

Міністерство наук і освіти України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Кафедра водопостачання, водовідведення та бурової справи

03-06-179М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять та самостійної роботи
з навчальної дисципліни «Сучасні методи системного аналізу
біотехнологічних процесів» для здобувачів вищої освіти другого
(магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою
«Біотехнології» вищої освіти за спеціальністю G21
«Біотехнології та біоінженерія» денної форми навчання

Рекомендовано науково-методичною
радою з якості Навчально-наукового
інституту будівництва, архітектури та
дизайну
Протокол № 1 від 28.08.2025 р.

Рівне – 2025

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Сучасні методи системного аналізу біотехнологічних процесів» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Біотехнології» вищої освіти за спеціальністю G21 «Біотехнології та біоінженерія» денної форми навчання. [Електронне видання] / : Ковальчук В. А. – Рівне : НУВГП. 2025. – 25 с.

Укладач: Ковальчук В. А., д-р. техн. наук, професор кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи.

Відповідальний за випуск – Мартинов С. Ю., д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи.

Керівник (гарант) ОП: Грицина О. О., к.т.н., доцент.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
I. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ	3
1. Передумови застосування методів експертного оцінювання ...	3
2. Методи проведення експертизи	4
3. Якісні експертні оцінки	7
4. Організація експертного оцінювання і відбір експертів	8
5. Методи опитування експертів	10
II. САМОСТІЙНА РОБОТА	24
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	25

© В. А. Ковальчук, 2025

© НУВГП, 2025

ВСТУП

Методи системного аналізу, прийняття рішень та оптимізації грають істотну роль при проектуванні біотехнологічних процесів, систем та виробництв. Сукупність методів системного аналізу дозволяє формалізувати багато проблем, що виникають як завдання прийняття рішень, оптимізації біотехнологічних процесів та систем в умовах невизначеності.

Повна математична формалізація багатьох завдань системного аналізу біотехнологічних процесів і виробництв часто нездійсненна внаслідок їх складності та якісного характеру вихідної інформації. У ході розвитку біотехнологічного виробництва зростають складність управління біотехнологічними процесами та вимоги до якості прийнятих рішень.

Щоб врахувати безліч факторів та підвищити обґрунтованість прийнятих рішень, необхідний системний аналіз, заснований як на розрахунках, так і аргументованих судженнях керівників та фахівців (експертів, консультантів, аналітиків із системного аналізу). Одним із способів отримання та обробки інформації, що надходить від фахівців, є методи експертного оцінювання.

I. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

1. Передумови застосування методів експертного оцінювання

Більшість промислових біотехнологічних процесів та виробництв настільки складні, що неможливо чи недоцільно будувати моделі, які б повністю відображали природу та кількісні взаємозв'язки різних факторів. Реальні завдання прийняття рішень вимагають участі як невід'ємний елемент людей, причому сам процес управління, прийняття рішень завжди передбачає орієнтацію як на кількісну, а й у якісну інформацію, на здоровий глузд і досвід людей, що беруть участь у прийнятті управлінських рішень [1,2].

Методологічні основи експертних методів полягають у отриманні від спеціалістів-експертів необхідної інформації (у вигляді кількісних та якісних оцінок), обробці та використанні зібраної інформації для підготовки та прийняття рішень з використанням суджень (знань) керівників, науковців, спеціалістів, тобто експерти. Ці судження дозволяють хоча б частково компенсувати. Недолік інформації, повніше

використовувати індивідуальний та колективний досвід допомагають фахівцю у ситуації невизначеності оцінити значимість альтернативних варіантів (стратегій дії), вибрати для них найбільш раціональну оцінку.

Застосування математико-статистичних методів, навіть найпростіших у поєднанні з експертною інформацією при оцінюванні альтернативних варіантів або рішень часто призводить до більш успішних результатів, ніж «точні» розрахунки з орієнтацією на середні показники.

У процесі прийняття рішень беруть участь керівники виробництва та спеціалісти (експерти, консультанти, аналітики, фахівці за системним аналізом) Вважається, що особа приймаюча рішення (ОПР) цілебумовлена у своїй меті, служить мотивом постановки завдання та її вирішення, має повноваження та відповідальність, систему переваг про переваги та недоліки альтернативних варіантів Для допомоги ОПР у підготовці та формуванні рішення. залучаються експерти, консультанти, аналітики, спеціалісти з системного аналізу. Експерти мають інформацію про окремі елементи завдання, допомагають ОПР сформулювати безліч альтернатив, оцінити альтернативи за окремими критеріями, пропонують варіанти оптимального вибору рішень.

Консультант, аналітик, фахівець із системного аналізу розробляють модель завдання, процедури її вирішення, організують роботу ОПР та експертів.

У загальному випадку переваги експертів можуть не збігатися з перевагами ОПР це дозволяє більш обґрунтовано вибрати найкраще рішення. Таким чином, експертні оцінки у завданнях прийняття рішень використовуються для вибору найкращого рішення.

2. Методи проведення експертизи

Експертне оцінювання є процесом вимірювання, який можна визначити як процедуру порівняння альтернативних варіантів (стратегій дії) за обраними критеріями (показниками). Якщо при вимірі можна вказати, який з варіантів краще, а також визначити, на скільки або у скільки разів один варіант кращий за інший, то доцільно використовувати кількісні оцінки критерію. Такі оцінки виражаються числами і є більш повними та інформативними, ніж

якісні, які дозволяють лише впорядкувати варіанти за перевагою. На вибір критеріїв порівняння варіантів суттєво впливає тип шкали, за допомогою якою вимірюють показники варіантів.

До найпоширеніших методів вимірів при експертизі відносяться ранжування, безпосередній вимір, парне порівняння.

Припустимо, що є кінцева кількість вимірюваних альтернатив $x_1, x_2, \dots, x_n$, визначені критерії порівняння (показники) $z_1, z_2, \dots, z_k$, якими здійснюється порівняння альтернатив (варіантів). Методи вимірів відрізняються процедурою порівняння, що включає побудову відносин між альтернативами та визначенням типу шкали вимірів.

Ранжування є процедурою впорядкування альтернатив, виконувану експертом у шкалі порядку; на основі своїх знань та досвіду експерт має альтернативні варіанти в порядку переваги, керуючись одним або декількома показниками порівняння.

При ранжируванні експерт має розмістити альтернативи в порядку, який видається йому найбільш раціональним, і приписати кожній їх числа натурального ряду – ранги; при цьому ранг 1 (перший) отримує найбільш кращий варіант, а ранг – найменш переважний. Отже, порядкова шкала, яка використовується для ранжування, повинна задовольняти умови рівності числа рангів n число ранжованих альтернативних варіантів.

Між альтернативними варіантами можуть бути відносини суворого порядку та еквівалентності: 1) між альтернативними варіантами існує тільки відношення суворого порядку, що має властивості несиметричності (якщо $x_i > x_j$, то $x_i \not< x_j$, де $>$, $<$ – відповідно знаки переваги (краще) і непереважності (не краще)), транзитивності (якщо $x_i > x_j$, $x_j > x_k$, то $x_i > x_k \forall x_i, x_j$ виконується або $x_i > x_j$, або $x_i < x_j$, або $x_i \propto x_j$ (де $\propto$ – знак еквівалентності)).

Якщо серед альтернатив є еквівалентні, то в таких випадках їм надають так звані пов'язані ранги, значення яких визначаються як середня сума місць, поділених між собою альтернативами з однаковими рангами. Нехай має місце наступний запис результатів ранжування у вигляді рангів: $x_1 > x_2 > x_3 \propto x_4 \propto x_5 >$

$\dots > x_{n-1} \propto x_n$. У цьому випадку маємо: $r_1 = 1, r_2 = 2, r_3 = r_5 = (3 + 4 + 5)/3 = 4, r_{n-1} = r_n = (n - 1 + n)/2 = n - 1/2$.

Таким чином, сума рангів, що отримується в результаті ранжування n альтернатив, що дорівнює сумі n чисел натурального ряду $(1, 2, \dots, n)$.

Один із поширених способів отримання групового ранжування полягає у розрахунку суми рангів, які присвоюються експертами кожної альтернативи: $R_j = \sum_{i=1}^m r_{ij}$.

Потім, виходячи з величини R_j встановлюють результуючий ранг для кожної альтернативи: найвищий ранг (перший) надають альтернативі, яка отримала найменшу суму рангів, і, навпаки, альтернативі, що отримала найбільшу суму рангів, надають найнижчий ранг; інші альтернативи впорядковують відповідно до значення суми рангів щодо альтернативи, якій присвоюється перший ранг.

Ранги альтернатив визначають лише порядок їхнього розташування за критеріями (показниками) порівняння; ранги як числа не дають можливості зробити висновок про те, на скільки або у скільки разів одна альтернатива краща за іншу.

Часто задля зручності сумарні оцінки ранги нормують; коли в експертизі бере участь кілька експертів, прагнуть отримати усереднену оцінку (вага) для кожної альтернативи за кількістю експертів.

Інший спосіб встановлення залежності між оцінками альтернатив полягає в тому, що найважливішій (з точки зору експерта) альтернативі надають вагу, що дорівнює наперед заданому числу, а оцінка наступних один за одним за важливістю альтернатив визначається послідовно як частка найважливішого. Потім одержані значення оцінок нормуються.

Метод безпосереднього оцінювання є процедурою присвоєння альтернативам числових значень у шкалі інтервалів: діапазон зміни будь-якої змінної розбивається на кілька інтервалів, кожному з яких надається певна оцінка (бал), наприклад від 0 до 100; завдання експерта полягає у приміщенні кожної з аналізованих альтернатив у певний інтервал відповідно до ступеня володіння ними тем або іншою властивістю чи уявленнями експерта про їх значущість.

Метод парних порівнянь використовують з метою безпосереднього оцінювання при виявленні переваг для великої кількості альтернатив: для цього експертам пропонується порівняти альтернативи попарно в шкалі порядку, щоб встановити в парі найважливішу. В результаті порівняння пари альтернатив x_i, x_j експерт упорядковує цю пару, висловлюючи, що $x_i > x_j$, або $x_i < x_j$, або $x_i \propto x_j$. Вибір числового порівняння пари природно зробити так, що якщо $x_i > x_j$, то $f(x_i) > f(x_j)$; якщо перевага в парі зворотна, то $f(x_i) < f(x_j)$, а якщо альтернативи еквівалентні, то $f(x_i) = f(x_j)$.

3. Якісні експертні оцінки

Якісними називають експертні оцінки, що не містять чисел; їх можна розділити на дві групи:

- 1) оцінки, які проводяться за заздалегідь складеними шкалами (оцінка якісних ознак);
- 2) оцінки, шкали для яких заздалегідь не можуть бути складені.

Оцінки першої групи застосовують щодо значень ознак, мають якісну варіацію, всі значення яких можуть бути заздалегідь перераховані та визначені деякими стандартними термінами чи виразами; наприклад, ознака «вплив режимної змінної біотехнологічного процесу на кількість та якість одержуваного біопродукту» може мати такі градації:

– значно збільшується вихід біопродукту, яке якість погіршується;

- збільшується вихід біопродукту, а його якість не змінюється;

- вихід біопродукту не змінюється, а його якість підвищується;

- вихід біопродукту зменшується, а його якість значно підвищується і т.д.

Оцінюючи вплив даної режимної змінної на кількість та якість біопродукту експерт вказує одну з перерахованих градацій і, отже, проводить вибір оцінки із заздалегідь визначених значень.

Оцінки другої групи, що не має наперед складених шкал, використовують при генеруванні альтернативних варіантів; вони виражаються у пропозиціях, гіпотезах, переліках тих чи інших показників, фактів. Якісні експертні оцінки другої групи, що мають характер рекомендацій (аргументів) на вибір тієї чи іншої

послідовності дій, застосовують при складанні сценаріїв та в ділових іграх.

4. Організація експертного оцінювання і відбір експертів

Організаційні роботи із застосування експертного оцінювання починаються з розробки плану, в якому формулюються мета роботи та основні положення щодо її виконання. У цьому документі мають бути відображені: опис проблеми, обґрунтування необхідності проведення експертного оцінювання, цілі та завдання експертизи, терміни виконання робіт, склад групи управління, фінансове та матеріальне забезпечення робіт.

Група управління визначає структуру експертизи та здійснює добір експертів. Одночасно група управління проводить розробку організаційних заходів та методики проведення опитування експертів; при цьому визначаються місце та час проведення опитування, передбачуване кількість та завдання турів опитування, форма та порядок проведення опитування, форми та зміст питань, порядок фіксації та збору результатів опитування, форми оформлення результатів опитування. Експертне оцінювання завершується оформленням одержаних результатів.

Достовірність експертизи залежить від кількості експертів у групі, пайового складу різних фахівців у групі, кваліфікації експертів. Для опису експертів з погляду оцінки якості вирішення проблеми використовують такі характеристики: компетентність, креативність, ставлення до експертизи, конформізм, аналітичність та широта мислення, колективізм, самокритичність та ін; перелічені характеристики переважно оцінюють якісно.

Компетентність – це ступінь кваліфікації експерта у певній галузі знань; компетентність може бути оцінена на основі аналізу плідності діяльності фахівця, рівня та широти знайомства з досягненнями науки, розуміння проблем та перспектив розвитку. На практиці оцінка компетентності часто проводиться шляхом самооцінки експерта або оцінки іншими експертами. Для оцінки цієї характеристики експерта введено числовий показник - коефіцієнт компетентності k :

$$k = (k_u + k_a)/2, 0 \leq k \leq 1,$$

де k_u – коефіцієнт поінформованості з проблеми, що встановлюється на основі самооцінки (за бальною шкалою); k_a -

коефіцієнт аргументації, одержуваний у результаті підсумовування балів за еталонною таблицею.

Існують інші методики оцінки компетентності експертів. Наприклад, згідно з методикою, заснованою на обчисленні відносних коефіцієнтів компетентності, ряду фахівців пропонується висловити судження про включення осіб до експертної групи для вирішення певної проблеми, і далі кожному експерта розраховуються відносні коефіцієнти компетентності.

Інший спосіб визначення коефіцієнта компетентності заснований на результатах опитування експертів та порівняння отриманих індивідуальних оцінок.

Креативність – це здатність вирішувати творчі завдання, що оцінюється з урахуванням суджень про діяльність експерта.

Ставлення до експертизи необхідно враховувати для ухвалення рішення про залучення спеціаліста до вирішення конкретної проблеми: зайнятість та інші фактори, які суттєво впливають на виконання фахівцем функцій експерта.

Конформізм – це схильність до впливу авторитетів; дана властивість проявляється у вигляді нестійкості власної думки експерта.

Властивість колективізму (етика поведінки людини у колективі експертів) у часто істотно впливає створення певного психологічного клімату.

Самокритичність експерта проявляється при оцінці ступеня своєї компетентності, а також при прийнятті рішень щодо розглянутої проблеми.

Як узагальнену характеристику експерта, що враховує найважливіші якості, з одного боку, і що допускають безпосередній вимір – з іншого, можна прийняти *достовірність суджень експерта*. Кількісно достовірність експерта оцінюють за формулою

$$D_i = N_{np}/N, i = 1, 2, \dots, m,$$

де N_{np} – кількість випадків, коли i -й експерт дав рішення, прийнятність якого підтвердилося практикою; N – загальна кількість випадків участі i -го експерта у вирішенні проблеми.

5. Методи опитування експертів

Опитування – основний етап спільної роботи групи управління та експертів, основним змістом якого є:

- постановка завдання та пред'явлення питань експертам;
- інформаційне забезпечення роботи експертів;
- вироблення експертами суджень, оцінок, пропозицій;
- збір результатів роботи експертів.

Метою опитування є отримання від експертів можливо більшого обсягу інформації у вигляді фактів, підходів, ідей, гіпотез та інших відомостей, що належать до предмета експертизи.

Анкетне опитування. Анкетне опитування полягає у підготовці та пред'явленні експертам опитувальних карт-анкет, на питання яких вони мають дати відповіді у письмовій формі. Анкети складаються часто в табличній формі, зміст яких визначається особливостями аналізованої проблеми. Анкетування може бути очним та заочним.

Одним із найпоширеніших методів анкетування є метод Дельфі: кожен експерт отримує спеціально розроблену анкету питання, яку заповнює незалежно від інших [3,4]. Відповіді експертів узагальнюють і разом із узагальненими безособовими аргументами на користь тих чи інших оцінок повертають експертам для уточнення чи зміни, якщо вони знайдуть це за необхідне, своїх початкових відповідей. Процедуру повторяють до тих пір, поки не буде отримано задовільний збіг думок експертів чи поки що не стане зрозумілим стійка відмінність у думках.

Насправді зазвичай обмежуються трьома-чотирма турами. У першому турі опитування експерти дають свої відповіді без аргументування; відповіді обробляються з метою виявлення середнього та крайніх думок. Експертам повідомляються ці думки, і проводиться другий тур опитування, під час якого вони переглядають та за бажання змінюють відповіді, дані у першому турі. Крім того, експерти мають аргументувати свої відповіді.

Наступні тури аналогічні. Зазвичай після третього чи четвертого опитування відповіді експертів перестають змінюватися, що є сигналом до припинення опитувань. Така процедура дозволяє експертам зважити на обставини, якими вони

нехтували або про які не знали. Введення зворотної зв'язку шляхом повторення опитування вносить елемент об'єктивності та робить оцінки більш надійними, дозволяє зменшити коливання у відповідях та має безперечні переваги порівняно з простим статистичним об'єднанням індивідуальних думок за допомогою середніх.

Інтерв'ю є бесідою, під час якої організатор експертизи ставить питання експерту щодо заздалегідь розробленої програми; при інтерв'ю експерт дає відповіді у усній формі на усні питання. За такого опитування експерт не має часу для глибокого продумування своїх відповідей, а консультант буде свої питання значною мірою залежно від відповідей експерта на попередні запитання. Безперервний, живий контакт експерта та консультанта дозволяє швидко отримати велику кількість інформації про досліджувану проблему.

Дискусія. Дискусію доцільно проводити першому етапі вивчення проблеми виявлення можливих шляхів її вирішення. Основними етапами підготовки та проведення цього виду опитування є:

- визначення та формулювання предмета дискусії та порядку її проведення;
- підготовка учасників до дискусії та її матеріально-технічне забезпечення;
- власне дискусія;
- підбиття підсумків, фіксація та обробка результатів дискусії.

Процедура проведення дискусії визначається групою управління; при цьому вибираються методи аналізу проблем, методи викладу міркувань; доказів, які використовуються експертами, засоби подання інформації, засоби фіксації та переробки інформації в ході дискусії; встановлюються місце та час проведення дискусії, порядок та регламент виступів.

Дискусія зазвичай включає вступне слово ведучого, доповідь з аналізованої проблеми, питання доповідача та його відповіді, виступи експертів, ухвалення рішення.

Сценарні методи. Методи опитування експертів, пов'язані зі складанням документів типу доповідних записок та сценаріїв, що застосовуються в наступних випадках:

1) при прогнозі та попередньому аналізі якісних змін та конфліктних ситуацій у різних сферах виробництва та людської діяльності;

2) при встановленні умов досягнення бажаних результатів на об'єкті експертизи та виявленні проблем, які можуть виникнути на шляху досягнення цих результатів;

3) щодо ймовірного режиму експлуатації різних систем та їх впливу на навколишні системи та середовище.

Завдання, яке має бути вирішене при складанні сценарію, складається у встановленні логічної послідовності подій, що відображає перехід системи з попереднього стану до наступного.

Мозковий штурм є методом отримання нових ідей при вирішенні будь-якої проблеми внаслідок колективної творчості групи експертів під час засідання – сеансу, який проводиться за певними правилами.

Мета такої експертизи полягає в тому, щоб спробувати висунути якомога більше ідей у вирішенні проблемної ситуації для подальшого їхнього аналізу.

Відібраних фахівців для участі в експертизі заздалегідь сповіщають та вручають документацію, що містить:

- формулювання проблеми та мети засідання;
 - правила проведення мозкового штурму;
 - пропозиція подумати та підготувати кілька ідей щодо проблеми,
- яка обговорюватиметься.

Мозковим штурмом керує ведучий, основним завданням якого є заохочення вільної творчості, вільного висловлювання ідей, абсолютне недопущення критики, організація штурму проблеми.

Сеанс триває від 15...20 до 40...45 хв без перерви і закінчується, коли потік пропозицій вичерпується. Зазвичай протягом сеансу надходить кілька десятків пропозицій; всі виступи мають бути зафіксовані.

Оцінювання запропонованих ідей, точок зору, думок полягає в їх ретельному аналізі у спокійній діловій обстановці, критиці та відборі найбільш цінних із них. Аналіз проводиться групою фахівців і може включати кілька етапів, у тому числі етап кількісного аналізу за допомогою комп'ютерні програми.

Морфологічний аналіз – спосіб аналізу та збору інформації призначений для генерації, виявлення, підрахунку та оцінювання всіх можливих варіантів здійснення деякого рішення чи процесу, всіх варіантів станів досліджуваного об'єкта тощо.

Цей метод дозволяє систематично виявити всю сукупність можливих варіантів, сформувати вихідну множину альтернатив, проаналізувати наслідки прийнятих рішень та врахувати багатокритеріальність досліджуваного об'єкта.

Основними етапами реалізації методу морфологічного аналізу є:

- 1) точне формулювання розв'язуваної задачі (опис бажаних функціональних властивостей досліджуваної системи);

- 2) виявлення максимально повного переліку основних функцій системи;

- 3) визначення альтернативних способів реалізації кожної з виявлених раніше функцій і генерування всіх можливих варіантів системи, що розглядається, кожен з яких складається з ланцюжка, що містить рівно по одному способу реалізації кожної окремої функції;

- 4) визначення ефективності варіантів системи;

- 5) вибір і реалізація найкращого варіанта.

При використанні методу морфологічного аналізу необхідно відповісти на низку питань: як сформулювати завдання та оцінити точність її формулювання; як можна визначити, чи повний список виявлених функцій та способів їх реалізації; яким має бути спосіб оцінювання ефективності варіантів; як подолати проблему розмірності, що виникає через те, що число можливих варіантів системи велике навіть при вирішенні відносно невеликої складності задачі; яким чином перевіряти та враховувати несумісність окремих методів реалізації різних функцій.

Можливість отримання відповідей на перелічені питання та конструктивність цих відповідей визначаються ступенем складності та новизни вирішуваного завдання, невизначеністю вихідної інформації та наявністю досвідчених фахівців із досліджуваної проблеми. Характер відповідей залежить від рівня кваліфікації та досвіду дослідника та фахівців-експертів, їх

інтуїції та ступеня розуміння ними сутності аналізованої проблеми.

Приклад 1. Два експерти визначили ступінь впливу 10 режимних змінних біотехнологічного процесу на вихід біопродукту при культивуванні ціанобактерій:

- 1) концентрація вітаміну В₁ у живильному середовищі;
- 2) концентрація азоту у нітратній формі;
- 3) швидкість переміщування середовища культивування;
- 4) концентрація глюкози в живильному середовищі;
- 5) рівень рН середовища культивування;
- 6) концентрація фосфатів у живильному середовищі;
- 7) концентрація амінного азоту в живильному середовищі;
- 8) концентрація вуглекислого газу газоповітряної суміші, що подається в біореактор;
- 9) температура в біореакторі.
- 10) рівень освітленості культурального середовища.

Результати ранжирування альтернатив 10 наведені в табл. 1; потрібно обчислити коефіцієнт рангової кореляції Спірмена та оцінити значущість його оцінки.

Таблиця 1

Результати експертного ранжирування змінних

Експерт	Альтернатива (режимна змінна)									
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
E ₁	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E ₂	2	3	1	4	6	5	9	7	8	10

У цьому прикладі $n = 10$, пов'язані ранги відсутні ($T_1, T_2 = 0$). Обчислимо вибіркового коефіцієнт кореляції Спірмена:

$$\rho_{1,2} = \frac{6}{1-n^3-n} \sum_{j=1}^n (r_{1j} - r_{2j})^2 = 1 - 6/(10^3 - 10) [(1 - 2)^2 + (2 - 3)^2 + (3 - 1)^2 + (4 - 4)^2 + (5 - 6)^2 + (6 - 5)^2 + (7 - 9)^2 + (8 - 7)^2 + (9 - 8)^2 + (10 - 10)^2] = 0,915.$$

Визначимо статистичну значущість отриманої оцінки за заданого рівня значущості $\alpha = 0,05$. За табл. 2 при $n = 10$, $Q = \alpha/2$ знаходимо $S_c = S_c(10; 0,025) \approx 270$, $K_n = \frac{1}{3}(n^3 - n) = \frac{1}{3}(10^3 - 10) = 330$ і обчислюємо

$$\rho_{C_{\max}} = (2S_c(n, Q) / Kn) - 1 = (2 \cdot 270 / 330) - 1 = 0,6363.$$

Висновок: оскільки вибіркове значення коефіцієнта рангової кореляції Спірмена перевищує граничне значення $\rho_{C_{\max}}$ ($\rho_{1,2} = 0,915 > \rho_{C_{\max}} = 0,6363$), то слід визнати наявність статистично значущого зв'язку між порівнюваними ранжуваннями, та оцінка коефіцієнта рангової кореляції Спірмена є значимою.

Таблиця 2

Таблиця значень допоміжної величини S_c

n = 4		n = 5		n = 6		n = 7		n = 8		n = 9		n = 10	
S_c	Q	S_c	Q	S_c	Q	S_c	Q	S_c	Q	S_c	Q	S_c	Q
12	0,458	22	0,475	50	0,210	74	0,249	108	0,250	156	0,218	208	0,235
14	0,375	24	0,392	52	0,178	78	0,198	114	0,195	164	0,168	218	0,184
16	0,208	26	0,342	54	0,149	82	0,151	120	0,150	172	0,125	228	0,139
18	0,167	28	0,258	56	0,121	86	0,118	126	0,108	180	0,089	238	0,102
20	0,042	30	0,225	58	0,088	90	0,083	132	0,076	188	0,060	248	0,072
		32	0,175	60	0,068	94	0,055	138	0,048	196	0,038	258	0,048
		34	0,117	62	0,051	98	0,033	144	0,029	204	0,022	268	0,030
		36	0,067	64	0,029	102	0,017	150	0,014	212	0,011	278	0,017
		38	0,042	66	0,017	106	0,0062	156	0,0054	220	0,0041	288	0,0087
		40	0,0083	68	0,0083	110	0,0014	162	0,0011	228	0,0010	298	0,0036
				70	0,0014							308	0,001
20		40		70		112		168		240		330	

Приклад 2. Для досягнення двох цілей (виробництва максимальної кількості біомаси клітин та найбільшої кількості внутрішньоклітинних ліпідів) експерт-біотехнолог запропонував сім заходів:

- 1) культивування мікроорганізму ліпідної спрямованості в оптимальних, а потім стресових умовах (при дефіциті азоту);
- 2) культивування мікроорганізму ліпідної спрямованості в оптимальних, а потім стресових умовах (при дефіциті фосфору);
- 3) культивування дикого штаму мікроорганізму в оптимальних, а потім стресових умовах (при дефіциті азоту);

4) культивування дикого штаму мікроорганізму в оптимальних, а потім стресових умовах (при дефіциті фосфору);

5) культивування дикого штаму мікроорганізму в оптимальних умовах;

6) культивування мікроорганізму ліпідної спрямованості у стресових умовах (при дефіциті азоту);

7) культивування дикого штаму мікроорганізму в стресових умов при дефіциті азоту) та дав оцінку в балах ефективності заходів для досягнення цілей (табл. 3).

Використовуючи коефіцієнт рангової кореляції Спірмена, визначити, наскільки сприяють заходи одночасного досягнення цілей.

Спочатку виконаємо ранжування заходів щодо досягнення двох цілей, присвоюючи найвищий ранг (перший) заходу з максимальним числом балів (табл. 4).

Таблиця 3

Результати експертного ранжирування заходів

Мета	Захід						
	З ₁	З ₂	З ₃	З ₄	З ₅	З ₆	З ₇
М ₁	20	15	8	10	2	4	7
М ₂	15	10	6	12	1	3	6

Таблиця 4

Результати експертного ранжирування заходів

Мета	Захід						
	З ₁	З ₂	З ₃	З ₄	З ₅	З ₆	З ₇
М ₁	1	2	4	3	7	6	5
М ₂	1	3	4,5	2	7	6	4,5

У цьому прикладі $n = 7$, для другої мети є пов'язані ранги ($T_1 = 0$, $T_2 = (1/12)(2^3 - 2) = 0,5$). Обчислимо вибіркового коефіцієнта кореляції Спірмена за формулою

$$\rho_{1,2} = \frac{\frac{1}{6}(n^3 - n) - S_{1,2}^2 - T_2}{\sqrt{[\frac{1}{6}(n^3 - n)] \cdot [\frac{1}{6}(n^3 - n) - 2T_2]}} = \frac{\frac{1}{6}(7^3 - 7) - 2,5 - 0,5}{\sqrt{[\frac{1}{6}(7^3 - 7)] \cdot [\frac{1}{6}(7^3 - 7) - 2 \cdot 0,5]}} = 0,955,$$

$$\text{де } S_{1,2}^2 = \sum_{j=1}^n (r_{1j} - r_{2j})^2 = [(1 - 1)^2 + (2 - 3)^2 + (4 - 4,5)^2 + (3 - 2)^2 + (7 - 7)^2 + (6 - 6)^2 + (5 - 4,5)^2] = 2,5.$$

Визначимо значимість отриманої оцінки за рівня значимості $\alpha = 0,05$. За таблицею 2.2 при $n = 7$, $Q = \alpha/2$ знаходимо $S_c = S_c(7; 0,025) \approx 100$, $Kn = \frac{1}{3}(n^3 - n) = \frac{1}{3}(7^3 - 7) = 112$

та обчислюємо

$$\rho_{c\max} = \frac{2Sc(n,Q)}{Kn} - 1 = 2 \cdot 100/112 - 1 = 0,7857.$$

Висновок: оскільки вибіркове значення коефіцієнта рангової кореляції Спірмена перевищує граничне значення ($\rho_{1,2} = 0,955 > \rho_{c\max} = 0,7857$), слід визнати, що оцінка коефіцієнта рангової кореляції Спірмена є значимою та запропоновані заходи сприяють одночасному досягненню цілей.

Приклад 2.3. Два експерти-біотехнологи провели ранжування п'яти альтернативних варіантів джерел азоту у складі живильного середовища при культивуванні мікроводоростей:

- 1) дріжджовий гідролізат;
- 2) курячий пептон;
- 3) соєве борошно;
- 4) катіони амонію;
- 5) нітрат-аніони;

Результати ранжирування наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Експерт	Альтернатива				
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
E ₁	2	1	4	3	5
E ₂	1	2	4	5	3

Визначити статистичну згоду думок експертів, обчисливши коефіцієнт рангової кореляції Спірмена.

Оскільки пов'язані ранги в ранжуваннях відсутні ($T_1 = T_2 = 0$), вибірквий коефіцієнт рангової кореляції Спірмена будемо розраховувати за формулою

$$\rho_{1,2} = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{j=1}^n (r_{1j} - r_{2j})^2 = 1 - 6/(5^3 - 5)((2 - 1)^2 + (1 - 2)^2 + (4 - 4)^2 + (3 - 5)^2 + (5 - 3)^2) = 0,5.$$

При $\alpha = 0,05$, $n = 5$ за табл. 2.2 визначимо величину $S_c = S_c(5; 0,025) = 39$, і розрахуємо граничне значення $\rho_{c\max}$ за формулою

$$\rho_{c\max} = \frac{2Sc(n, Q)}{Kn} - 1 = \frac{2 \cdot 39}{\frac{1}{3}(5^3 - 5)} - 1 = 0,95.$$

Висновок: оскільки значення вибіркового коефіцієнта рангової кореляції Спірмена $\rho_{1,2} = 0,5$ менше за порогове значення $\rho_{c\max} = 0,95$, то оцінка коефіцієнта $\rho_{1,2}$ не є статистично значущою, і слід прийняти гіпотезу про відсутність статистичного зв'язку між порівнюваними ранжуваннями.

Розглянемо питання оцінки узгодженості думок експертів, коли

кількість експертів більше двох. Як міру узгодженості думок групи експертів частіше використовують дисперсійний коефіцієнт конкордації (або узгодженості) Кендала, рідше - ентропійний коефіцієнт конкордації.

Коефіцієнт конкордації Кендала. Нехай $|r_{ij}|$ - матриця результатів ранжирування, отримана в результаті оцінки n альтернатив m експертами, тобто r_{ij} - ранг, який присвоюється i -м експертом j -й альтернативі.

Складемо суми рангів по кожному стовпцю матриці; в результаті отримаємо вектор R_j з компонентами:

$$R_j = \sum_{i=1}^m r_{ij}, j = 1, 2, \dots, n.$$

Оскільки величини R_j являють собою реалізації випадкової величини, знайдемо незміщену оцінку дисперсії D за формулою

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (R_j - \bar{r})(R_j - \bar{r})^2,$$

де $\bar{r}$ - оцінка математичного очікування, $\bar{r} = 1$

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_j = \frac{1}{2} m(n+1).$$

Дисперсійний коефіцієнт конкордації W дорівнює відношенню оцінки дисперсії до максимального значення $D_{\max}$ цієї величини, тобто $W = D/D_{\max}$, де $0 \leq W \leq 1$.

За наявності пов'язаних рангів дисперсійний коефіцієнт конкордації обчислюється за такою формулою:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n) - m \sum_{i=1}^m T_i},$$

$$S = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m r_{ij} - \bar{r})^2,$$

$$T_i = \sum_{k=1}^{H_i} (h_k^3 - h_k),$$

де T_i – показник пов'язаних рангів у i -му ранжуванні; H_i – число груп рівних рангів у i -му ранжуванні; h_k – число рівних рангів у k -й групі пов'язаних рангів у i -му ранжуванні.

Якщо співпадаючих рангів немає, то $H_i = 0$ і, отже, $T_i = 0$; у цьому у разі дисперсійний коефіцієнт конкордації обчислюється за формулою

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}.$$

Таблиця 6

До перевірки статистичної значущості вибіркової
величини коефіцієнта конкордації

S_r	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$	$m=10$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,833	0,944	0,931	0,954	0,956	0,964	0,967	0,971	0,974
6	0,500	0,528	0,653	0,691	0,740	0,768	0,794	0,814	0,830
8	0,167	0,361	0,431	0,522	0,570	0,620	0,654	0,685	0,710
14		0,194	0,273	0,367	0,430	0,486	0,531	0,569	0,601
18		0,028	0,125	0,182	0,252	0,305	0,355	0,398	0,436
24			0,069	0,124	0,184	0,237	0,285	0,328	0,368
26			0,042	0,0930	0,142	0,192	0,236	0,278	0,316
32			0,0046	0,039	0,072	0,112	0,149	0,187	0,222
38				0,024	0,052	0,085	0,120	0,154	0,187
42				0,0085	0,029	0,051	0,079	0,107	0,135
50				0,00077	0,012	0,027	0,047	0,069	0,092
54					0,0081	0,021	0,038	0,057	0,078
56					0,0055	0,016	0,030	0,048	0,066
62					0,0017	0,0084	0,018	0,031	0,046
72					0,00013	0,0036	0,0099	0,019	0,030
74						0,0027	0,0080	0,016	0,026
78						0,0012	0,0048	0,010	0,018

Коефіцієнт конкордації є вибірковою оцінкою істинного (теоретичного) значення коефіцієнта i , отже, є випадковою величиною для визначення значущості якої необхідно знати розподіл ймовірностей для різних значень числа експертів m та кількості альтернатив n . Для малих значень m і n ($2 \leq m \leq 20$, $3 \leq n \leq 7$), вибірових значень

Таблиця 7.

До перевірки статистичної значущості вибіркової
величини коефіцієнта конкордації

S_r	$m = 3$	$m = 5$	ST	$m = 5$
1	2	3	4	5
1	1,000	1,000	61	0,055
3	0,958	0,975	65	0,044
5	0,910	0,944	67	0,034
9	0,727	0,857	69	0,031
11	0,608	0,771	73	0,023
13	0,524	0,709	75	0,020
17	0,446	0,652	77	0,017
19	0,342	0,561	81	0,012
21	0,300	0,521	83	0,0087
25	0,207	0,445	85	0,0067
27	0,175	0,408	89	0,0055
29	0,148	0,372	91	0,0031
33	0,075	0,298	93	0,0023
35	0,054	0,260	97	0,0018
37	0,033	0,226	99	0,0016
41	0,017	0,210	101	0,0014
43	0,0017	0,162	105	0,00064
45	0,0017	0,141	107	0,00033

Таблиця 8

До перевірки статистичної значущості вибіркової величини коефіцієнта конкордації W : ймовірність $P_T = 1 - \alpha_T$ того, що вибіркове значення S при чотирьох порівнюваних альтернативах ($n = 4$) та відповідному m досягне або перевищить табличне значення S_T

S_T	$m = 2$	$m = 4$	$m = 6$	S_T	$m = 6$
1	2	3	4	5	6
0	1,000	1,000	1,000	82	0,035
2	0,958	0,992	0,996	84	0,032
4	0,833	0,928	0,957	86	0,029
6	0,792	0,900	0,940	88	0,023
8	0,625	0,800	0,874	90	0,022
10	0,542	0,754	0,844	94	0,017
12	0,458	0,677	0,789	96	0,014
14	0,375	0,649	0,772	98	0,013
16	0,208	0,524	0,679	100	0,010
18	0,167	0,508	0,668	102	0,0096
20	0,042	0,432	0,609	104	0,0085
22		0,389	0,574	106	0,0073
24		0,365	0,541	108	0,0061
26		0,324	0,512	110	0,0057
30		0,242	0,431	114	0,0040
32		0,200	0,386	116	0,0033
34		0,190	0,375	118	0,0028
36		0,158	0,338	120	0,0023
38		0,141	0,317	122	0,0020
40		0,105	0,270	126	0,0015
42		0,094	0,256	128	0,00090
44		0,077	0,230	130	0,00087
46		0,068	0,218	132	0,00073
48		0,054	0,197	134	0,00065
50		0,052	0,194	136	0,00040
52		0,036	0,163	138	0,00036
54		0,033	0,155	140	0,00028
56		0,019	0,127	144	0,00024
58		0,014	0,114	146	0,00022
62		0,012	0,108	148	0,00012

$$S = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m r_{ij} - \frac{1}{2}m(n+1))^2$$

за допомогою табл. 6–10 може бути визначено порогове значення ймовірності $P_t = 1 - \alpha_T$, та отримано відповідь на питання про те, як сильно можуть відхилятися від нуля вибіркові значення коефіцієнта конкордації W . «Входами» до зазначених таблиць є трійка чисел (m, n, S) , «виходом» – ймовірність $P_T = 1 - \alpha_T$ того, що значення S при n порівнюваних альтернативах і відповідному m досягне або перевищить табличне значення S_T .

Якщо виявиться, що табличне значення рівня значимості α_T менше прийнятої величини рівня значущості критерію α (наприклад, $\alpha = 0,05$), тобто $\alpha_T < \alpha$, гіпотезу про відсутність зв'язку слід відкинути, тобто визнати статистичну значимість аналізованого зв'язку.

Таблиця 9

До перевірки статистичної значущості вибіркової величини коефіцієнта конкордації W : ймовірність $P_T = 1 - \alpha_T$ того, що вибіркове значення S апри п'яти порівнюваних альтернативах ($n = 5$) і $m = 3$ досягне або перевищить табличне значення S_T

S_1	$m = 3$	S_2	$m = 3$	S_3	$m = 3$	S_4	$m = 3$
0	1,000	22	0,649	44	0,236	66	0,038
2	1,000	24	0,595	46	0,213	68	0,028
4	0,988	26	0,559	48	0,172	70	0,026
6	0,972	30	0,493	50	0,163	72	0,017
8	0,941	28	0,475	52	0,127	74	0,015
10	0,914	32	0,432	54	0,117	76	0,0078
12	0,845	34	0,406	56	0,096	78	0,0053
14	0,831	36	0,347	58	0,080	80	0,0040
16	0,768	38	0,326	62	0,063	82	0,0028
18	0,720	40	0,291	64	0,056	86	0,0009
20	0,682	42	0,253	44	0,045	90	0,000069

Наступна таблиця критичних значень коефіцієнта конкордації W (табл. 10) побудовано дещо інакше; у ній за рівня значимості $\alpha = 0,05$ і відповідно до «входів» (m, n) наведені «критичні» значення S_T допоміжної величини S , тобто. такі критичні

значення, при перевищенні яких слід відкидати гіпотезу про відсутність зв'язків між ранжуваннями та визнавати їхню статистичну значимість.

Таблиця 10

До перевірки статистичної значущості вибіркової величини коефіцієнта конкордації W : критичні значення S_T при заданому рівні значимості α , n порівнюваних альтернативах та m ранжуваннях

$\alpha = 0,05$							
m	n					$n = 3$	
	3	4	5	6	7	m	S_T
1	2	3	4	5	6	7	8
3			64,4	103,9	157,3	9	54,0
4		49,5	88,4	143,3	217,0	12	71,9
5		62,6	112,3	182,4	276,2	14	83,8
6		75,7	136,1	221,4	335,2	16	95,8
8	48,1	101,7	183,7	299,0	453,1	18	107,7
10	60,0	127,8	231,2	376,7	571,0		
15	89,8	192,9	349,8	570,5	864,9		
20	119,7	258,0	468,5	764,4	1158,7		

II. Самостійна робота

Самостійна робота студента є основним засобом засвоєння студентом навчального матеріалу в час, вільний від обов'язкових навчальних занять.

Пізнавальна діяльність студентів у процесі виконання самостійної роботи характеризується високим рівнем самостійності та спричиняє залученню студентів до творчої активності.

Підсумком самостійної роботи над вивченням навчальної дисципліни «Сучасні методи системного аналізу біотехнологічних процесів» є самостійне опрацювання рекомендованих тем:

1. Основні поняття та завдання системного аналізу у біохімічній інженерії.
2. Методика та принципи системного аналізу при дослідженні біотехнологічних систем.
3. Основні поняття та завдання теорії прийняття рішень.
4. Методи проведення експертизи.
5. Організація експертного оцінювання та відбір експертів.

Підсумком самостійної роботи над вивченням навчальної дисципліни є складання письмового звіту за темами, вказаними вище.

Звіт оформляється на стандартному папері формату А4 (210х297) з одного боку. Поля; верхнє, праве, лівє – 20 мм, нижнє – 22 мм, лівє. У тексті повинні бути зазначені посилання на використану літературу.

Звіт може бути рукописним або друкованим і виконується українською мовою.

На титульній сторінці звіту мають бути зазначені назва кафедри, навчальна дисципліна, прізвище та ініціали здобувача вищої освіти, група, прізвище та ініціали викладача який приймає роботу, посада.

Загальний обсяг звіту – 10-15 сторінок. Звіт включає план, основну частину, висновки, список використаної літератури та додатки (за необхідності).

Захист звіту про самостійну роботу проводиться у терміни, спільно обумовлені викладачем і здобувачем вищої освіти.

Список літературних джерел

1. Сурмін Ю. П. Теорія систем і системний аналіз : навчальний посібник. К. : МАУП, 2003. 368 с.
2. Панкратова, Н. Д. Системний аналіз. Теорія та застосування : підручник / НАНУ, НТУУ “КПІ”, ІПСА НАНУ. Київ : Наук. думка, 2018.
3. МВ 05-02-131. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Системний аналіз якості навколишнього середовища». Ч. 1 (практичні роботи 1-7) для здобувачів вищої освіти другого (магістерського рівня освіти) за спеціальностями 101 «Екологія», 183 «Технології захисту навколишнього середовища» денної та заочної форми навчання / Клименко М. О., Прищепа А. М., Стецюк Л. М., Брежицька О. А. Рівне : НУВГП, 2018. 41 с.
4. МВ 05-02-132. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Системний аналіз якості навколишнього середовища». Ч. 2 (практичні роботи 8-14) для здобувачів вищої освіти другого (магістерського рівня освіти) за спеціальностями 101 «Екологія», 183 «Технології захисту навколишнього середовища» денної та заочної форми навчання / Клименко М. О., Прищепа А. М., Стецюк Л. ., Брежицька О. А. Рівне : НУВГП, 2018. 30 с.