (adjusted average deviation index), Берк та ін. [94].

– Індекс визначається як $I = \frac{2M-1}{2M(M-1)} \sum_{i=1}^{n} |x_i - M|$, де $M = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$.

– Цей індекс подібний до стандартного відхилення вибірки, але дозволяє досягнути більш достовірних результатів завдяки врахуванню аспекту згоди між експертами. Помічені недоліки даного індексу є такими самими як і для індексу стандартного відхилення.

4) Індекси r_{wg} (Джеймс та ін. [95]) та r^{*}_{wg} (Лінделл та ін. [96]).

– Вони визначаються як $r_{wg} = \max\left(1 - 144 \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - M)^2}{(n-1)(n^2-1)^2}, 0\right)$ $r^{*}_{wg} = 1 - 16 \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - M)^2}{(n-1)^5}$.

– Перелік недоліків r_{wg} не обмежується наступними:

- Індекс не є неперервним, що ускладнює, або, навіть, унеможливлює його застосування в досліджуваній сфері.
- Набір оцінок $\{1,1,1,1,5\}$ даний індекс визначає одним з найбільш неузгоджених: $\{1,1,1,1,5\}_{[1,5]} = 0$, тобто, таким самим, як і $\{1,1,1,5,5\}$. З цього також випливає, що індекс не є монотонним.
- У відповідності з розрахунками цього індексу, дуже велика кількість наборів оцінок отримують індекс рівним нулю. Тобто, індекс виявляється не достатньо чутливим при визначенні низьких рівнів узгодженості множин експертних оцінок.
- Не виконується вимога 6, що підтверджує приклад: $\{1,3,4,5\}_{[1,5]} = \{1,3,4,5\}_{[1,6]} = 0$.

- Також, не виконується вимога 7, оскільки $\{1,3,3,5\}_{[1,6]} = 0.09 > 0 = \{1,3,4,5\}_{[1,6]}$, але $\{1,3,3,5\}_{[1,5]} = \{1,3,4,5\}_{[1,5]} = 0$.

– Недоліки індексу r_{wg}^{*}:

- Результат розрахунку за цим індексом не нормований до $[0,1]$, окрім того може приймати від'ємні значення: $\{1,1,1,5,5\}_{[1,5]} = -0.2$.
- Індекс не є монотонним, оскільки $\{1,1,1,6\}_{[1,7]} = 0.31 < 0.41 = \{1,1,5,5\}_{[1,7]}$ (хоча, з точки зору здорового глузду, мало би бути навпаки), також: $\{1,1,1,6\}_{[1,7]} = 0.31 < 0.33 = \{1,1,4,6\}_{[1,7]}$. У цьому випадку, віддалення оцінки від середнього значення призводить до збільшення індексу, але так не має бути.

5) Індекс a_{wg}, Браун та Гавенстейн [97].

– Індекс визначається як $I = 1 - \frac{2(m-1)\sum_{i=1}^{n}(x_i - M)^2}{m(n-1)\left((i_1+i_k)M - M^2 - i_1 i_k\right)}$, де $M = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$, i_1 – найменша вибрана оцінка, а i_k – найбільша.

– Властивості даного індексу подібні до властивостей r_{wg} та, у деякій мірі, доповнюють властивості його.

– Але не виконуються наступні вимоги:

- Не виконується вимога 4. Індекс не є нормованим, тобто його значення виходять за інтервал $[0,1]$, присутні, навіть, від'ємні значення, наприклад, $m_{[1,7]}^{4} = \{1,1,1,6\}_{[1,7]} = -1$.
- Індекс не є монотонним: $\{1,1,1,6\}_{[1,7]} = -1 < -0.68 = \{1,1,5,6\}_{[1,7]}$
- Ще, варто зазначити, що цей індекс не враховує зміну шкали при одних і тих самих оцінках, тобто, $\{1,2,5\}_{[1,5]} = \{1,2,5\}_{[1,10]} = -0.49$. Таким чином, не виконується вимога 6.

6) Спектральний показник узгодженості (spectral consistency ratio), запропонований Тоценком [23, 91] і більш загальний випадок для групових експертиз – Згуровський, Тоценко та Циганок [76].

Наявність цього показника, який ґрунтується на побудові розподілів (спектрів) експертних оцінок при груповому оцінюванні, якраз і спонукала до

використання підходів, що застосовуються у цьому дисертаційному дослідженні. Даний показник розраховується відповідно до формули:

$$k(S_{vj}) = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i |i - \sum_{i=1}^{n} i\sigma_i| - \sum_{i=1}^{n} \sigma_i \, ln\, \sigma_i}{G \sum_{i=1}^{n} |i - (n+1)/2| + ln\, n}\right) z, \qquad (1.1)$$

де $G = \frac{m_j}{\ln(m_j) n \ln(n)}$ – масштабний коефіцієнт; $z = \begin{cases} 1, & \text{якщо } z^* = true \\ 0, & \text{якщо } z^* = false \end{cases}$,

$z^* = \overline{[i(1) = 1]} \vee \overline{[i(n) = 1]} \vee_{d=1}^{q_i - 1} \overline{[\sigma_i(d) = \sigma_i(d+1)]} \vee_{d=1}^{q_i - 1} \overline{[i(d) - i(d+1)] = const}$,

де m_j – кількість експертів, що оцінили j-й об'єкт; q_i – кількість груп експертів, що дали однакові оцінки j-го об'єкта; $i(d)$ – номер поділки шкали, до якої заокруглені оцінки, дані експертами d-ї групи, $d = (1, q_i)$; $\sigma_i(d)$ – сума коефіцієнтів компетентності експертів, оцінки яких заокруглені до поділки з номером $i(d)$; z^* – булева функція, що задає необхідні й достатні умови рівності 0 коефіцієнта узгодженості $k(S_{vj})$.

Усе ж, і для цього показника мають місце ряд недоліків:

- Функція розрахунку не є неперервною (це випливає з визначення індексу).
- Мінімальне за визначенням значення індексу не завжди 0, наприклад, $m_{[1,10]}^5 = \{1,1,2,9,10\}_{[1,10]} = \{1,2,9,10,10\}_{[1,10]} = 0.23$.
- Не виконується вимога 7, оскільки $\{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\}_{[1,11]} = 0.35 > 0.28 = \{1,1,1,1,1,9,10,10,10,10\}_{[1,11]}$, але $\{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\}_{[1,10]} = 0 < 0.21 = \{1,1,1,1,1,9,10,10,10,10\}_{[1,10]}$

7) Зважений індекс спарювання (weighted pairing index), Чіккетті та ін. [80].

– Індекс визначається як $I = \frac{\sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} f_i f_j \left(1 - \frac{|i-j|}{s}\right) - n}{n(n-1)}$, де f_i – кількість експертів, що вибрали оцінку i.

– Цей індекс базується на визначенні відстані відхилення експертних оцінок від середнього показника групи.

Не виконуються наступні вимоги:

- Індекс не є нормованим, тобто хоча його значення і лежать всередині інтервалу [0,1], але інколи нульове значення не досягається, наприклад,

$m^7_{[1,7]} = \{1,1,1,1,7,7,7\}_{[1,7]} = 0.51$. Це може бути проблемою при визначенні порогових значень індексу.

- Індекс в певному сенсі не є монотонним, оскільки, усі набори множин $\{1,1,1,1,7,7,7\}$, $\{1,1,1,2,7,7,7\}$, $\{1,1,1,3,7,7,7\}$, $\{1,1,1,4,7,7,7\}$, $\{1,1,1,5,7,7,7\}$, $\{1,1,1,6,7,7,7\}$, $\{1,1,1,7,7,7,7\}$ на шкалі $[1,7]$ мають індекс узгодженості, що дорівнює 0.51. Також $\{1,1,1,1,2,2,7\}_{[1,7]} = \{1,1,1,2,2,2,7\}_{[1,7]} = 0.71$
- Індекс дає занадто високі значення для рівномірних розподілів: $\{1,2,3,4,5,6,7\}_{[1,7]} = 0.62$.

8) Критерій узгодженості Пірсона (Pearson's statistic).

– Він визначається як $I = \frac{s}{n}\sum_{i=1}^{s}\xi(f_i)\left(f_i - \frac{n}{s}\right)^2$, де f_i – кількість експертів, що вибрали оцінку i, а $\xi(f_i) = \begin{cases} 1, & f_i > 0 \\ 0, & f_i = 0 \end{cases}$.

– Цьому індексу притаманні наступні недоліки:

- Індекс не є нормованим, тобто, його значення виходять за інтервал $[0,1]$. Мінімум не завжди 0: $m^7_{[1,10]} = \{1,2,3,4,5,6,7\}_{[1,10]} = 3$.
- При розрахунку індексу враховуються частоти оцінок, а не їхні значення, тобто: $\{1,1,2,2\}_{[1,10]} = \{1,1,5,5\}_{[1,10]} = 16$.
- Через врахування лише частоти оцінок, індекс не є монотонним: $\{1,1,2,3\}_{[1,10]} = \{1,1,9,10\}_{[1,10]} = 11$.

9) Індекс подвійної ентропії (double entropy index), Оленко та Циганок [26].

Цей показник докладніше проаналізований у публікації [8], де позначення: $n \geq 2$ – кількість поділок шкали оцінювання (кількість оцінок, можливих для використання експертом), $I = \{i_1, \dots, i_k\}$ – множина оцінок, обраних експертами і, без втрати загальності, вважається, що $i_1 < i_2 < \cdots < i_k$.
$m \geq 2$ – загальна кількість експертів та r_i – кількість тих, хто дав оцінку i. Розподіл оцінок позначено через $R = (r_1, \dots, r_n)$. Якщо оцінку i не обрано, то $r_i = 0$. Тому, $m = \sum_{i \in I} r_i$.

Для заданих значень k, m та n найбільш неузгодженою вважається така множина оцінок, коли:

· k елементів із I є рівновіддаленими в множині $\{1, \ldots, n\}$, де $i_1 = 1$ та $i_k = n$ (або відстань між сусідніми оцінками відрізняються не більш ніж на 1, якщо $k < n$ і рівновіддалене розміщення неможливе, тобто $k - 1$ не є дільником $n - 1$);

· значення $\{r_{i_1}, \ldots, r_{i_k}\}$ однакові (відрізняються не більше ніж на 1, якщо k не є дільником m). Це означає, що однакова кількість експертів обрали кожну з k оцінок, і ці k оцінок рівномірно розподілені на числовому промені від 1 до n.

Для оцінювання узгодженості множини експертних оцінок використовується розподіл обраних оцінок $i_1, \ldots, i_k$ із множини $\{1, \ldots, n\}$ та розподіл частот $r_i,\ i \in I$ цих оцінок.

Для кожного з цих розподілів пропонується обчислити ентропію Шенона та нормалізувати її до інтервалу [0, 1]. Подвійно-ентропійний показник визначається як середнє значення нормалізованих ентропій:

$$\kappa_0(P, Q) = \frac{H^*(P) + H^*(Q)}{2}, \tag{1.2}$$

де $H^*(P) = \begin{cases} \frac{H(P) - min_P H(P)}{max_P H(P) - min_P H(P)}, & \text{якщо } k < n \\ 1, & \text{якщо } k = n \end{cases}$ та $H^*(Q) = \frac{H(Q)}{max_{k,Q} H(Q)}$.

Щоб задати неузгодженість між k обраними експертними оцінками використовується ентропія [92]: $H(P) = -\sum_{j=1}^{k} p_j \ln p_j$, у якій для опису розкиду оцінок $\{i_1, \ldots, i_k\}$, використовуються відстані $d_j = i_{j+1} - i_j,\quad j = 1, \ldots, k - 1$, між послідовними обраними оцінками. Тоді як додаткова відстань між i_k та i_1 може бути подана у наступному вигляді:

$$d_k = \begin{cases} (n - i_k) + (i_1 - 1) + \left[\frac{n-1}{k-1}\right], & \text{якщо } k > 1 \\ n, & \text{якщо } k = 1 \end{cases}, \tag{1.3}$$

де $[x]$ – найбільше ціле число, менше або рівне x.

Звернімо увагу, що усі відстані – додатні цілі числа, і їхня сума однакова для кожного k, незалежно від фактичних значень $\{i_1, \ldots, i_k\}$. Ця сума дорівнює

$$d = \begin{cases} n - 1 + \left[\frac{n-1}{k-1}\right], & \text{якщо } k > 1 \\ n, & \text{якщо } k = 1 \end{cases}. \quad (1.4)$$

Множину відстаней $\{d_1, \dots, d_k\}$ нормалізують так, щоб сума була рівна 1 і відповідні частки $P = \{p_1, \dots, p_k\}$ знаходяться за формулою $p_j = \frac{d_j}{d}$, $j = 1, \dots, k$.

Для того, щоб охарактеризувати ступінь неузгодженості для Q використовується ентропія [92]: $H(Q) = -\sum_{i \in I} q_i \ln(q_i)$, де для опису розподілу частот r_i, $i \in I$, вони нормалізуються і визначаються відповідні відношення $Q = \{q_i,\ i \in I\}$ за формулою $q_i = \frac{r_i}{\sum_{i \in I} r_i}$, $i \in I$. І, нарешті, відповідний показник узгодженості експертних оцінок $\kappa(P, Q)$ визначається як

$$\kappa(P, Q) = 1 - \kappa_0(P, Q). \quad (1.5)$$

Отже, при розрахунку цього індексу враховується міра невизначеності (ентропія) значень експертних оцінок, а також ентропія їхніх частот.

– Недоліки цього методу:

- Індекс не є монотонним: при віддаленні однієї оцінки від основної множини оцінок індекс спочатку зменшується, а потім збільшується, наприклад, $\{1,2,3,6\}_{[1,10]} = 0.28$, $\{1,2,3,8\}_{[1,10]} = 0.22$, але $\{1,2,3,10\} = 0.28$.
- Індекс може бути нечутливим до зміни значень оцінок, частоти яких повторюються, наприклад: $\{1,3,3,5\}_{[1,5]} = \{1,3,5,5\}_{[1,5]} = 0.125$.
- Не виконується вимога 6, оскільки: $\{1,2,10,10\}_{[1,10]} = 0.34 > 0.29 = \{1,2,10,10\}_{[1,12]}$.
- Не виконується вимога 7: $\{1,2,3,6\}_{[1,10]} = 0.28 < 0.34 = \{1,2,10,10\}_{[1,10]}$, але $\{1,2,3,6\}_{[1,12]} = 0.31 > 0.29 = \{1,2,10,10\}_{[1,12]}$.

Таким чином, виходячи з наведеного вище аналізу, можна дійти висновку, що наявні в літературі інструменти не надають надійних засобів для вирішення задач, поставлених у межах поточного дослідження. Це свідчить про актуальність пошуку оптимальної функції для дослідження рівня узгодженості експертних оцінок.

1.6 Постановка задачі

Постановку задачі дослідження можна подати наступним чином:

Дано множину 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, який задовольняє вищеописаним вимогам, поріг узгодженості, достатній для агрегації множини оцінок і у випадку недостатньої узгодженості – підвищити узгодженість множини оцінок за допомогою зворотного зв'язку з експертом.

1.7 Висновки до розділу 1

Перший розділ присвячено аналізу проблематики узгодженості експертних оцінок в області підтримки прийняття рішень. Проведено огляд наявних досліджень у цій області та задач, що випливають з цілі дослідження.

Проведено огляд наявних індексів узгодженості та виявлено їх відповідність до сформульованого переліку вимог до індексу узгодженості. Аналіз свідчить про відсутність індексів узгодженості, що в повній мірі задовольняють вимоги, що спонукає до розробки засобів визначення рівня узгодженості відповідно до сформульованої постановки задачі.

РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ УЗГОДЖЕНОСТІ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК

Метод визначення та підвищення узгодженості експертних оцінок та його дослідження описано в статтях [3, 4], які представляють основні наукові результати дисертації. Виходячи з постановки задачі дослідження та вимог до індексу узгодженості, сформульованих у попередньому розділі дисертації, функцію, що задовольняє вимоги пропонується обирати з множини функцій, які оперують лінійними відстанями між оцінками. Ефективність такого рішення підтверджується рядом досліджень, описаних у п. 1.2 та 1.4.

Окрім того, в подальшому описі даного дисертаційного дослідження обрано для використання поняття «узгодженість» експертних оцінок на противагу поняттю «неузгодженість», яке нерідко використовується у сучасних наукових дослідженнях за цією тематикою. Діапазоном значень індексу, для зручності, обрано інтервал дійсних додатних чисел, що не перевищують одиницю.

2.1 Індекс узгодженості оцінок

Пропонується індекс узгодженості подати у вигляді наступного виразу:

$$I = 1 - \frac{\sum_{i \neq j} f\left(\left|x_i - x_j\right|\right)}{M}, \tag{2.1}$$

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

Отже, індекс узгодженості – це одиниця мінус нормована сума функцій від відстані між оцінками для усіх можливих пар оцінок експертів. Функція f має мати такі властивості: $f(x) > 0$, 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.

2.2 Визначення найбільш неузгодженого випадку

Тепер визначимо формально, який саме набір оцінок є найбільш неузгодженим для запропонованого індексу узгодженості. Для цього, очевидно, потрібно знайти максимум $\sum_{i \neq j} f\left(\left|x_i - x_j\right|\right)$. Оскільки, в залежності від функції f, максимум буде різним, проведімо 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:

$$\sum_{i \neq j}(x_i - x_j)^2 \to \max\, i, j = \overline{1..n} \tag{2.2}$$

$$x_i \leq x_{i+1}, i = \overline{1..n-1} \tag{2.3}$$

$$x_1 \geq 1 \tag{2.4}$$

$$x_n \leq s \tag{2.5}$$

Перепишемо задачу у наступному вигляді:

$$\sum_{i \neq j}(x_i - x_j)^2 \to \max\, i, j = \overline{1..n} \tag{2.6}$$

$$x_{i+1} - x_i \geq 0, i = \overline{1..n-1} \tag{2.7}$$

$$x_1 - 1 \geq 0 \tag{2.8}$$

$$s - x_n \geq 0. \tag{2.9}$$

Лагранжіан має наступний вигляд:

$$L = \sum_{i \neq j} (x_i - x_j)^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \mu_i (x_{i+1} - x_i) + \alpha(x_1 - 1) + \beta(s - x_n). \tag{2.10}$$

Тепер знайдемо умови оптимальності:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 2 \sum_{i=1}^{n} (x_1 - x_i) + \alpha - \mu_1 = 0 \tag{2.11}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_k} = 2 \sum_{i=1}^{n} (x_k - x_i) + \mu_{k-1} - \mu_k = 0, k = \overline{2..n-1} \tag{2.12}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_n} = 2 \sum_{i=1}^{n} (x_n - x_i) - \beta + \mu_{n-1} = 0 \tag{2.13}$$

$$\alpha(x_1 - 1) = 0 \tag{2.14}$$

$$\beta(s - x_n) = 0 \tag{2.15}$$

$$\mu_i (x_{i+1} - x_i) = 0, i = \overline{1..n-1} \tag{2.16}$$

$$x_i \leq x_{i+1}, i = \overline{1..n-1} \tag{2.17}$$

$$x_1 \geq 1 \tag{2.18}$$

$$x_n \leq s \tag{2.19}$$

$$\alpha \geq 0, \quad \beta \geq 0, \quad \mu_i \geq 0, i = \overline{1..n-1}. \tag{2.20}$$

Додаючи перші n рівнянь, ми отримуємо, що

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

$$+2 \sum_{i=1}^{n} (x_n - x_i) - \beta + \mu_{n-1} = 0 \tag{2.21}$$

$$2 \left(n \sum_{i=1}^{n} x_i - \sum_{i=1}^{n} n x_i \right) + \alpha - \beta = 0 \tag{2.22}$$

$$\alpha - \beta = 0 \tag{2.23}$$

$$\alpha = \beta. \tag{2.24}$$

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

У цьому випадку перші n рівнянь матимуть наступний вигляд:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 2\sum_{i=1}^{n}(x_1 - x_i) - \mu_1 = 0 \tag{2.25}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_k} = 2\sum_{i=1}^{n}(x_k - x_i) + \mu_{k-1} - \mu_k = 0, k = \overline{2..n-1} \tag{2.26}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_n} = 2\sum_{i=1}^{n}(x_n - x_i) + \mu_{n-1} = 0. \tag{2.27}$$

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:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 2\sum_{i=1}^{n}(1 - x_i) + \alpha - \mu_1 = 0 \tag{2.28}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_k} = 2\sum_{i=1}^{n}(x_k - x_i) + \mu_{k-1} - \mu_k = 0, k = \overline{2..n-1} \tag{2.29}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_n} = 2\sum_{i=1}^{n}(s - x_i) - \beta + \mu_{n-1} = 0 \tag{2.30}$$

$$\mu_i(x_{i+1} - x_i) = 0, i = \overline{1..n-1} \tag{2.31}$$

$$x_i \leq x_{i+1}, i = \overline{1..n-1}. \tag{2.32}$$

Розв'язуючи цю систему нелінійних рівнянь числовим методом з допомогою програмних засобів, отримуємо, що коли n парне, то розв'язок має вигляд $\left\{\underbrace{1\ \dots\ 1}_{\frac{n}{2}}, \underbrace{s\ \dots\ s}_{\frac{n}{2}}\right\}$, а якщо n непарне – то $\left\{\underbrace{1\ \dots\ 1}_{\frac{n+1}{2}}, \underbrace{s\ \dots\ s}_{\frac{n-1}{2}}\right\}$ або

$$\left\{\underbrace{1\ \dots\ 1}_{\frac{n-1}{2}},\ \underbrace{s\ \dots\ s}_{\frac{n+1}{2}}\right\}.$$

2.3 Визначення індексу узгодженості оцінок експертів з урахуванням їх компетентності

Для вирішення завдання більш достовірного визначення узгодженості оцінок, наданих групою експертів, доцільно ураховувати той факт, що кожен з експертів має різний рівень обізнаності / інформованості / компетентності у питанні, що розглядається. Експериментальне дослідження, яке підтверджує необхідність врахування відносного рівня компетентності експертів при оцінюваннях в малих групах було проведене Лабораторією систем підтримки прийняття рішень Інституту проблем реєстрації інформації НАН України [99]. У зв'язку з цим задача, вирішення якої пропонується у попередньому пункті, приймає додаткові умови. Задача визначення індексу узгодженості оцінок експертів з урахуванням їх компетентності при підтримці прийняття групових рішень представлено в науковій статті [5].

2.3.1 Формальна постановка задачі

Нехай ми маємо n експертів, кожен з яких дав оцінку $x_i, i = \overline{1..n}$ на шкалі $[1, \mathrm{s}]$. Позначатимемо це як $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}_{[1,s]}$. Позначимо компетентність (вагу) i-го експерта через $w_i, i = \overline{1..n}$. 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 $w_i > 0, i = \overline{1..n}$ та, оскільки, розглядаються відносна компетентність експерта у рамках групи (компетентність у певному питанні відносно інших у групі), то зручно розглядати нормовані певним чином оцінки, наприклад: $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$. При визначенні ваги експерта будемо використовувати мультиплікативне відношення – 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.

Нова постановка задачі приводить до уведення додаткових вимог до індексу узгодженості у порівнянні з попередньою умовою (у якій не враховується компетентність експертів). Отже, до восьми вищеописаних вимог, природньо сформулювати ще дві:

Вимога 9. 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.

Вимога 10. Чим вищий рівень відносної компетентності експерта, що надав певну оцінку, тим більшим є вплив цієї оцінки на загальний рівень узгодженості.

2.3.2 Запропоновані варіанти вирішення задачі

Одним із варіантів вирішення поставленої задачі може бути підхід, що застосовувався, наприклад, у [101] при агрегації ранжирувань наданих різнокомпетентними експертами. При цьому підході пропонується замінити оцінку кожного експерта, що має вагу $\mathrm{w_i}$, кількістю оцінок експертів $v_i = \left[\frac{w_i}{w_0}\right]$ з однаковою вагою $\mathrm{w_0}$. Тобто, множина оцінок стає $\left\{\underbrace{x_1 \dots x_1}_{v_1}, \underbrace{x_2 \dots x_2}_{v_2}, \dots, \underbrace{x_n \dots x_n}_{v_n}\right\} = \{x_1^0, x_2^0, \dots . x^0_{\sum_{i=1}^n v_i}\}$. Фактично, у результаті підходу відбувається перехід до випадку визначення узгодженості рівнокомпетентними експертами.

Таким чином, індекс узгодженості має вигляд:

$$I = 1 - \frac{\sum_{i \neq j} f\left(\left|x_i^0 - x_j^0\right|\right)}{M}, \tag{2.33}$$

де x_i – оцінка i-го «розкладеного» експерта, M – значення для найбільш неузгодженого випадку, яке визначається знаходженням максимуму $\sum_{i \neq j} f\left(\left|x_i^0 - x_j^0\right|\right)$.

У результаті виходить, що найбільш неузгоджений випадок – випадок,

коли половина оцінок експертів лежить на лівій границі шкали, а половина на правій.

Покажемо на прикладі цей розклад.

Приклад 1. Нехай маємо оцінювання з урахуванням компетентності $\{3|0.2,1|0.5,2|0.1\}_{[1,10]}$, тоді ця задача зводиться до наступної без урахування компетентності $\{3,3,1,1,1,1,1,2\}$ при умові, якщо $w_0 = 0.1$. Індекс узгодженості у цьому випадку буде мати значення $I = 1 - \frac{5|3-1|+|3-2|+5|3-1|+|3-2|+5|1-2|}{4|1-10|+4|1-10|+4|1-10|+4|1-10|} = 0.81$.

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 розглянути інший варіант рішення. При цьому підході пропонується подати індекс узгодженості у вигляді

$$I = 1 - \frac{\sum_{i \neq j} w_i w_j f\left(\left|x_i - x_j\right|\right)}{M}, \tag{2.34}$$

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

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

$x = 0$.

За викладених вище умов $I \in [0,1]$, а максимум функції досягається тоді, і тільки тоді, коли всі змінні (оцінки) рівні. Мінімум досягається у найбільш неузгодженому випадку. Для того, щоб визначити M, використовується той самий підхід: 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 рахувати для кожного конкретного випадку окремо.

Проаналізуємо цей варіант вирішення задачі. Можливе виникнення наступних питань.

Що означає доданок $w_i w_j f(|x_i - x_j|)$? Фактично, це функція від відстані 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.

Приклад 2. Нехай маємо теж саме оцінювання, яке подано у прикладі 1: $\{3|0.2,1|0.5,2|0.1\}_{[1,10]}$. Тоді індекс узгодженості має значення $I = 1 - \frac{2 \cdot 5|3-1| + 2 \cdot 1|3-2| + 5 \cdot 1|1-2|}{108} = 0.75$.

Отже, із двох проаналізованих варіантів вирішення задачі, перевага надається 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 $\{2|0.5,3|0.25,5|0.25\}_{[1,10]} = 0.67$.

2.4 Визначення порогового рівня узгодженості

Як зазначалось вище, визначення узгодженості оцінок експертів здійснюється з метою подальшої перевірки на коректність виконання агрегації цих оцінок. Тобто, для отримання достовірних результатів при агрегації потрібно, щоб рівень узгодженості був достатньо високим. Інакше, врешті-решт, може статись ситуація, як у класичному прикладі про стрільбу по мішені, коли у результаті агрегації двох неточних попадань у лівий і у правий край мішені отримано агреговане «попадання» у центр мішені. Таким чином, постає актуальна задача визначення цього порогового значення узгодженості, при якому агрегація є припустимою і доцільною.

Для розуміння ходу вирішення цієї задачі, наведемо деякі міркування, що випливають із проведених досліджень. Припустімо, що експерт проводить оцінювання навмання (надає випадкові оцінки), і припустімо, що розподіл оцінок відбувається згідно з трикутним законом (рис. 2.1), тобто, нехай експерт має тенденцію до центрування оцінок.

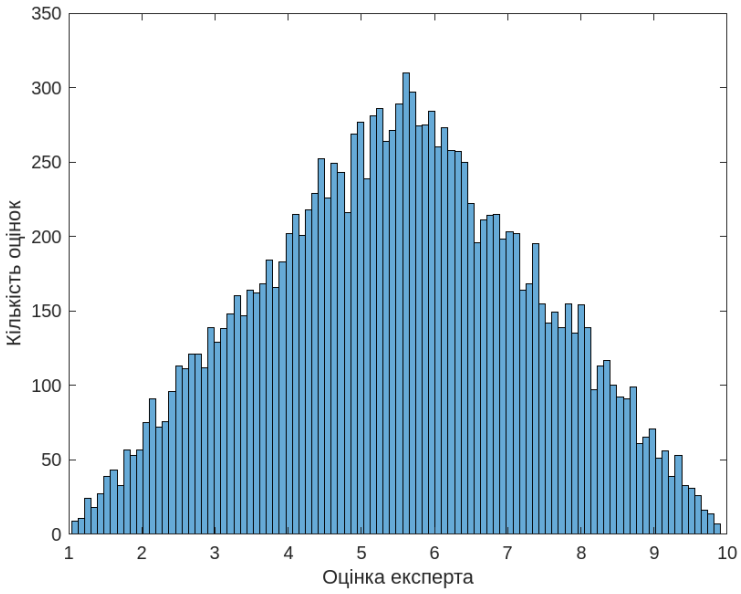


Рис. 2.1. Приклад зображення трикутного закону розподілу оцінок

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

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

Якщо $f(x) = x^2$, то закон розподілу має вигляд, як на рис. 2.2.

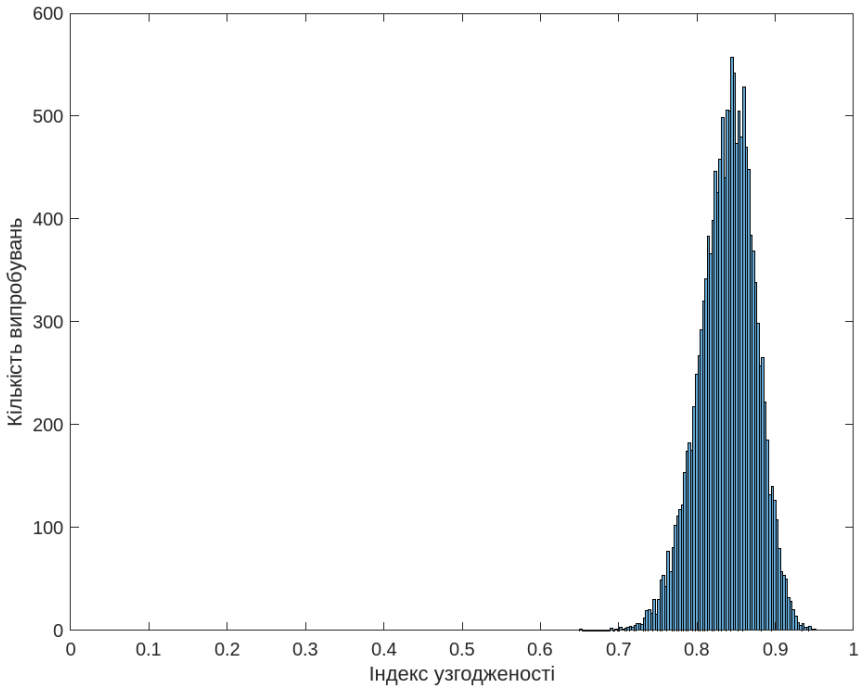


Рис. 2.2. Приклад зображення закону розподілу оцінок для функції $f(x) = x^2$

Як можна побачити з наведеного вище графіка, за $f(x) = x^2$ розподіл виразно тяжіє правобіч на горизонтальній осі. Тенденція до тяжіння праворуч свідчить про те, що виставлені 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 досліджень). Для наведеного вище розподілу порогове значення дорівнює 0.94. Таким чином, за $f(x) = x^2$ ми 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 $f(x) = x^2$ досягається високе значення індексу узгодженості: 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, варто розглянути інший варіант функції, який краще задовольнятиме встановлені вимоги.

Для $f(x) = |x|$ закон має вигляд (див. рис. 2.3):

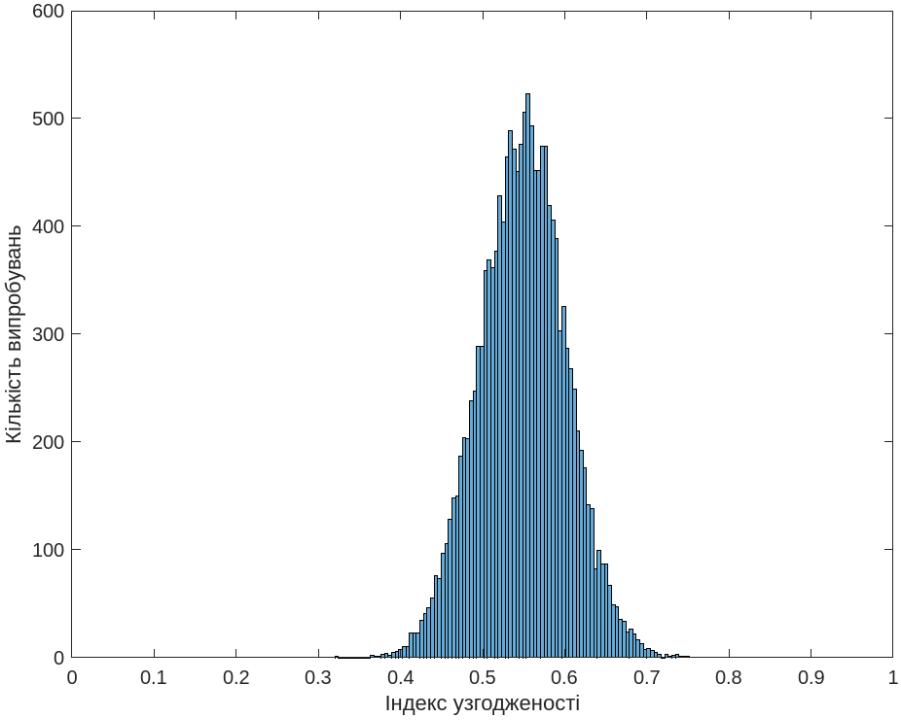


Рис. 2.3. Приклад зображення закону розподілу оцінок для функції $f(x) = x$

Як можна побачити з графіка вище, для $f(x) = |x|$ досягається набагато більш рівномірний розподіл, який тяжіє до центру, а не до периферії на горизонтальній осі. Порогове значення за порогового індексу 0.95 дорівнює 0.73. Таким чином, можна стверджувати, що порогове значення для $f(x) = |x|$ істотно нижче за відповідне значення для $f(x) = x^2$ (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 $f(x) = |x|$ проти 0.57 для $f(x) = x^2$. 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.

Порівняльний аналіз двох розглянутих вище функцій може служити для вибору функції для подальшого її використання.

Розглядалися дві функції $f(x) = |x|$ та $f(x) = x^2$.

Функція $f(x) = |x|$ вбачається більш підходящою, оскільки:

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

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

Отже, на даному етапі досліджено шляхи вирішення задачі визначення узгодженості експертних оцінок. Задля цього розроблено відповідний метод, який дозволяє визначити індекс узгодженості, що задовольняє поставленим вимогам. Запропоновано індекс, що дозволяє визначати узгодженість оцінок у рамках групи експертів з урахуванням їх відносної компетентності щодо питання експертизи.

Окрім того, запропоновано спосіб визначення порогу узгодженості множини оцінок, достатнього для їх агрегації. Для випадку недостатньої узгодженості – питання підвищення узгодженості множини оцінок за допомогою повторного звернення до експерта, розглядається у наступних пунктах даного розділу дисертації.

2.5 Підвищення узгодженості експертних оцінок

Питання підвищення узгодженості множини оцінок у випадку недостатньої узгодженості (коли визначений індекс узгодженості нижчий

порогового значення) є досить дискусійним у наукових колах спеціалістів. У аналітичному огляді наявних методів (розділ 1 цієї дисертації) описані ряд методів, які здійснюють підвищення узгодженості шляхом коригування або відкидання деяких експертних оцінок (зазвичай, тих, що вносять дисбаланс у систему оцінок та найбільше спричиняють зниження загального рівня узгодженості). У такому випадку підвищення узгодженості здійснюється без втручання експертів, що надавали оцінки. Такий процес, беззаперечно, є швидким і маловартісним щодо витрат експертних ресурсів, але неприйнятним з точки зору їх марнування (марнотратства), адже, експерт уже виконав певну роботу щодо оцінювання і недоречно нехтувати цією високовартісною роботою.

Єдино прийнятним у такій ситуації вважається повторне звернення до експерта з пропозицією переглянути свою попередню оцінку. Цю процедуру називають зворотним зв’язком з експертом і умовою її застосування є не спричинення тиску на експерта у ході звернення при мінімізації затрат, тобто, кількості цих звернень.

Для отримання достовірних результатів експертиз, в яких, зазвичай, застосовуються індивідуальні та групові попарні порівняння, важливо виконувати підсумкове узагальнення (агрегування) експертних оцінок при умові їх достатньої узгодженості. Існують декілька способів визначення порогового рівня узгодженості, достатнього для агрегації оцінок, але жоден з них не пов’язує це значення з вимогами до достовірності результатів експертизи, що проводиться. Тому, пропонується новий підхід до визначення цього порогу узгодженості, який базується на імітаційному моделюванні експертних попарних порівнянь та цілеспрямованому пошуку серед змодельованих матриць попарних порівнянь найбільш неузгоджених, що дозволяє визначити поріг узгодженості для заданого допустимого відхилення результуючої відносної ваги альтернативи від гіпотетичного еталонного значення.

2.5.1 Підхід до визначення рівня узгодженості експертних оцінок, достатнього для їх агрегації

Із поданого вище можна зробити висновок, що для отримання достовірних результатів експертиз, надважливо враховувати узгодженість оцінок, причому, визначення узгодженості само по собі не має особливого сенсу без визначення порогового значення, яке слугує індикатором для виконання подальшої агрегації. У випадку низької узгодженості оцінок, її підвищення доцільне лише до необхідного рівня, а не до повного узгодження, яке, на практиці, призведе до неминучої втрати ефективності проведеної експертизи.

2.5.1.1 Проблемна ситуація

Практично кожний з відомих методів визначення узгодженості [22-55] передбачає використання певного способу визначення порогового значення. Більшість із них, окрім оригінальних підходів, на кшталт [23, 91], ґрунтуються на імітаційному моделюванні експертних оцінок, наприклад, визначення узгодженості в методі аналізу ієрархій Томаса Сааті [55]. Наявні імітаційні підходи здебільшого пов’язують значення індексу узгодженості з розмірністю матриці попарних порівнянь, але жоден з них не пов’язує це значення з вимогами, що ставляться до достовірності результатів експертизи, хоча інтуїтивно зрозуміло, що узгодженість оцінок безпосередньо впливає на достовірність («точність») результатів експертизи.

2.5.1.2 Сутність підходу

В основі підходу лежить постулат про існування «фундаментальної істини» (ground truth), який уможливлює проведення будь-якої експертизи. Це дає підстави припустити наявність еталонних (точних) ваг альтернатив, які 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: $m_{ij} = \frac{1}{m_{ij}}$.

– 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.

Таким чином зімітовані матриці попарних порівнянь агрегуються різними методами [84], також є можливість визначити узгодженість таких матриць.

Підхід до визначення порогу узгодженості, так саме, як і до оцінювання методів агрегації експертних оцінок [84], використовує цілеспрямований пошук (як приклад, Генетичний алгоритм [111]), 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). Докладніше процес імітації експертних оцінок та цілеспрямованого пошуку описаний у наступному розділі дисертації.

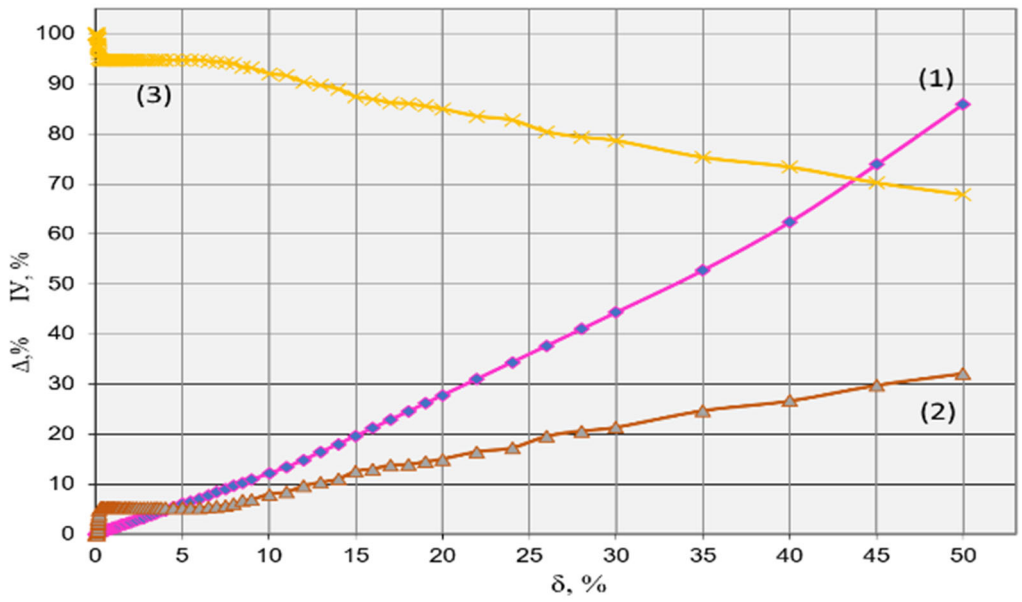


Рис. 2.4. Результати імітаційних обчислень

Результати обчислень за допомогою Генетичного алгоритму подані у графічному вигляді на рисунку 3.1. Графік (1) – залежність $\Delta(\delta)$, розрахована для Комбінаторного методу агрегації [5], (2) – залежність неузгодженості 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.

Не важко помітити значну кореляцію між залежностями $\Delta(\delta)$ та $(1 - I(\delta))$, тобто, зі збільшенням відносної похибки оцінювання збільшується і неузгодженість експертних оцінок, що також добре узгоджується зі здоровим глуздом.

2.5.2 Метод підвищення узгодженості та його переваги

Тепер, коли сформульовано основні умови задачі, опишемо запропонований метод підвищення узгодженості задля досягнення рівня узгодженості, достатнього для агрегації експертних оцінок. Фактично, цей

метод передбачає досягнення порогу узгодженості. Ще раз варто зазначити, що у ході підвищення рівня узгодженості переслідуються дві цілі: питання до експерта повинні бути ненав'язливими (тобто, не має спричинятися тиск на експерта) та кількість питань повинна бути мінімальною.

Схему алгоритму підвищення узгодженості експертних оцінок зображено на рис. 2.5.

Пропонується наступна процедура підвищення узгодженості недостатньо узгодженої множини оцінок. 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 фіксуються оцінки всіх інших експертів, а оцінку i-го експерта варіюємо, та знаходимо, за якого значення індекс узгодженості стає максимальним, тобто розв'язуємо задачу мінімізації функції $F(x_i) = \sum_{i \neq j} f\left(\left|x_i - x_j\right|\right)$.

У випадку, якщо $f(x) = x^2$, то $F(x_i) = \sum_{i \neq j}\left(x_i - x_j\right)^2$, і мінімум досягається тоді, 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, значення мінімуму знаходимо при $f(x) = |x|$. У цьому випадку $F(x_i) = \sum_{i \neq j}\left|x_i - x_j\right|$. Сума модулів має вигляд неперервної ламаної лінії, і з властивостей модуля випливає, 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, середня оцінка якого експерта може максимізувати індекс узгодженості.

Запитуємо у цього експерта, чи бажає він змінити свою оцінку. Якщо дана відповідь «ні», переходимо до наступного за ним експерта, оцінка якого є наступною у порядку зменшення максимізації індексу узгодженості. Якщо дана відповідь «так», то просимо експерта надати нову оцінку. Якщо надана ним оцінка збільшила індекс узгодженості, то замінюємо його попередню

оцінку новою, якщо ні – то просто запам’ятовуємо цю ситуацію для подальшого аналізу.

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

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

Наголосимо, що ця процедура зворотного зв’язку, на відміну від досліджених у [100], 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 порівняно з методами, що досліджені в [100]. Тобто, «тиск» на експерта при зверненні з питанням типу «Чи не погодитеся змінити свою попередню оцінку?» є меншим, ніж у випадку запитання «Чи не погодитеся зменшити/збільшити свою попередню оцінку?», оскільки в першому випадку експертові не «нав’язується» напрямок необхідної 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 (досліджених у [100]), кількість звернень до певного експерта з проханням змінити одну й ту ж саму його оцінку в бік збільшення або зменшення, може бути значною.

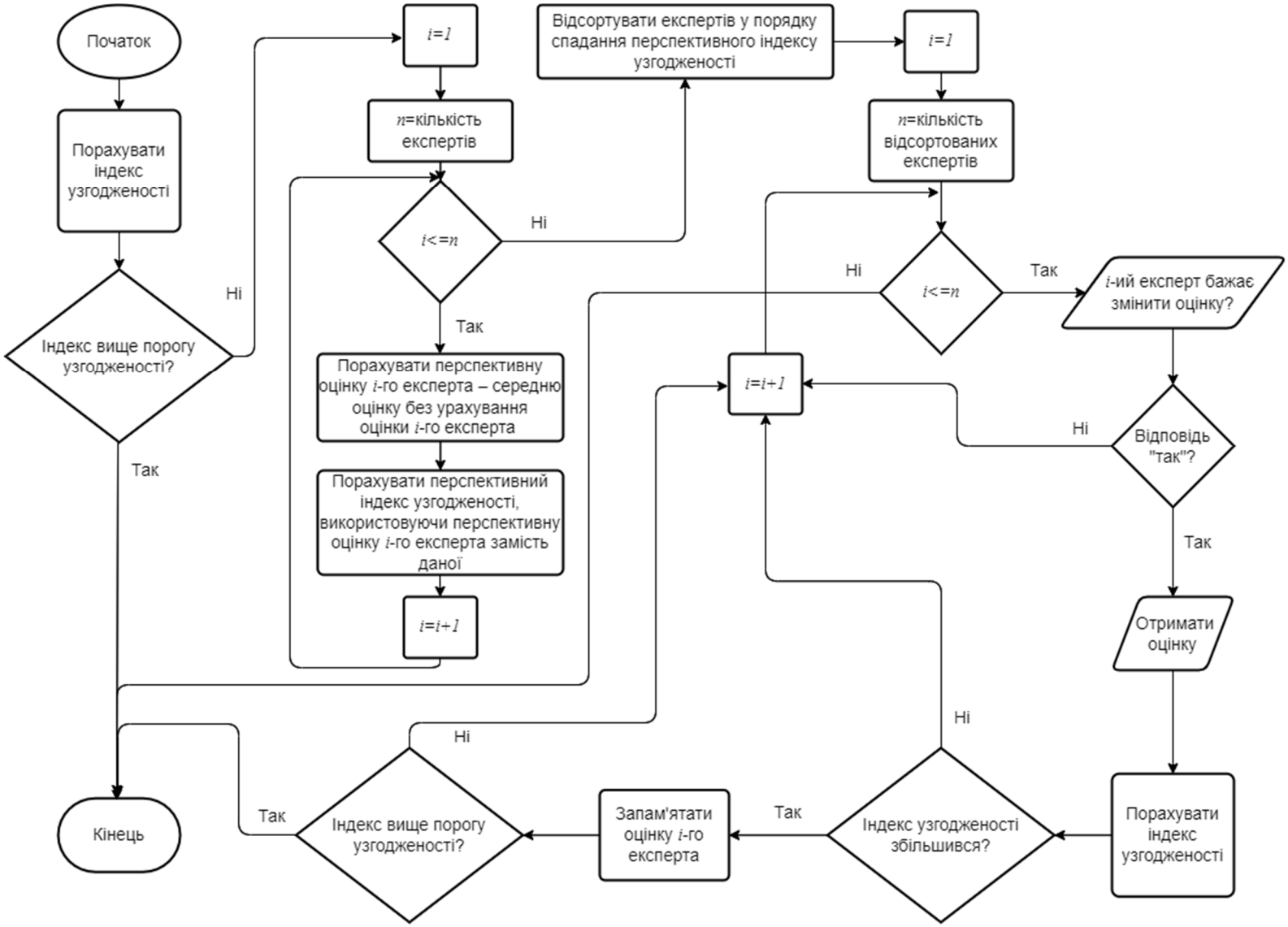


Рис. 2.5. Схема алгоритму підвищення узгодженості експертних оцінок

2.5.3 Приклад роботи алгоритму

Приклад роботи алгоритму подано нижче у вигляді діалогових повідомлень у ході виконання макету відповідного програмного засобу.

```
Введіть максимальне значення на шкалі (5–100): 10.
Введіть кількість експертів (2–25): 5.
Яку функцію використовувати (модуль (1) чи квадрат (2))?: 1.
Рахую порогове значення (95 % персентиль)...
Пороговий індекс узгодженості дорівнює 0,82.
Введіть оцінку експерта № 1 ([1, 10]): 7.
Введіть оцінку експерта № 2 ([1, 10]): 3.
Введіть оцінку експерта № 3 ([1, 10]): 6.
Введіть оцінку експерта № 4 ([1, 10]): 7.
Введіть оцінку експерта № 5 ([1, 10]): 1.
Рахую індекс узгодженості...
Індекс узгодженості дорівнює 0,41.
Намагаємося підвищити рівень узгодженості...
Експерте № 5, чи хочете Ви змінити свою оцінку (була 1.0) (так (1)
або ні (0))?: 1.
Експерте № 5, яка Ваша нова оцінка (була 1.0)?: 7.
Індекс узгодженості підвищився, тепер дорівнює 0,67.
Експерте №2, чи хочете Ви змінити свою оцінку (була 3.0) (так (1)
або ні (0))?: 1.
Експерте №2, яка Ваша нова оцінка (була 3.0)?: 6.
Індекс узгодженості підвищився, тепер дорівнює 0,89.
Фінальний індекс узгодженості дорівнює 0,89.
Оцінки: 7.0, 6.0, 6.0, 7.0, 7.0
```

Тепер слід розглянути випадок, коли після всіх запланованих звернень до експертів необхідний рівень узгодженості все ж не досягнуто. У такому випадку пропонується задіяти процедуру виключення оцінок деяких експертів з розгляду. Вбачається, що ця процедура не є бажаною, адже ми при цьому втрачаємо (не беремо до уваги) судження деяких експертів, але ця процедура

є вимушеною і проводиться заради досягнення успішного результату експертизи. Звичайно ж, достовірність результату групової експертизи у ході такого процесу зменшується, 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 віддаленими від середньо-групового значення.

Звичайно, збіжність алгоритму цієї процедури є очевидною, оскільки шляхом виключення оцінок завжди отримаємо вироджений випадок множини експертних оцінок, що складається з єдиної оцінки, і ця множина має найбільший індекс узгодженості, рівний одиниці.

Для подальшого дослідження залишається ще ряд питань. По-перше, це питання щодо визначення мінімальної кількості експертних оцінок, яка має залишатися, щоб критично не знизилася достовірність отриманих узагальнених оцінок і, тим самим, не звелася нанівець достовірність результату експертизи. Тобто, ця кількість може бути обґрунтованою не на рівні 3-х оцінок, а бути дещо більшою. Окрім того, додаткової уваги заслуговує питання, що при виборі експертної оцінки для виключення її із розгляду, потрібно враховувати ті повторно надані оцінки, які не були прийняті при попередніх зверненнях до експертів через те, що вони не підвищували узгодженість.

Запропонований метод практично реалізовано та апробовано в рамках системи розподіленого збору та обробки експертної інформації «Консенсус-2» [6].

2.6 Висновки до розділу 2

У другому розділі дисертації розроблено метод визначення узгодженості експертних оцінок, який дозволяє визначити відповідний індекс узгодженості, що задовольняє поставленим у розділі 1 вимогам, а також дозволяє визначати узгодженість у рамках групи з урахуванням відносної компетентності експертів щодо питання експертизи.

Окрім того, запропоновано новий підхід до визначення порогу узгодженості експертних попарних порівнянь, достатнього для виконання агрегації цих оцінок та отримання відносних ваг альтернатив із заданою достовірністю. Визначення порогу узгодженості саме відповідного заданому допустимому відхиленню результуючої відносної ваги альтернативи від гіпотетичного еталонного значення дозволяє підвищити ефективність процесу підвищення узгодженості та заощадити високовартісні експертні ресурси.

Досліджено підходи до підвищення узгодженості експертних оцінок, яке є необхідним у разі, коли рівень узгодженості виявляється меншим за визначений поріг.

Показано, що єдино прийнятним є застосування зворотного зв’язку з експертом (повторного звернення до нього) для підвищення узгодженості.

Запропоновано процедуру підвищення узгодженості множини експертних оцінок, яка на відміну від тих, що застосовувались на практиці раніше, не спонукає експерта до певної зміни (саме збільшення або зменшення) його/її попередньої оцінки і, тим самим, спричиняє менший тиск на експерта у порівнянні з попередньо застосовуваними процедурами.

РОЗДІЛ 3. АПРОБАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ ТА ПІДХОДІВ У ХОДІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Усі розроблені у дисертації моделі, методи та процедури реалізовані та протестовані у ході застосування відповідних програмних додатків. Через відсутність еталонних значень в слабко структурованих областях класичне визначення точності неможливе, тому апробація методів здійснювалась у ході порівняльних досліджень ефективності агрегації методів з урахуванням узгодженості та без його урахування. Задля заощадження високовартісних експертних ресурсів і часу, необхідного для організації експерименту, дослідження проводилось шляхом імітаційного моделювання експертних оцінок із застосуванням відповідної авторської методики.

3.1 Сутність методики моделювання експертних оцінок

Моделювання експертних оцінок зручно виконати у вигляді імітації індивідуальних попарних порівнянь. Це зручно саме тому, що на основі однієї матриці попарних порівнянь (МПП) є можливість сформувати множини відносних оцінок альтернатив великої потужності і завдяки великій кількості складових у таких спектрах є можливість імітувати більшу кількість експертних оцінок і, тим самим, отримувати більшу кількість вхідних даних для дослідження методів. Окрім того, як описано далі, МПП дають можливість зімітувати наявність еталонів («істинних» оцінок) щоб з ними можна було порівняти отримані у результаті агрегації значення і, як наслідок, визначати достовірність оцінок аналогічно визначенню точності.

Як було запропоновано в [84, 102] для визначення ефективності методів агрегації, пропонується процес моделювання почати із задання довільних еталонних значень ваг альтернатив. Вони виступають у якості еталонів при моделюванні. За цими вагами формально і абсолютно однозначно формується ідеально узгоджена матриця попарних порівнянь, тобто МПП, у якій немає протиріч, і яка представляє собою транзитивне відношення на множині

альтернатив. Далі пропонується «зашумити» цю матрицю, таким чином, що кожен елемент матриці, окрім діагональних, може бути лінійно змінений на величину, пропорційну заданому значенню максимального відносного відхилення у відсотках від еталонних значень, представлених елементами ідеально узгодженої матриці.

Тим самим, здійснюється моделювання похибок при експертному оцінюванні. Величина заданого максимального відносного відхилення кожного, окрім діагональних елементів МПП представляє, у цьому випадку, можливу відносну похибку експерта при проведенні попарних порівнянь. У подальшому, одна і та ж сама «зашумлена» матриця обробляється методами агрегації попарних порівнянь, результатом роботи кожного з яких є узагальнені ваги альтернатив. Вектор ваг цих альтернатив порівнюється із заданим на початку процесу моделювання вектором еталонних ваг.

Якість (ефективність) методу агрегації обчислюється як максимально можливе серед відносних відхилень розрахованої ваги альтернативи від заданої еталонної ваги цієї ж альтернативи. До переліку методів агрегації, що порівнюються у ході моделювання експертних оцінок, включаються методи, що передбачають визначення та підвищення узгодженості. На основі створеної методики пропонується протестувати та порівняти розроблені методи визначення узгодженості як з урахуванням компетентності експертів, так і без урахування, а також визначити відповідні порогові значення індексів узгодженості.

3.2 Хід експериментального дослідження запропонованих методів

У цьому підрозділі докладно викладено проведене експериментальне дослідження. Як відмічалось у попередньому підрозділі, задаються довільні еталонні ваги альтернатив. Зручно розглядати ці ваги як елементи вектора $W = (w_i), i = \{1..n\}, n \in \mathrm{N}$. Згідно з властивостями ваг альтернатив: $w_i > 0$, окрім того, оскільки ваги відносні, доцільно використовувати нормовані значення: $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$.

За цими вагами формально будується повністю (ідеально) узгоджена МПП (consistency matrix) A, виходячи зі співвідношення $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ для мультиплікативних порівнянь або співвідношення виду $a_{ij} = w_i - w_j$ для адитивних МПП, де $a_{ij}, i, j = \overline{1..n}$ – елемент матриці A. Без втрати загальності, у подальшому розглядаються мультиплікативні порівняння і відповідні ним мультиплікативні МПП, а перехід до адитивних можна здійснити шляхом логарифмічних перетворень [85].

Отже, якщо припустити, виходячи з властивості окремого попарного порівняння, що $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, то отримаємо ідеально узгоджену МПП, яка є зворотно симетричною. Також, без втрати загальності, можна розглядати лише трикутну матрицю, в яку входять елементи, розміщені вище головної діагоналі. Елементи ж головної діагоналі матриці не приймають участі в подальшому моделюванні, вони незмінні: $a_{ii} = 1$.

Далі, проводиться «зашумлення» матриці A, таким чином, що кожен задіяний елемент матриці A, 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 результатів парних порівнянь експерта (елементів матриці A) у відсотках від еталонних значень. Тим самим, здійснюється моделювання помилок при експертному оцінюванні. Величина δ, у цьому випадку, представляє собою можливу відносну помилку експерта при проведенні попарних порівнянь. Далі, «зашумлена» МПП, позначимо її A', поступає на вхід одного з методів агрегації з метою одержання узагальнених ваг альтернатив w'_i у вигляді вектора ваг пріоритетів. Якість (ефективність) методу агрегації попарних порівнянь пропонується обчислювати як максимально можливе відносне відхилення отриманої в результаті розрахунку ваги альтернативи від еталонної ваги цієї ж альтернативи $\Delta = \max_i \left|\frac{w'_i - w_i}{w_i}\right| \cdot 100\%$.

З метою дослідження впливу визначення узгодженості саме для методів,

що передбачають виконання цих процедур, запропоновано сформувати на основі МПП відповідні їм спектри оцінок.

3.3 Формування розподілів оцінок для визначення узгодженості

Для методів, що застосовують визначення узгодженості, на основі «зашумленої» матриці попарних порівнянь будуються спектри (розподіли) оцінок за кожною з альтернатив. З метою найповнішого використання інформації про співвідношення альтернатив, закладеної у МПП, побудова розподілу оцінок для кожної альтернативи ґрунтується на декомпозиції на покривні дерева графа, відповідного матриці попарних порівнянь. За інформацією, що міститься у множині елементів матриці, які відповідають покривному дереву, однозначно знаходяться ваги альтернатив – імітовані експертні оцінки, кожна з яких стає складовою спектру, відповідного альтернативі розподілу оцінок. Такі створені в результаті імітації спектри оцінок виступають як вхідні дані, що використовуються для тестування методів визначення узгодженості без необхідності залучення реальних високовартісних експертів.

3.3.1 Спосіб побудови розподілу

З метою підвищення достовірності визначення узгодженості, у [77] було запропоновано побудову розподілу оцінок, коли складові розподілу отримуються як значення відносних ваг альтернатив, отриманих за кожним покривним деревом графа, відповідного заданій МПП. Фактично, для кожної альтернативи створюється розподіл оцінок, у якому кожна його складова визначаються вагою альтернативи, однозначно визначеної за кожним із покривних дерев графа. Відомо, що будь-яке покривне дерево графа із n вершинами має $(n-1)$ ребро. Загальна кількість покривних дерев у повному графі із n вершинами, що відповідає повній МПП розмірністю $n \times n$, за теоремою Кейлі [108], дорівнює n^{n-2}, у випадку неповного графа кількість покривних дерев можна визначити скориставшись Матричною теоремою Кірхгофа про дерева [109]. Побудувати покривні дерева можна за допомогою

будь-якого з алгоритмів обходу графа, наприклад, пошук у глибину або пошук у ширину. Окрім того, пропонується спосіб перебору покривних дерев графа у відповідності з кодом Прюфера [110].

Достовірність, а разом з тим і точність визначення коефіцієнта узгодженості при застосуванні даного підходу у порівнянні з традиційним підвищуються за рахунок збільшення кількості інформації, що обробляється при обчисленні цього показника.

Формування розподілів оцінок, для яких обчислюються індекси узгодженості у ході експерименту зручно продемонструвати на прикладі.

3.3.2 Приклад формування розподілів при моделюванні оцінок

Далі запропоновано характерний приклад, що демонструє побудову розподілів.

Нехай таблиця 4.1 містить трикутну матрицю A попарних мультиплікативних порівнянь чотирьох альтернатив за деяким критерієм, які виконано одним із експертів.

Таблиця 3.1

Вихідна МПП A

	1	2	3	4
1	1	**1/2**	**1/3**	**1/4**
2		1	**2/3**	**3**
3			1	**5**
4				1

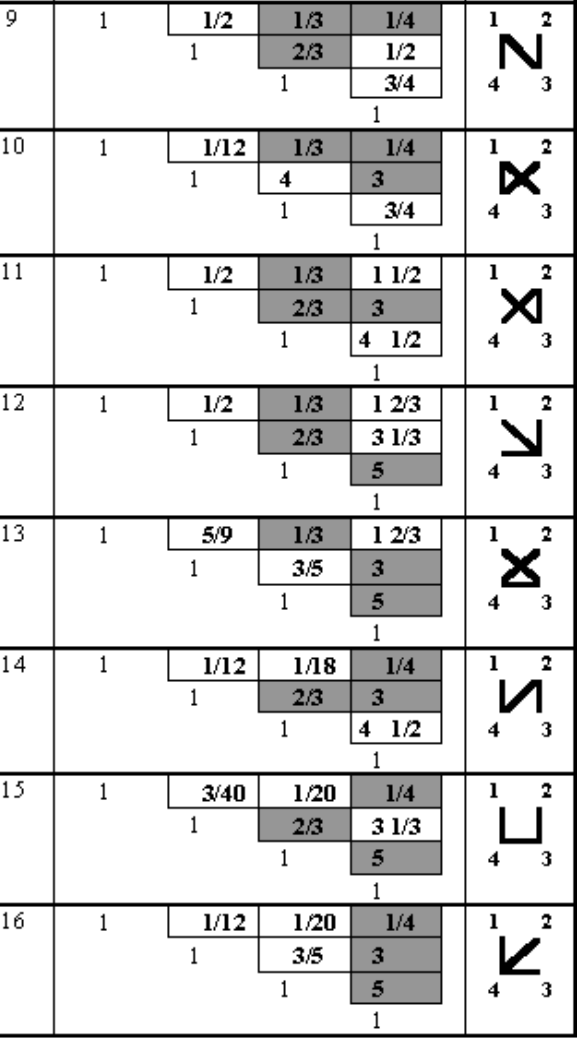
Кількість поділок шкали, в рамках якої розглядається розподіл оцінок, виберемо рівним десяти ($n = 10$). Оскільки МПП A – повністю заповнена (відповідає повному неорієнтованому графу), то згідно з теоремою Кейлі визначаємо загальну кількість варіантів покривних дерев, що можуть бути сформовані за таким графом з 4-ма вершинами: $4^{(4-2)} = 16$.

В таблиці 3.2 наведено весь перелік ідеально узгоджених МПП та відповідні їм покривні дерева. Для представленого прикладу кожному дереву поставлено у відповідність ідеально узгоджену МПП, побудовану на базі

трьох $(n-1 \equiv 4-1=3)$, так званих інформаційно-вагомих елементів матриці A, які відповідають дугам покривного дерева. Слід зазначити, що в загальному випадку, побудовані таким чином ідеально узгоджені матриці можуть повторюватись, а при повній узгодженості вихідної МПП A вони усі співпадають.

Таблиця 3.2

Ідеально узгоджені МПП, сформовані за відповідними покривними деревами

№ МПП	Ідеально узгоджені МПП				Вигляд дерева
1	1	1/2	1/3	1/4	
		1	2/3	1/2	
			1	3/4	
				1	
2	1	1/2	1/3	1 1/2	
		1	2/3	3	
			1	4 1/2	
				1	
3	1	1/2	1/3	1 2/3	
		1	2/3	3 1/3	
			1	5	
				1	
4	1	1/2	1/3	1/4	
		1	2/3	1/2	
			1	3/4	
				1	
5	1	1/2	1/20	1/4	
		1	1/10	1/2	
			1	5	
				1	
6	1	1/2	1/3	1 1/2	
		1	2/3	3	
			1	4 1/2	
				1	
7	1	1/2	1/3	1 2/3	
		1	2/3	3 1/3	
			1	5	
				1	
8	1	1/2	2/7	1 1/2	
		1	3/5	3	
			1	5	
				1	
9	1	1/2	1/3	1/4	
		1	2/3	1/2	
			1	3/4	
				1	
10	1	1/12	1/3	1/4	
		1	4	3	
			1	3/4	
				1	
11	1	1/2	1/3	1 1/2	
		1	2/3	3	
			1	4 1/2	
				1	
12	1	1/2	1/3	1 2/3	
		1	2/3	3 1/3	
			1	5	
				1	
13	1	5/9	1/3	1 2/3	
		1	3/5	3	
			1	5	
				1	
14	1	1/12	1/18	1/4	
		1	2/3	3	
			1	4 1/2	
				1	
15	1	3/40	1/20	1/4	
		1	2/3	3 1/3	
			1	5	
				1	
16	1	1/12	1/20	1/4	
		1	3/5	3	
			1	5	
				1	

- значення із матриці A

Тепер, за кожною із 16-ти таких МПП, що подані в таблиці 3.2, визначаються ваги альтернатив. Оскільки матриці є ідеально узгодженими, то ці ваги визначаються однозначно і найпростішим способом їх визначення у цьому випадку – нормалізувати останній стовпець відповідної матриці. У результаті такої нормалізації сума елементів отриманого вектора ваг

альтернатив має бути рівною одиниці.

Для формування розподілу обирається дискретна шкала, в рамках якої відображаються ваги певної альтернативи. Щоб розмістити ці оцінки на обраній шкалі, кожна з них має бути заокруглена і приведена до відповідної поділки цієї шкали. Шкала для розміщення сформованого спектру оцінок обирається зазвичай відповідною до вербальної шкали, що застосовується при попарних порівняннях. Оскільки обрана шкала, з 10-ма поділками, починається з «1», то заокруглення компонентів ваг проводиться до найближчої більшої поділки шкали. Усі, визначені описаним способом значення зведено в таблиці 3.3. У відповідних колонках таблиці розміщені точні та заокруглені до найближчої поділки шкали значення ваг кожної з чотирьох альтернатив. За заокругленими значеннями у відповідності до поділок шкали, побудовано спектри ваг альтернатив, складові яких відповідають цим значенням.

Таблиця 3.3

Значення складових ваг, визначених за ідеально узгодженими МПП

№ Ідеально узгодженої МПП	Значення складової ваги							
	альтернативи 1		альтернативи 2		альтернативи 3		альтернативи 4	
	Точне	Заокруглене	Точне	Заокруглене	Точне	Заокруглене	Точне	Заокруглене
1	0,1	2	0,2	3	0,3	4	0,4	5
2	0,15	3	0,3	4	0,45	6	0,1	2
3	0,151515	3	0,30303	4	0,454545	6	0,090909	2
4	0,1	2	0,2	3	0,3	4	0,4	5
5	0,037037	1	0,074074	2	0,740741	8	0,148148	2
6	0,15	3	0,3	4	0,45	6	0,1	2
7	0,151515	3	0,30303	4	0,454545	6	0,090909	2
8	0,142857	2	0,285714	4	0,47619	6	0,095238	2
9	0,1	2	0,2	3	0,3	4	0,4	5
10	0,05	2	0,6	7	0,15	3	0,2	3
11	0,15	3	0,3	4	0,45	6	0,1	2
12	0,151515	3	0,30303	4	0,454545	6	0,090909	2
13	0,15625	3	0,28125	4	0,46875	6	0,09375	2
14	0,028571	1	0,342857	4	0,514286	6	0,114286	2
15	0,026087	1	0,347826	4	0,521739	6	0,104348	2
16	0,027027	1	0,324324	4	0,540541	6	0,108108	2

На рисунку 3.1 показано розподіли, сформовані на основі даних таблиці 3.3. Значення складових спектрів отримані із колонок таблиці із заокругленими величинами. Кожен розподіл оцінок ваг, який відповідає певній альтернативі, складається з стовпців, розміщених на відповідних до оцінок поділках шкали, а висота стовпців є пропорційною кількості таких оцінок у колонці таблиці.

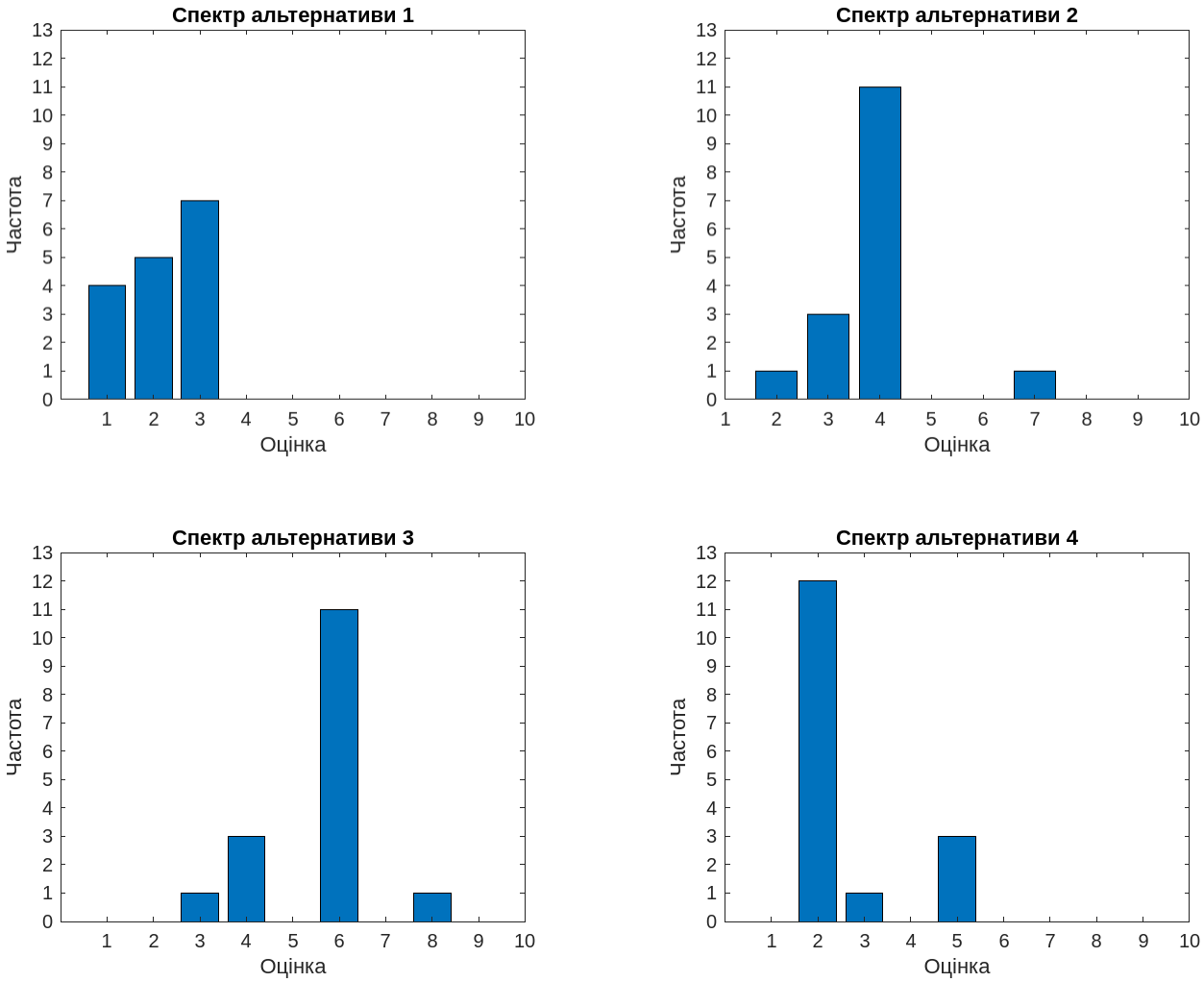


Рис. 3.1. Спектри ваг альтернатив

Отже, на основі декомпозиції графа, відповідного МПП, у результаті систематизації та дискретизації оцінок ваг альтернатив отримано розподіли цих ваг, базуючись на яких обчислюється узгодженість матриць попарних порівнянь (оцінок, що моделюються).

3.4 Визначення узгодженості змодельованих оцінок

У відповідності з запропонованим методом для прикладу розглянутого у попередньому пункті визначаються індекси узгодженості, що відповідають кожному із спектрів, а рівно і кожній із альтернатив: $I_1 = 0{,}7919$; $I_2 = 0{,}8272$; $I_3 = 0{,}7871$; $I_4 = 0{,}8085$. Найменший із індексів узгодженості альтернатив приймається в якості значення показника узгодженості змодельованих оцінок, що складають МПП ($I_A = 0{,}7871$). Отже, I_A – це індекс узгодженості матриці A, отриманий як мінімальне значення серед індексів узгодженості розподілів оцінок усіх порівнюваних альтернатив.

Таким чином, найменший із індексів узгодженості, що відповідає найбільш неузгодженому спектру оцінок, характеризує загальну узгодженість МПП. Тобто, керуючись цим правилом, що не суперечить засадам системного аналізу, узгодженість системи не може перевищувати узгодженість будь-якого із її компонентів.

Тепер, у ході експерименту, для кожної змодельовані експертної оцінки – матриці попарних порівнянь альтернатив – крім отриманого максимального відносного відхилення вектора ваг альтернатив, що є характеристикою якості того чи іншого метода агрегації, ще обчислюється узгодженість експертної МПП.

3.5 Визначення порогу узгодженості змодельованих оцінок

Як раніше відмічалось, в практичному застосуванні експертиз важливо визначити рівень узгодженості оцінок, який є достатнім, щоб при агрегації оцінок отримати достовірний результат. Тобто, важливо визначити поріг індексу узгодженості, при якому експертні оцінки вважаються узгодженими і операції агрегації таких оцінок є допустимими. Наприкінці другого розділу запропоновано варіант вирішення цієї задачі із застосуванням статистичного підходу.

Подальші дослідження показали, що доцільно враховувати наявність взаємозв’язку між порогом узгодженості і необхідним рівнем якості

(ефективності) агрегації оцінок, а, тим самим, і необхідним рівнем достовірності експертизи, що проводиться.

Отже, щоб зробити явним цей зв'язок, пропонується у методах агрегації з урахуванням узгодженості для кожного досягнутого значення показника якості розрахувати мінімально необхідне значення індексу узгодженості, яке і є, по суті, пороговим значенням узгодженості. Значення порогу узгодженості залежить від необхідного рівня якості результатів методу агрегації, тобто, від рівня достовірності оцінок, якого потрібно досягти у ході експертизи.

Із логіки проведеного експериментального дослідження випливає, що задля досягнення певного рівня достовірності експертних оцінок потрібно забезпечити достатній рівень індексу узгодженості – не нижчий порогового значення.

3.6 Знаходження результуючих показників

Оскільки, обчислені значення показника Δ залежать як від заданої δ, так і від самих відносних значень заданих еталонів, то визначені значення показника ефективності кожного із порівнюваних методів подаються у вигляді графіків залежності $\Delta(\delta)$ для кожного з варіантів еталонного вектора ваг. Вхідні значення δ (відносна похибка оцінювання експерта при попарних порівняннях) в рамках даного експерименту пропонується обмежити інтервалом $\delta \in (0{,}100)$, оскільки, не доцільно розглядати експертні відносні похибки більші ніж 100%.

Окрім показника Δ для методів, що враховують узгодженість розраховуються індекси узгодженості I для кожної вхідної МПП. Отже, для оцінювання ефективності агрегації експертних оцінок експеримент забезпечує знаходження максимально можливого відносного відхилення Δ для кожного δ, і для визначення порогу індексу узгодженості забезпечує знаходження мінімально можливого значення індексу узгодженості I для того ж самого значення δ. Знаходження максимуму Δ і мінімуму I пропонується проводити із застосуванням генетичного алгоритму [111].

Цей вибір, застосування цілеспрямованих переборів – еволюційних методів, обумовлений тим, що, по суті, ми маємо справу зі знаходженням екстремуму функції багатьох змінних $f\left(a'_{ij}\right), i, j = \overline{1..n}$, аргументами якої є елементи МПП A'. Окрім того, експеримент не ставить ціллю знаходження точних значень екстремуму, а достатніми є лише раціональні рішення, що відповідає властивостям еволюційних методів. До того ж, прийнятних за продуктивністю аналітичних методів для рішення такого плану задач не існує.

3.7 Реалізація експерименту

Оскільки, результати щодо визначення ефективності цілого ряду методів агрегації, а саме показників якості $\Delta(\delta)$ як максимально можливого відносного відхилення, були отримані раніше [102, 84, 14], то для дослідження методів, що враховують узгодженість потрібно ще визначити мінімально можливе значення індексу узгодженості $I(\delta)$. З цією метою доцільно скористатись результатами, отриманими у попередньому дослідженні стосовно певних методів агрегації, а також доопрацювати розроблений інструментарій для продовження проведення експерименту.

3.7.1 Наявний інструментарій для проведення експерименту

Знаходження максимально можливого відносного відхилення Δ для кожного δ проводиться за допомогою Генетичного алгоритму. У цьому методі, який реалізовано в програмному модулі, застосовуються одно-точковий кросовер і мутація. Фітнес-функція (функція пристосованості) задається як обчислення відносного відхилення Δ (суми абсолютних значень відхилень ваг альтернатив, обчислених у результаті агрегації МПП від заданих еталонних значень).

Дві особини для схрещування вибираються випадковим чином із популяції. У результаті розмноження з’являється потомство («дитина»), яке замінює найменш пристосовану особину (з гіршою пристосованістю). Тут використовується елітизм, тобто паралельний підхід із глобальною конкуренцією.

Модуль отримує вектор заданих вхідних ваг із вхідного файлу, і результати розрахунку Δ також зберігаються у іншому файлі для подальшого аналізу. Інтерфейс керування модулем побудовано у вигляді діалогового вікна (див. рис. 3.2) для введення необхідних даних та експериментальних параметрів.

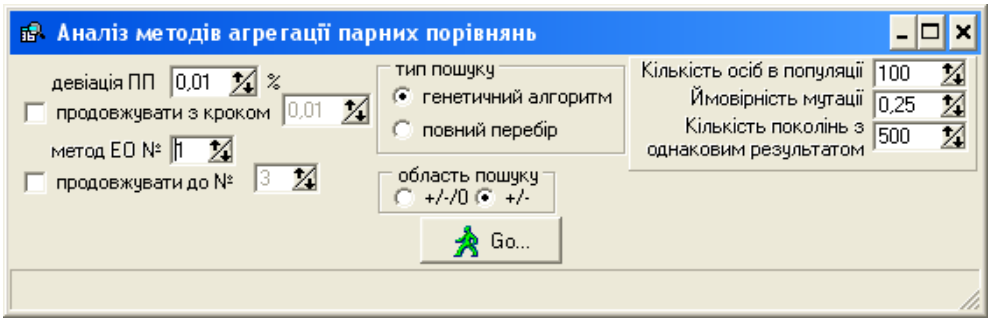


Рис. 3.2. Інтерфейс експериментального модуля аналізу методів агрегації попарних порівнянь

Значення δ – відносне відхилення (девіація) попарних порівнянь, уводиться в поле вводу з назвою «девіація ПП» і може автоматично збільшуватися з певним заданим кроком для безперервного проведення серії розрахунків і нагромадження даних.

У модулі передбачено також режим перевірки правильності результатів роботи Генетичного алгоритму при певних заданих вхідних параметрах. Перевірку доцільно здійснювати лише при невеликих значеннях n ($n < 6$) за допомогою повного перебору варіантів значень аргументів – елементів МПП A'. При значеннях $n \geq 6$ такі перевірки не доцільні, оскільки потребують значних обчислювальних ресурсів.

Вибір вхідних параметрів генетичного алгоритму (кількість особин у популяції, ймовірність мутації та кількість поколінь з однаковою максимальною пристосованістю) для виконання пошуку оптимуму здійснюється ітераційно, з використанням, при можливості, повного перебору для перевірки.

Крім того, програмний модуль дозволяє вибрати один із двох режимів

пошуку максимуму функції: перевірити варіанти відхилення аргументу або з можливістю залишити аргумент незмінним (позначено як «+/–/0») або без такої можливості («+/–»). На практичному досвіді було показано, що достатньо використовувати більш вузький діапазон пошуку варіантів, коли всі аргументи змінюються за відносною величиною на позитивні чи негативні значення (на екранній формі, зображеній на рис. 3.2 цей режим позначено як «+/–»).

3.7.2 Доопрацювання програмного інструментарію

Для отримання експериментальних даних щодо визначення узгодженості наявний інструментарій проведення експериментального дослідження було доопрацьовано. Без зміни інтерфейсу уведення параметрів експерименту до програмного модуля додано процедуру обчислення індексу узгодженості для МПП, яка виконує роль функції пристосованості Генетичного алгоритму. Окрім того, модуль налаштовується на пошук мінімуму цієї фітнес-функції, на відміну від попереднього налаштування на пошук максимуму.

Для коректності експериментально отриманих результатів доопрацьований програмний модуль варто використовувати для розрахунків узгодженості з тими самими налаштуваннями вхідних параметрів, що і при попередніх розрахунках, пов’язаних з ефективністю методів агрегації.

3.7.3 Отримані результати розрахунків

З попереднього дослідження [102] пропонується використати отриману залежність $\Delta(\delta)$ для Комбінаторного методу [84], який виявився найефективнішим з-проміж інших методів агрегації.

Результати були отримані при заданих значеннях еталонних ваг: $w = \{1, \sqrt{3} = 1.732051,\ \sqrt{3}\sqrt{3} = 3,\ 3\sqrt{3} = 5.196152,\ 3\sqrt{3}\sqrt{3} = 9\}$, заданих довільно на обмеженій шкалі експертного оцінювання. У ході дослідження експериментально було підтверджено, що отримані залежності $\Delta(\delta)$ для кожного окремого методу агрегації лише у деякій мірі (не значно) залежить від конкретних значень вхідних еталонних ваг альтернатив $w_i, i = \overline{1..n}$.

Результати проведеного імітаційного дослідження для цих заданих еталонних ваг зображено на рисунку 3.3.

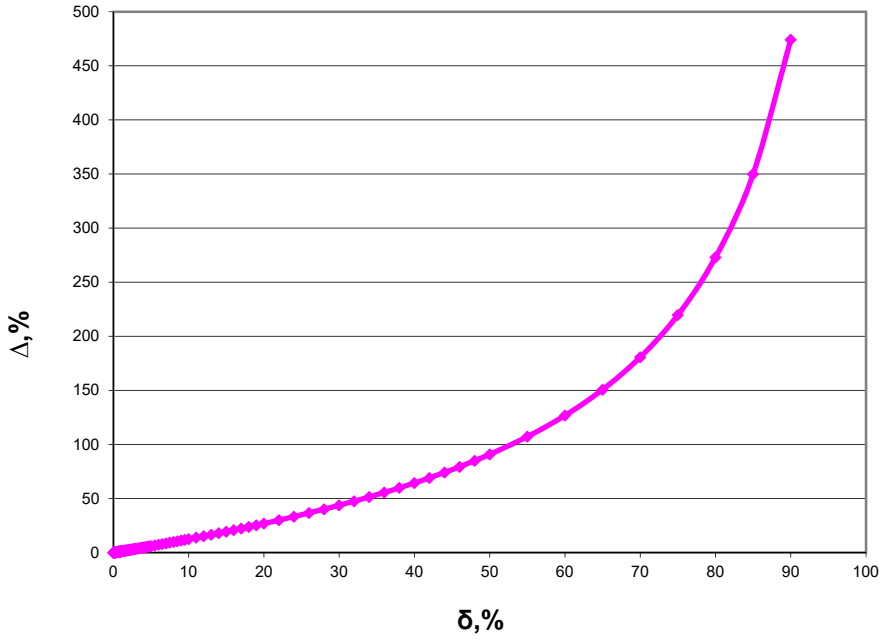


Рис. 3.3. Результати експериментального дослідження Комбінаторного методу агрегації попарних порівнянь

На основі тих самих вхідних даних, що попередньо були використані у ході експерименту з отримання залежності $\Delta(\delta)$, запропоновано провести дослідження з отримання залежності $I(\delta)$, використовуючи доопрацьований програмний модуль.

Було вирішено, що достатньо у подальшому використовувати результати дослідження залежності максимального відхилення оцінок від еталонів ваг, визначених комбінаторним методом для девіації елементів ідеально узгодженої МПП у діапазоні від 0 до 50% (див. рис. 3.4).

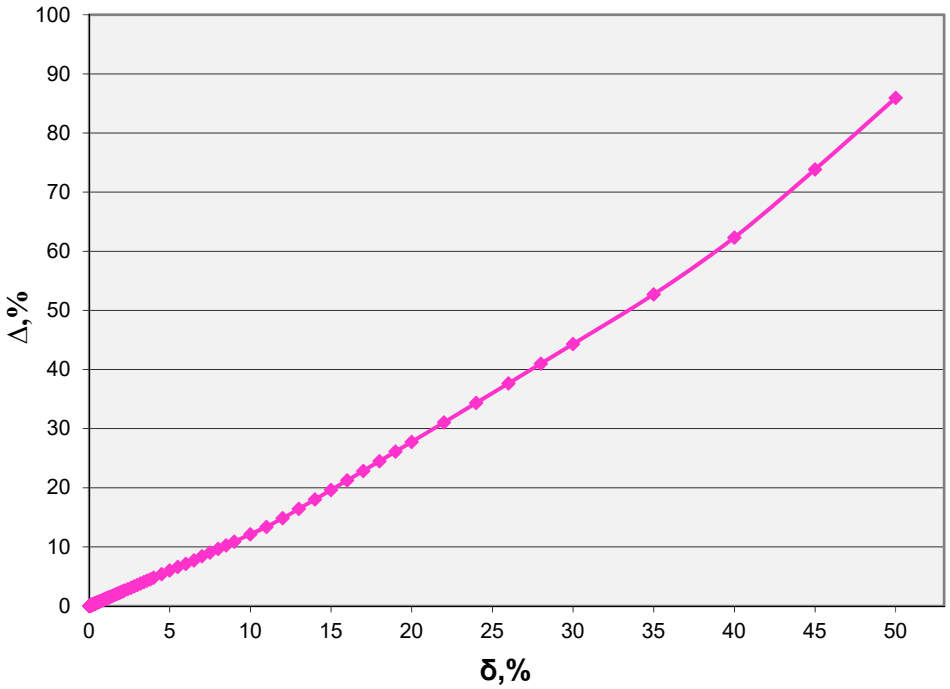


Рис. 3.4. Використані результати дослідження залежності максимального відхилення оцінок від еталонів ваг

3.7.4 Застосування результатів

Отримані у ході імітаційного дослідження результати зручно візуалізувати у тій самій системі координат, що зображено на рис. 3.3 та рис. 3.4. По суті, обидві залежності $\Delta(\delta)$ та $I(\delta)$ зручно зобразити зі спільною віссю δ – відносна похибка експертних попарних порівнянь (див. рис. 3.5).

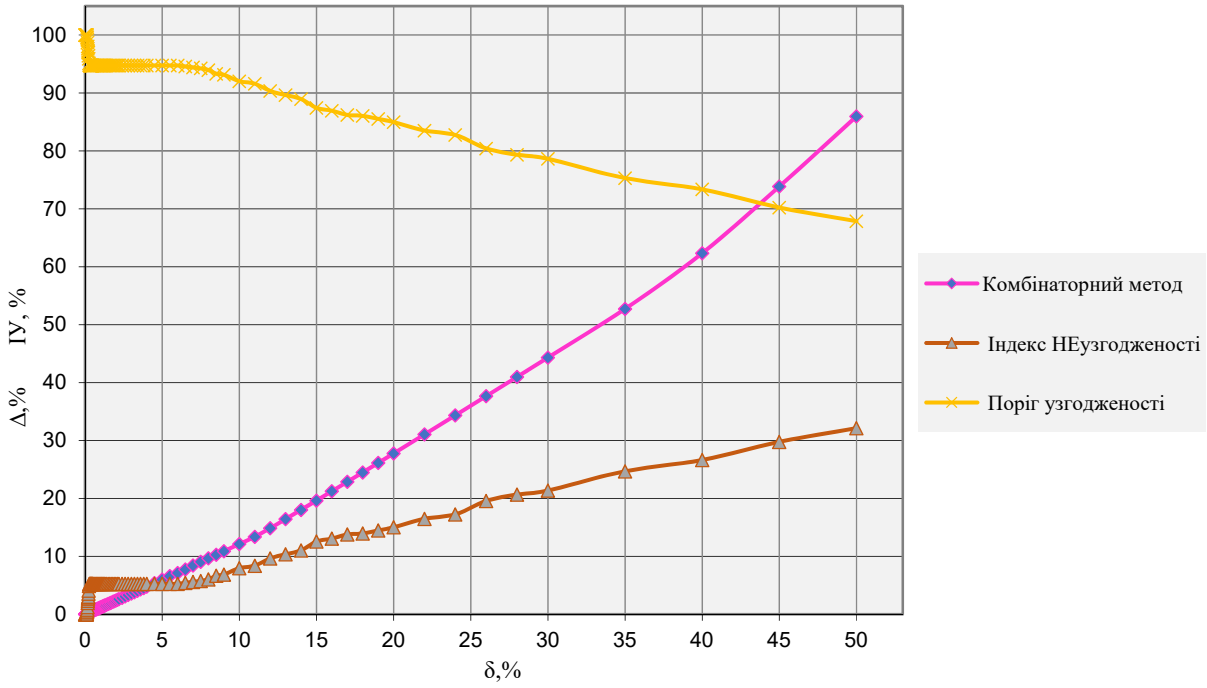


Рис. 3.5. Результати визначення індексу узгодженості для Комбінаторного методу агрегації попарних порівнянь

На даному графіку залежність $\Delta(\delta)$ зображено пурпурним кольором, а залежність $I(\delta)$ – жовтим. Для наочності коричневим (брунатним) кольором зображено залежність $(1 - I(\delta))$, що відповідає індексу неузгодженості.

Не важко помітити значну кореляцію між залежностями $\Delta(\delta)$ та $(1 - I(\delta))$, тобто, зі збільшенням відносної похибки оцінювання збільшується і неузгодженість експертних оцінок, що також добре узгоджується зі здоровим глуздом.

На рисунку 3.4 показано залежність від девіації елементів ідеально узгодженої МПП (побудованої за еталонними вагами)

1) максимального відхилення від еталонів ваг, визначених комбінаторним методом (рожевий)

2) максимально можливого індексу «неузгодженості» у відсотках (100%–ІУ) (коричневий)

3) мінімально можливого індексу узгодженості у відсотках (жовтий).

Максимально можливі значення розраховувались за допомогою ГА.

Як відмічалось у попередньому підрозділі, знайдені значення індексу узгодженості залежності $I(\delta)$ відповідають порогу узгодженості для відповідних значень необхідної заданої якості агрегації $\Delta(\delta)$ при проведенні експертизи.

Далі, на рис. 3.6 зображено дві залежності для визначення порогу узгодженості відповідно до заданого Δ, яке потрібно забезпечити у експертизі.

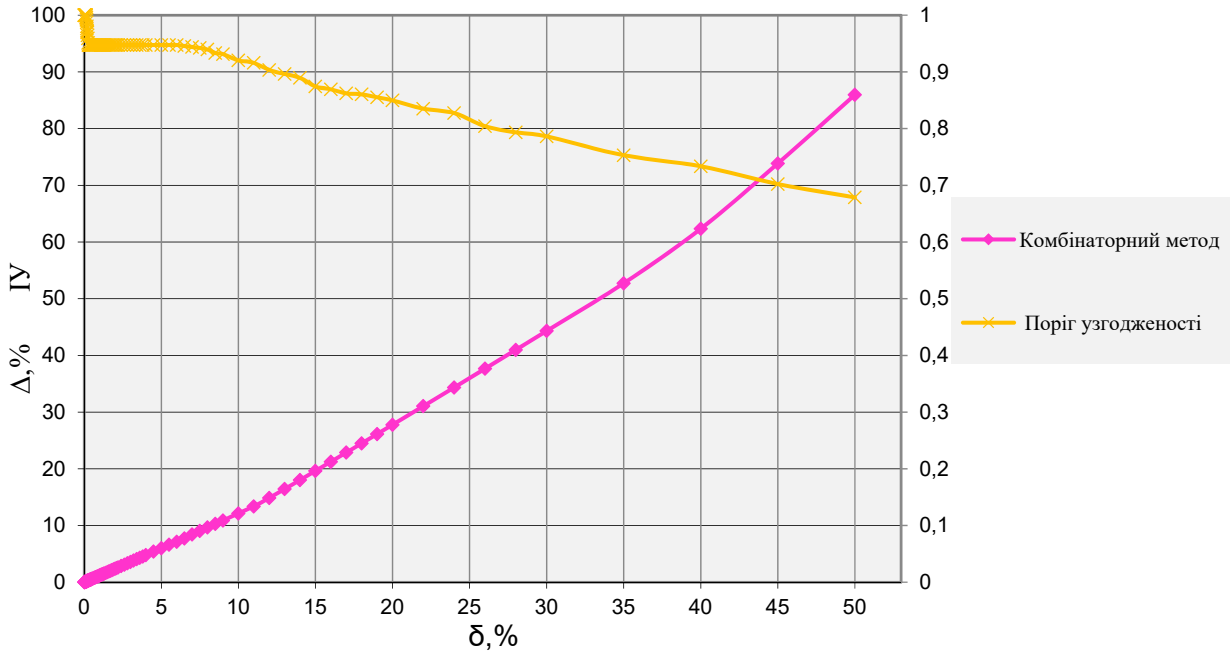


Рис. 3.6. Графіки для визначення порогу узгодженості

Отже, скориставшись відповідними графіками можна визначити поріг узгодженості, який потрібно досягти для подальшої обґрунтованої агрегації експертних оцінок. Поріг узгодженості, в такому розумінні, це значення індексу узгодженості, нижче якого оцінки вважаються неузгодженими і, у такому випадку, потрібне підвищення узгодженості для подальшої агрегації цих оцінок.

3.7.5 Графічний спосіб визначення порогу узгодженості

Таким чином, маючи у розпорядженні графіки залежності $\Delta(\delta)$ та $I(\delta)$ є можливість визначити поріг узгодженості оцінок за заданим значенням необхідного рівня відносного відхилення результуючих агрегованих значень цих оцінок від еталонних. Отже, відповідно до графіка залежності $\Delta(\delta)$, визначається значення δ, і вже за цим значенням δ із залежності $I(\delta)$ визначається значення індексу узгодженості, який потрібно досягти, тобто – поріг узгодженості. Звичайно ж, аналітичне визначення порогу узгодженості за заданим рівнем відхилення результуючих оцінок є можливим і, певне, доцільним у більшості практичних прикладів застосування. Цей спосіб визначення порогу буде запропоновано нижче.

3.7.6 Табличні значення порогу узгодженості

На основі експериментально визначених залежностей $\Delta(\delta)$ та $I(\delta)$ не складно отримати залежність $I(\Delta)$, яка дає можливість визначати поріг узгодженості і використовувати його на практиці. Виходячи із графіків, зображених на рис. 3.6, отримаємо залежність показану на рис. 3.7.

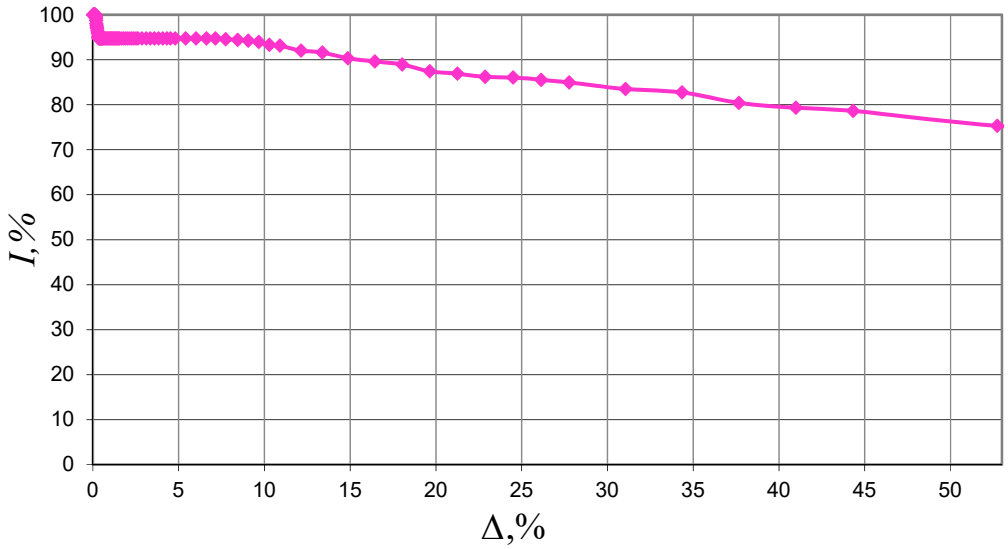


Рис. 3.7. Залежність порогу узгодженості від заданого Δ,%

Задавшись певною дискретизацією дану залежність можна представити у табличному вигляді (див. табл.3.4).

Таблиця 3.4

Поріг узгодженості в залежності від затребуваного рівня достовірності експертизи

Δ,%	< 10	10	15	20	25	30	35	40	45	50
I	0,95	0,94	0,9	0,87	0,86	0,84	0,82	0,8	0,78	0,76

Таблиця 3.4 корисна при проведенні експертиз, коли достовірність отриманого результату є важливим показником.

3.7.7 Аналітичний вираз визначення порогу узгодженості

Для практичного застосування також може бути корисним аналітичний вираз, отриманий з лінійного тренда, доданого до графіка залежності на рис. 3.7 (див. рис. 3.8).

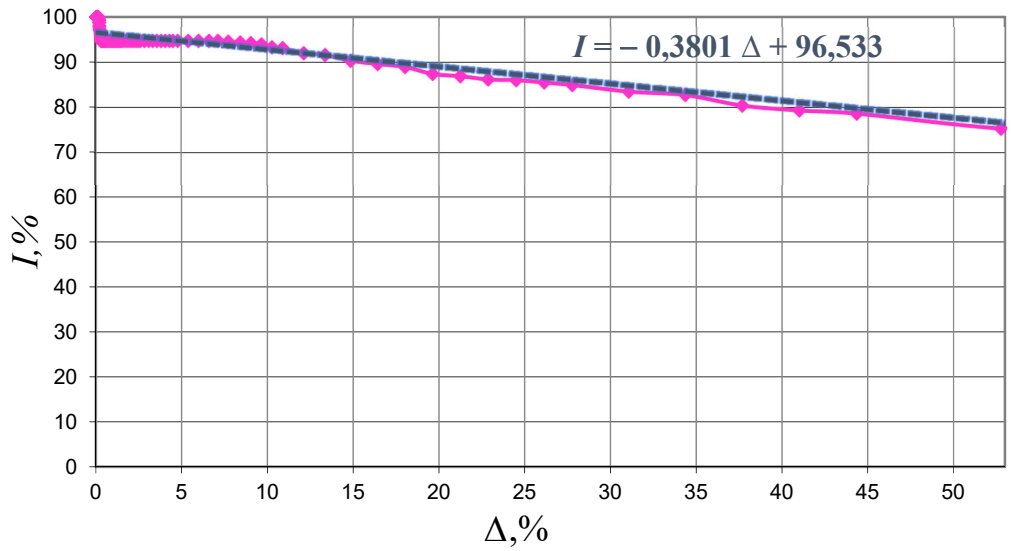


Рис. 3.8. Лінійний тренд залежності порогу узгодженості від Δ,%

Цю приблизно визначену лінійну залежність $I = -0{,}3801\,\Delta + 96{,}533$ теж можна застосовувати для визначення порогу узгодженості. Застосування таких, експериментально розрахованих порогів узгодженості дозволяє підвищити достовірність отриманих оцінок та удосконалити механізм проведення експертиз.

3.8 Висновки до розділу 3

У результаті експерименту підтверджено, що застосування розробленого методу визначення та підвищення узгодженості підвищує достовірність отриманих агрегованих оцінок у порівнянні із застосуванням методу агрегації без урахування узгодженості.

Експериментально отримано порогові значення індексу узгодженості в залежності від необхідного рівня достовірності отримуваних результуючих оцінок. Ці порогові значення позначають межу узгодженості, при досягненні якої експертні оцінки можна узагальнювати (агрегувати), у іншому ж випадку узгодженість потребує підвищення.

Використання розрахованих порогів узгодженості дозволяє підвищити достовірність отриманих оцінок та удосконалити механізм проведення експертиз.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ У СКЛАДІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Методи та процедури, пов'язані з узгодженістю експертних оцінок, а саме, з визначенням рівня узгодженості як індивідуальних оцінок експерта, так і оцінок наданих у складі групи експертів, з визначенням рівня узгодженості достатнього для агрегації оцінок, а також, з підвищенням, при потребі, узгодженості до достатнього рівня, програмно реалізовані на основі платформи трансферу знань і застосовуються в системах отримання, обробки та використання експертних знань [9, 103–107]. Застосування таких знання-орієнтованих систем пов'язане з вирішенням задач стратегічного планування у різних сферах [7, 122–125, 128] – космічна галузь [112, 113], військова сфера [1, 114, 115], включаючи інформаційні операції [117, 118, 120], індустрія [127], сталий розвиток [2, 116, 121] тощо, задач генерування сценаріїв [15, 119] та інших складних задач інтелектуального характеру. Як складову платформи трансферу знань розроблено систему розподіленого збору експертної інформації «Консенсус-2» [6], в рамках якої реалізовано технологію групової побудови моделі предметної області.

Сутність технології полягає в певній структуризації складної слабко структурованої системи у ході побудови її моделі. Моделювання полягає в декомпозиції складної системи на складові, з визначенням зв'язків між цими складовими. У кожному етапі цього процесу моделювання приймають участь колективи експертів, компетентних у питаннях, що розглядаються на поточний момент. Тобто, процес побудови моделі складається з окремих декомпозицій, що виконуються певними групами аналітиків та експертів. У ході декомпозиції кожна група формує узагальнене рішення, прийшовши до консенсусу з використанням методів групового експертного оцінювання.

При кожному застосуванні відповідного методу експертного оцінювання постає питання узгодженості оцінок, яке і вирішується запропонованою низкою методів та процедур.

4.1 Настанова щодо використання системи розподіленого збору та обробки експертної інформації

Система розподіленого збору та обробки експертної інформації (СРЗОЕІ) «Консенсус-2» [6] призначена для проведення експертиз розподіленими групами експертів з подальшим використанням зібраної та обробленої інформації в системах підтримки прийняття рішень. Система реалізує технологію побудови проблемно-орієнтованих баз знань цільового типу для слабко структурованих предметних областей.

За допомогою системи проводиться розподілена побудова бази знань мережевого типу – модель предметної галузі для подальшого використання її в СППР з метою вироблення рекомендацій для осіб, що приймають рішення.

4.2 Опис програмної системи

4.2.1 Склад системи

Система складається з двох автоматизованих робочих місць (АРМ): організатора експертизи (інженера по знаннях) та експерта. Система дозволяє одночасну роботу декількох робочих експертних груп з різними проблемами і, тим самим, одночасну побудову декількох БЗ. Користувачі працюють з СРЗОЕІ «Консенсус-2» через програму перегляду інтернет-контенту (веббраузер). Інтерфейс системи реалізовано українською та англійською мовами. Загальний вигляд інтерфейсу зображено на рис. 4.1.

4.2.2 Особливості реалізації системи

СРЗОЕІ «Консенсус-2» реалізовано як вебсерверний додаток із використанням мови програмування Python та програмної платформи (фреймворку) Django.

Програмна система «Консенсус-2» потребує наявності на вебсервері діючого інтерпретатора Python та системи управління баз даних (СУБД) MySQL.

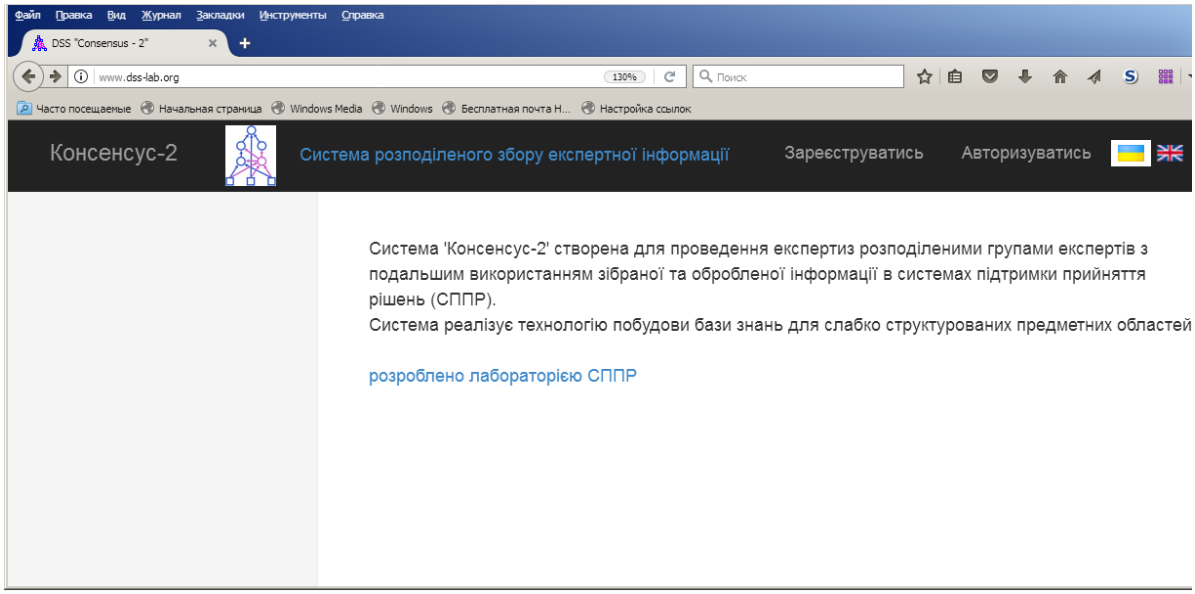


Рис. 4.1. Загальний вигляд інтерфейсу СРЗОЕІ «Консенсус-2»

4.2.3 Функціонування програмної системи

Діаграма варіантів використання системи (Use-case) представлено в підрозділі 4.3, а далі, у ході опису технології групового моделювання предметної області, коротко розглянемо функціонал системи з точки зору користувачів.

4.2.3.1 Реєстрація в системі

Ініціалізація АРМ (організатора експертизи або експерта) проводиться у залежності від аутентифікації користувача при вході в систему (наявності у користувача відповідних повноважень організатора експертизи або експерта). (див. рис. 4.2)

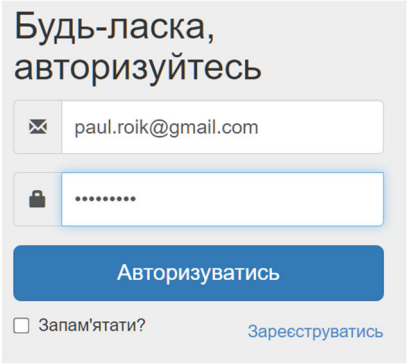


Рис. 4.2. Аутентифікація користувача при вході в систему

Усі користувачі проходять попередню реєстрацію засобами системи. Для цього користувачеві потрібно за допомогою веббраузера зайти за відповідною веб-адресою та, вибравши посилання «Зареєструватись», заповнити реєстраційну форму (рис. 4.3).

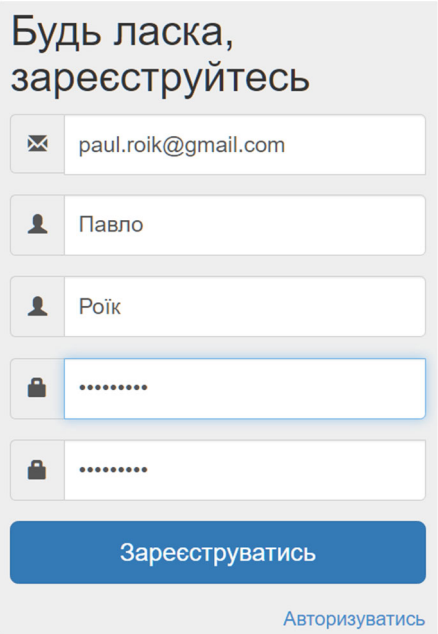


Рис. 4.3. Форма початкової реєстрації користувача

4.2.3.2 Формування нової експертизи

Організатор експертизи формує нову експертизу (проблему), що підлягає подальшому розгляду. Для цього він переходить до пункту вертикального меню «Керування експертизами» (рис. 4.4).

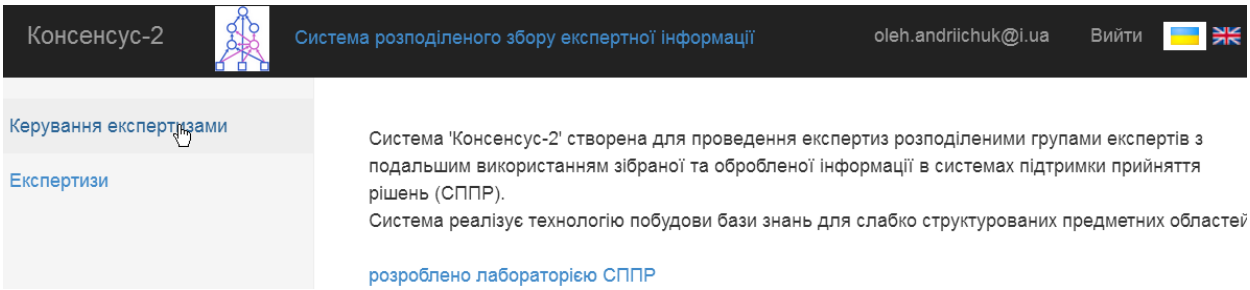


Рис. 4.4. Перехід організатором експертизи до пункту вертикального меню «Керування експертизами»

Для додавання нової експертизи слід натиснути значок «+» (див. рис. 4.5).

Також, організатором експертизи формулюється назва проблеми та головна ціль, яка попередньо була поставлена ОПР (див. рис. 4.6).

Далі організатор експертизи має можливість, за потреби, призначити ще додаткових організаторів експертизи. Для цього треба вибрати їх серед уже зареєстрованих в системі користувачів, які мають повноваження організатора експертизи, та підтвердити натисканням відповідної кнопки (див. рис. 4.7).

Для переходу до наступної стадії експертизи (вибір експертної групи) слід натиснути кнопку «►►» (див. рис. 4.8).

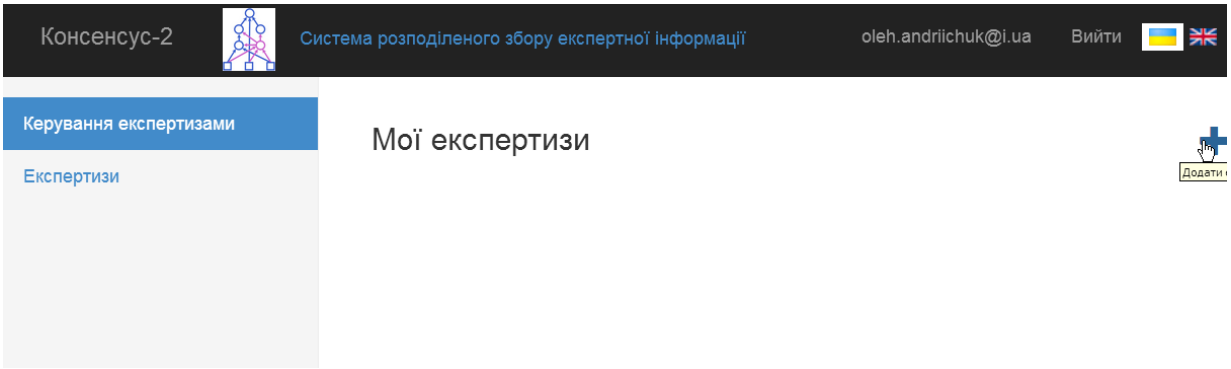


Рис. 4.5. Додавання нової експертизи

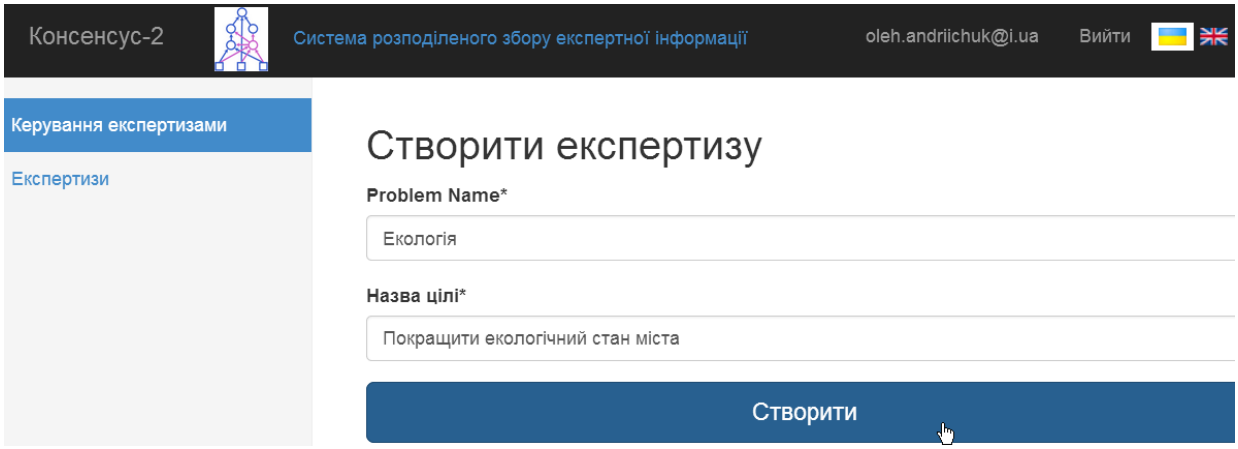


Рис. 4.6. Створення нової експертизи

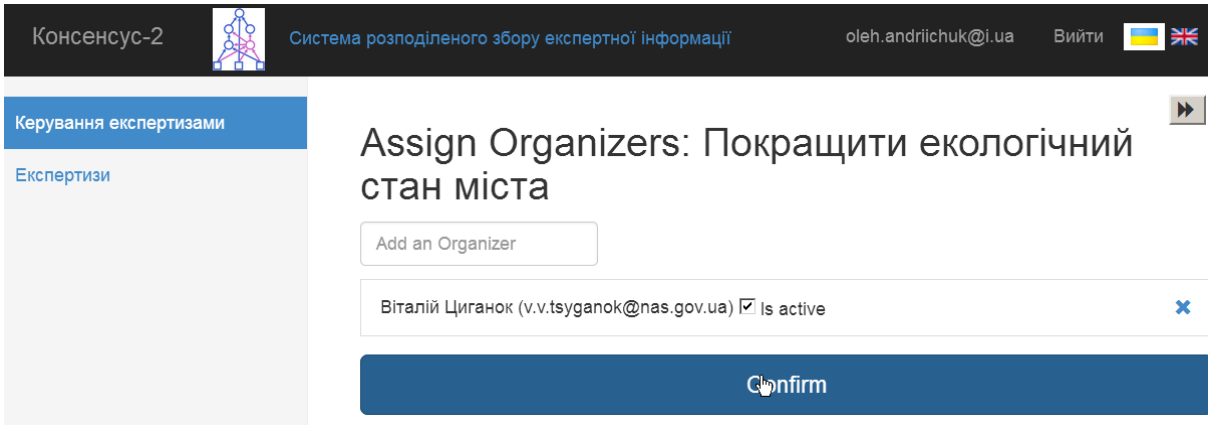


Рис. 4.7. Призначення додаткового організатора експертизи

Далі організатор експертизи формує експертну групу, яка буде приймати участь у декомпозиції головної цілі вищезгаданої проблеми. Для цього треба вибрати членів групи серед уже зареєстрованих в системі користувачів, які мають повноваження експерта, та підтвердити натисканням відповідної кнопки (див. рис. 4.9).

Для переходу до наступної стадії експертизи (додавання формулювань цілей експертами) слід натиснути кнопку «►►» (див. рис. 4.10).

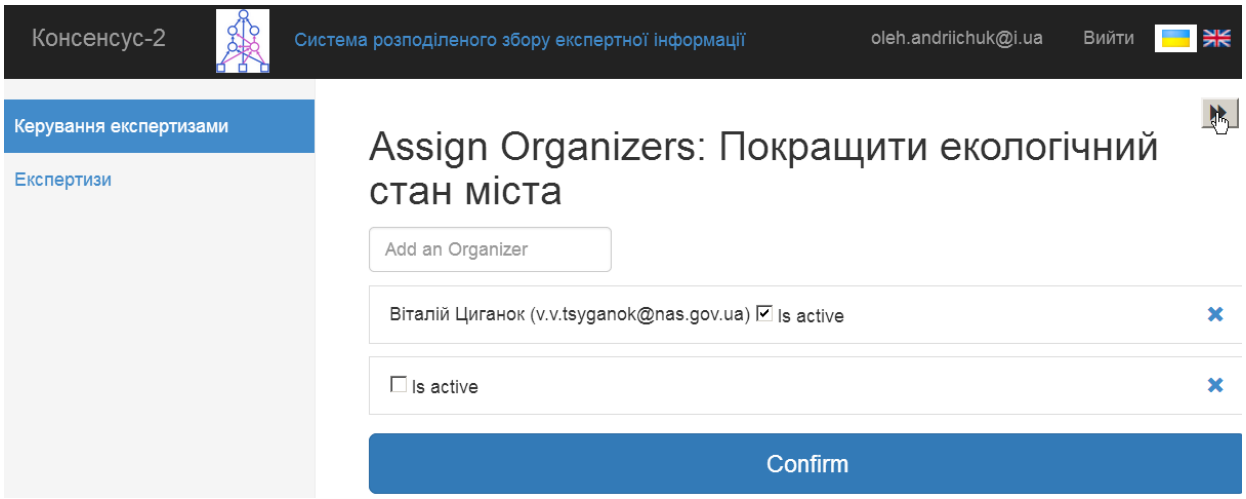


Рис. 4.8. Перехід до наступної стадії – вибір експертної групи

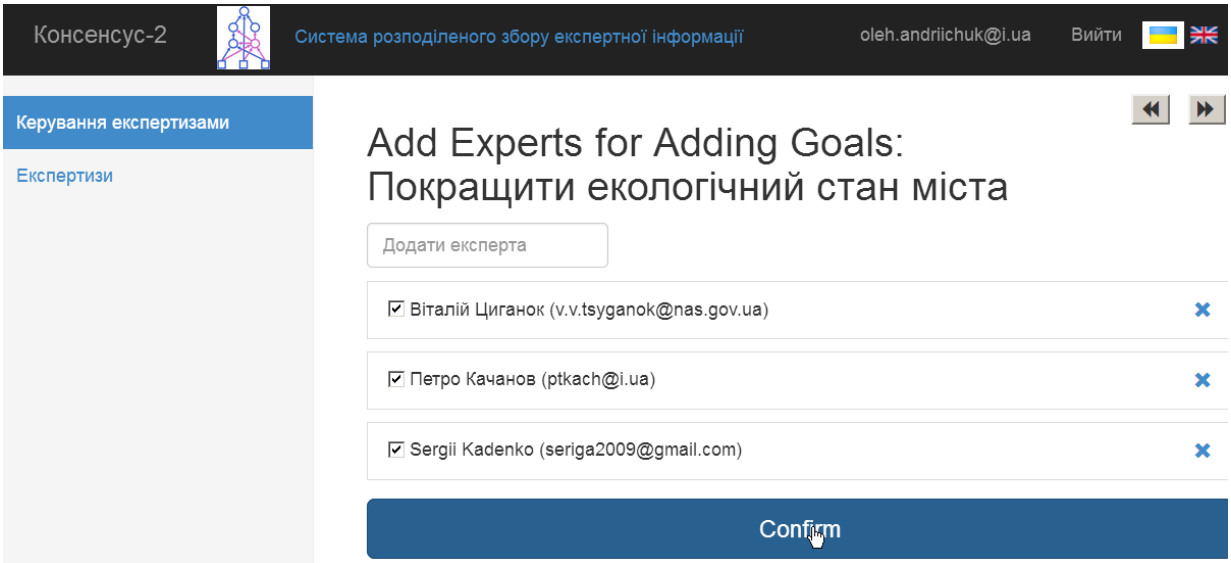


Рис. 4.9. Формування експертної групи

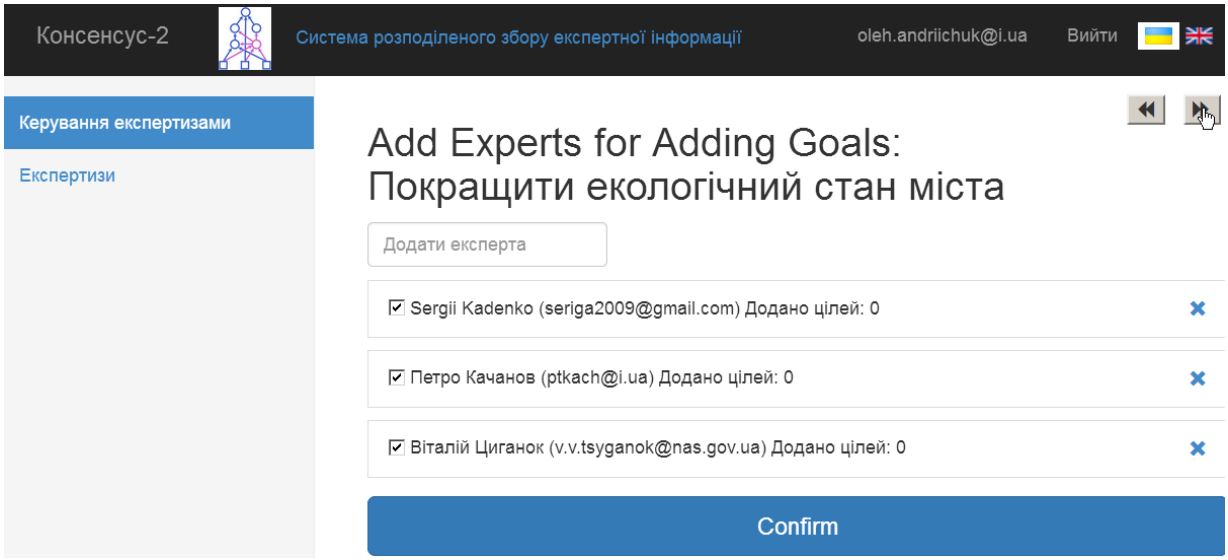


Рис. 4.10. Перехід до наступної стадії – додавання формулювань цілей експертами

4.2.3.3 Додавання формулювань цілей експертами

На даній стадії кожен з експертів, включених до експертної групи, повинен після своєї аутентифікації в системі «Консенсус-2» (аналогічно до описаного на початку даного підрозділу) перейти до пункту вертикального меню «Експертизи» та обрати відповідну експертизу (див. рис. 4.11).

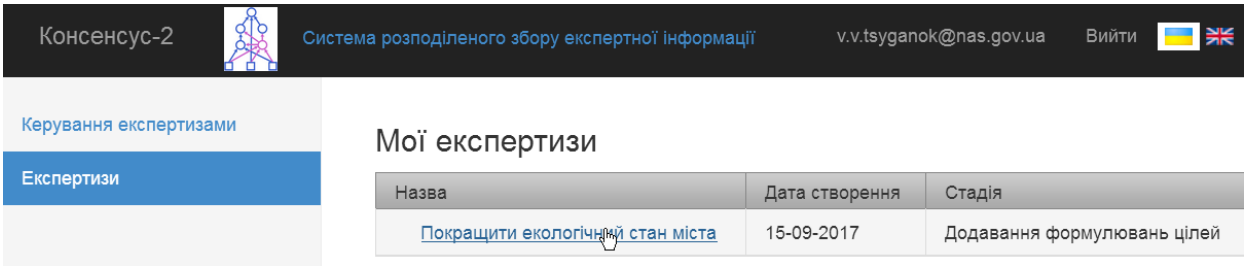


Рис. 4.11. Експерт вибирає експертизу для участі

Далі кожен експерт групи формує свій індивідуальний перелік факторів (цілей), які, на його думку, найсуттєвіше пливають на досягнення поставленої головної цілі (див. рис. 4.12). Це проводиться шляхом уведення нових формулювань цілей або шляхом вибору цілей зі списку раніше уведених.

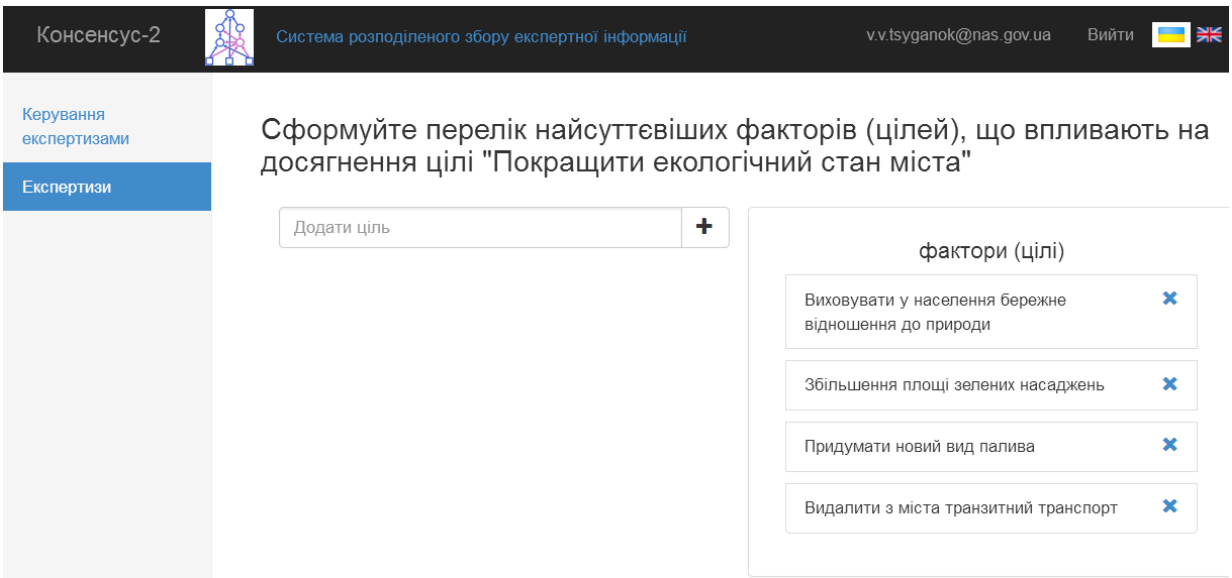


Рис. 4.12. Введення індивідуальних експертних формулювань

Кожний експерт із сформованої експертної групи має можливість редагувати свої формулювання, поки організатор експертизи не зупинить стадію уведення експертних формулювань. Перелік введених експертом формулювань відображається у списку «фактори (цілі)» (див. рис. 4.12).

Організатор експертизи протягом даної стадії відслідковує кількість цілей сформульованих кожним експертом групи (рис. 4.13).

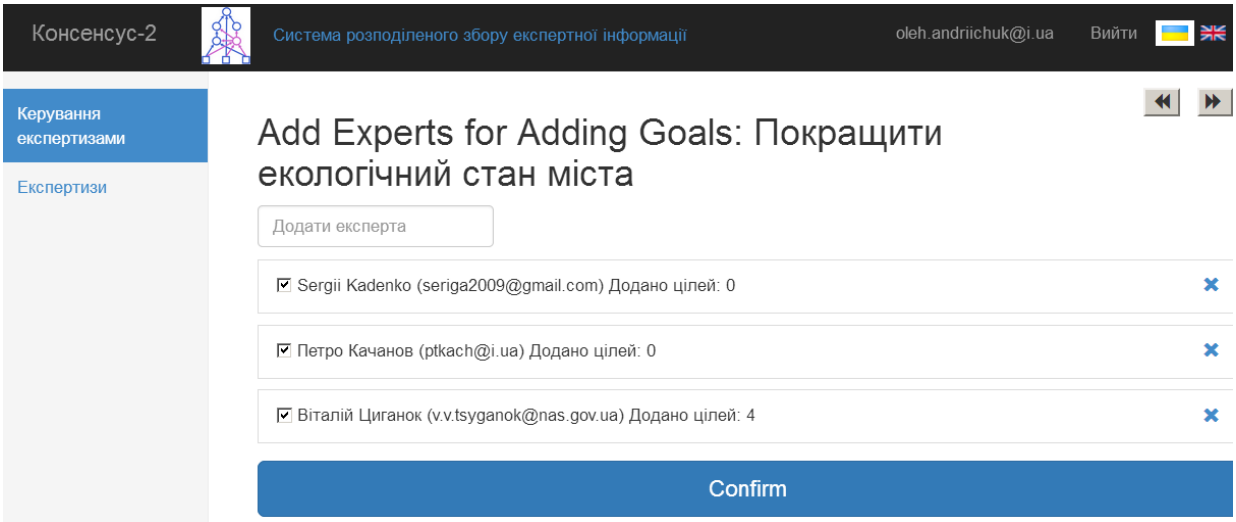


Рис. 4.13. Перегляд кількості цілей сформульованих експертами групи

Слід зазначити, що протягом даної стадії організатор експертизи має можливість змінювати склад експертної групи: додавати (аналогічно описаному вище), призупиняти або видаляти експертів. Для призупинення дій експерта організатор повинен прибрати «галочку» напроти відповідного експерта та підтвердити свій вибір відповідною кнопкою (див. рис. 4.13). Для виключення експерта з групи організатор повинен натиснути кнопку «×» напроти відповідного експерта та підтвердити свій вибір відповідною кнопкою (див. рис. 4.13).

Коли експертна група ввела достатню кількості формулювань організатор експертизи приймає рішення про перехід до наступної стадії експертизи – вибір методу групування формулювань цілей за змістом. Для цього слід натиснути кнопку «►►» (див. рис. 4.14).

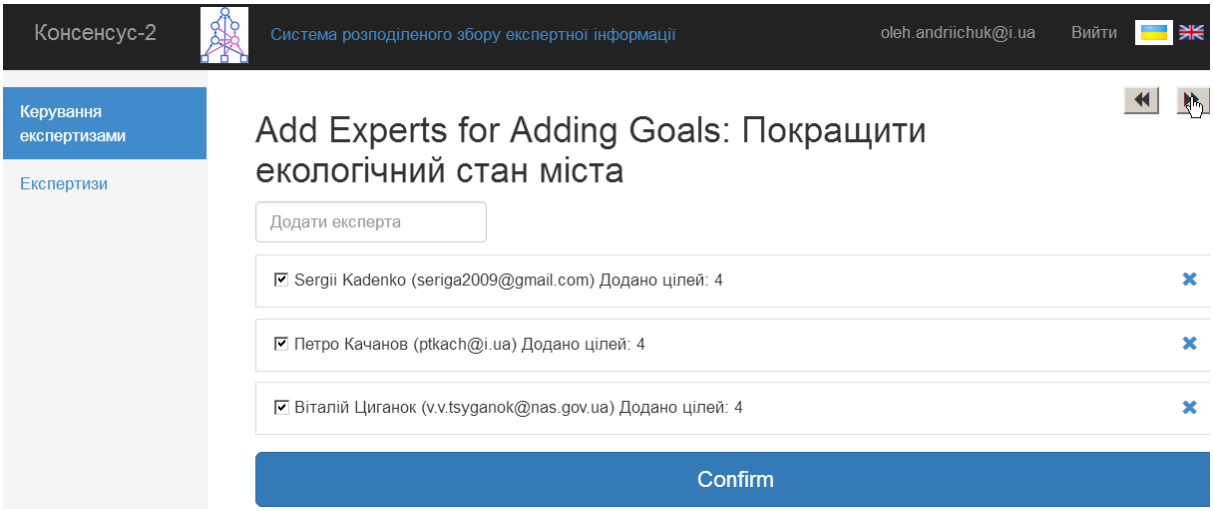


Рис. 4.14. Перехід до наступної стадії – вибір методу групування формулювань цілей за змістом

4.2.3.4 Групування формулювань цілей за змістом

Організатор експертизи вибирає метод групування формулювань цілей за змістом з випадного списку та підтверджує свій вибір натисненням відповідної кнопки (див. рис. 4.15). В даному прикладі був обраний метод «За вибором організатора експертизи». Це означає, що групування за змістом буде виконувати організатор експертизи в ручному режимі, але система зробить лише попереднє групування за змістом. Також є інші методи, наприклад: організатор експертизи повністю в ручному режимі проводить групування (без попереднього групування за змістом системою), організатор експертизи залучає до процесу групування експерта.

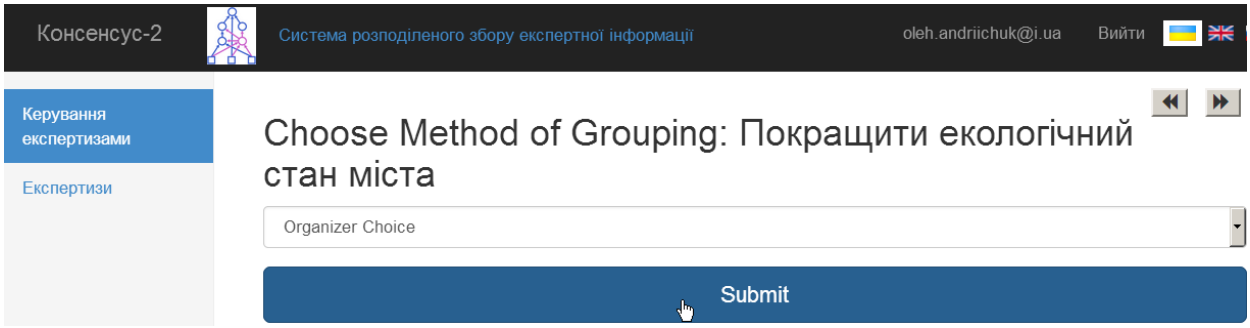


Рис. 4.15. Вибір методу групування формулювань цілей за змістом

Після вибору методу групування формулювань цілей за змістом

організатор експертизи переходить до наступної стадії експертизи – групування формулювань цілей за змістом. Для цього йому слід натиснути кнопку «►►» (див. рис. 4.16).

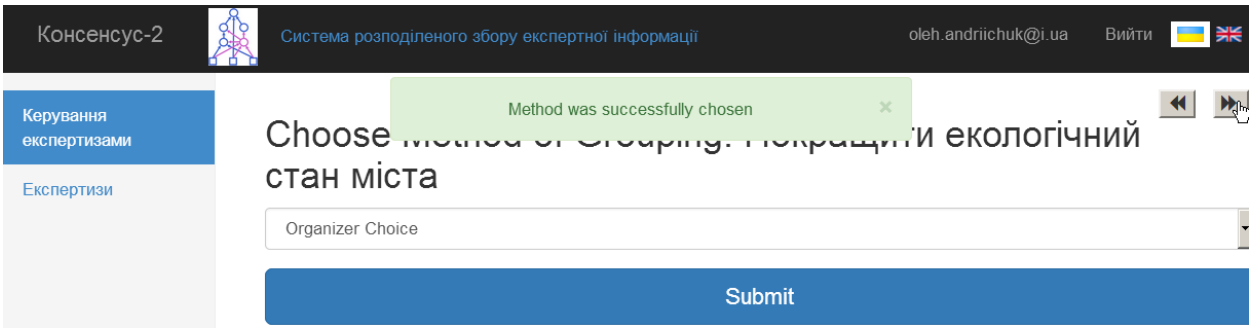


Рис. 4.16. Перехід до наступної стадії – групування цілей за змістом

На стадії групування цілей за змістом методом «За вибором організатора експертизи», як було сказано вище, організатор експертизи виконує групування формулювань цілей за змістом вручну, а система готує лише попереднє групування за змістом (див. рис. 4.17). Попередньо згруповані формулювання цілей містяться у відповідних групах, які відокремлюються прямокутниками (див. рис. 4.17). Формулювання цілей, які не було попередньо згруповано системою, знаходяться у відповідному помаранчевому прямокутнику (див. рис. 4.17).

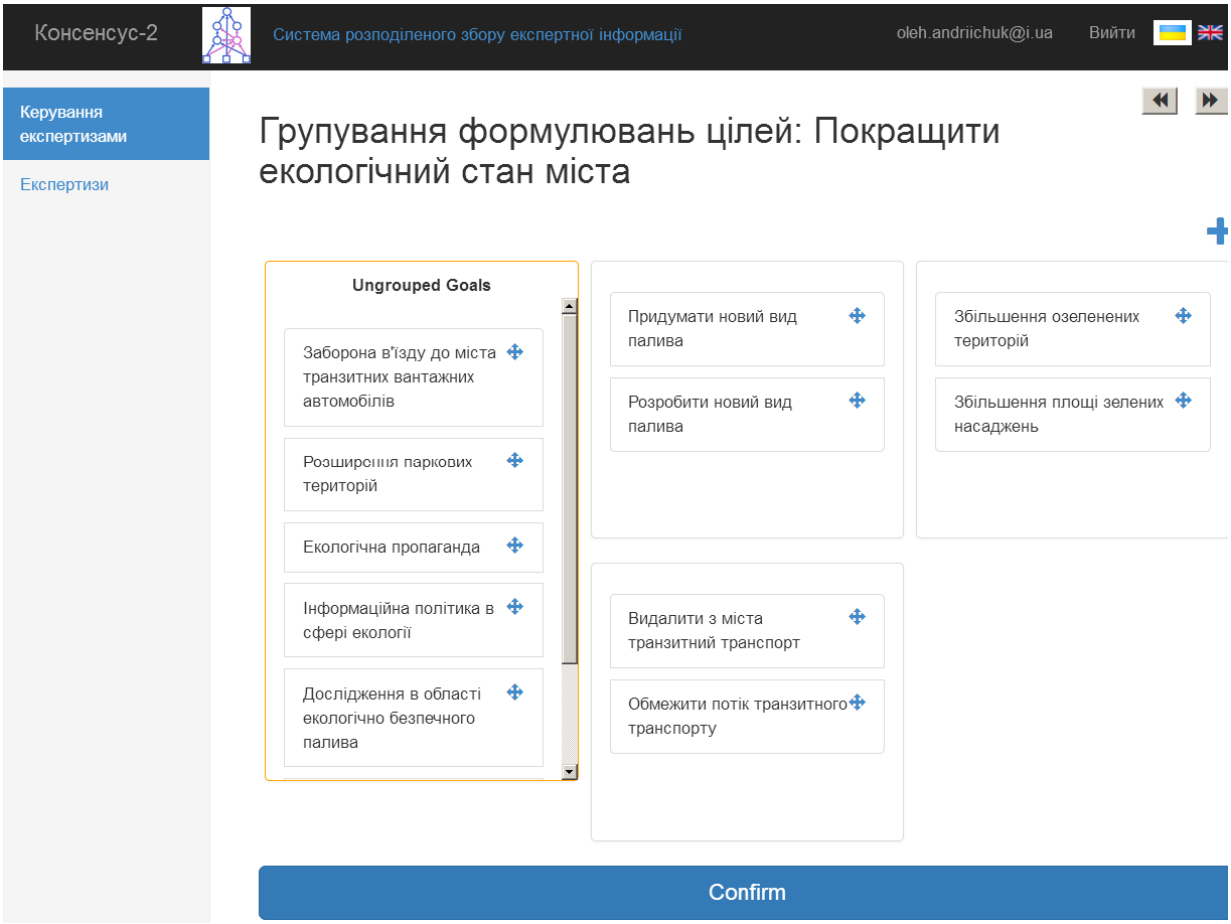


Рис. 4.17. Попереднє групування цілей за змістом

Організатор експертизи переглядає формулювання цілей та приймає рішення про включення подібних за змістом формулювань до відповідної групи. До речі, попереднє групування, яке виконала система, при потребі також може бути змінено. Для групування формулювань цілей за змістом організатор експертизи повинен вибрати мишкою певне формулювання та перетягнути його до відповідної групи (див. рис. 4.18).

Для створення нової групи організатору експертизи слід натиснути кнопку «+» (див. рис. 4.19) та перетягнути у новий прямокутник, що з’явився, відповідні формулювання цілей.

Коли всі формулювання цілей розподілені за змістом у відповідні групи, організатор експертизи підтверджує свій вибір натисненням відповідної кнопки (див. рис. 4.20).

Після того, як всі формулювання цілей розподілені за змістом,

організатор експертизи приймає рішення про перехід на наступну стадію експертизи – вибір методу експертного голосування за найкраще формулювання. Для цього слід натиснути кнопку «►►» (див. рис. 4.21).

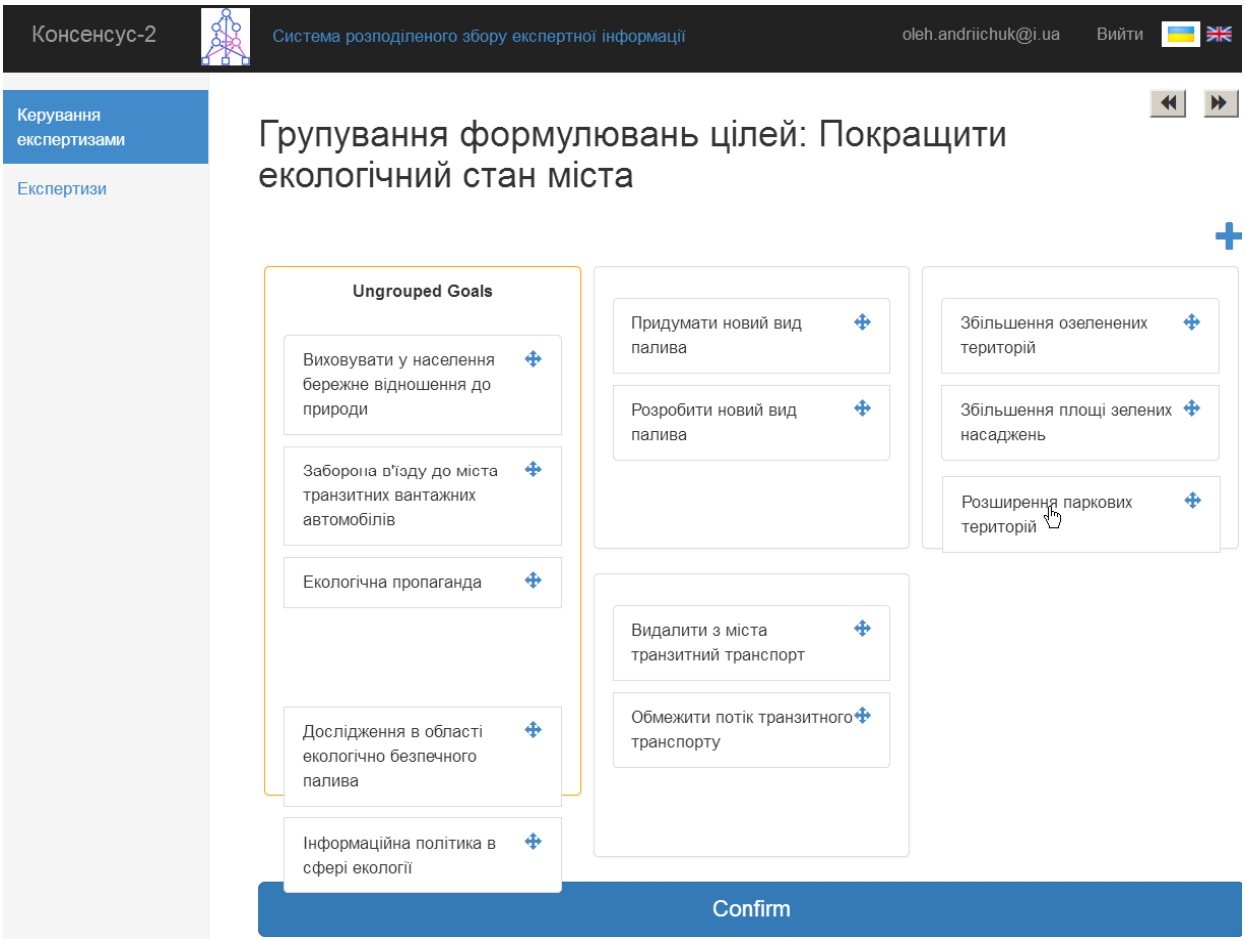


Рис. 4.18. Перетягування формулювання цілі до відповідної групи

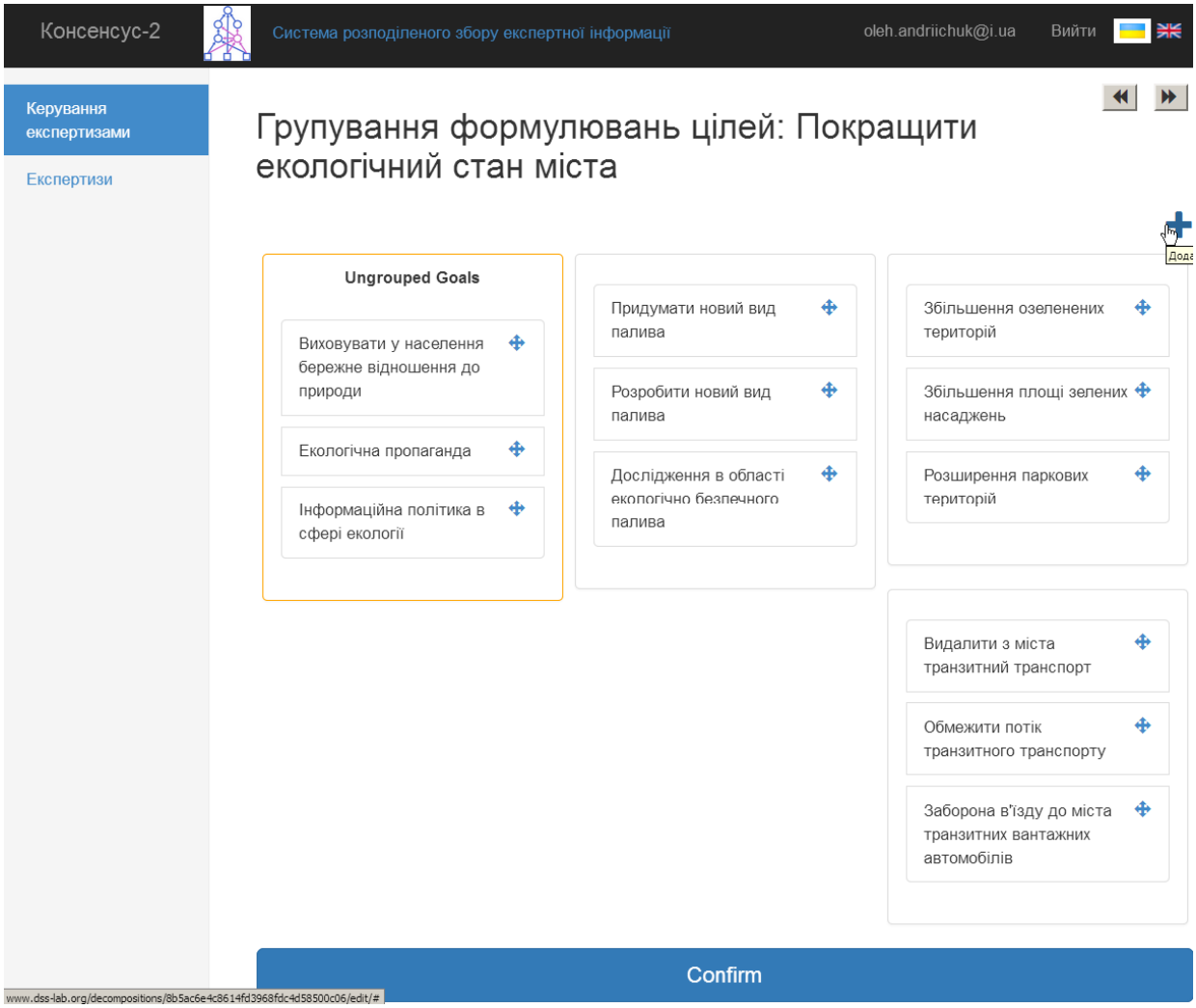


Рис. 4.19. Створення нової групи

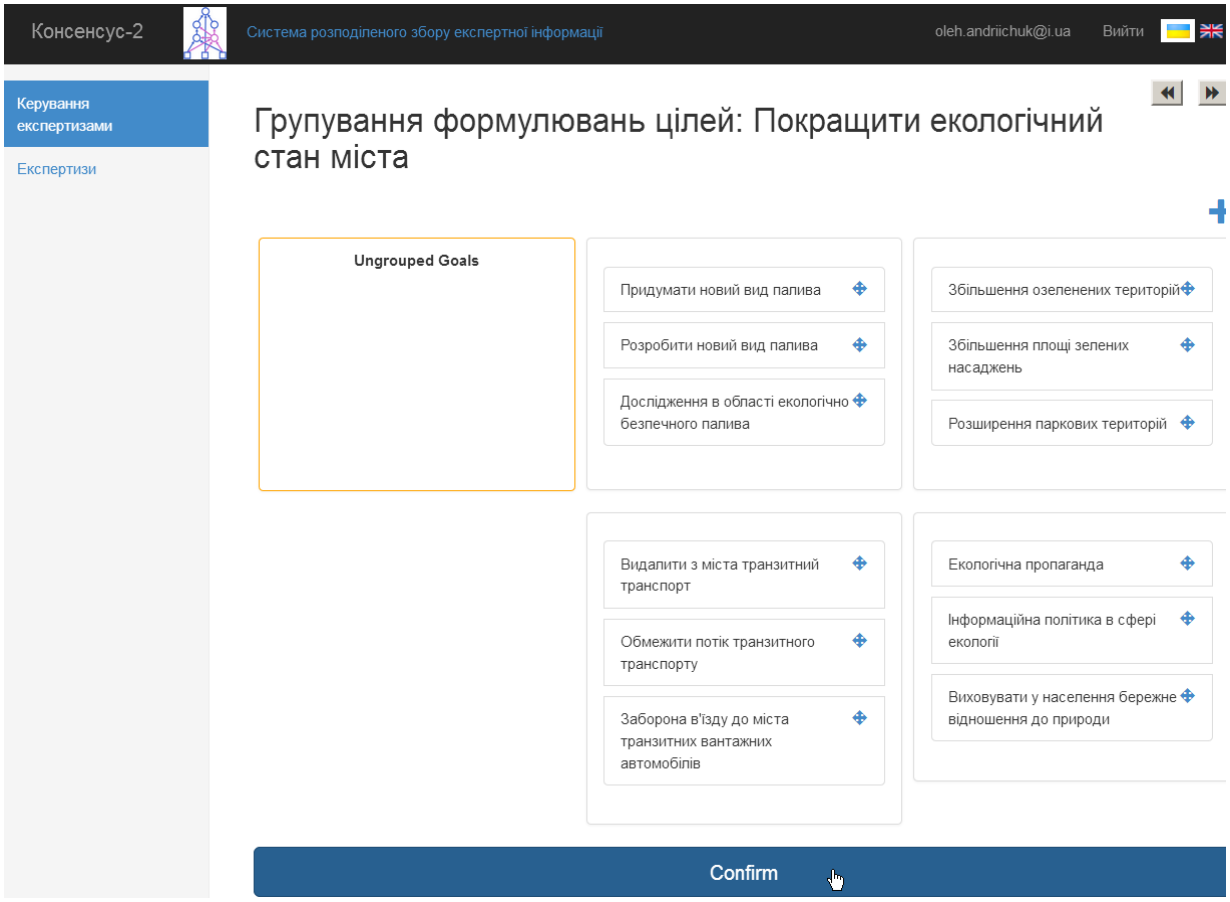


Рис. 4.20. Підтвердження групування формулювань цілей за змістом

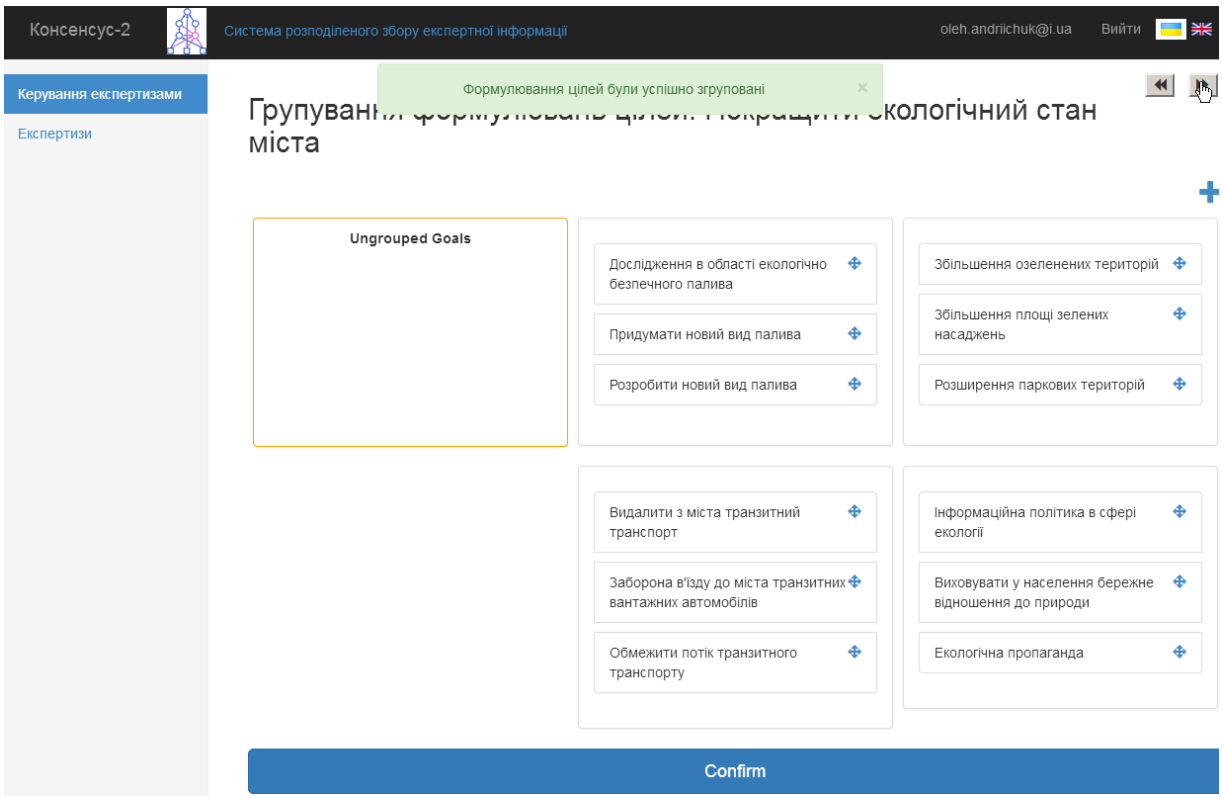


Рис. 4.21. Перехід до наступної стадії – вибір методу експертного голосування за найкраще формулювання

4.2.3.5 Голосування за найкраще формулювання

На стадії вибору методу експертного голосування за найкраще формулювання організатор експертизи повинен вибрати відповідний метод з випадного списку та підтверджує свій вибір натисненням відповідної кнопки (див. рис. 4.22). У даному прикладі був обраний метод «Просте голосування». Це означає, що в якості найкращого формулювання групи буде обране те, за які було віддано найбільша кількість голосів. Є й інші методи, наприклад, безпосереднє оцінювання (експерт надає числову оцінку кожному формулюванню цілі в кожній групі), парні порівняння (експерт порівнює всі пари формулювань цілей в кожній групі).

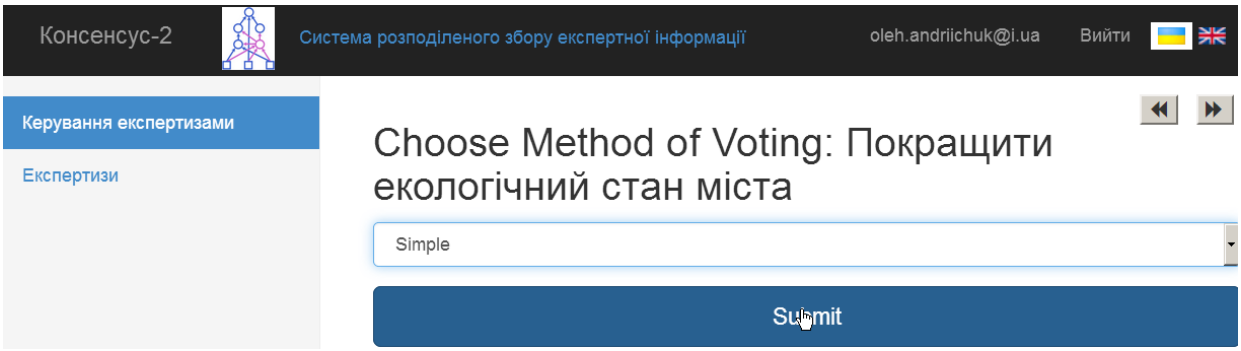


Рис. 4.22. Вибір методу експертного голосування за найкраще формулювання

Після вибору методу експертного голосування за найкраще формулювання організатор експертизи переходить до наступної стадії експертизи – голосування за найкраще формулювання. Для цього йому слід натиснути кнопку «►►» (див. рис. 4.23).

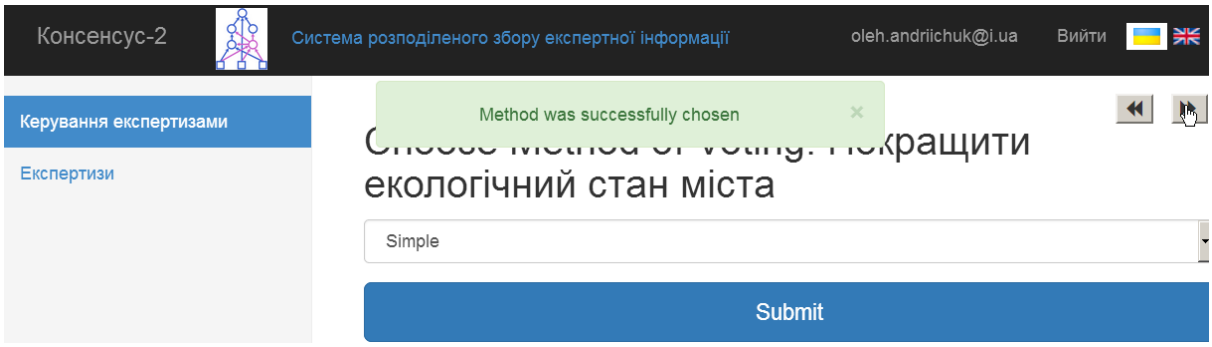


Рис. 4.23. Перехід до наступної стадії – голосування за найкраще формулювання

На даній стадії кожний експерт повинен розглянути кожну групу формулювань цілей та проголосувати за найкраще формулювання в кожній групі. Для цього він у кожному прямокутнику, що відповідає групі, вибирає один з варіантів формулювання цілі або вибирає пункт «Жодне з перелічених» та підтверджує свій вибір натисненням відповідної кнопки (див. рис. 4.24).

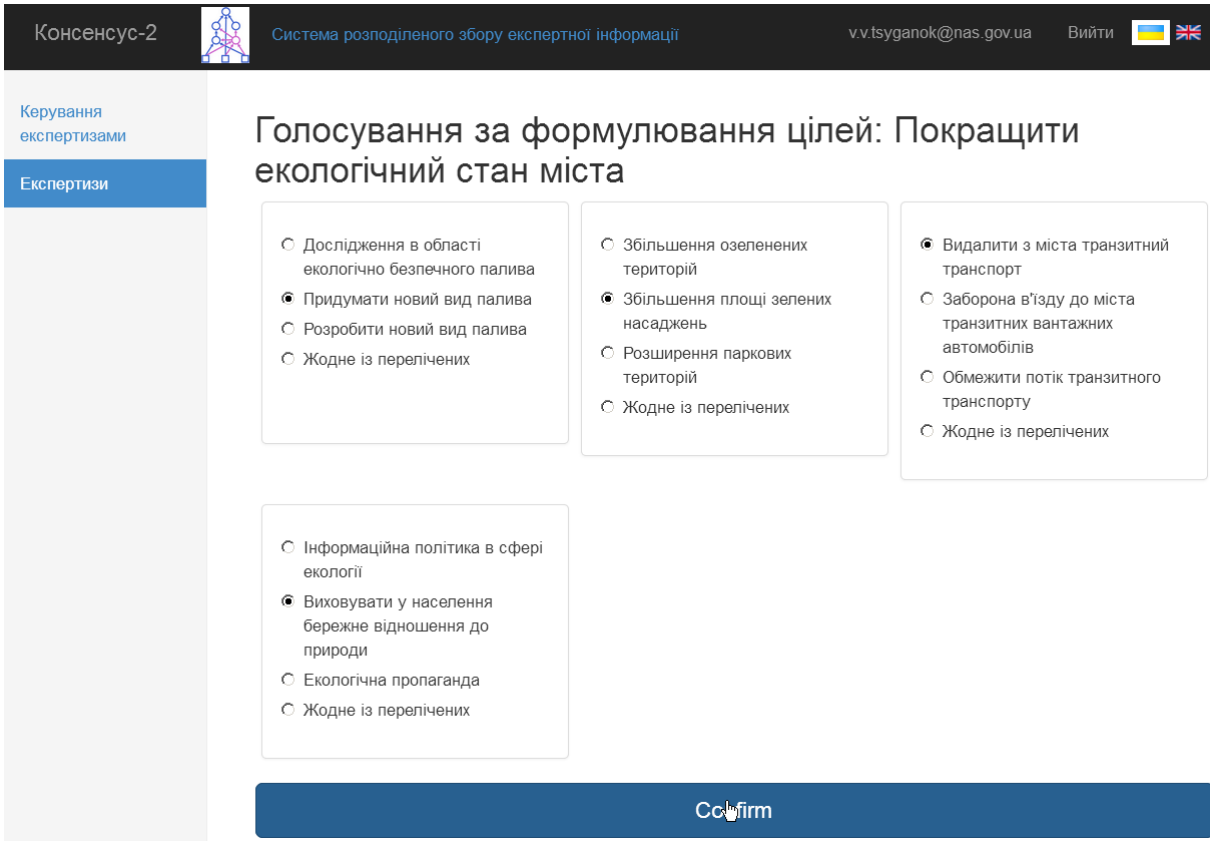


Рис. 4.24. Експертне голосування за найкращі формулювання

Організатор експертизи протягом даної стадії відслідковує у скількох голосуваннях прийняв участь кожний з експертів групи (рис. 4.25).

Слід зазначити, що протягом даної стадії організатор експертизи має можливість змінювати склад експертної групи: додавати, призупиняти роботу або виключати експертів. Для призупинення роботи експерта організатор повинен прибрати «галочку» напроти відповідного експерта та підтвердити свій вибір відповідною кнопкою (див. рис. 4.25). Для виключення експерта з групи організатор повинен натиснути кнопку «×» напроти відповідного

експерта та підтвердити свій вибір відповідною кнопкою (див. рис. 4.25).

Коли експертна група виконала достатню кількості голосувань організатор експертизи приймає рішення про перехід на наступну стадію експертизи – введення характеристик цілей. Для цього слід натиснути кнопку «►►» (див. рис. 4.26).

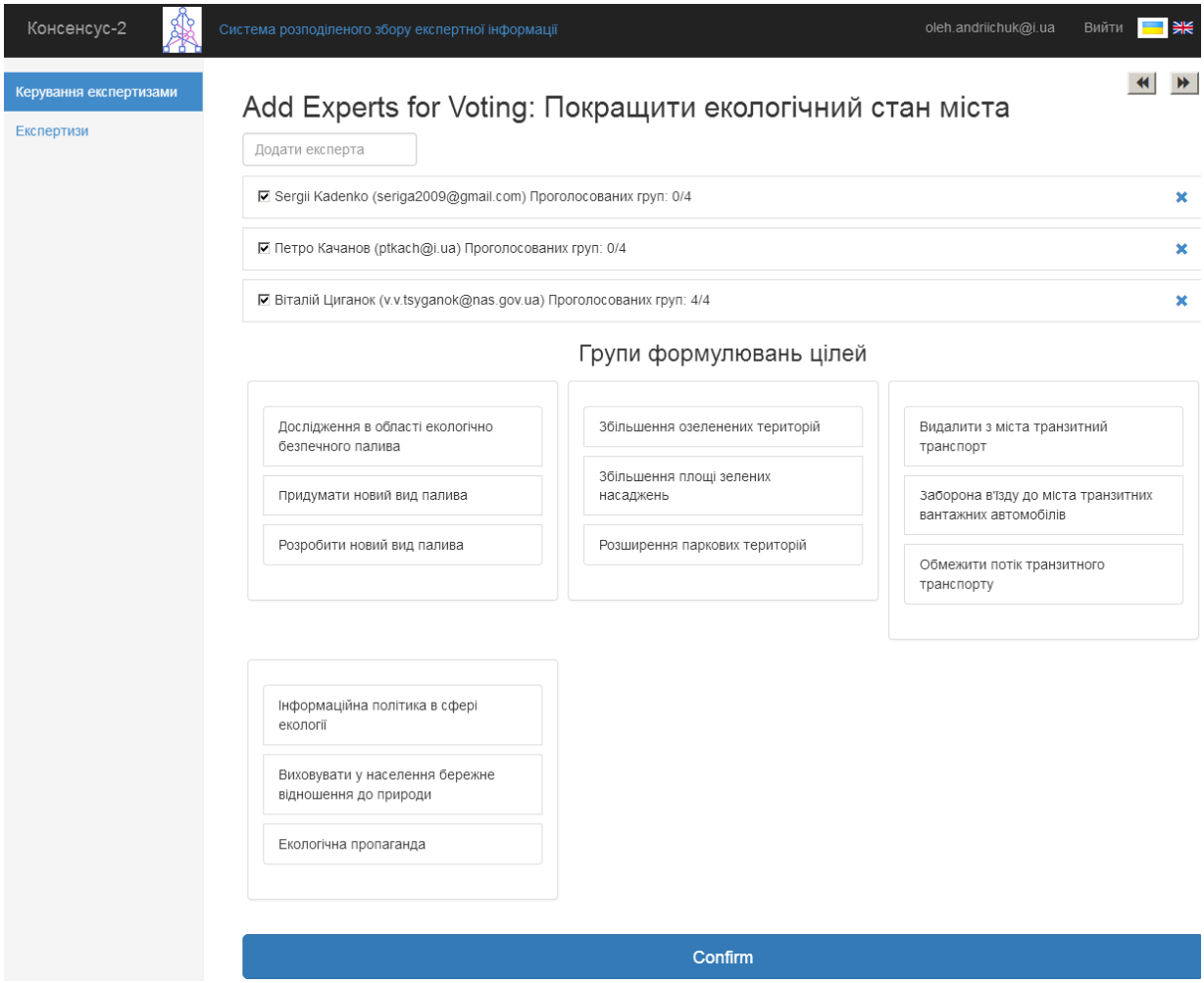


Рис. 4.25. Перегляд кількості голосувань експертів

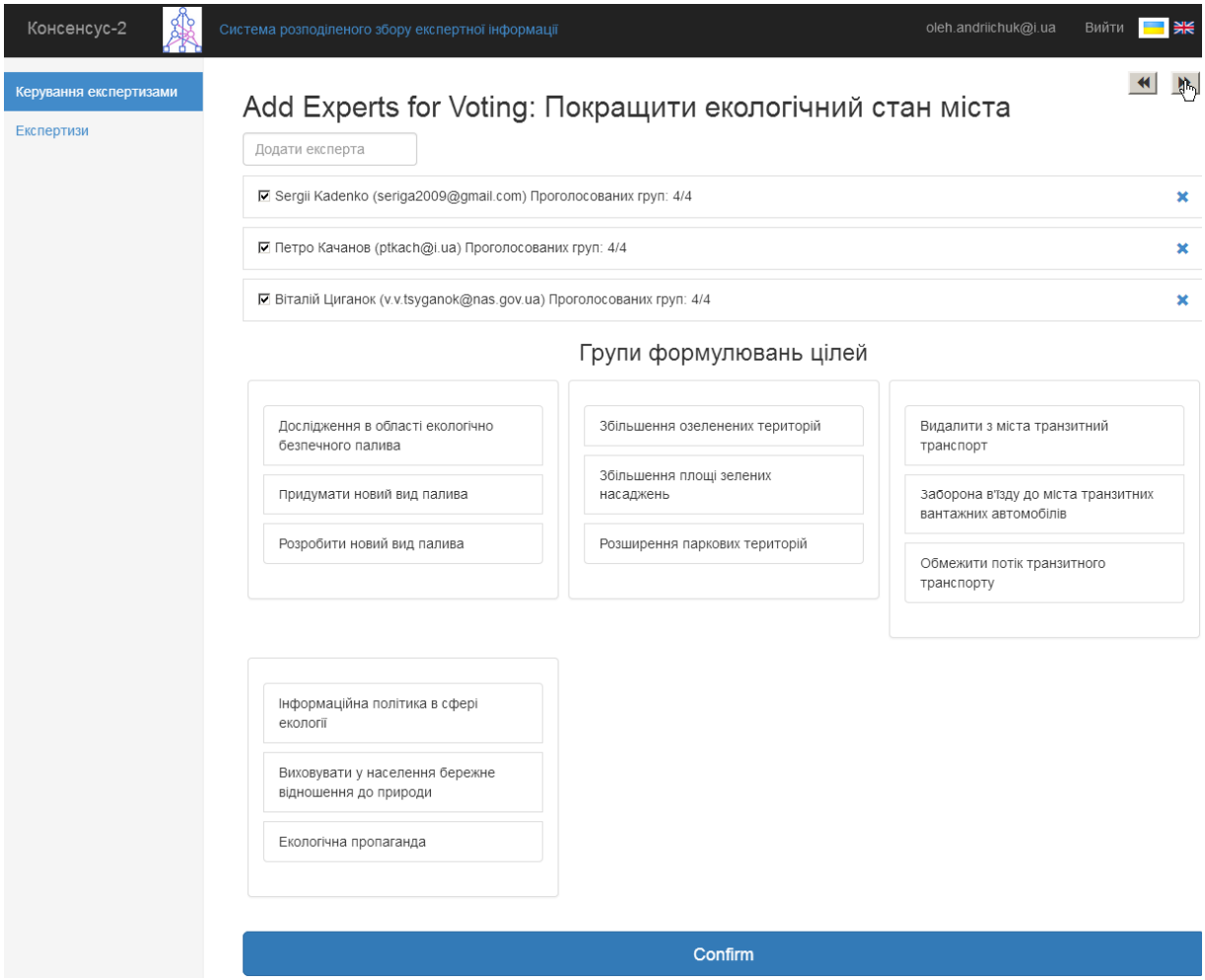


Рис. 4.26. Перехід на наступну стадію експертизи – введення характеристик цілей

4.2.3.6 Введення характеристик цілей та впливів

Протягом стадії «введення характеристик цілей» організатор експертизи переглядає формулювання цілей, які були обрані найкращими в кожній групі, встановлює «галочку» напроти кількісних цілей та підтверджує свій вибір відповідною кнопкою (див. рис. 4.27).

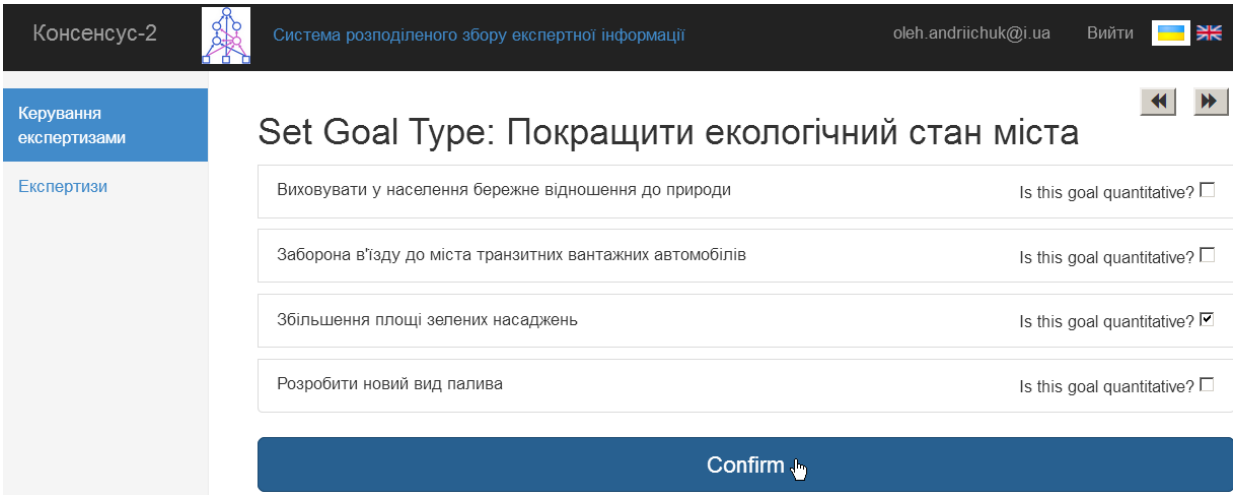


Рис. 4.27. Введення характеристик цілей

Після того, як для цілей було введено відповідні характеристики, організатор експертизи приймає рішення про перехід на наступну стадію експертизи – визначення типу впливів. Для цього слід натиснути кнопку «►►» (див. рис. 4.28).

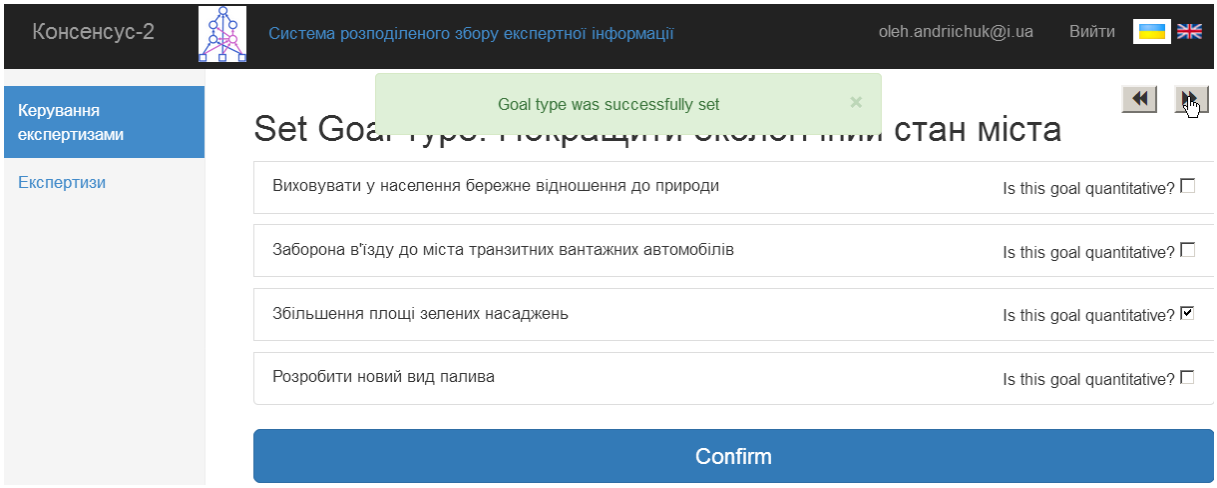


Рис. 4.28. Перехід на наступну стадію експертизи – визначення типу впливів

Протягом стадії «визначення типу впливів» організатор експертизи переглядає список цілей, знімає «галочку» напроти цілей з негативним впливом та підтверджує свій вибір відповідною кнопкою (див. рис. 4.29). У випадку, коли досягнення цілі сприяє досягненню головної цілі, вплив вважається позитивним, у протилежному випадку – негативним.

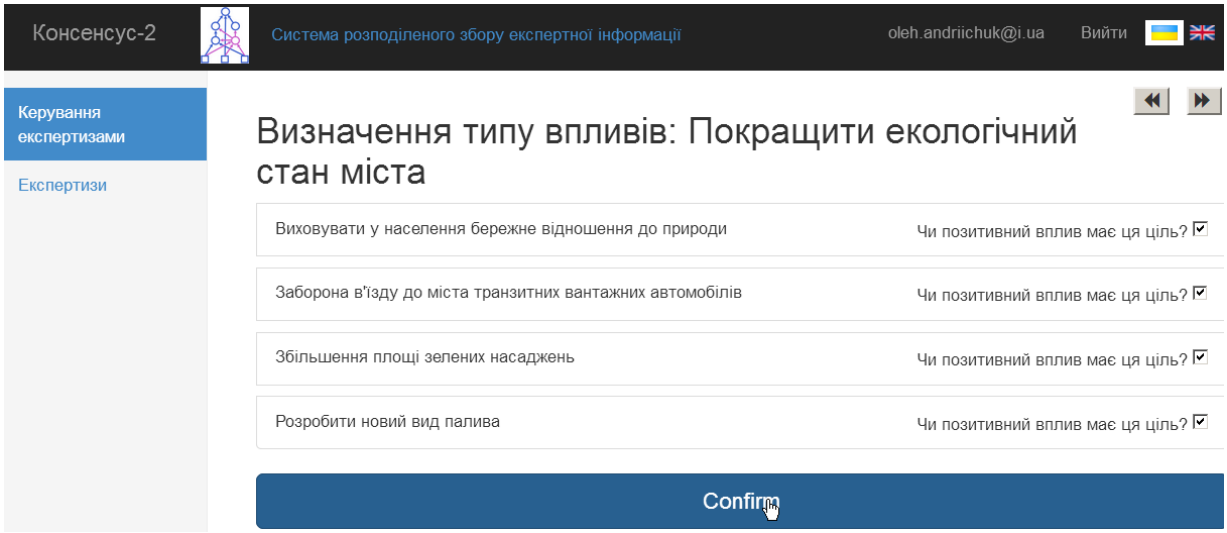


Рис. 4.29. Визначення типу впливів

Після того, як було визначено всі типи впливів, організатор експертизи приймає рішення про перехід на наступну стадію експертизи – фінальна стадія декомпозиції головної цілі. Для цього слід натиснути кнопку «►►» (див. рис. 4.30).

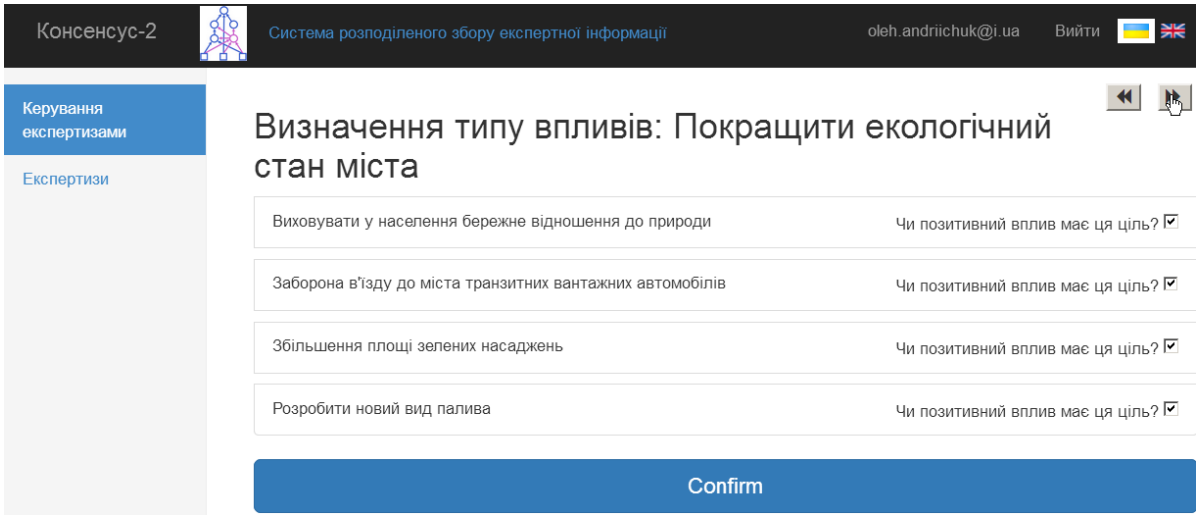


Рис. 4.30. Перехід на наступну стадію експертизи – фінальну стадію декомпозиції головної цілі

4.2.3.7 Фінальна стадія декомпозиції

Організатор експертизи протягом фінальної стадії декомпозиції головної цілі має можливість переглянути результати декомпозиції у графічному

вигляді (див. рис. 4.31). Блакитний колір вузлів/цілей свідчить про те, що для відповідних цілей декомпозиція вже була виконана. Зелений колір вузлів/цілей свідчить про те, що декомпозиція відповідних цілей ще не виконувалась, і для них вона може бути виконана.

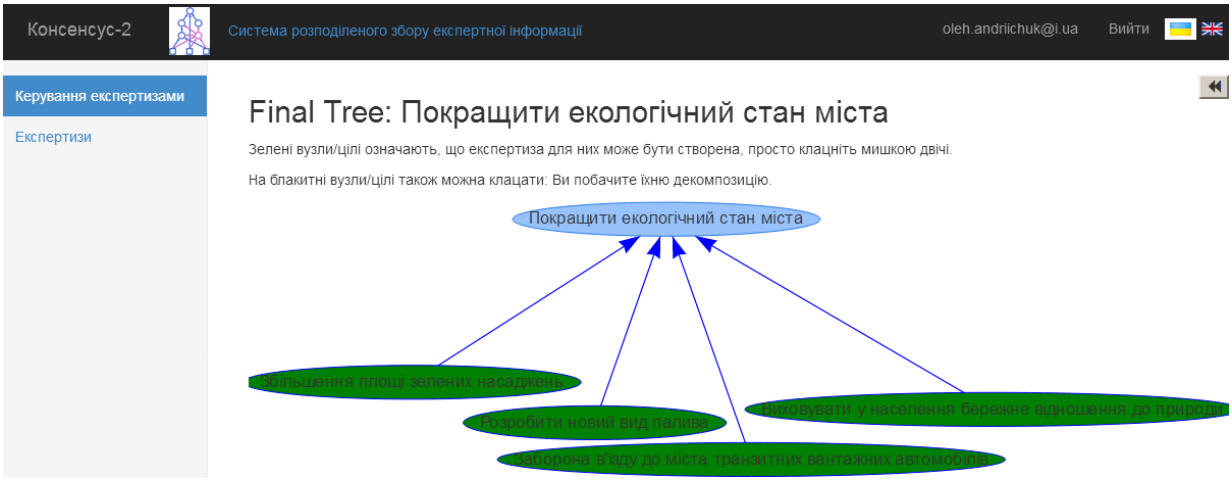


Рис. 4.31. Перегляд графу декомпозиції головної цілі

Далі організатор експертизи приймає рішення про хід подальшої декомпозиції, тобто, він може обирати цілі, що в подальшому будуть підлягати декомпозиції. Для цього він повинен двічі клацнути мишкою на відповідний вузол/ціль зеленого кольору (див. рис. 4.32).

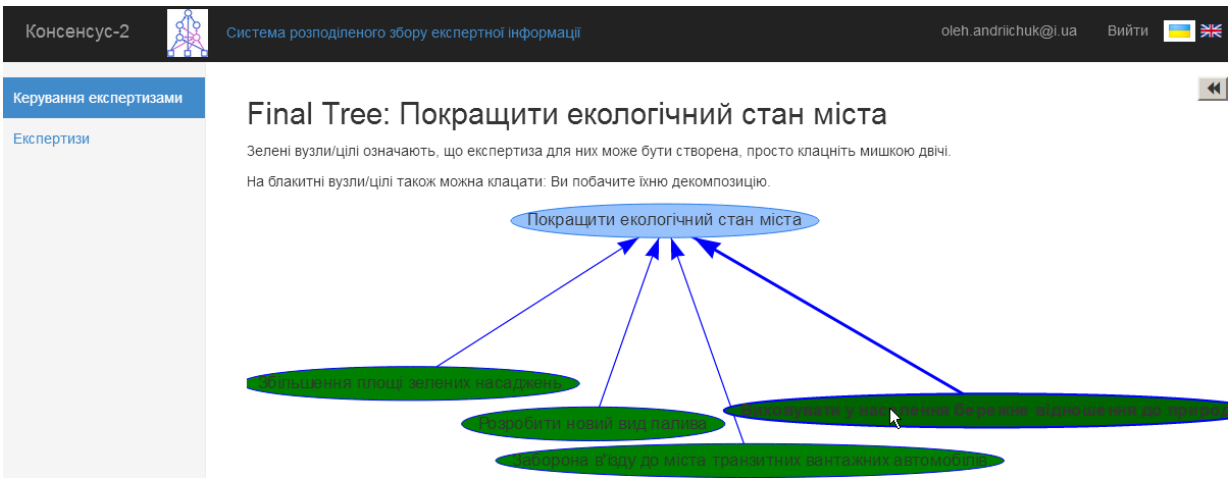


Рис. 4.32. Вибір цілі для подальшої декомпозиції

Подальший процес декомпозиції проходить аналогічно вище викладеному у пунктах 2–7 поточного підрозділу щодо головної цілі.

Експертиза припиняється, коли усі необхідні декомпозиції були завершені.

Побудована таким чином БЗ сіткового типу зберігається у вигляді бази даних MySQL для подальшого використання її в СППР з метою вироблення рекомендацій для ОПР.

4.3 Діаграма варіантів використання системи

На рис. 4.33 представлено діаграму варіантів використання (Use case) системи «Консенсус-2». Нижче наведено опис основних елементів діаграми.

4.3.1 Актори в системі

Основними акторами в системі є:

● Експерт ─ спеціаліст, якого запрошують чи наймають за грошову нагороду для надання кваліфікованого висновку, оцінки чи судження за деяким питанням. До категорії експертів можуть бути віднесені аналітики, що колективно співпрацюють над вирішенням певної задачі, або вузькопрофільні спеціалісти в певній галузі, які готові поділитись власними знаннями.

● Організатор експертизи (ОЕ) ─ спеціаліст, який керує процесом проведення експертизи. Зазвичай, ця особа є інженером знань, що формує на основі об’єктивних та експертних знань відповідну базу знань – модель предметної галузі та розраховує на її основі рекомендації за допомогою інструментарію СППР.

● Особа, що приймає рішення (ОПР) ─ особа, що формулює завдання (задачу) для колективного вирішення, головну мету, яку має бути досягнуто і є споживачем рекомендацій, наданих СППР на основі моделі предметної галузі.

● Користувач ─ будь-яка особа, що взаємодіє з програмною системою через наданий веб-інтерфейс. Усі актори, окрім ОПР, є користувачами системи. ОПР ставить завдання та отримує результати (рекомендації) через користувача, що є організатором експертизи.

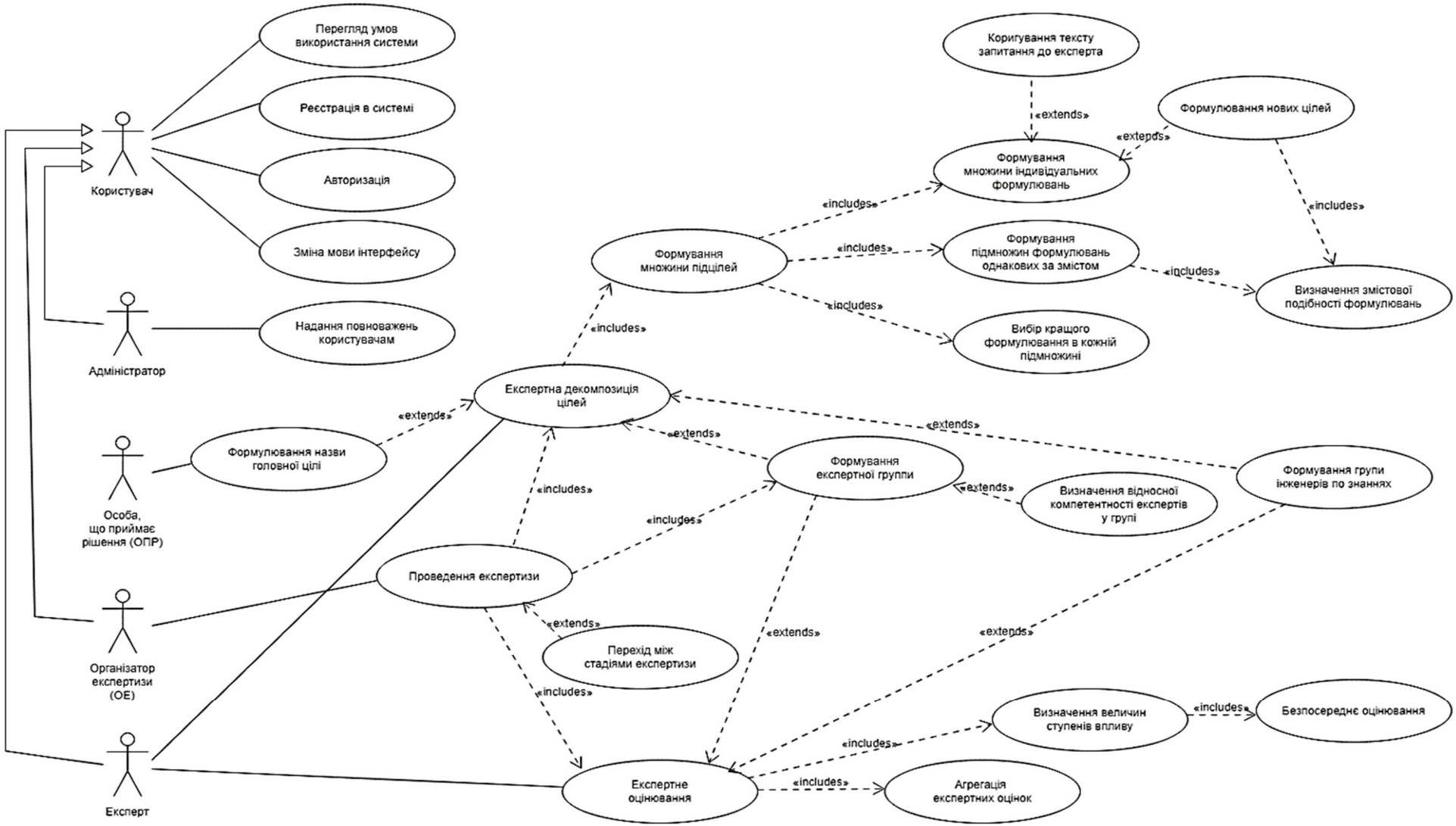


Рис. 4.33. Діаграма варіантів використання (Use case) системи «Консенсус-2»

● Адміністратор ─ користувач уповноважений розподіляти ролі користувачам у системі та надавати їм повноваження для взаємодії з системою, а рівно, за потреби, і позбавляти цих повноважень.

Кожний користувач може бути уповноваженим виконувати декілька ролей в системі, або ж бути позбавленим будь-яких ролей.

4.3.2 Варіанти використання системи

Перед тим, як працювати з системою, кожний користувач має переглянути умови використання системи та зареєструватись в системі, задавши адресу своєї електронної пошти, ім'я та пароль для подальшої автентифікації. У кожного користувача є можливість обрати мову інтерфейсу (українська / англійська) для подальшої взаємодії з системою.

Для роботи з системою кожен користувач, зареєстрований в системі та той, що пройшов перевірку системою або адміністратором системи, повинен пройти авторизацію. В системі передбачається можливість використання двофакторної авторизації або інших засобів підтримання рівня безпеки інформації в системі.

Основний функціонал системи може бути охарактеризований наступними варіантами використання:

● Формулювання назви головної цілі чи проблемної ситуації. У цьому процесі задіяна ОПР, яка через ОЕ – інженера знань уводить цю назву в систему.

● Групова декомпозиція – основний процес в системі, який багатократно повторюється у ході побудови моделі предметної галузі. Процес ініціюється інженером знань – ОЕ. Експерти приймають участь у груповій декомпозиції цілей. Відповідно до сформульованої головної цілі, організатор експертизи формує групу експертів-спеціалістів, компетентних у питаннях, які будуть розглядатись. Процес групової декомпозиції відбувається у ході поетапного діалогу з експертами групи шляхом послідовної декомпозиції (тобто розділення) головної цілі на складові. На кожному етапі декомпозиції

експертові групи пропонується сформулювати множину цілей (серед існуючих або вводяться нові), які безпосередньо впливають на ціль, що розкривається. Далі, аналогічним чином, відбувається декомпозиція інших цілей. Процес декомпозиції завершується, коли в якості цілей виступають конкретні проекти (заходи), на здійснення яких ОПР може мати безпосередній вплив.

● Групове експертне оцінювання. Процес ініціюється організатором експертизи після групової декомпозиції. У ході цього процесу для кожної групи цілей, що мають спільну ціль впливу, визначається характер їхнього впливу (якісний чи кількісний, позитивний чи негативний) та відносна величина ступенів впливу цих цілей на їхню спільну ціль. Ці відносні оцінки впливу визначаються за допомогою методів групового експертного оцінювання, які реалізовані в системі. Передбачається можливість додавання нових методів експертного оцінювання у ході супроводження (експлуатації) даного програмного продукту.

У ході групової декомпозиції та експертного оцінювання проводиться агрегація суджень експертів, що колективно співпрацюють та надають свої знання при побудові моделі предметної галузі. При агрегації знань експертів застосовуються і реалізовані в системі «Консенсус-2» методи визначення та підвищення узгодженості експертних оцінок, які запропоновані в дисертації.

Методи підвищення узгодженості у ході діалогу з експертами дозволяють досягти консенсусу в їх поглядах, прийти до спільної думки і отримати більш достовірні результати експертизи, що дає змогу підвищити адекватність моделей предметних галузей і, водночас, якість згенерованих на їх основі рекомендацій для ОПР.

4.4 Висновки до розділу 4

Запропонований метод, що дозволяє досягти необхідного для агрегації експертних оцінок рівня узгодженості практично реалізовано в рамках

інформаційної технології, що покладена в основу системи розподіленого збору експертної інформації «Консенсус-2», яка є складовою програмної платформи трансферу знань.

У комплексі з іншими представленими методами та процедурами ця програмна реалізація дозволяє підвищити достовірність отриманих експертних знань, що використовуються при побудові моделей у різних сферах і, тим самим, підвищити якість рекомендацій, згенерованих системами підтримки прийняття рішень на основі цих моделей.

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 до 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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.
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.
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. *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 слабко 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.
18. Uriarte, Filemon A. (2008). *Introduction to Knowledge Management: A brief introduction to the basic elements of knowledge management for non-practitioners interested in understanding the subject.* Jakarta: ASEAN Foundation, 168 p. ISBN: 9791968403, 9789791968409. URL:

https://books.google.com.ua/books?id=R1VhlwEACAAJ

19. Heather Smith, James Mckeen. Instilling a knowledge-sharing culture. In: Journal of Knowledge Management, vol. 15, no. 4, 2011, pp. 675-687. URL: https://www.researchgate.net/publication/228828294
20. Shabrina V., Silvianita A. Factors Analysis on Knowledge Sharing at Telkom Economic and Business School (TEBS) Telkom University Bandung. In: Procedia - Social and Behavioral Sciences, vol. 169, 2015, pp. 198-206. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.01.303.
21. Saaty T.L. Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.
22. Koczkodaj W. A new definition of consistency of pairwise comparisons. Mathematical and Computer Modeling. 1993. 18(7). P. 79–84.
23. Totsenko V.G. The Agreement Degree of Estimations Set with Regard of Experts Competency. Proc. of the Fourth International Symposium on the Analytic Hierarchy Process. Simon Fra-ser University. Vancouver, Canada, 1996. P. 229–241.
24. Zgurovsky M.Z., Totsenko V.G. and Tsyganok V.V. Group Incomplete Paired Comparisons with Account of Expert Competence. Mathematical and Computer Modelling. 2004. 39(4-5). P. 349–361.
25. Pankratova N., Nedashkovskaya N. Methods of Evaluation and Improvement of Consistency of Expert Pairwise Comparison Judgments. *International Journal "Information Theories and Applications"*, Vol. 22, Number 3, 2015. pp. 203-223.
26. Olenko Andriy and Tsyganok Vitaliy. Double Entropy Inter-Rater Agreement Indices. *Applied Psychological Measurement*. 2016. Vol. 40(1). P. 37–55.
27. Siraj Sajid, Mikhailov Ludmil, Keane John A. Contribution of individual judgments to-ward inconsistency in pairwise comparisons. *European Journal of Operational Research*. 2015. 242(2). P. 557–567.
28. Koczkodaj, Waldemar W. & Szwarc, Ryszard. On Axiomatization of Inconsistency Indicators for Pairwise Comparisons. *Fundamenta Informaticae*,

vol. 132, no. 4, 2014, pp. 485-500. DOI: 10.3233/FI-2014-1055

29. Brunelli Matteo & Fedrizzi Michele (2015) Axiomatic properties of inconsistency indices for pairwise comparisons, Journal of the Operational Research Society, 66:1, 1-15, DOI: 10.1057/jors.2013.135
30. Brunelli, M. (2017). Studying a set of properties of inconsistency indices for pairwise comparisons. *Annals of Operations Research*, *248*, 143-161.
31. Csató L. Axiomatizations of inconsistency indices for triads. *Annals of Operations Research* 280, 99–110 (2019). doi: 10.1007/s10479-019-03312-0
32. Csató, L. (2013) Monotonicity of paired comparison-based ranking methods: self-consistency and self-consistent monotonicity. Contributions to an axiomatic analysis of scoring methods / Working paper, Corvinus University of Budapest, Budapest. URL: http://unipub.lib.uni-corvinus.hu/1399/.
33. Aguarón Juan, Moreno-Jiménez José María, The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, Volume 147, Issue 1, 2003, pp. 137-145. ISSN 0377-2217, DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00255-2.
34. Pankratova N., Nedashkovskaya N. The Method of Estimating the Consistency of Paired Comparisons. *International Journal "Information Technologies & Knowledge"* Vol.7, Number 4, 2013. pp. 347-361.
35. Brunelli M. A technical note on two inconsistency indices for preference relations: A case of functional relation. *Information Sciences*. Volume 357, 20 August 2016, Pages 1-5. doi: 10.1016/j.ins.2016.03.048
36. Čerňanová V., Koczkodaj W.W., Szybowski J., Inconsistency of special cases of pairwise comparisons matrices, *International Journal of Approximate Reasoning*, Volume 95, 2018, pp. 36-45. ISSN 0888-613X, https://doi.org/10.1016/j.ijar.2018.01.004.
37. Koczkodaj W.W. and Szybowski J. The Limit of Inconsistency Reduction in Pairwise Comparisons. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, 2016, Vol. 26, No. 3, 721–729. DOI: 10.1515/amcs-2016-0050

38. Koczkodaj W.W., Urban R., Axiomatization of inconsistency indicators for pairwise comparisons, *International Journal of Approximate Reasoning,* Volume 94, 2018, pp. 18-29. ISSN 0888-613X, https://doi.org/10.1016/j.ijar.2017.12.001.
39. Brunelli Matteo (2018) A survey of inconsistency indices for pairwise comparisons, *International Journal of General Systems*, 47:8, 751-771, DOI: 10.1080/03081079.2018.1523156
40. Liang Fuqi, Brunelli Matteo, Rezaei Jafar, Consistency issues in the best worst method: Measurements and thresholds, *Omega*, Volume 96, 2020, pp. 102-175. ISSN: 0305-0483, DOI: 10.1016/j.omega.2019.102175.
41. Brunelli, M., Fedrizzi, M. A general formulation for some inconsistency indices of pairwise comparisons. Ann Oper Res 274, 155–169 (2019). https://doi.org/10.1007/s10479-018-2936-6
42. F. Liu, W.-G. Zhang, Yu-F. Shang A group decision-making model with interval multiplicative reciprocal matrices based on the geometric consistency index. *Computers & Industrial Engineering* 101 (2016) 184–193.
43. H. M. Moshkovich and A. I. Mechitov ORCON - a tool for analysis of ordinal consistency in a pairwise comparison matrix. *International Journal of Management and Decision Making*. Vol. 16, No. 1, 2017. DOI: 10.1504/IJMDM.2017.10002944
44. S. Kubler, et al., Measuring inconsistency and deriving priorities from fuzzy pairwise comparison matrices using the knowledge-based consistency index, *Knowledge-Based Systems* Knowledge-Based Systems, Volume 162, 2018, pp. 147-160. ISSN 0950-7051, DOI: 10.1016/j.knosys.2018.09.015
45. Jacek Szybowski, Tournament indices of inconsistency, *Procedia Computer Science*, Volume 159, 2019, pp. 913-922. ISSN: 1877-0509, DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.251.
46. Konrad Kułakowski & Dawid Talaga (2020) Inconsistency indices for incomplete pairwise comparisons matrices. *International Journal of General*

Systems, 49:2, pp. 174-200, DOI: 10.1080/03081079.2020.1713116.

47. Palangetić, M., Cornelis, C., Greco, S., & Słowiński, R. (2021). A Novel Machine Learning Approach to Data Inconsistency with respect to a Fuzzy Relation. *ArXiv*. /abs/2111.13447
48. Goto, H., Wang, S. Polyad inconsistency measure for pairwise comparisons matrices: max-plus algebraic approach. *Oper Res Int J* 22, 401–422 (2022). https://doi.org/10.1007/s12351-020-00547-9.
49. G. Kou, D. Ergu, J. Shang Enhancing data consistency in decision matrix: Adapting Hadamard model to mitigate judgment contradiction. *European Journal of Operational Research*. 236 (2014) 261–271.
50. Nadezhda I. Nedashkovskaya (2018) Investigation of methods for improving consistency of a pairwise comparison matrix, *Journal of the Operational Research Society*, 69:12, 1947-1956. DOI: 10.1080/01605682.2017.1415640
51. D. Ergu et al. A simple method to improve the consistency ratio of the pair-wise comparison matrix in ANP. *European Journal of Operational Research*. 213 (2011) 246–259.
52. J. Temesi An interactive approach to determine the elements of a pairwise comparison matrix. *Central European Journal of Operations Research* volume 27, pp. 533–549 (2019) doi: 10.1007/s10100-018-0539-6
53. Zhibin Wu, Bingmin Jin, Hamido Fujita, Jiuping Xu, Consensus analysis for AHP multiplicative preference relations based on consistency control: A heuristic approach. *Knowledge-Based Systems,* Volume 191, 2020, pp. 105-137. ISSN: 0950-7051, DOI: 10.1016/j.knosys.2019.105317.
54. Олецький О. В. Підвищення узгодженості матриць попарних порівнянь у методі аналізу ієрархій на основі розв’язків систем лінійних алгебраїчних рівнянь. *Наукові записки НаУКМА. Комп’ютерні науки*, *5*, 2023, с. 85–91. DOI: 10.18523/2617-3808.2022.5.85-91.
55. Saaty T. L. and Kearns K. P. Analytical Planning the Organization of Systems, *Pergamon Press*, 1985.

56. Hnatiienko, H., at al. The Method of Determining the Priority of Candidates by Means of Preferential Voting Based on an Algebraic Approach. *CEUR Workshop Proceedings*, 2023, 3538, pp. 232–244.
57. LeBreton, J. M., & Senter, J. L. Answers to 20 questions about interrater reliability and interrater agreement. *Organizational Research Methods*, 11, 2008, 815-852.
58. Lin, L., Hedayat, A. S., Sinha, B., & Yang, M (2002). Statistical methods in assessing agreement. *Journal of the American Statistical Association*, 97, 257-270.
59. Shoukri, M. M. (2004). *Measures of interobserver agreement*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall.
60. von Eye, A., & Mun, Y. E. (2005). *Rater agreement: Manifest variable methods.* Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
61. Wagner, S. M., Rau, C., & Lindemann, E. (2010). Multiple informant methodology: A critical review and recommendations. *Sociological Methods & Research*, 38, 582-618.
62. Gwet, K. L. (2012). *Handbook of inter-rater reliability*. Gaithersburg, MD: Advanced Analytics.
63. LeBreton, J. M., James, L. R., & Lindell, M. K. (2005). Recent issues regarding rWG, rWG, rWG(J), and rWG(J). *Organizational Research Methods*, 8, 128-138.
64. Lin, L., Hedayat, A. S., & Tang, Y. (2013). A comparison model for measuring individual agreement. *Journal of Biopharmaceutical Statistics*, 23, 322-345.
65. Lohse-Bossenz, H., Kunina-Habenicht, O., & Kunter, M. (2014). Estimating within-group agreement in small groups: A proposed adjustment for the average deviation index. *European Journal for Work & Organizational Psychology*, 23, 456-468.
66. Shah, M. (2011). Generalized agreement statistics over fixed group of experts. In D. Gunopulos, T. Hofmann, D. Malerba, & M. Vazirgiannis (Eds.), *Lecture*

Notes in Computer Science: Vol. 6913. Machine learning and knowledge discovery in databases (pp. 191-206). Berlin, Germany: Springer.

67. Smith-Crowe, K., Burke, M. J., Kouchaki, M., & Signal, S. M. (2013). Assessing interrater agreement via the average deviation index given a variety of theoretical and methodological problems. *Organizational Research Methods*, 16, 127-151.
68. Brown, R. D., & Hauenstein, N. M. A. (2005). Interrater agreement reconsidered: An alternative to the rwg indices. *Organizational Research Methods*, 8, 165-184.
69. Burke, M. J., & Dunlap, W. (2002). Estimating interrater agreement with the average deviation index: A user's guide. *Organizational Research Methods*, 5, 159-172.
70. Fleiss, J. L. (1971). Measuring nominal scale agreement among many raters. *Psychological Bulletin*, 76, 378-382.
71. James, L. R., Demaree, R. G., & Wolf, G. (1984). Estimating within-group interrater reliability with and without response bias. *Journal of Applied Psychology*, 69, 85-98.
72. Klemens, B. (2012). Mutual information as a measure of intercoder agreement. *Journal of Official Statistics*, 28, 395-412.
73. DeCarlo, L. T., Kim, Y. K., & Johnson, M. S. (2011). A hierarchical rater model for constructed responses, with a signal detection rater model. Journal of Educational Measurement, 48, 333-356.
74. Totsenko, V.G., Tsyganok, V.V. Method of paired comparisons using feedback with expert. *Journal of Automation and Information Sciences*, 1999, 31(7-9), pp. 86–96.
75. Циганок В.В. Комбінаторний алгоритм парних порівнянь зі зворотним зв'язком з експертом. *Реєстрація, зберігання і обробка даних.* 2000. Т.2, №2. С.92-102.

76. Zgurovsky, M. Z., Totsenko, V. G., and Tsyganok, V. V. (2004). Group Incomplete Paired Comparisons with Account of Expert Competence, *Mathematical and Computer Modelling,* 39(4-5), 349–361.
77. Циганок В.В. Елементи комбінаторного підходу при визначенні спектрального коефіцієнта узгодженості експертних парних порівнянь / *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. – 2012. – т.14, №2. – С.98-105.
78. Borda J. C. Mémoire sur les elections au scrutin. *Historie de de l'académie Royale des Sciences*, Paris, 1781. – 657 p.
79. Marquis de Condorcet (1785). Essai sur l'application de l'analyse á la probabilité des décisions rendues á la pluralité des voix:– Режим доступу: http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k417181
80. Kendall M. G., A New Measure of Rank Correlation, *Biometrika*, Volume 30, Issue 1-2, 1938, pp. 81–93. DOI: 10.1093/biomet/30.1-2.81
81. Spearman C. The proof and measurement of association between two things. *Amer. J. Psychol*. – 1904. – 15. – pp. 72–101.
82. Totsenko, V.G. Method of verifying sufficiency of individual ranking consistency in group decision making. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2006, 38(8), pp. 1–7.
83. Tsyganok, V.V., Kadenko, S.V. On sufficiency of the consistency level of group ordinal estimates. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2010, 42(8), pp. 42–47.
84. Tsyganok V.V. Investigation of the aggregation effectiveness of expert estimates obtained by the pairwise comparison method. *Mathematical and Computer Modelling*. – August 2010. – v.52, №3-4. – P.538-544.
85. Bozóki, S., Tsyganok, V. The (logarithmic) least squares optimality of the arithmetic (geometric) mean of weight vectors calculated from all spanning trees for incomplete additive (multiplicative) pairwise comparison matrices. *International Journal of General Systems*, 2019, 48(4), pp. 362–381. https://doi.org/10.1080/03081079.2019.1585432

86. Siraj S., Mikhailov L., Keane J.A. Enumerating all spanning trees for pairwise comparisons. *Computers & Operations Research*. 2012. – Volume 39, Issue 2. pp.191-199.
87. Siraj S., Mikhailov L., Keane J.A. Corrigendum to: "Enumerating all spanning trees for pairwise comparisons" [Comput.Oper.Res.39(2012) 191–199] *Computers & Operations Research*. 2012. – Volume 39, Issue 9. – Page 2265.
88. Totsenko V.G., Tsyganok V.V., Kachanov P.T., Kachanova E.V., Deev A.A., Torba L.T. Experimental Research of Methods for Getting Cardinal Expert Estimates of Alternatives. Part 2. Methods with Expert Feedback Journal of Automation and Information Sciences. 2003. Vol. 35, Is. 4. P. 28–38.
89. Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*. 63 (2): 81–97. doi:10.1037/h0043158.
90. Циганок В.В. Моделі та методи експертної підтримки прийняття рішень в слабко структурованих складних системах. – 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.
91. Totsenko V.G. Spectral Method for Determination of Consistency of Expert Estimate Sets. Engineering Simulation. – 2000. – 17. – P.715-727.
92. Hartley R.V.L. Transmission of information. *Bell System Technical J.* 1928. 7. pp. 535-563.
93. Schmidt, F. L., and Hunter, J. E. (1989). Interrater Reliability Coefficients Cannot be Computed When Only One Stimulus is Rated, *Journal of Applied Psychology*, 74, 368–370.
94. Burke, M. J., Finkelstein, L. M., and Dusig, M. S. (1999). On Average Deviation Indices for Estimating Interrater Agreement, *Organizational Research Methods*, 2, 49–68.

95. James, L. R., Demaree, R. G., and Wolf, G. (1984). Estimating Within-Group Interrater Reliability With and Without Response Bias, *Journal of Applied Psychology,* 69, 85–98.
96. Lindell, M. K., Brandt, C. J., and Whitney, D. J. (1999). A Revised Index of Agreement for Multi-Item Ratings of a Single Target, *Applied Psychological Measurement*, 23, 127–135
97. Brown, R. D., and Hauenstein, N. M. A. (2005). Interrater Agreement Reconsidered: An Alternative to the rwg Indices, *Organizational Research Methods*, 8, 165–184.
98. Cicchetti, D. V., Showalter, D., and Rosenheck R. (1997). A New Method for Assessing Interexaminer Agreement when Multiple Ratings are Made on a Single Subject: Applications to the Assessment of Neuropsychiatric Symtomatology, Psychiatry research, 72(1), 51–63.
99. Tsyganok V.V., Kadenko S.V., Andriichuk O.V. Significance of Expert Competence Consideration in Group Decision Making using AHP. *International Journal of Production Research*. – 2012. – v.50, issue 17.– P.4785-4792.
100. Totsenko V.G., Tsyganok V.V., Kachanov P.T., Kachanova E.V., Deev A.A., Torba L.T. Experimental Research of Methods for Getting Cardinal Expert Estimates of Alternatives. Part 2. Methods with Expert Feedback. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2003. Vol. 35, Is. 4. P. 28–38.
101. Totsenko, V.G. Method of determination of group multicriteria ordinal estimates with account of expert competence. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2005, 37(10), pp. 19–23.
102. Циганок В.В. Визначення ефективності методів агрегації експертних оцінок при використанні парних порівнянь. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. – 2009. – т.11, №2. – С.83-89.
103. Циганок В.В. Платформа трансферу знань для підтримки прийняття рішень в слабко структурованих предметних областях / Міжнародна

науково-практична конференція «Інформаційні технології та взаємодії», КНУ ім.Тараса Шевченка, 8-10 листопада, м.Київ, 2017.

104. Циганок В. В., Савченко М. М., Каденко С. В., Андрійчук О. В. Децентралізація проблемно-орієнтованої платформи трансферу знань. Інформаційні технології і безпека (ІТБ-2020) : Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 10 грудня 2020). Київ, 2020. С.90-95.

105. Vitaliy Tsyganok, Mykyta Savchenko, Sergii Kadenko and Oleh Andriichuk Decentralization of the Issue-based Knowledge Transfer Platform / CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2859, Selected Papers of the XX International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security (ITS 2020); Kyiv, Ukraine, December 10, 2020. P.36-45.

106. Астахов А.К., Циганок В.В. Технологія визначення компетентності експертів у ході трансферу знань/ 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.

107. Циганок В.В., Астахов А.К., Мінас В.П., Коновалюк М. Інструментарій платформи трансферу знань для стратегічного планування / XXII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та безпека» (ІТБ-2022) 16 листопада 2022 року Київ, ІПРІ НАН України. С.62–64. https://its.ipri.kiev.ua/#schedule

108. Cayley A. A theorem on trees. Quart. J. Pure Appl. Math., 23 (1889), 376–378.

109. Kirchhoff, Gustav. Ueber die Auflösung der Gleichungen, auf welche man bei der Untersuchung der linearen Vertheilung galvanischer Ströme geführt wird // Annalen der Physik. 1847. Bd. 148, Nr. 12 (12 August). S. 497–508.

110. Prüfer, H. Neuer Beweis eines Satzes über Permutationen. *Archiv der Mathematik und Physik*. 1918. 27, 742-744.

111. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. *University of Michigan Press*. Ann Arbor, 1975.

112. Розроблення системи кількісних та якісних показників для аналізу та оцінки ефективності виконання Плану заходів з розвитку космічної діяльності та виробництва космічної техніки на 2013 рік (шифр «Програма-Н (ІПРІ)»): звіт про НДР / Ін-т проблем реєстрації інформації НАН України; наук. кер. Циганок В.В.; – К., 2013. – 44 с. – №0113U002766.

113. Розроблення методики оцінки ефективності виконання Плану заходів з розвитку космічної діяльності та виробництва космічної техніки на 2013 рік (шифр «Програма-Н (методика)»): звіт про НДР / Ін-т проблем реєстрації інформації НАН України; наук. кер. Циганок В.В.; – К., 2013. – 173 с. – №0113U007093.

114. Циганок В.В. Технологічні засоби побудови довготермінових планів розвитку озброєння та військової техніки. VI Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 10-11 жовтня 2018 року. Київ, 2018. – С.313-314.

115. Tsyganok V.V. Technological tools for construction of long-term plans for development of arming and military equipment. VI International scientific conference “Challenges of Coordination of Military Technical and Defense Industry Policies in Ukraine. Prospects of Development of Armament and Military Equipment”, Kyiv. Ukraine, October 10-11, 2018. –P.193-194.

116. Ночвай В.І., Циганок В.В. Прийняття рішень для досягнення регіональних, національних та міжнародних цілей сталого розвитку. Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика: Збірник доповідей наук.-практ. конф. з міжнар. участю / НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем. Київ, 2017. – С.14-17.

117. Циганок В.В. Підтримка прийняття рішень при побудові стратегії протидії інформаційним операціям. Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави : зб. матеріалів наук.-практ. конф., (Київ, 24 трав. 2017 р.). – Київ : Нац. акад. СБУ, 2017. – С.230-232.

118. Tsyganok, V.V. Decision-making support during planning of measures for counteracting informational operations (reprint) CEUR Workshop Proceedings, Vol. 1813 Selected Papers of the XVI International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security (ITS 2016); Kyiv, Ukraine, December, 2016 P.24-31.[http://ceur-ws.org/Vol-1813/paper4.pdf]

119. Циганок В.В. Технологія генерування сценаріїв розвитку ймовірних подій. Матеріали науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології та кібербезпека». – К.: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С.77-79.

120. Dodonov A., Lande D., Tsyganok V., Andriichuk O., Kadenko S., Graivoronskaya A. Information Operations Recognition: from Nonlinear Analysis to Decision-making. LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2019. – 283 p.

121. Ночвай В.І., Циганок В.В. Модель прийняття рішень з розподілу ресурсів між проектами в соціоекологічній системі. Моделювання-2016 ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України / 25-27 травня, 2016. – С.221-224.

122. Циганок В.В. Концепції створення стратегічних планів. Реєстрація, зберігання і обробка даних: зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової наукової конференції 14-15 травня 2014 року / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. – К: ІПРІ НАН України, 2014. – С.139-141.

123. Циганок В.В. Технологія стратегічного планування на основі експертної підтримки прийняття рішень. Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика : Збірник доповідей наук.-практ. конф. з міжнар. участю

// НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем. – Київ, 2015. – С.33-37.

124. Циганок В.В. Удосконалення та особливості застосування для стратегічного планування методу цільового динамічного оцінювання альтернатив / Реєстрація, зберігання і обробка даних: зб. наук. праць за матеріалами Щорічної підсумкової конференції 27-28 лютого 2013 року / НАН України. Інститут проблем реєстрації інформації. – К: ІПРІ НАН України, 2013. – С.230-240.

125. Каденко С.В., Циганок В.В., Андрійчук О.В., Карабчук О.В. Аналіз інструментарію підтримки прийняття рішень у контексті вирішення задач стратегічного планування. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2020, Т. 22, № 2. С.77-91.

126. Циганок В.В., Андрійчук О.В., Каденко С.В., Карабчук О.В. Підтримка прийняття рішень при побудові стратегії підвищення безпеки дорожнього руху та розвитку міської транспортної інфраструктури. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2019, Т. 21, № 4. С.76-89.

127. Tsyganok V.V., Kadenko S.V. & Andriichuk O.V. Using different pair-wise comparison scales for developing industrial strategies. *International Journal of Management and Decision Making*. – 2015. – vol. 14, issue 3. – P. 224-250.

128. Tsyganok, V. (2023). Strategic business planning technology for weakly-structured subject domains. In A. Ujwary-Gil, A. Florek-Paszkowska, & A. Kozioł (Eds.), *Economic Policy, Business, and Management in the Post-Pandemic Perspective* (pp. 149-176). Warsaw: Institute of Economics, Polish Academy of Sciences. (https://konferencja.jemi.edu.pl/files /MONOGRAFIA_2023.pdf)

ДОДАТОК А

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. *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 слабко 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.

ДОДАТОК Б
Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір

УКРАЇНА

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" ("СРЗОЕІ "Консенсус - 2")

(вид, назва твору)

Автор(и) Циганок Віталій Володимирович, Роїк Павло Дмитрович, Андрійчук Олег Валентинович, Каденко Сергій Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 27.11.2017

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

М.П.

Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев

ПК «Україна». Зам. 17-2020. 2017 р. IV кв.

ДОДАТОК В

Акти впровадження результатів дисертації

„ЗАТВЕРДЖУЮ"
ТВО начальника Воєнної академії
імені Євгенія Березняка
полковник Вячеслав КОЛОТОВ
"_____" _____ 2023р.

АКТ

про впровадження у освітній процес Воєнної академії імені Євгенія Березняка результатів дисертаційної роботи РОЇКА Павла Дмитровича на тему «Метод підвищення узгодженості експертних оцінок при підтримці прийняття рішень», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – «Інформаційні технології».

Комісія у складі:

Голова комісії – начальник четвертої кафедри Першого навчально-наукового інституту Воєнної академії імені Євгенія Березняка (далі – Перший ННІ ВА), кандидат військових наук, професор, заслужений працівник освіти України Олександр МІШКОВ;

Члени комісії:

доцент четвертої кафедри Першого ННІ ВА, кандидат технічних наук, доцент Віктор ГОЛОТА;

старший викладач четвертої кафедри Першого ННІ ВА Олександр БОЛЮТА

ВСТАНОВИЛА:

В період з 4 по 8 грудня 2023 року четвертою кафедрою Першого ННІ ВА було розглянуто результати дисертаційного дослідження РОЇКА Павла Дмитровича на тему «Метод підвищення узгодженості експертних оцінок при підтримці прийняття рішень».

Результатом діяльності стало впровадження в освітній процес Воєнної академії імені Євгенія Березняка наступних результатів дисертаційного дослідження Павла РОЇКА:

1. Технологія групової декомпозиції проблеми у ході побудови моделі предметної області (використання макету програмної системи розподіленого збору та обробки експертної інформації «Консенсус-2»).
2. Методика визначення та поліпшення узгодженості експертних оцінок групи аналітиків та інженерів знань при побудові моделей предметних областей.

3. Проблемно-орієнтована платформа обробки знань, яка надає можливість генерувати рекомендації різного характеру для осіб, що приймають рішення, а саме: щодо стратегічного планування, відбору заходів для фінансування, вибору оптимальної множини заходів у розрізі досягнення (головної) стратегічної цілі, генерування сценаріїв розвитку подій (використання макетів програмних систем «Консенсус-2» та «Солон-3»).

На основі аналізу представлених матеріалів комісія визначила, що отримані наукові результати доцільно використовувати в освітньому процесі Воєнної академії імені Євгенія Березняка.

Використання зазначених матеріалів в освітньому процесі академії:

1. Сприяє розвитку необхідних професійних компетентностей у слухачів академії за напрямом фахової підготовки.

2. Дозволяє застосовувати програмні системи «Консенсус-2» та «Солон-3» при модулюванні та прогнозуванні безпекового середовища,

3. Сприяє підвищенню ефективності вивчення навчальних дисциплін «Інформаційно-аналітична діяльність» та «Методологія інформаційно-аналітичної діяльності».

Голова комісії:
начальник четвертої кафедри, кандидат військових наук, професор, заслужений працівник освіти України — Олександр МІШКОВ

Члени комісії:
доцент четвертої кафедри кандидат технічних наук, доцент — Віктор ГОЛОТА
старший викладач четвертої кафедри — Олександр БОЛЮТА

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
03049, м. Київ, пр-т Повітрофлотський, 28, буд. 63/68,
тел. (044) 271-09-66, тел.-факс (044) 520-12-84, e-mail: cndi_ovt@mil.gov.ua

№_____"____"_____2019 р.

На Ваш № _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
доктор технічних наук, професор
генерал-майор

І. ЧЕПКОВ

_____ 2019 року

АКТ

впровадження результатів дисертації Роїка Павла Дмитровича на тему "Метод підвищення узгодженості експертних оцінок в системах підтримки прийняття рішень", поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.04 – "Системний аналіз і теорія оптимальних рішень"

Комісія у складі:

тимчасово виконуючого обов'язки начальника науково-дослідного управління воєнно-технічної політики, кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника полковника ГУПАЛО Андрія Юрійовича;

та членів комісії:

головного наукового співробітника науково-дослідного управління воєнно-технічної політики, кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника полковника БОРОХВОСТОВА Ігора Валерійовича;

провідного наукового співробітника науково-дослідного управління воєнно-технічної політики, кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника працівника ЗС України НОРА Петра Івановича

ВСТАНОВИЛА, що результати наукових досліджень за дисертацією на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук розроблені особисто Роїком Павлом Дмитровичем та використані у науково-дослідній роботі "Розробка

пропозицій щодо формування методологічних підходів розвитку озброєння та військової техніки в Україні у довгостроковий період" шифр "Плановик" в частині:

розробки пропозицій щодо організації заходів планування розвитку озброєння та військової техніки у довгостроковій перспективі як складової частини системи оборонного планування на основі спроможностей (стандартів НАТО) із застосуванням методу, що дозволяє визначити та, при необхідності, поліпшити узгодженість оцінок, наданих експертами у ході експертиз з побудови моделей складних систем у слабко структурованих предметних областях та підтримки прийняття рішень;

розробки практичних рекомендації щодо реалізації заходів з планування розвитку озброєння та військової техніки в Міністерстві оборони України у довгостроковій перспективі за допомогою технології розподіленої побудови баз знань в системах підтримки прийняття рішень з залученням експертів та інженерів по знаннях, яка дозволяє створювати моделі складних систем шляхом взаємного доповнення знань, наданих віддалено працюючими інженерами по знаннях та експертами за умови досягнення консенсусу між ними.

Голова комісії:

ТВО начальника науково-дослідного управління воєнно-технічної політики
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
полковник А. ГУПАЛО

Члени комісії:

Головний науковий співробітник
науково-дослідного управління воєнно-технічної політики
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
полковник І. БОРОХВОСТОВ

Провідний науковий співробітник
науково-дослідного управління воєнно-технічної політики
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
працівник ЗС України П. НОР

„ЗАТВЕРДЖУЮ"

Декан факультету Інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, д.т.н., професор

_____ Віталій СНИТЮК

"_____" _____ 2023р.

АКТ

використання у навчальному процесі кафедри інтелектуальних технологій факультету Інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка результатів дисертаційної роботи Роїка Павла Дмитровича на тему «Метод підвищення узгодженості експертних оцінок при підтримці прийняття рішень», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – «Інформаційні технології».

Комісія у складі:
голова – завідувач кафедри інтелектуальних технологій,
к.т.н., доцент Олег ІЛАРІОНОВ;
члени комісії:
доцент кафедри, к.ф.-м.н., доцент Наталія ТМЄНОВА;
доцент кафедри, к.т.н., доцент Ірина ДОМАНЕЦЬКА

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи Роїка П. Д. на тему «Метод підвищення узгодженості експертних оцінок при підтримці прийняття рішень» використані викладачами кафедри інтелектуальних технологій при підготовці та викладанні курсів «Високопродуктивні обчислення» та «Стратегічний бізнес аналіз» для студентів спеціальностей «Комп'ютерні науки» та «Аналітика даних».

Викладачі кафедри використовували ряд результатів, отриманих у ході дисертаційного дослідження, а саме:

1. Методику визначення та поліпшення узгодженості експертних оцінок групи при систематизації знань студентів у ході побудови моделей на основі отриманих знань з наведених дисциплін.
2. Технологію групової декомпозиції проблеми у ході побудови моделі предметної області за допомогою системи збору та обробки експертної інформації «Консенсус-2».
3. Проблемно-орієнтовану платформу обробки знань, яка надає можливість генерувати рекомендації різного характеру для осіб, що приймають рішення, а саме: щодо стратегічного планування, відбору заходів для фінансування, вибору оптимальної множини заходів у розрізі досягнення (головної)

стратегічної цілі (використання програмної системи «Консенсус-2» у комплексі з СППР «Солон-3»).

На основі аналізу представлених матеріалів комісія установила, що отримані наукові результати використовуються в навчальному процесі кафедри інтелектуальних технологій факультету Інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка при курсовому та дипломному проектуванні, для систематизації отриманих знань, застосовуючи систему «Консенсус-2», а також при викладанні навчальних дисциплін «Високопродуктивні обчислення» та «Стратегічний бізнес аналіз».

Впровадження отриманих у дисертаційному дослідженні Роїка П.Д. результатів у навчальний процес підвищує якість підготовки студентів в галузі знань «Інформаційні технології».

Голова комісії
к.т.н., доцент _____ Олег ІЛАРІОНОВ

Члени комісії
к.ф.-м.н., доцент _____ Наталія ТМЄНОВА

к.т.н., доцент _____ Ірина ДОМАНЕЦЬКА