

О.В. ТРИФОНОВА
Л.В. ТИМОШЕНКО
С.А. УС

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ І МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ



НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

О.В.Трифорова, Л.В.Тимошенко, С.А.Ус

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ
І МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ**

Навчальний посібник

НТУ ДП

2023

УДК 519.8:504 (075)

T69

Затверджено до видання Вченою радою як навчальний посібник для здобувачів вищої освіти спеціальностей 073 «Менеджмент», 076 «Підприємництво та торгівля», 124 «Системний аналіз» (протокол № 12 від 30.11.2023 року)

Рецензенти:

Бакурова А.В. – д-р екон. наук, професор кафедри системного аналізу та обчислювальної математики Національного університету «Запорізька політехніка»;

Алексєєв М.О. – д-р. т. н., професор, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка»;

Величко О.П. – д-р екон. наук., професор, завідувач кафедри менеджменту і права Дніпровського державного аграрно-економічного університету.

Трифонова О.В.

T69

Математичні моделі і методи прийняття рішень для сталого розвитку: навч. посіб. / О.В. Трифонова, Л.В. Тимошенко, С.А. Ус; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. – 240 с.

Навчальний посібник охоплює матеріал з вивчення ключових понять і термінів сталого розвитку, методів прийняття рішень та економіко-математичного моделювання для цілей управління сталим розвитком промислових підприємств і територій. Викладено математичні основи теорії прийняття рішень, як складової системи управління сталим розвитком. Розглянуто типові методи вирішення проблемних ситуацій – прогнозування на основі статистичних та економетричних моделей, методи прийняття рішень за наявності багатьох критеріїв та в умовах невизначеності. Основну увагу приділено прикладним аспектам теорії прийняття рішень.

Книгу розраховано на осіб, які опанували математику в межах університетського курсу, зокрема на тих, що навчаються за спеціальностями 073 «Менеджмент», 076 «Підприємництво та торгівля», 124 «Системний аналіз». Посібник призначений, насамперед, для студентів, аспірантів і викладачів закладів вищої освіти, а також може бути корисним для державних службовців, менеджерів та інших осіб, яких цікавить використання методів прийняття рішень в практиці управління сталим розвитком.

Навчальний посібник підготовлений в рамках міжнародного проєкту «Створення німецько-української мережі вищої освіти для забезпечення академічної успішності у галузі інженерії та природничих наук в університетах України в умовах війни та кризи», що виконується за підтримки програми Німецької служби академічних обмінів (DAAD) «Україна цифрова: Забезпечення академічної успішності під час кризи, 2023».

УДК 519.8:504 (075)

© О.В.Трифонова, Л.В.Тимошенко, С.А. Ус, 2023

© НТУ «Дніпровська Політехніка», 2023

Охороняється Законом України «Про авторське право та суміжні права»

Жодну частину цього видання не може бути відтворено в будь-якому вигляді без дозволу автора чи видавництва

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
DNIPRO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

O. Tryfonova, L. Tymoshenko, S. Us

**MATHEMATICAL MODELS
AND DECISION-MAKING METHODS
FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT**

Textbook

Dnipro – 2023

УДК 519.8:504 (075)

T69

Approved for publication by the Academic Council as a study guide for students of higher education in specialties 073 «Management», 076 «Entrepreneurship and trade», 124 «System analysis» (protocol № 12 dated November 30, 2023)

Reviewers:

Bakurova A.V. – Prof., Dr. Sc. (Econ), Professor of Department of System Analysis and Computational Mathematics of the National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

Alexieiev M. O. – Prof., Dr. Sci. (Tech.), Head of Department of software of computer systems of Dnipro university of technology

Velychko O.P. – Prof., Dr. Sc. (Econ), Head of Department of management and law of Dnipro State Agrarian and Economic University.

T69

Mathematical models and decision-making methods for sustainable development / O. Tryfonova, L. Tymoshenko, S. Us. – Ministry of education and science of Ukraine, Dnipro University of Technology. – Dnipro, 2023. – 240 c.

The textbook contains material on the study of the main concepts and terms of sustainable development, decision-making methods and economic-mathematical modeling for the purposes of managing the sustainable development of industrial enterprises and territories. The paper outlined the mathematical foundations of the decision-making theory as a component of the system for sustainable development management. Typical methods of solving problem situations are considered – the forecasting, based on statistical and econometric models, methods of decision-making in multi-criteria problems and in conditions of uncertainty. The main attention is paid to the applied aspects of decision-making theory.

The book is designed for people who have mastered mathematics as part of a university course, in particular for students studying in specialties 073 «Management», 076 «Entrepreneurship and trade», 124 «System analysis». The manual is intended primarily for students, postgraduates and teachers of higher education institutions, and can also be useful for civil servants, managers and others interested in the use of decision-making methods in the practice of sustainable development management.

The textbook was prepared under the DAAD Programme “Ukraine digital: Ensuring academic success in times of crisis, 2023”.

УДК 519.8:504 (075)

© O. Tryfonova, L. Tymoshenko, S. Us, 2023

© Dnipro University of Technology, 2023

Protected by the Law of Ukraine "On Copyright and Related Rights"

No part of this publication may be reproduced in any form without the permission of the authors or publisher.

ЗМІСТ

Передмова	7
Розділ 1 Принципи побудови і функціонування системи управління сталим розвитком	9
1.1 Сутність сталого розвитку як об'єкта управління	10
1.2 Сталий розвиток та основи побудови системи управління	13
1.3 Особливості побудови і функціонування систем управління сталим розвитком	20
<i>Висновки</i>	37
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	39
Розділ 2 Прийняття рішень як складова процесу управління сталим розвитком	41
2.1 Категоріально-понятійна сутність прийняття управлінських рішень	42
2.2 Прийняття рішень у процесі управління сталим розвитком	46
2.3 Стратегічні та тактичні рішення в управлінні сталим розвитком	49
<i>Висновки</i>	61
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	63
Розділ 3 Системний підхід в процесах прийняття рішень	65
3.1 Основні принципи системного підходу	66
3.2 Задачі прийняття рішень та їхня класифікація	69
3.3 Системний підхід до прийняття рішень	77
3.4 Моделі прийняття рішень	83
<i>Висновки</i>	86
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	87

Розділ 4 Статистичне та економетричне моделювання як інструмент прийняття рішень	91
4.1 Моделювання та прогнозування в контексті управління сталим розвитком підприємства	92
4.2 Моделювання та прогнозування динаміки	101
4.3 Моделювання взаємозв'язків і прогнозування стану об'єкта управління	119
<i>Висновки</i>	142
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	143
Розділ 5 Багатокритеріальні моделі прийняття рішень	147
5.1 Загальна проблема багатокритеріального вибору	148
5.2 Метод аналізу ієрархій	150
5.3 Приклад застосування МАІ	164
<i>Висновки</i>	176
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	177
Розділ 6 Моделі прийняття рішень в умовах невизначеності	182
6.1 Невизначеність у задачах прийняття рішень	183
6.2 Поняття про ситуацію прийняття рішень	186
6.3 Прийняття рішень в умовах ризику	189
6.4 Прийняття рішень в умовах повної невизначеності	206
6.5 Критерії прийняття рішень в умовах антагоністичної поведінки середовища	211
6.6 Критерії прийняття рішень в умовах часткової невизначеності	214
<i>Висновки</i>	221
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	222
Список використаних джерел	229
Предметний покажчик	236
Відомості про авторів	239

ПЕРЕДМОВА

Не варто лише сподіватися на те, що можна прийняти безпомилкове рішення, навпаки, слід заздалегідь примиритися з тим, що всяке рішення сумнівне, бо це звичайна річ, коли, уникнувши однієї халепи, потрапляєш в іншу. Однак у тому й полягає мудрість, щоб, зваживши на всі можливі неприємності, найменше зло визнати за благо.

Н. Макіавеллі

Сталий розвиток, що враховує та збалансовує економічні, екологічні та соціальні аспекти людської діяльності, виступає орієнтиром для прийняття стратегічних рішень. Україна, завдяки своєму вигідному географічному та геополітичному розташуванню, багатству природних ресурсів і високому рівню освіченості та кваліфікованості населення, має значний потенціал для економічного розвитку. Проте, складні політичні, економічні, екологічні і соціальні умови, зумовлені, насамперед, війною, а також кризовими економічними явищами, ресурсними обмеженнями і гуманітарними проблемами, ускладнюють досягнення поставлених цілей і вирішення завдань щодо сталого розвитку країни в цілому, її регіонів, територіальних громад, бізнес-структур тощо.

Відновлення України повинно ґрунтуватися на принципах сталості, забезпечуючи захист національних інтересів. Ухвалюючи рішення, публічна влада, громади, компанії мають враховувати не лише вирішення поточних проблем та перспективу 10 – 20 років, а й далеке майбутнє. Підґрунтям прийняття управлінських рішень в системі сталого розвитку різних організаційних формувань має виступати застосування сучасних математичних методів та моделей. Це визначає важливість оволодіння здобувачами вищої освіти сучасними теоретичними знаннями та практичними навичками розробки рішень при управлінні сталим розвитком з використанням математичного інструментарію.

Наразі на розвиток методів прийняття рішень істотно впливають інші науки, серед яких методологія, зокрема методологія мислення, теорія управління, менеджмент, кібернетика, психологія, соціологія та політологія. Але, вирішальну роль тут все ж таки має математика, зокрема методи кількісного оцінювання альтернативних варіантів управлінських рішень та прогнозування розвитку ситуацій під час вироблення найбільш раціонального рішення.

Цей посібник містить детальну характеристику математичних моделей і методів, що застосовуються для формалізації та змістовного обґрунтування рішення в управлінні сталим розвитком, зокрема, практики економіко-математичного моделювання, методів прийняття рішень в умовах невизначеності та наявності багатьох критеріїв.

Мета посібника – навчити студентів формалізувати задачі планування, організації та управління у сфері сталого розвитку, будувати економіко-математичні моделі та використовувати методи прийняття рішень в умовах визначеності й невизначеності для вирішення найбільш актуальних завдань управління сталим розвитком.

Матеріал посібника поділено на шість розділів.

У першому визначено категоріальну сутність сталого розвитку та управління на засадах системного підходу, досліджено принципи побудови і функціонування систем на різних рівнях управління сталим розвитком.

У другому розглянуто природу управлінського рішення, процес його розробки та прийняття, особливості стратегічних і тактичних рішень в управлінні сталим розвитком.

Третій розділ присвячено системному підходу до прийняття рішень. Тут викладено основні поняття системного підходу до прийняття рішень, розглянуто етапи формулювання та розв'язування задач прийняття рішень (ЗПР), подано класифікацію цих задач і методів, які застосовуються для їхнього розв'язування.

У четвертому розділі розглянуто основні поняття статистичного та економетричного моделювання у процесі прийняття рішень для забезпечення сталого розвитку. Визначено поняття моделювання та адекватності моделі, типи трендових моделей, досліджено питання їхньої параметризації та верифікації. Основну увагу приділено моделюванню взаємозв'язків і прогнозуванню стану об'єкта управління, а також визначенню наслідків впливу на об'єкт управління із застосуванням економетричних моделей.

П'ятий розділ містить у собі характеристику задач прийняття рішень в умовах наявності багатьох критеріїв. Тут описано загальні проблеми багатокритеріального вибору. Розглянуто метод аналізу ієрархій у застосуванні до задач сталого розвитку.

У шостому розділі розглянуто статичні задачі прийняття рішень в умовах невизначеного середовища. Розглянуто різні типи невизначеності, що можуть виникати в процесі прийняття рішень, та способи їхньої формалізації. Описано методи прийняття рішень в умовах ризику, повної невизначеності та ігрових ситуаціях вибору.

Автори сподіваються, що посібник буде слугувати своєрідним вступом до вивчення задач сталого розвитку й методів прийняття рішень. Він може бути корисним як для студентів, котрі вперше починають вивчати викладену тут теорію, так і для спеціалістів, які використовують методи прийняття рішень для розв'язування практичних завдань у сфері управління сталим розвитком, і дозволить поповнити знання стосовно деяких питань, висвітлених у спеціальній літературі, оскільки містить обширну бібліографію, де наведено повний перелік використаної літератури і джерела, які можуть бути корисними на практиці.

РОЗДІЛ 1

Принципи побудови і функціонування системи управління сталим розвитком

Питання для дискусії:

Ідея та категоріальна сутність сталого розвитку. Концепція та принципи сталого розвитку. Формування системи управління. Принципи системного підходу. Принципи технології управління. Складові побудови системи управління. Вимірювання сталості розвитку. Процес управління сталим розвитком. Побудова та функціонування систем на різних рівнях управління сталим розвитком.

Ключові терміни та поняття:

- Сталий розвиток
- Процес управління
- Система управління
- Принципи управління
- Цілі управління
- Механізм управління
- Функції та методи управління
- Індикатори та індекси сталого розвитку
- Рівні управління
- Інструменти управління

1.1 Сутність сталого розвитку як об'єкта управління

В сучасному дискурсі питання сталого розвитку (англ. *sustainable development*) привертає увагу світових лідерів, наукових кіл, урядів та представників громадськості. Концепція сталого розвитку була запропонована світовим співтовариством як шлях розвитку людської цивілізації. На початку ХХІ століття сталий розвиток став всесвітнім явищем, яке здобуло популярність як на міжнародному, так і на національному рівнях.

Незважаючи на те, що багато країн впровадили концепції сталого розвитку, сучасні тенденції на глобальному рівні визначають новий курс їх вдосконалення. Це пояснюється тим, що центральною ідеєю став інтегрований підхід до вирішення економічних, соціальних та екологічних проблем.

Ідея сталого розвитку полягає у переході від стихійного саморозвитку до регулювання діяльності суспільства на основі визнання загальних принципів, прийняття обмежень та використання спеціальних інструментів управління, що забезпечують стійкий прогрес економічного розвитку у просторово-часовій єдності, не руйнуючи природно-ресурсну основу, дотримуючись соціальної справедливості та відповідальності перед нинішнім та майбутніми поколіннями [60]

Проблемні питання сталого розвитку стоять у порядку денному міжнародних організацій, форумів, саммітів, конгресів, висвітлені як в урядових, так і міжурядових директивах та програмах. Цілі та принципи сталого розвитку становлять основу внутрішньої та зовнішньої політики багатьох країн світу, визначають стратегічні орієнтири і поточні завдання, виступають підґрунтям формування планів дій та механізмів втілення їх у життя. Це потребує побудови певної системи управління і визначення основних засад її функціонування.

Теорія сталого розвитку з'явилася як відповідь на панування парадигми економічного зростання, яка залишає без уваги екологічні та соціальні проблеми.

На початковому етапі формування теорії сталого розвитку увагу видатного дослідника В.І. Вернадського¹ було зосереджено на вивченні біосфери і ноосфери. Він розглядав навколишнє середовище та діяльність людей не як окремі частини, а у межах єдиної системи «природа – суспільство».

¹ Володимир Іванович Вернадський (1863 – 1945) – український науковець та філософ, природознавець, засновник геохімії, біогеохімії та радіогеології, вчення про біосферу, ноосферу.

Його наукові доробки дозволили зрозуміти, що всі компоненти екосистеми Землі є взаємозалежними, тому важливо проводити дослідження діяльності людства на планетарному рівні. В.І. Вернадський підкреслював необхідність зміни способу життя людства, щоб зберегти баланс у взаємодії між людиною і природою. Його праці складають фундаментальні принципи світогляду, що розкривають важливість розуміння і збереження природних екосистем для добробуту та майбутнього людства.

Людство, взяте загалом, стає потужною геологічною силою. І перед ним, перед його думкою і працею, постає питання про перебудову біосфери на користь вільно мислячого людства як єдиного цілого. Цей новий стан біосфери, до якого ми, не помічаючи цього, наближаємося і є «ноосферою».
В.І. Вернадський

Еволюціонування ідеї єдності з природою як передумови подальшого розвитку людства відбулося на основі наукових досліджень, що були проведені протягом середини ХХ століття вченими з різних інституцій під егідою Римського клубу². До цієї групи науковців входили дослідники, які працювали над низкою публікацій, а саме: «Межі зростання», «За межами зростання: глобальна катастрофа чи стабільне майбутнє» та «Межі зростання. 30 років потому», під керівництвом Д. Медоуза³. Вони зосередилися на прогнозуванні довгострокових наслідків глобальної тенденції зростання чисельності населення, обсягів виробництва, споживання природних ресурсів та забруднення довкілля.

Також формуванню концепції сприяли результати досліджень М. Месаровича, Е. Пестеля, Д. Воутера, Е. Вайцзеккера, К. Харгроуза, Й. Рандерса та інших, які намагалися науково осмислити проблеми раціонального використання наявних ресурсів та забезпечення належного стану довкілля.

Завдяки наполегливій роботі в кінці ХХ та початку ХХІ століття Організації Об'єднаних Націй (ООН), під егідою якої були проведені всесвітні конференції, спеціальні сесії Генеральної Асамблеї (ГА) ООН, організовано зустрічі на найвищому рівні представників країн світу, було сформовано стратегію сталого розвитку.

На Першій конференції ООН з навколишнього середовища у 1972 році в Стокгольмі була вперше запропонована ідея «сталого розвитку».

² Римський клуб – міжнародна громадська організація, яка започаткувала дослідження глобальних проблем сучасності, розпочала свою діяльність у 1968 році з зустрічі в Академії деї Лінчеї в Римі, звідки походить його назва. Римський клуб об'єднує представників світової політичної, фінансової та культурної еліти. Першим президентом Римського клубу став італійський бізнесмен та видатний гуманіст Ауреліо Печчеї.

³ Денніс Медоуз (англ. Dennis Meadows, нар. 7 червня 1942) – американський вчений, заслужений професор в галузі управління системами, колишній директор Інституту політичних і соціальних досліджень при Університеті Нью-Гемпшира. З 1970 по 1972 рік – директор Проекту глобальних загроз людства при Римському клубі.

ГА ООН у 1983 році створено Міжнародну комісію з навколишнього середовища і розвитку (МКНСР) або World Commission on Environment and Development (WCED). За результатами роботи МКНСР 1987 року була опублікована доповідь голови комісії Гру Харлем Брундтланд⁴ «Наше спільне майбутнє» («Our common future»), де вперше подане трактування сталого розвитку [76].

Сталим розвитком є «розвиток, який задовольняє потреби нинішнього покоління без шкоди для можливості майбутніх поколінь задовольняти свої власні потреби» [76].

Термін «сталий розвиток» містить двоїсте значення. З одного боку, економічний розвиток сприяє збереженню стабільного стану навколишнього середовища, а з іншого – він включає стійке зростання економіки.

Сталий розвиток суспільства можна охарактеризувати як той, де людина діє так, аби мінімізувати шкоду природним системам, дозволяючи їм відновлюватися. Це означає, що розвиток сприяє не лише підтримці, але й збереженню природи. Негативна взаємодія людини та довкілля призводить до значних деградаційних змін в природних екосистемах. В результаті природа стає вразливою до впливу людини і залежною від її втручання, що негативно впливає на процес відновлення довкілля.

Сучасна інтерпретація концепції сталого розвитку враховує не тільки економічний та екологічний аспекти, а й суспільний (соціальний), що включає ідеологічні, політичні, моральні та культурологічні компоненти. Зрозуміло, що майбутнє цивілізації залежить не лише від ставлення людини до природи, хоча це є надзвичайно важливим. Також важливим є передача поколіннями знань про життєві потреби як матеріальні, так і духовні, збереження загальнолюдських і цивілізаційних цінностей та традицій гуманізму.

Концепція сталого розвитку передбачає забезпечення ефективного функціонування економічних процесів на рівні, що відповідає високим стандартам якості, екологічності та безпеки.

Визначення базових принципів сталого розвитку включає наступні аспекти:

1. Забезпечення балансу між виробничо-господарською та екологічною сферами, що спрямоване на досягнення технологічного рівня, при якому економічна діяльність не наносить збитку природному оточенню.

2. Встановлення рівноваги між економічною та соціальною сферами, включаючи максимальне використання тих ресурсів, які забезпечують економічний розвиток в інтересах населення.

⁴ Гру Харлем Брундтланд (норв. Gro Harlem Brundtland (нар. 20 квітня 1939) – норвезька політична та відома міжнародна діячка, голова найбільшої партії в Норвегії, прем'єр-міністр. Свою діяльність на міжнародній арені Брундтланд розпочала ще в 1983 р., коли стала головою Міжнародної комісії з навколишнього середовища і розвитку.

3. Вирішення завдань, пов'язаних із розвитком, як для сучасних поколінь, так і для майбутніх, забезпечуючи всім рівні права на користування природними ресурсами.

Отже, сучасне трактування поняття сталого розвитку визначає його як розвиток, який не лише сприяє економічному зростанню, але й забезпечує справедливий розподіл його результатів; активно відновлює навколишнє середовище та не допускає його руйнування; підвищує життєві можливості людей та запобігає їх збідненню. Цей вид розвитку зосереджений на членах суспільства, забезпечуючи розширення їх можливостей і активну участь у прийнятті рішень, що стосуються їх життя. Це розвиток, в якому головною метою стоїть добробут людей з орієнтацією на збереження природи, забезпечення зайнятості і гендерної рівності.

1.2 Сталий розвиток та основи побудови системи управління

Для визначення особливостей побудови і функціонування системи управління сталим розвитком необхідно розкрити зміст поняття «управління» та його функціональне призначення.

Управління, як стверджує Пітер Друкер⁵, є особливим видом діяльності, що перетворює неорганізовану юрбу в ефективну, цілеспрямовану і продуктивну групу. Управління впорядковує світ, зменшуючи хаотичність й непередбачуваність у діяльності систем. Управління водночас є і стимулюючим елементом соціальних змін, і прикладом значних соціальних перетворень [2].

Управління – це усвідомлений вплив на об'єкти (процеси, явища) з метою зміни їх динаміки чи стану. Термін «управління» застосовується у керуванні державою, регіоном, організацією, структурним підрозділом, колективом, технікою тощо.

Основними складовими системи управління виступають: об'єкт управління (керована система) та суб'єкт управління (керуюча система).

Під об'єктом управління розуміється те, на що спрямований владний вплив суб'єкта управління. Об'єктом управління можуть виступати процеси, явища, відносини тощо.

Суб'єктом управління є певний орган (фізична чи юридична особа), який здійснює владні впливи, керує процесами та приймає рішення задля досягнення визначених цілей.

⁵ Пітер Фердинанд Друкер (нім. Peter Ferdinand Drucker, 19.11.1909 – 11.11.2005) – американський вчений австрійського походження, письменник, консультант в галузі менеджменту та, як він сам себе називав, «соціальний еколог». Його книги, підручники та популярні статті досліджують те, як люди організують діяльність у бізнесі, державних установах та некомерційних організаціях.

Загалом управління спрямоване на:

- ✓ збереження ключових характеристик об'єкта, втрата яких призводить до його руйнації/знищення;
- ✓ реалізацію програми, що гарантує стійке функціонування об'єкта і досягнення ним визначеної мети;
- ✓ нормальне функціонування та розвиток об'єкта.

Система управління являє собою сукупність взаємопов'язаних і взаємозалежних елементів, що утворюють впорядковану цілісність, єдність. Основу побудови системи управління визначає мета її функціонування.

В теорії управління основними поняттями виступають: інформація, взаємодія суб'єкта і об'єкта управління, прямий і зворотний зв'язки, ієрархічність.

Зв'язки між суб'єктом і об'єктом управління бувають прямими (ними передаються керуючі команди) та зворотними (містять інформацію про стан об'єкта).

По суті, управління завжди базується на обміні інформацією.

Управління може бути подане як взаємодія між суб'єктом та об'єктом у межах структурованої ієрархічної системи, що спрямована на обмін інформацією за допомогою прямих та зворотних зв'язків з метою досягнення оптимального функціонування об'єкта загалом. Формування системи управління сталого розвитку мусить враховувати основні принципи теорії управління, зокрема встановлення чіткої ієрархії, ефективного обміну інформацією та здійснення зворотного зв'язку. Це допомагає досягти гармонійної взаємодії між різними рівнями управління та забезпечити оптимальний розвиток об'єкта з урахуванням стратегій сталого розвитку та фундаментальних принципів управління.

Побудова і функціонування системи управління повинно ґрунтуватися на відповідних принципах.

Слово «*принцип*» походить від латинського слова «*principium*», що означає початок, основа.

Принципи управління, ґрунтуючись на законах та закономірностях, виступають орієнтирами, формуючи вимоги до структури системи управління та визначаючи її функції і методи.

Суть процесу управління полягає в організованому упорядкуванні системи з метою збереження її якості шляхом переміщення з одного стану в інший. В основі управління лежить принцип гармонізації внутрішніх закономірностей і тенденцій системи з її цільовими параметрами. Тому управління фактично є процесом організації системи, її координації та налагодження відповідно до об'єктивних законів, що діють у конкретному середовищі/ситуації.

Важливо відзначити, що для створення та функціонування системи управління базовим принципом має бути системність, яка визначає багато інших аспектів.

В управлінні основні принципи системного підходу передбачають наступне [2]:

1. Цілісність, що дозволяє розглядати систему одночасно і як єдине ціле, і як підсистему вищих рівнів управління.

2. Ієрархічність побудови, тобто наявність множини (принаймні двох) елементів, які розташовані на основі підпорядкування елементів нижчого рівня елементам вищого рівня. Реалізація простежується у взаємодії двох підсистем: керуючої (суб'єкта управління) і керованої (об'єкта управління).

3. Структуризація, яка дозволяє аналізувати елементи системи і їх взаємозв'язки в межах заданої організаційної структури. Згідно з принципом емерджентності процес функціонування системи обумовлений не стільки властивостями її окремих елементів, скільки властивостями самої структури.

4. Множинність, яка дозволяє використовувати множини кібернетичних, економічних і математичних моделей для опису окремих елементів і системи в цілому.

5. Емерджентність (системний ефект, системність) – наявність у будь-якої системи особливих властивостей, не притаманних її підсистемам, блокам чи сумі елементів, не пов'язаних особливими системоутворюючими зв'язками.

Жодна система не може бути сформована, якщо не визначено мету її створення. Подальше існування системи не можливе без орієнтування на досягнення поставленої мети. Тому встановлення мети функціонування системи виступає основною проблемою формування системи управління. Слід відзначити, що важко звести цілі функціонування окремих елементів складної системи до єдиної мети, яка може бути подана у кількісному вимірі.

За системним підходом суттєвими рисами системи є характеристики загального цілого, які відсутні у будь-якої окремої складової частини. Нові характеристики виникають та існують завдяки взаємодії між компонентами – внутрішніми зв'язками в рамках структури системи. Тому при побудові системи управління можна сформулювати спільну мету, коли досягається конкретний компроміс під час реалізації своїх власних цілей окремих підсистем.

При створенні та діяльності системи управління для забезпечення оптимальності прийняття рішень слід враховувати низку об'єктивних загальних принципів, зокрема:

– збалансований демократичний централізм (відповідно до цього принципу, вирішення питань здійснюється з урахуванням інтересів всіх учасників, але при цьому зберігається централізований контроль);

– оптимальне поєднання єдиноначальності та колегіальності (це означає, що в системі управління має бути чітко визначена ієрархія, але при цьому враховується значимість спільного прийняття рішень);

– активізація та стимулювання (система управління повинна створювати стимули для працівників, щоб вони були більш активні та віддані своїй роботі);

– делегування повноважень (ефективне управління передбачає делегування відповідальності та повноважень на підлеглих рівнях, сприяючи швидкому та зручному прийняттю рішень);

– відповідальність (керівники та співробітники повинні нести відповідальність за свої дії та результати роботи, що сприяє ефективності і прозорості);

– зацікавленість до творчої роботи управлінського персоналу (залучення кожного працівника до активної творчої діяльності допомагає вдосконалювати процеси та досягати більш високих результатів).

Існують три основні характеристики в технологіях управління діяльністю: організаційно-технологічна, соціально-психологічна і соціально-економічна, які включають низку принципів [1].

Організаційно-технологічна сторона управління – це переважно організаційно-розпорядницька, адміністративно-виконавча діяльність, до якої відносять наступні принципи: розподіл праці, ієрархічності і зворотного зв'язку, оптимального поєднання централізації і децентралізації.

З позиції соціально-психологічного управління слід виділити такі принципи: цільової спрямованості, мотивації, демократизації, співвідношення прав, обов'язків і відповідальності.

До соціально-економічних можна віднести принципи поєднання права господаря і участі працівників в управлінні (принцип демократії), стимулювання, конкуренції, галузевого і регіонального управління.

Основним завданням принципу ефективності (оптимальності) є досягнення поставленої мети в можливо короткий термін і при менших витратах матеріальних засобів і людської енергії. Ефективність управління забезпечується інтегративною взаємодією необхідних принципів і технологій їх реалізації за трьома вище зазначеними технологіями управління [1].

Однією з ключових функцій системи управління є створення структури взаємодії між суб'єктом та об'єктом управління. Ця структура визначається за допомогою інструментів, що використовуються всередині конкретних механізмів.

Механізм управління – це єдина складна система взаємопов'язаних елементів, що формується на основі цілеспрямованих принципів, організувального, координувального і регулювального впливу суб'єкта управління на об'єкт, шляхом застосування методів, важелів та інструментів впливу.

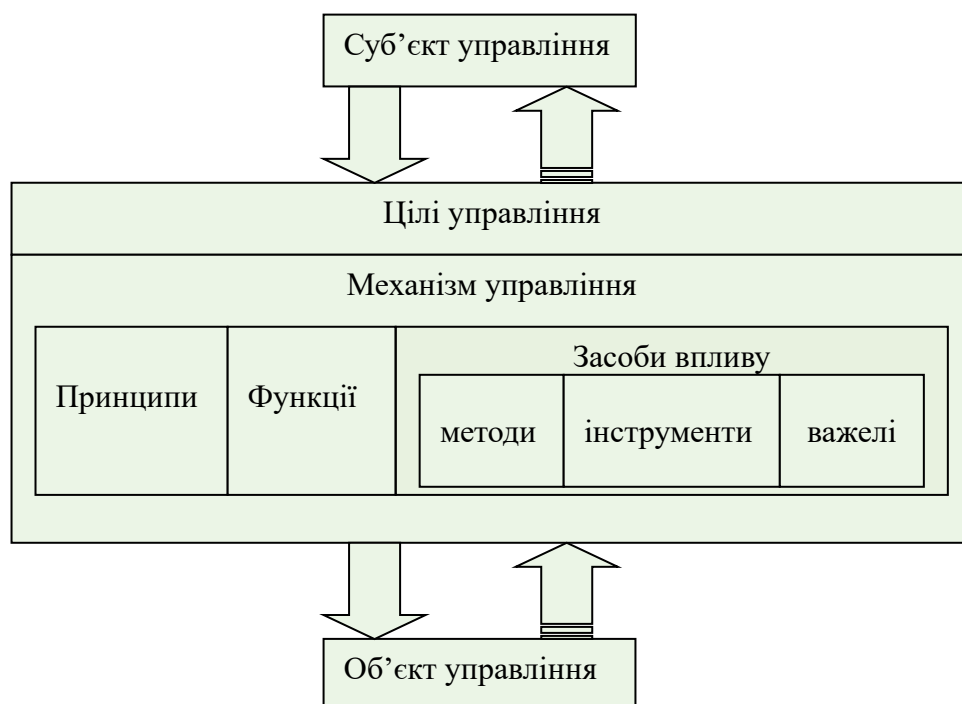


Рисунок 1.1 – Складові побудови системи управління

Цілі управління визначають бажаний стан об'єкта управління або результат, який очікується отримати внаслідок здійснення певної діяльності (заходів, дій).

Важливим аспектом при досягненні управлінських цілей є вміння збалансовано поєднувати об'єктивні та суб'єктивні фактори.

Успішне управління досягається, коли цілі відповідають конкретному набору вимог.

1. Чіткість, однозначність та зрозумілість для виконавців.
2. Реалістичність, досяжність в даному контексті.
3. Гнучкість, здатність до адаптації при зміні умов.
4. Сумісність у часі та просторі.
5. Особиста прийнятність виконавцями.
6. Відображення гармонії інтересів суспільства, колективів та окремих осіб для уникнення конфліктів.
7. Виключення можливості негативності та руйнації.

Отже, досягнення ефективного управління вимагає розумного поєднання об'єктивних та суб'єктивних аспектів, а також врахування різних аспектів формулювання та досягнення цілей.

Залежно від функціонування об'єкта управління, розрізняють три типи управлінських процесів [14]:

- розвиток, коли в процесі управління параметри реального виходу згідно з обраними критеріями поліпшуються;
- стабілізація, коли метою управління є збереження параметрів виходу в незмінному стані;
- деградація, коли в процесі управління параметри реального виходу згідно з певними критеріями погіршуються.

Функції управління репрезентують спеціалізовані форми діяльності, що дозволяють суб'єкту управління впливати на керований об'єкт.

Управлінський процес складається із чотирьох основних функцій: планування, організації, мотивації та контролю. Всі ці функції взаємодіють через комунікацію та процес прийняття рішень.

Планування означає встановлення мети та вибір оптимального шляху досягнення цієї мети. Це сукупність дій, спрямованих на визначення завдань, напрямку, темпу та пропорцій розвитку (збереження стану) об'єкта управління.

Організація включає в себе заходи, що забезпечують раціональне поєднання всіх структурних елементів у часі та просторі. Організувати означає створити структуру та розподілити роботу, координувати дії та делегувати завдання виконавцям.

Мотивація полягає у створенні внутрішнього спонукання для виконання завдань шляхом задоволення потреб виконавців. Це включає розробку та застосування стимулів для підвищення ефективності праці учасників.

Контроль передбачає спостереження за процесами в керованому об'єкті, порівняння його параметрів із заданими стандартами, виявлення відхилень та коригування невідповідностей з очікуваними результатами.

Усі чотири первинні функції управління мають дві загальні характеристики: вони вимагають прийняття рішень та взаємодіють через обмін інформацією.

Прийняття рішень означає вибір того, як планувати, організувати, мотивувати та контролювати. Ефективні рішення потребують адекватної інформації, яку можна отримати через комунікаційний процес.

Комунікація – це обмін інформацією між двома або більше людьми. Вона є ключовим чинником для отримання необхідної інформації для прийняття ефективних управлінських рішень.

Загалом процес управління включає одні й ті самі функції, але конкретні методи, які можна використовувати, структури управління, навички в прийнятті рішень та рівень відповідальності за їх реалізацію можуть значно варіювати в залежності від конкретної ситуації.

Слово «метод» від грецького слова «*methodos*» означає спосіб дослідження.

Метод визначається як засіб досягнення певної мети або розв'язання конкретної задачі; це сукупність прийомів або дій, які використовуються для практичного або теоретичного вивчення реальності.

У сфері управління під **методами** розуміються комплекс прийомів і способів, за допомогою яких суб'єкт управління впливає на об'єкт управління задля досягнення визначених цілей.

Класичний набір принципів формування організаційної структури управління [56]:

1. Організаційна структура управління має відтворювати її місію, стратегію та специфіку діяльності.
2. Оптимальний розподіл праці має забезпечувати її спеціалізацію, помірну загрузку і, як наслідок, творчий характер праці.
3. Формування організаційної структури управління має відбуватися одночасно із визначенням повноважень та відповідальності кожного працівника і органу управління.
4. Функції та обов'язки мають бути узгоджені із повноваженнями та відповідальністю.
5. Організаційна структура управління має бути адекватною соціально-культурному середовищу організації. Це означає, що сліпе її копіювання із іншого соціально-культурного середовища, де вона успішно функціонує, як правило, не дає бажаного результату.

Якщо підходити до системи управління як до системи прийняття рішень, то до вище визначених принципів додається низка нових стратегічних моментів, а саме [56]:

1. Організаційні структурні форми, у тому числі і структури управління, мають бути підпорядковані стратегії та, власне, самому процесу прийняття управлінських рішень.
2. Організаційні структури, у тому числі і структури управління, мають бути не двомірними (класичний підхід), а багатомірними і досить гнучкими та легко піддаватися адаптації, аби при прийнятті управлінських рішень можна було врахувати технічні та соціальні зміни, швидкість яких інколи важко, навіть, прогнозувати.

1.3 Особливості побудови і функціонування систем управління сталим розвитком

Системний підхід ґрунтується на тому, що сталою та надійною є лише система, в якій основні підсистеми та елементи також є усталеними та надійними.

Стійкий розвиток будь-якої системи передбачає її здатність зберігати сутнісний інваріант, який визначає її функціонування. Це означає, що система залишається стійкою, якщо вона здатна зберігати незмінність своїх основних властивостей та структури навіть при зміні умов чи факторів, які на неї впливають.

Ця інваріантність є ключовим елементом для забезпечення функціонування системи в різних контекстах. Це може включати у себе збереження основних цілей, принципів або ключових зв'язків у системі. Забезпечення стійкості допомагає системі адаптуватися до змін, зберігаючи при цьому свою основну суть.

Для досягнення стійкого розвитку системі необхідно враховувати не лише зміни внутрішніх та зовнішніх умов, але й доповнювати її здатність адаптуватися до нових викликів та ризиків. Такий підхід допомагає зберегти основні принципи та властивості системи, що визначають її успішне функціонування в довгостроковій перспективі.

У сучасних умовах екологічні та економічні аспекти діяльності соціуму взаємодіють між собою на всіх рівнях – від місцевого до глобального. Ця взаємодія формує складну систему причин та наслідків. Тому треба повністю інтегрувати екологічні та економічні цілі під час прийняття управлінських рішень. Це необхідно не лише для збереження природного середовища, а й для забезпечення соціально-економічного розвитку.

Розвиток неможливий без належного врахування стану ресурсної бази. Забезпечення збереження навколишнього середовища можливе, якщо при економічному зростанні враховуються фінансові втрати, пов'язані з погіршенням стану довкілля. Ці питання мають розглядатися в комплексі, оскільки вони взаємопов'язані і функціонують як єдина система.

У складних системах взаємодія відбувається не лише між підсистемами на одному рівні (природне середовище – суспільство – економічна діяльність), а також між ними і підсистемами на інших рівнях, від локальних до глобальних.

При управлінні сталим розвитком, особливо забезпеченні функцій планування та контролювання, під час проведення аналізу існування (стану, зміни) системи потрібно враховувати велику кількість показників. Тому в першу чергу важливо визначити загальну множину показників, які відносяться до діяльності конкретного об'єкта управління та зовнішнього впливу на нього. Після цього доцільно обрати найвпливовіші показники.

Індикатор в системі виміру сталості – це показник (переважно такий, що має кількісний вимір), який відображає стан економічного, соціального або екологічного розвитку обраного об'єкта дослідження (міста, району, області, макрорегіону, країни тощо). Агреговані за певним алгоритмом набори індикаторів називають **індексом** [55].

Визначення індексів при управлінні сталим розвитком здійснюється з метою оцінювання стану об'єкта управління (певної ситуації, події тощо), для прогнозування зміни стану об'єкта управління або розвитку ситуації, розробки управлінського рішення.

Основні підходи до вимірювання сталості розвитку [35]

Характеристика підходу	Практика застосування
Перший підхід полягає у побудові розгорнутої програми показників, кожен з яких оцінює вирішення окремих завдань у комплексі цілей сталого розвитку.	Індикатори сталого розвитку Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) (англ. OECD Sustainable Development Indicators). Ця система використовує модель «вплив→стан→реакція»: (1) індикатори впливу (англ. pressure indicators) характеризують вплив різних чинників діяльності на навколишнє середовище; (2) індикатори стану (англ. state indicators) оцінюють якісні і кількісні зміни стану природних ресурсів і елементів навколишнього середовища; (3) індикатори реакції (англ. response indicators) вимірюють ефекти і ефективність заходів з оздоровлення довкілля, реалізації природоохоронної, загальноекономічної та галузевої політики, підвищення екологічної відповідальності підприємництва та суспільства. Індикатори сталого розвитку Комісії ООН зі сталого розвитку (КСР) (англ. CSD Indicators of Sustainable Development). Ця система вважається однією з найповніших за охопленням, включає набір з 50 основних показників, які можна розгортати у 96 показників сталого розвитку. Вона розбита на чотири основні групи: (1) індикатори економічної сталості розвитку; (2) індикатори екологічної сталості розвитку; (3) індикатори соціального розвитку; (4) індикатори інституційних аспектів сталості
Другий підхід передбачає використання єдиного інтегрального індексу, що за певною методикою об'єднує стандартизовані показники з оцінки стану різних сфер розвитку.	За методикою визначення Індексу сталого розвитку, запропонованою у проєкті Інституту прикладного системного аналізу НАН України та МОН України, що виконувався під керівництвом М. З. Згуровського, складові індексу сталого розвитку побудовані на основі індикаторів, що вимірюються в різних одиницях, приводяться до нормованого вигляду та мають значення в діапазоні від 0 до 1, а потім визначається їх сума з врахуванням вагових коефіцієнтів. Розраховані індекси підсумовуються до загального індексу сталого розвитку з відповідними ваговими коефіцієнтами.

Має сенс комплексно аналізувати параметри, що використовуються при розрахунку кожного окремого індексу з врахуванням обліково-аналітичної інформації стосовно екологічних, соціальних та економічних показників функціонування об'єктів управління сталим розвитком.

Процес управління сталим розвитком ґрунтується на системі управління, яка дозволяє забезпечити цілісний та комплексний підхід до процесу взаємодії окремих підсистем, що беруть участь в управлінських процесах, не лише на одному рівні (природне середовище – суспільство – економічна діяльність), а також між ними і підсистемами на інших рівнях, від локальних до глобальних.

Основним завданням створення та розвитку систем управління є забезпечення сталого розвитку об'єкта управління шляхом інтеграції соціально-відповідальної поведінки у взаємодії з зовнішнім природним середовищем.

Кожна країна вибудовує власне бачення свого економічного розвитку, і вирішальну роль відіграє визначення мети цього розвитку. Єдиною метою економічного розвитку в XXI сторіччі має визнаватись якість/рівень життя населення (індекс людського розвитку, середня очікувана тривалість життя, рівень бідності, самооцінка власного життя тощо) [25].

Рівні, на яких формується система управління сталим розвитком:

- глобальний;
- макрорівень (національний рівень – країна);
- мезорівень (регіон, область);
- мікрорівень або локальний рівень (територіальна громада, окреме підприємство/організація).

Ієрархія управління забезпечує розв'язання стратегічних завдань сталого розвитку у вищих ланках управління з делегуванням більш дрібних і локальних проблем на нижчі ланки управління.

Глобалізація впливає на різні процеси, що відбуваються у світі, зокрема на те, що ризики та небезпеки для населення і планети Земля стають загальними.

До основних глобальних проблем, які є предметом особливої уваги у розробці цілей та завдань сталого розвитку, відносять [35]:

- ✓ викиди парникових газів і прискорення зміни клімату
- ✓ виснаження природних і енергетичних ресурсів;
- ✓ забруднення і деградація навколишнього середовища;
- ✓ стрімке зростання населення і продовольчі проблеми.
- ✓ бідність і нерівність.
- ✓ тероризм та збройні конфлікти.

Саме на глобальному рівні відбувається формування концептуальних засад побудови системи управління сталим розвитком.

Так, в рамках конференцій ООН було визначено як категоріальний зміст поняття «сталий розвиток» – ключового принципу проєктів ООН, спрямованих на захист навколишнього середовища, так і концепція сталого розвитку – найбільш популярна концепція розвитку людства.

На Конференції ООН з проблем навколишнього середовища (червень 1972 року) було створено Стокгольмську декларацію, яка встановила 26 принципів збереження довкілля, визнано права людини на свободу, рівність і адекватні умови життя в довкіллі, також був прийнятий план дій з 109 пунктів, для реалізації якого створена організація ООН – Програма ООН з довкілля (ЮНЕП, утворена у грудні 1972 року).

Ключовим моментом у глобальній екологічній політиці стала Конференція ООН з навколишнього середовища та розвитку «Самміт Землі», яка відбулася в Ріо-де-Жанейро за ініціативи Генеральної Асамблеї (ГА) ООН у червні 1992 року. Участь 178 країн, понад 10 тисяч представників громадських організацій і об'єднань, більше 30 міжурядових і неурядових міжнародних організацій, а також лідерство 114 делегацій, на чолі з главами держав або урядів, підкреслюють значущість, масштаб і вагомість цього заходу. В результаті було прийнято п'ять підсумкових документів [86]:

1. Декларація Ріо-де-Жанейро щодо навколишнього середовища та розвитку – ключовий документ у галузі природоохоронної діяльності та впровадження збалансованого розвитку, в якому визначено 27 принципів нового, справедливого, глобального партнерства між державами, ключовими секторами суспільства та громадянами.

2. Порядок денний на XXI століття (Agenda 21). В цьому документі кожній країні було рекомендовано розробити національну стратегію збалансованого розвитку з урахуванням необхідних природоохоронних заходів.

3. Рамкова конвенція ООН щодо змін клімату (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), де вперше офіційно визнано загрозу зміни клімату.

4. Конвенція щодо збереження біологічного різноманіття.

5. Декларація щодо напрямку розвитку, охорони та використання лісів.

Аналіз та оцінку реалізації Порядку денного на XXI століття (Agenda 21) було проведено в рамках Зустрічі на вищому рівні «Планета Земля» (Форум «Ріо+5», березень 1997 року, Ріо-де-Жанейро, Бразилія) та сесії Комісії ООН зі збалансованого розвитку (квітень 1997 року, Нью-Йорк, США). Сесія зобов'язала сформулювати до 2002 року національні стратегії збалансованого розвитку, до розроблення яких мають бути залучені усі сектори суспільства.

Конкретні механізми забезпечення паритету між державами у контролі за викидами CO₂ та зменшенням впливу парникового ефекту були визначені у міжнародній угоді, відомій як Кіотський протокол (1997 рік, Кіото, Японія), що підписали представники 38 країн, а також Європейський Союз (ЄС). Саме цей документ містив перший управлінський інструмент стимулювання сталого розвитку, який базувався на відповідному наборі узгоджених дій. Пізніше, у 2015 році була укладена Паризька угода, яка замінила Кіотський протокол. У цьому документі країни-учасниці зобов'язалися прийняти конкретні заходи для утримання глобального потепління на рівні менше 2°C від середини 20-го століття, коли розпочався інтенсивний промисловий розвиток.

Починаючи з 2000 року відбувається процес розробки цілей та інструментів управління сталим розвитком.

На Самміті тисячоліття ООН (2002 рік, Йоганнесбург, ПАР) представлено підсумки десятирічного досвіду руху до збалансованого розвитку та прийнято Йоганнесбурзьку декларацію зі збалансованого розвитку, основними завданнями якої визначено подолання бідності, зміну моделей споживання та охорону і раціональне використання природної ресурсної бази.

На Конференції ООН з питань сталого розвитку Rio+20 (2012 рік, Ріо-де-Жанейро) реалізовано можливість оцінити прогрес, досягнутий у напрямку сталого розвитку з 1992 року, і почати розбудову «зеленої» економіки. Відбулося офіційне визнання «зеленої» економіки на міжнародному рівні як інструменту сприяння сталому розвитку. Акцентовано увагу урядів на створенні належних стимулів для заохочення необхідних інвестицій та використання державно-приватного партнерства для досягнення мети сталого розвитку. Для політиків світу з'явилась можливість прийняти дорожню карту «зеленої» економіки для сталого розвитку на наступні 20 років і далі для того, щоб світова економіка була поставлена на зелену, інклюзивну та стійку основу [77].

«Зелена» економіка – це новий тренд, який сприймається як важливіший напрям структурних реформ і покликаний [17]:

- (1) підвищити обізнаність про реальне екологічне, енергетичне та соціально-економічне становище світу, виявивши ідеологічні варіанти для кращого розуміння дилеми «економічне зростання та захист довкілля»
- (2) знайти оптимальні шляхи та більш ефективні інструменти для вирішення проблем, з якими стикнулося суспільство.



Рисунок 1.2 – Система напрямів зеленої економіки

Інклюзивна «зелена» економіка (англ. *Inclusive Green Economy (IGE)*) є такою, що покращує добробут людей і створює соціальну справедливість, одночасно зменшуючи екологічні ризики та екологічний дефіцит; є низьковуглецевою, ефективною та чистою у виробництві, але також інклюзивною у споживанні та результатах, заснована на спільному використанні, циркулярності, співпраці, солідарності, стійкості, можливостях та взаємозалежності [72].

В рамках ювілейної 70-ї сесії ГА ООН (2015 рік, Нью-Йорк, США) відбувся Самміт зі сталого розвитку, результатом якого стало ухвалення світовими лідерами Резолюції «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року», де визначено нові орієнтири світового розвитку, які будуть сприяти економічному зростанню, раціональному природокористуванню і охороні довкілля та вирішенню низки соціальних потреб. Ці орієнтири відображені у комплексних, взаємопов'язаних і неподільних 17 Цілях сталого розвитку (ЦСР) та 169 пов'язаних з ними проміжних завданнях, які спрямовані на усунення основних системних перешкод на шляху до сталого розвитку.

Вставка 1.1

ЦІЛІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ [62]:

- (1) Подолання бідності в усіх її формах та усюди.
- (2) Подолання голоду, досягнення продовольчої безпеки, поліпшення харчування і сприяння сталому розвитку сільського господарства.
- (3) Забезпечення здорового способу життя та сприяння благополуччю для всіх в будь-якому віці.
- (4) Забезпечення всеохоплюючої і справедливо якісної освіти та заохочення можливості навчання впродовж усього життя для всіх.
- (5) Забезпечення гендерної рівності, розширення прав і можливостей всіх жінок та дівчат.
- (6) Забезпечення наявності та раціонального використання водних ресурсів і санітарії для всіх.
- (7) Забезпечення доступу до недорогих, надійних, стійких і сучасних джерел енергії для всіх.
- (8) Сприяння поступальному, всеохоплюючому та сталому економічному зростанню, повній і продуктивній зайнятості та гідній праці для всіх.
- (9) Створення стійкої інфраструктури, сприяння всеохоплюючій і сталій індустріалізації та інноваціям.
- (10) Скорочення нерівності всередині країни і між ними.
- (11) Забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості й екологічної стійкості міст і населених пунктів.
- (12) Забезпечення переходу до раціональних моделей споживання і виробництва.
- (13) Вжиття невідкладних заходів щодо боротьби зі зміною клімату та його наслідками.
- (14) Збереження та раціональне використання океанів, морів і морських ресурсів в інтересах сталого розвитку.
- (15) Захист, відновлення екосистем суші та сприяння їх раціональному використанню, раціональне лісокористування, боротьба з опустелюванням, припинення і повернення назад процесу деградації земель та зупинка процесу втрати біорізноманіття.
- (16) Сприяння побудові миролюбного і відкритого суспільства в інтересах сталого розвитку, забезпечення доступу до правосуддя для всіх і створення ефективних, підзвітних та заснованих на широкій участі інституцій на всіх рівнях.
- (17) Зміцнення засобів здійснення й активізація роботи в рамках Глобального партнерства в інтересах сталого розвитку.

193 держави-члени ООН одностайно прийняли нову глобальну програму сталого розвитку, що охоплює всі аспекти соціально-економічного розвитку, конкурентоздатність країн, екологічної та енергетичної безпеки, глобального партнерства для розвитку і обумовлює необхідність розробки конкретних завдань відповідно до визначених на глобальному рівні цілей та їх моніторингу.

Відповідно до глобальних ЦСР метою «зеленої» економіки, як інструменту сприяння сталому розвитку, визначено забезпечення зрушення у бік сталого виробництва та споживання за одночасного включення екологічних питань у процес прийняття рішень.

Європейський Союз (ЄС) вже має низку програм, які забезпечують відповідний внесок в реалізацію Порядку денного ООН на період до 2030 року та цілей сталого розвитку.

Європейська зелена угода (European Green Deal) (грудень 2019, Брюссель)

Прийнята як реакція на виклики щодо зміни клімату та погіршення навколишнього середовища, які становлять загрозу існуванню Європи та світу. Європейська зелена угода повинна перетворити ЄС на сучасну, ресурсоефективну та конкурентоздатну економіку, для чого в угоді закладено план цих трансформаційних змін. Водночас це забезпечить наявність можливостей для кожного, підтримку вразливих громадян шляхом подолання нерівності та зміцнення конкурентоздатності європейських компаній. Концепція Європейського «Нового зеленого курсу» (European Green Deal) охоплює всі галузі економіки і в першу чергу стосується сектору транспорту, енергетики, сільського господарства, будівництва, а також металургії, цементної, текстильної та хімічної промисловості [68].

Усі 27 держав-членів ЄС взяли на себе зобов'язання перетворити ЄС на перший кліматично нейтральний континент до 2050 року. Щоб досягти цього, вони зобов'язалися скоротити викиди щонайменше на 55 % до 2030 року порівняно з показниками 1990 року.

Важливою складовою порядку денного стратегії Європейського «зеленого» курсу (European Green Deal) виступає ухвалений 11 березня 2020 року Європейською Комісією План дій щодо «циркулярної» економіки (Circular Economy Action Plan), метою якого є скорочення споживання та подвоєння повторного використання ресурсів в ЄС у найближчі десятиліття, що одночасно буде сприяти економічному зростанню. Циркулярна економіка матиме чисті позитивні переваги з точки зору зростання ВВП і створення робочих місць, оскільки застосування амбітних заходів циклічної економіки в Європі може збільшити ВВП ЄС додатково на 0,5 % до 2030 року, створивши близько 700 000 нових робочих місць [64].

Вставка 1.2

Ключові кроки досягнення кліматичної нейтральності Європи за [66]

Грудень 2019 р.	Європейська Комісія презентує Європейську зелену угоду, яка зобов'язується досягти кліматичної нейтральності до 2050 року
Березень 2020 р.	Комісія пропонує Європейське законодавство про клімат, щоб записати ціль кліматичної нейтральності до 2050 року в обов'язкове законодавство
Вересень 2020 р.	Комісія пропонує нову ціль ЄС – скорочення чистих викидів щонайменше на 55 % до 2030 року та додавання її до Європейського закону про клімат
Грудень 2020 р.	Європейські лідери схвалюють запропоновану Комісією мету скоротити чисті викиди щонайменше на 55 % до 2030 року
Квітень 2021 р.	Європейський парламент і країни-члени досягли політичної згоди щодо європейського кліматичного права
Червень 2021 р.	Європейський кліматичний закон вступає в силу
Липень 2021 р.	Комісія подає пакет пропозицій щодо трансформації європейської економіки, аби досягти кліматичних цілей до 2030 року. Європейський парламент і країни-члени обговорять і ухвалюють пакет законодавства щодо досягнення кліматичних цілей до 2030 року
Вересень 2021 р.	New European Bauhaus (Новий європейський Баугауз): нові дії та фінансування
Жовтень 2022 р.	Рада та Європейський парламент досягли попередньої політичної домовленості щодо більш суворих стандартів викидів CO ₂ для нових автомобілів і фургонів
2030 р.	ЄС має забезпечити скорочення викидів щонайменше на 55 % порівняно з показниками 1990 року
2050 р.	ЄС стане кліматично нейтральним

Циркулярна економіка (англ. *circular economy*) – модель економіки замкнутого циклу, за якої ресурси багаторазово повертаються для використання в наступних виробничих циклах, що сприяє збереженню природно-ресурсного, виробничого, фінансового та трудового капіталу [60].

Черговим рішенням Європейської Комісії (5 липня 2023 р.) було прийняття пакету заходів щодо сталого використання ключових природних ресурсів, що також посилить стійкість європейських продовольчих систем і сільського господарства. Пакет містить новий закон про ґрунти, положення про рослини, вирощені за допомогою геномних методів, а також заходи зі зменшення харчових і текстильних відходів. Його прийняття доповнює попередні пропозиції в рамках Європейської зеленої угоди. Кінцевою метою виступає досягнення здорових ґрунтів ЄС до 2050 року відповідно до амбіцій ЄС щодо нульового забруднення [69].

Прийняття на глобальному рівні рішень в рамках проведених заходів із залученням світових лідерів, урядів країн та представників науки і громадськості відносно концептуального підґрунтя сталого розвитку як способу організації діяльності суспільства, що забезпечить його існування в довгостроковій перспективі, має на меті досягнення соціальної та економічної справедливості, збереження навколишнього середовища та відновлення використаних природних ресурсів.

Сталий розвиток певної країни є неодмінною складовою сталого розвитку всього глобального співтовариства. Це поступовий процес, який стоїть перед всім людством, а також перед кожною окремою країною, і вимагає чіткого визначення цілей на кожному етапі. Основним стратегічним орієнтиром сталого розвитку є підвищення якості життя населення, що засноване на наукових та технічних досягненнях, динамічному зростанні економіки та соціальної сфери. При цьому важливо зберігати ресурси для відновлення природного багатства країни, яке є невід'ємною складовою біосфери Землі, а також зберігати технологічний потенціал для потреб сучасних і майбутніх поколінь.

Система макроуправління поширює свою дію на великомасштабні національні об'єкти, природні екосистеми, природні ресурси загальнодержавного значення, а також на охорону здоров'я населення. До суб'єктів, що здійснюють управління сталим розвитком на макрорівні, належать центральні законодавчі й виконавчі структури, органи екологічного управління. Вони уповноважені приймати управлінські рішення, що стосуються держави в цілому, галузей національної економіки тощо.

Україна також долучилась до глобального процесу. Принципи сталого розвитку, викладені в законодавстві більшості країн світу, виступають основою для розбудови національної економіки. Ця тенденція також має місце в Україні, де розроблено та ухвалено систему нормативно-правових документів, спрямованих на втілення концепції сталого розвитку.

В національній доповіді «Цілі сталого розвитку: Україна» (вересень, 2017 рік) [31] визначено завдання національного рівня та адаптовані показники для досягнення глобальних ЦСР. Національні ЦСР є основою для інтеграції зусиль, спрямованих на забезпечення економічного зростання, соціальної справедливості та раціонального природокористування. Реалізація ЦСР потребує удосконалення процесу прийняття управлінських рішень на основі аналізу відповідної статистичної інформації. Моніторинг стану виконання завдань для досягнення ЦСР вимагає відповідного інформаційно-аналітичного забезпечення із застосуванням комплексних підходів та використанням різних джерел даних.

30 вересня 2019 року Указом Президента «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» [54] сталий розвиток було визначено як єдино можливий шлях розвитку вітчизняної економіки та суспільних інститутів, що сприятиме зростанню рівня та якості життя громадян, додержанню конституційних прав і свобод людини. Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року слугують орієнтирами для розроблення проєктів прогнозних і програмних документів, проєктів нормативно-правових актів з метою забезпечення збалансованості економічного, соціального та екологічного вимірів сталого розвитку України.

Це сприяло розробці в Україні нової системи управлінських заходів для досягнення Цілей сталого розвитку. Система управління охоплює економічний, соціальний та екологічний (природоохоронний) аспекти, спрямована на створення суспільних відносин, ґрунтованих на довірі, солідарності та рівності поколінь, а також гарантування безпечного навколишнього середовища.

Основною ідеєю сталого розвитку України є визнання невід’ємних прав людини на життя та повноцінний розвиток. Для досягнення цих цілей, нові стратегічні напрями орієнтовані на інтеграцію зусиль щодо економічного зростання, соціальної справедливості та раціонального природокористування.

Успішне втілення цих стратегічних цілей вимагає глибоких соціально-економічних перетворень в Україні, а також прийняття нових підходів у межах глобального партнерства. Важливо враховувати, що традиційне економічне зростання може негативно впливати на природне середовище, а екологічна деградація – підірвати економіку.

Механізм управління сталим розвитком країни та її регіонів ґрунтується на таких базових блоках [34]: законодавча база; організаційна база; суспільно-громадянська база (рис. 1.2).

Підґрунтям впровадження концепції сталого розвитку України та її регіонів є Державна стратегія регіонального розвитку [37], яка визначає його генеральний вектор та розроблена відповідно до Цілей сталого розвитку України до 2030 року, затверджених Указом Президента України.

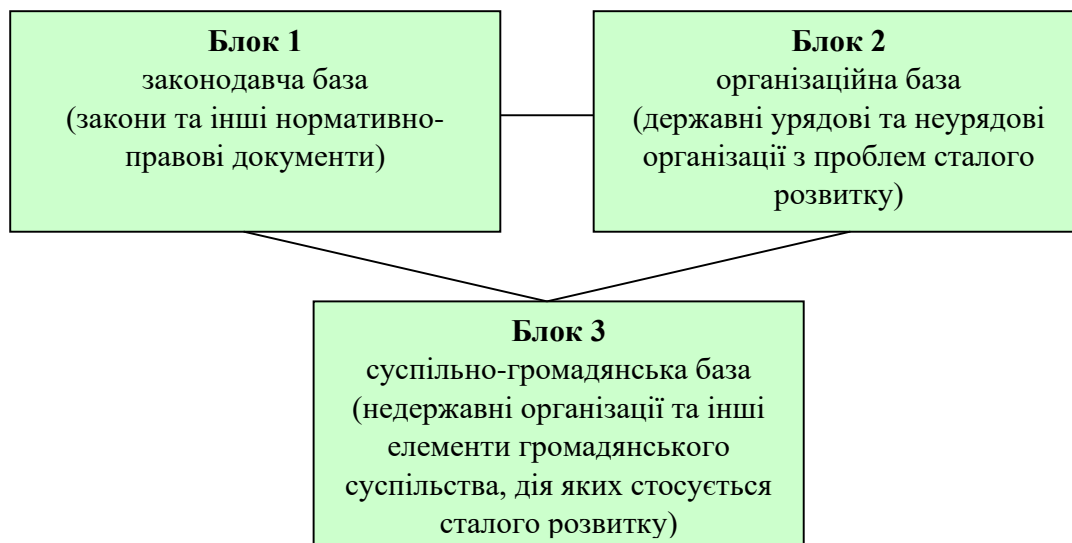


Рисунок 1.2 – Елементи механізму управління сталим розвитком країни та її регіонів [34]

Метою Державної стратегії регіонального розвитку [37]

є розвиток та єдність, орієнтовані на людину – її гідне життя в згуртованій, децентралізованій, конкурентоздатній і демократичній Україні, забезпечення ефективного використання внутрішнього потенціалу територій та їх спеціалізації для досягнення сталого розвитку країни, що створює умови для підвищення рівня добробуту та доходів громадян під час досягнення згуртованості в соціальному, гуманітарному, економічному, екологічному та просторовому вимірах.

2020 року, за даними Держстату, було підготовлено та презентовано перед світовою спільнотою Добровільний національний огляд [10]. Він надав бачення здобутків та викликів на шляху досягнення кожної із сімнадцяти ЦСР у відповідності до бенчмаркінгових орієнтирів, встановлених на основі розрахунково-прогнозна роботи, та підсумував результати оцінювання національного розвитку за ЦСР. Встановлено, що для кожної ЦСР, де має місце низька ефективність виконання того чи іншого завдання, існують проблеми та недоліки в управлінні: суперечності в організації відповідних адміністрацій, надлишкове різноманіття суб'єктів в одній сфері діяльності, брак координації тощо.

Отже, передумовою досягнення всіх без винятку ЦСР буде рух до високоякісного управління, що передбачає компетентність персоналу, спрощення адміністративних структур, викорінення корупції та справжню прихильність до суспільної підтримки. При плануванні та реалізації завдань і досягненні цілей мають враховуватися питання належного управління, чесної та прозорої влади й участі населення у прийнятті рішень і забезпеченні підзвітності. Прискорення реалізації потребують реформа судової системи, антикорупційна реформа. Заходи з відновлення та розбудови миру, досягнення соціальної справедливості, забезпечення дотримання прав людини, прав дитини та гендерної рівності мають буди більш досконаліми у частині координації та управління.

Інструментами реалізації Державної стратегії є плани заходів на 2021 – 2023 і 2024 – 2027 роки; програми та проекти регіонального розвитку; регіональні стратегії розвитку та плани заходів з їх реалізації; державні програми щодо розвитку транскордонного співробітництва, соціально-економічного розвитку окремих територій, угоди щодо регіонального розвитку тощо.

Отже, пріоритетним завданням управління сталим розвитком є забезпечення гармонії між економічним розвитком, соціальною справедливістю та екологічною стійкістю, що передбачає стає і благополуччє майбутнє для всіх громадян України.

Управління сталим розвитком на мікрорівні поширює свою дію на територіальні громади, компанії, підприємства, організації, природні об'єкти, що мають визначені межі на місцевості: земельні ділянки, водні об'єкти, ділянки надр, об'єкти природно-заповідного фонду тощо. До суб'єктів, що здійснюють управління на мікрорівні, належать виконавчі структури, органи місцевого самоврядування та органи екологічного управління, системи екологічного менеджменту суб'єктів господарювання. Вони уповноважені приймати управлінські рішення, що стосуються невеликих територій, окремих природних об'єктів, компаній, підприємств, організацій. До системи місцевих органів виконавчої влади входять місцеві державні адміністрації, які в межах своїх повноважень здійснюють виконавчу владу на території відповідної адміністративно-територіальної одиниці, а також реалізують повноваження, делеговані їй відповідною радою.

Громада являє собою основне адміністративно-територіальне утворення базового рівня, що може об'єднувати одне або декілька поселень. Залежно від типу адміністративного центру, до якого вони відносяться, громади поділяються на міські, селищні та сільські. Вони мають чітко встановлені законом межі, які збігаються з межами суміжних громад. Основним ініціатором місцевого самоврядування є населення територіальної громади, тобто жителі, які проживають в місті, селі або селищі, виступають у ролі першоджерела місцевого управління

Мета сталого розвитку будь-якої територіальної громади включає наступні аспекти:

1. Забезпечення належних соціальних умов. Важливим завданням є збереження стійких та сприятливих умов для проживання, включаючи належну інфраструктуру: побутові послуги, культурно-освітні заклади, зручний транспорт, доступ до торговельної мережі тощо.

2. Підтримка розвитку підприємництва задля забезпечення спроможності територіальної громади.

3. Збереження навколишнього середовища має критичне значення для сталого розвитку громади. Дії територіальних громад повинні сприяти збереженню лісів, чистого повітря, природних джерел і річок, а також здорових ґрунтів. Найпоширенішими проблемами є незаконні сміттєзвалища, відсутність адекватної каналізації або її недостатня дієздатність, а також забруднення водойм та вирубка лісів. Ці проблеми наразі значно обмежують можливості створення прийнятних умов для життя.

Для оцінки сталого розвитку територій у світовій практиці, насамперед, використовуються індикатори якості життя, включаючи аспекти економічного, екологічного, соціально-інституційного характеру й рівень гармонізації між ними, та безпеки життя. Загальна оцінка враховує взаємодію цих показників і виражається через індекс сталого розвитку.

Концептуальні засади реалізації соціальних, економічних та екологічних аспектів сталого розвитку вбудовуються в стратегічні плани розвитку територіальної громади задля покращення якості життя населення за умови концентрації влади на базовому рівні. Основні ініціативи щодо забезпечення сталості розвитку громади належать органам місцевого самоврядування. Це наглядно демонструє формування нормативно-правового документу «Стратегія Дніпра 2030» [43]. Документ розроблений відповідно до положень статуту територіальної громади міста, а також з урахуванням оцінки результативності реалізації регіональних стратегій розвитку, визначає три основні напрями та одинадцять цілей розвитку Дніпра, відкриває нові можливості та перспективи (рис. 1.3).

Стратегія Дніпра 2030 – основний нормативно-правовий документ, який визначає довгострокові цілі та завдання розвитку міста, виступає базовим документом для визначення середньострокових цілей та завдань [43]

«Від муніципального кодексу, реальних повноважень територіальної громади до єдиної сучасної екосистеми глобального міста»

Борис Філатов, міський голова



Рисунок 1.3 – Складові стратегії розвитку міста Дніпра

На локальному рівні особливості побудови та функціонування мають системи управління сталим розвитком підприємства (організації), враховуючи той аспект, що саме виробничі підприємства, будучи складними системами, найбільш активно взаємодіють з навколишнім природним середовищем та використовують в своїй діяльності природні ресурси.

Управління системою – це процес координації функціонування її підсистем за умови узгодження цілей їх функціонування з цілями функціонування системи взагалі.

Сучасне підприємство являє собою складну, відкриту, динамічну, соціально-технічну систему, окремі частини якої – технічна база, виробнича структура, трудові та матеріальні ресурси – перебувають у постійній взаємодії та розвитку. Для досягнення мети, що стоїть перед підприємством, необхідна система управління, яка координує діяльність усіх його ланок.

Соціально-технічні системи – це системи, в яких відбувається поєднання живої праці людини із засобами виробництва, а саме засобами та предметами праці, задля виробництва продукції, виконання робіт та надання послуг. Результати діяльності таких систем мають суспільну цінність.

Відкриті системи являють собою певний вид систем, які обмінюються з навколишнім середовищем інформацією, уречевленими засобами та предметами, енергією тощо.

Для оцінювання наслідків антропогенного впливу на природні екосистеми в результаті взаємодії суспільства та навколишнього природного середовища на локальному рівні доцільно створювати моделі еколого-економічних систем, основними складовими яких є екологічна підсистема, соціум і виробництво. Дослідження взаємодії цих компонентів дозволяє розробляти практичні процедури переходу до засад сталого розвитку.

Поняття «еколого-економічна система» відкриває можливість застосування системного підходу для вивчення проблеми взаємодії між виробничим підприємством та навколишнім середовищем. Еколого-економічна система має свої власні принципи функціонування і розвитку, які необхідно враховувати при формуванні системи управління.

В рамках моделі еколого-економічної системи можна виділити різні типи взаємодії між її окремими структурними компонентами та зовнішньою середою:

- ✓ соціально-економічні взаємозв'язки, що виникають у сфері виробництва продукції, виконання робіт або надання послуг, при здійсненні економічної діяльності;
- ✓ економіко-екологічні взаємозв'язки, котрі відображають вплив довкілля на умови суспільного виробництва;
- ✓ еколого-економічні взаємозв'язки, які включають в себе різні аспекти природокористування та форми впливу виробничо-господарської діяльності на навколишнє природне середовище;
- ✓ соціально-екологічні взаємозв'язки, що обумовлюють вплив довкілля на умови життєдіяльності та здоров'я людей.

Сфера природокористування виступає основною ланкою, яка об'єднує екологічну та економічну підсистеми. Вона є основою для реалізації економічних процесів, оскільки успішна підприємницька діяльність потребує активного використання природних ресурсів. Без їх освоєння ефективні економічні процеси стають неможливими.

Еколого-економічна система являє собою відносно самостійну природно-виробничу систему. Управлінський вплив спрямований на забезпечення мінімальних витрат (матеріальних, енергетичних, тощо) за умови отримання запланованого обсягу продукції (робіт, послуг) відповідної якості, досягнення оптимальної продуктивності використання природних ресурсів і забезпечення необхідної якості довкілля. При цьому керуюча система суттєво впливає на результат діяльності об'єкта управління та величину витрат щодо досягнення цього результату, тому відіграє важливу роль у формуванні ефекту та ефективності.

Еколого-економічна складова будь-якого виробничого процесу, що впливає на навколишнє середовище, повинна бути покладена в основу нового технологічного мислення. У техніці й технології мають домінувати рішення, які базуються на переробці відходів, нейтралізації причин, що призводять до порушень природного середовища.

Вставка 1.3

Приклад впровадження нового технологічного рішення в рамках управління сталим розвитком компанії

Данський виробник іграшок Lego Group і компанія з охорони здоров'я Novo Nordisk оголосили про плани впровадження проекту заміни пластику на основі викопних речовин на матеріал, вироблений з використанням відновлюваних джерел енергії та вловленого біогенного CO₂. Стратегія сталого розвитку Lego Group орієнтована на ініціативи щодо інвестування в дослідження екологічно чистих матеріалів, щоб зменшити викиди вуглекислого газу від виробництва продукції і пакування. Проект дасть третій стійкий матеріал, разом з біополіетиленом і прототипами деталей, виготовлених з переробленого ПЕТ-пластику [75].

Стійкість трьох підсистем (екологічної, виробничої і соціальної), що формують еколого-економічну систему, не є однаковою. Найбільшою стійкістю володіє екологічна система. Коли ж вибираються пріоритетами розвитку економічні цілі, то система переходить у нестійкий стан. І лише при переході до екологічних пріоритетів розвитку і підпорядкуванні економічних цілей соціальним інтересам, ми переводимо систему в стан стійкості, тобто стійкого розвитку [14].

Управління підприємством як еколого-економічною системою являє собою систематичний вплив на техніку, технологію й організацію процесів виробництва з метою їх екологізації й погодженості з виробничими витратами для досягнення найбільшого прибутку від реалізації продукції при найменших припустимих порушеннях природного середовища. Під припустимим рівнем порушення розуміється рівень, який не впливає шкідливо на людей, тварини та рослини або дає можливість порушеним природним об'єктам само відтворюватися до первинного стану. Останні повинні враховувати можливі за прогнозом зміни показників внутрішнього середовища підприємства, на основі яких було прийнято управлінське рішення.

Висновки

- ① Сучасне трактування сталого розвитку означає сприяння не лише економічному зростанню, але й справедливому розподілу його результатів; активне відновлення навколишнього середовища та запобігання його знищенню; підвищення життєвих можливостей людей та запобігання їх збідненню. Цей підхід фокусується на членах суспільства, забезпечуючи розширення їх можливостей та активну участь у прийнятті рішень, що впливають на їхнє життя.
- ② Формування системи управління сталим розвитком повинно враховувати фундаментальні основи теорії управління. Управління може бути подане як певний тип взаємодії, що існує між суб'єктом і об'єктом управління в рамках побудованих ієрархічних структур щодо обміну інформацією за допомогою прямих і зворотних зв'язків для досягнення оптимального функціонування об'єкта загалом.
- ③ Побудова і функціонування системи управління мусять базуватися на відповідних принципах, які виступають орієнтирами формування вимог до структури системи управління загалом та основних складових механізму управління (функцій, методів, інструментів, важелів, тощо).
- ④ Система управління сталим розвитком, ґрунтуючись на певних принципах, дозволяє забезпечити цілісний та комплексний підхід до взаємодії окремих підсистем, що беруть участь в управлінських процесах, не лише на одному рівні (природне середовище – суспільство – економічна діяльність), а також між ними і підсистемами на інших рівнях – від локальних до глобальних.
- ⑤ Прийняття рішень в рамках системи управління на глобальному рівні забезпечує формування концептуального підґрунтя сталого розвитку як способу організації діяльності суспільства, що визначає його існування в довгостроковій перспективі, має на меті досягнення соціальної та економічної справедливості, збереження навколишнього середовища та відновлення використаних природних ресурсів.
- ⑥ Система управління сталим розвитком на макрорівні поширює свою дію на великомасштабні національні об'єкти, природні екосистеми, природні ресурси загальнодержавного значення, а також на охорону здоров'я населення.

- 7 На національному рівні сталий розвиток визначено як єдино можливий шлях розвитку вітчизняної економіки та суспільних інститутів, що сприятиме зростанню рівня та якості життя громадян, додержанню конституційних прав і свобод людини. Цілі сталого розвитку виступають орієнтирами для розроблення прогностичних проєктів і програмних документів, проєктів нормативно-правових актів з метою забезпечення збалансованості економічного, соціального та екологічного вимірів сталого розвитку України.
- 8 Основу систем управління сталим розвитком на національному та регіональних рівнях становить механізм управління, який ґрунтується на наступних базових блоках: законодавчому (закони та інші нормативно-правові документи); організаційному (державні урядові та неурядові організації з проблем сталого розвитку) та суспільно-громадянському (недержавні організації та інші елементи громадянського суспільства, дія яких стосується сталого розвитку).
- 9 Основні ініціативи щодо забезпечення сталості розвитку громади належать органам місцевого самоврядування. Концептуальні засади реалізації соціальних, економічних та екологічних аспектів сталого розвитку вбудовуються в стратегічні плани розвитку територіальної громади задля покращення якості життя населення за умови концентрації влади на базовому рівні. Мета сталого розвитку будь-якої територіальної громади включає наступні аспекти: забезпечення належних соціальних умов для людей, підтримка розвитку підприємництва задля забезпечення її спроможності, збереження навколишнього природного середовища.
- 10 Поняття «еколого-економічна система» відкриває можливість застосування системного підходу для вивчення проблеми взаємодії між виробничим підприємством та навколишнім середовищем. Сфера природокористування є основною ланкою, яка об'єднує екологічну та економічну підсистеми. Управлінський вплив спрямований на забезпечення мінімальних витрат (матеріальних, енергетичних, тощо) за умови отримання запланованого обсягу продукції (робіт, послуг) відповідної якості, досягнення оптимальної продуктивності використання природних ресурсів і забезпечення необхідної якості довкілля.

Додаткову інформацію з питань, викладених в цьому розділі, зацікавлений читач може знайти в літературі [1, 2, 14, 18, 18, 25, 34, 35, 44, 55, 56, 60, 84, 85].

Питання для самоконтролю і завдання

Дайте відповіді на питання та поясните їх на прикладах:

- Дайте визначення категоріальній сутності сталого розвитку.
- Охарактеризуйте трансформацію концепції сталого розвитку в сучасних умовах.
- Дайте визначення поняттю система управління та охарактеризуйте основні її елементи.
- На яких основних принципах теорії управління повинна формуватися система управління сталим розвитком?
- Надайте характеристику основним принципам системного підходу в управлінні.
- Яким вимогам мають відповідати управлінські цілі для забезпечення успішного функціонування системи управління?
- Надайте характеристику основним підходам до вимірювання сталості розвитку
- На яких рівнях формується система управління сталим розвитком? Охарактеризуйте їх.
- На якому міжнародному форумі відбулося офіційне визнання «зеленої» економіки як інструменту сприяння сталому розвитку? Які основні напрями зеленої економіки?
- Визначте чисті позитивні переваги циркулярної економіки.
- Яким чином пов'язані системи управління сталим розвитком на глобальному та національному рівнях?
- На яких базових блоках ґрунтується механізм управління сталим розвитком країни та її регіонів? Надайте їм характеристику.
- Охарактеризуйте об'єкти та суб'єкти управління сталим розвитком на мікро-рівні.
- На яких засадах формується та функціонує система управління сталим розвитком виробничого підприємства?
- Дайте визначення категорійній сутності еколого-економічної системи.

Завдання для виконання у класі

- 1 Поясніть, досягнення яких глобальних цілей сталого розвитку буде сприяти економічному зростанню та забезпечити справедливий розподіл його результатів.
- 2 Виділіть та обґрунтуйте ті глобальні цілі сталого розвитку, які спрямовані на відновлення навколишнього природного середовища та не допустять його руйнування.
- 3 Обґрунтуйте, які позитивні риси комплексного механізму державного регулювання сталого розвитку в країнах Європейського Союзу можна застосувати в Україні.
- 4 Наведіть приклад впровадження нового технологічного рішення в рамках управління сталим розвитком компанії в Україні. Обґрунтуйте, чому екологічні пріоритети розвитку організації забезпечують її стійкість.
- 5 Визначте основні засади комунікаційно-інформаційної підтримки виконання завдань сталого розвитку на прикладі певного виробничого підприємства вашого регіону.
- 6 Обґрунтуйте основні принципи забезпечення взаємодії органів місцевої влади, бізнесу та громади у вирішенні завдань досягнення ЦСР (Цілі сталого розвитку) на прикладі обраної територіальної громади.

РОЗДІЛ 2

Прийняття рішень як складова процесу управління сталим розвитком

Питання для дискусії:

Сутність прийняття рішення. Характерні риси управлінського рішення. Види управлінських рішень за класифікаційними ознаками. Ознаки ключових управлінських проблем. Вимоги до рішень при управлінні сталим розвитком. Процес розробки та прийняття рішення. Стратегічні рішення в управлінні сталим розвитком та їх особливості. Характеристики процесу формування тактичних рішень.

Ключові терміни та поняття:

- Прийняття рішень
- Управлінське рішення
- Процес прийняття рішень
- Класифікація управлінських рішень
- Рішення в процесі управління сталим розвитком
- Вимоги до рішень
- Розробка управлінського рішення
- Прийняття управлінського рішення
- Стратегія сталого розвитку
- Стратегічні управлінські рішення
- Особливості прийняття стратегічних рішень
- Тактичні управлінські рішення

2.1 Категоріально-понятійна сутність прийняття управлінських рішень

Управлінські рішення виступають найважливішою характеристикою і ключовою умовою ефективності управлінської діяльності будь-якої управлінської системи в цілому.

Кожна людина практично пізнає процес прийняття рішень, оскільки як протягом дня, так і протягом життя приймає досить велику кількість рішень. Рішення виникають як результат розумового процесу людини, що приводить до певних висновків або до необхідних кроків. Це може включати в себе відмову від дії, розробку конкретного плану дій або вибір оптимального варіанту серед різних альтернатив та його реалізацію. За своєю суттю рішення – це вибір альтернативи.

У процесі управління керівники різних рівнів відповідно до своїх функцій, обов'язків і прав щодня стикаються з необхідністю вибору з великої кількості можливих варіантів дій найкращого. Таким чином, вироблення та прийняття рішення – це вузлова процедура у діяльності будь-якого суб'єкта управління, який визначає весь подальший хід процесу управління.

Прийняття рішень – це основа процесу управління, його сполучний елемент, складова частина будь-якої управлінської функції.

Суб'єкти управління – особи, наділені правом приймати та реалізовувати рішення. Це можуть бути керівники організацій (структурних підрозділів) або колегіальні органи (дирекції, спостережні ради, правління тощо).

Управлінське рішення – це вибір, який містить відповідь на певні питання, що виникають у процесі реалізації кожної функції управління (планування, організування, мотивування, контролювання). Управляти – значить вирішувати, яким чином досягти поставленої мети.

Основним завданням управлінського рішення є забезпечення координованого впливу на об'єкт (систему) управління з метою досягнення визначених цілей.

Розглядаючи процес прийняття рішення з врахуванням психологічного аспекту, слід відзначити наступні моменти:

1) Ухвалювати рішення, як правило, порівняно легко, але важко ухвалити гарне рішення.

2) Ухвалення рішення – це психологічний процес. Поведінкою людини іноді рухає логіка, а іноколи – почуття.

Процес прийняття рішень може мати різний характер.

✓ Інтуїтивний.

Суто інтуїтивне рішення – це вибір, зроблений тільки на основі відчуття правильності саме цього вибору. Тобто зважуються всі «за» і «проти» за кожною альтернативою і обирається рішення, яке спирається на «шосте» почуття – інтуїцію.

✓ Заснований на судженнях.

Рішення, засноване на судженнях – це вибір, зумовлений знаннями та накопиченим досвідом. Обирається альтернатива, яка в минулому принесла успіх. Логіка таких рішень не очевидна, тому цей вибір іноді здається інтуїтивним.

✓ Раціональний.

Раціональне рішення, на відміну від заснованого на судженнях, не залежить від минулого досвіду та обґрунтовується за допомогою об'єктивного аналітичного процесу прийняття рішення.

Імовірність правильного вибору можна суттєво підвищити, підходячи до рішення раціонально.

Для прийняття раціонального рішення потрібна якісна інформація, котра відповідає вимогам своєчасності, достовірності, повноти тощо.

Управлінське рішення є продуктом спільної творчої діяльності, завжди має соціальний характер. Навіть тоді, коли рішення розробляється однією особою, воно піддається впливу колективного інтелекту.

Процес формування управлінських рішень вимагає високого професіоналізму та використання теоретичних напрацювань, а також практичного досвіду.

Не кожне рішення, яке приймає та втілює керівник, можна вважати управлінським. Наприклад, рішення, пов'язані з технічними аспектами діяльності компанії (організації, установи, тощо), такі як підбиття підсумків діяльності, не є за своєю суттю управлінськими.

Рішення можна визнати як управлінське, коли його розробка та реалізація спрямовані на реалізацію завдань компанії (організації, установи, тощо) в таких напрямках: створення системи корпоративного управління; розробка стратегічних планів; управління поточною господарською діяльністю; керування людськими ресурсами; управління внутрішньою та зовнішньою комунікаціями тощо.

Вставка 2.1

Класифікація управлінських рішень

Таблиця 2.1. – Класифікація управлінських рішень

Класифікаційні ознаки	Види управлінських рішень
За часом дії	<ul style="list-style-type: none"> ● перспективні (довгострокові), ● середньострокові, ● поточні (короткострокові) ● оперативні
За масштабами	<ul style="list-style-type: none"> ○ глобальні, ○ національні, ○ локальні
За характером діяльності	<ul style="list-style-type: none"> ● організаційні, ● економічні, ● політичні, ● технічні, ● екологічні, ● соціальні
За місцем дії (за рівнями управлінської ієрархії)	<ul style="list-style-type: none"> ○ на вищих рівнях, ○ на середніх рівнях, ○ на нижніх рівнях
За функціональною спрямованістю щодо	<ul style="list-style-type: none"> ● планування, ● організації, ● координації, ● контролю, ● активізації
За рівнями суспільної організації	<ul style="list-style-type: none"> ○ державні, ○ галузеві, ○ регіональні, ○ місцеві, ○ на рівні підприємств (організацій)
За управлінськими підходами	<ul style="list-style-type: none"> ● програмно-цільові, ● комплексні, ● системні
За ступенем оптимізації	<ul style="list-style-type: none"> ○ оптимальні, ○ прийнятні
За прогнозованими результатами	<ul style="list-style-type: none"> ● з певним результатом, ● з імовірнісним результатом
За методами переробки інформації:	<ul style="list-style-type: none"> ○ алгоритмічні, ○ евристичні
За числом критеріїв для обґрунтування:	<ul style="list-style-type: none"> ● однокритеріальні, ● багатокритеріальні.
За обмеженнями на ресурси	<ul style="list-style-type: none"> ○ з обмеженнями, ○ без обмежень

Прийняття управлінських рішень, як показує аналіз їх різновидів за класифікаційними ознаками, здійснюється на всіх рівнях управлінської ієрархії організації згідно з функціями, обов'язками і правами суб'єктів управління, встановленими статутами, положеннями, посадовими інструкціями і стандартами.

Ключові управлінські проблеми характеризуються наступними головними ознаками [57]:

- 1) множинністю цілей, внаслідок чого часто-густо виникає ситуація, коли неможливо прийняття рішення, що задовольняє усім цілям, тому потрібен компроміс;
- 2) невизначеністю, оскільки у більшості випадків не можна однозначно стверджувати про наслідки прийняття рішення щодо конкретної проблеми;
- 3) наявністю ризиків, позаяк кожний варіант вирішення проблеми має певний ступінь ризику, тобто ймовірність не отримати конкретний результат в частині чи в цілому;
- 4) складністю структури, тому що в багатьох випадках сутність і зміст проблеми є прихованими від того, хто має прийняти рішення, а її структура часто-густо є незрозумілою чи заплутаною;
- 5) зв'язком з іншими проблемами, оскільки як проблеми, так і відповідні їм рішення майже завжди логічно і змістовно пов'язані одне з одним;
- 6) множинністю учасників, позаяк у вирішенні проблем бере участь багато сторін, які мають різні потреби, інтереси, цілі й цінності.

В сучасних умовах об'єкти управління піддаються впливу комплексу потужних факторів зовнішнього середовища, що спричиняють значні зміни в їхньому функціонуванні, котрі відзначаються швидкістю та непередбачуваністю, створюючи в сучасному зовнішньому середовищі явище, яке одночасно виступає джерелом як загроз, так і можливостей для будь-якої організації.

Така динаміка спричиняє появу управлінських викликів, тобто виникнення суперечностей між поточним станом об'єкта управління та поставленими цілями.

Управлінське рішення при цьому набуває значущості через його спрямованість на досягнення вигоди, яка реалізується через зацікавленість тих осіб, що отримують користь від нього.

Важливим є концепція задоволення інтересів – суспільних, групових чи індивідуальних. Це пояснює, чому управлінські рішення часто стають складними завданнями, оскільки має місце неузгодження людських цінностей, цілей та інтересів, а вирішення конкретної управлінської проблеми виявляється корисним лише для певних осіб.

2.2 Прийняття рішень у процесі управління сталим розвитком

Здійснення основних функцій в процесі управління сталим розвитком та прийняття управлінських рішень впливають з мети досягнення об'єктом управління поставлених завдань.

Рішення в процесі управління сталим розвитком:

- це вибір альтернативи (найкращого варіанта, ідеї, плану, програми тощо) на підставі аналізу достовірної інформації,
- включає в себе визначення цілей діяльності та конкретну стратегію (програму) досягнення цих цілей.

В залежності від визначених задач це може:

- включати розробку ефективних стратегій (проектів, заходів) для досягнення екологічної, економічної та соціальної збалансованості в розвитку організації, міста, регіону або навіть країни;
- означати володіння концептуальними засадами та інструментами, які дозволяють інтегрувати аспекти сталого розвитку в традиційну систему управління.

Рішення в процесі управління сталим розвитком має відповідати наступним вимогам:

1. Оптимальність. Вимога оптимальності полягає у прийнятті рішень, що забезпечують максимальний ефект за мінімальних витрат. Для цього необхідно вибирати рішення з декількох варіантів, використовуючи при цьому відповідні методи та інструменти за умови всебічної обґрунтованості.

Оптимальне рішення завжди обґрунтоване та компромісне. При обґрунтуванні рішень в процесі управління сталим розвитком широко використовуються математичні методи та прогнозування на базі повної і достовірної інформації.

Кожне рішення, що стосується певного об'єкта управління, слід розглядати з позицій системного підходу та враховувати можливі наслідки управлінського рішення для всіх елементів системи. Компроміси при ухваленні рішення мають забезпечити кінцевий ефект з урахуванням економічної, екологічної та соціальної складової.

2. Законність. Рішення в процесі управління не має суперечити чинним законодавчим актам, постановам, стандартам тощо.

3. Повноваженість. Управлінське рішення має прийматися суб'єктом управління, який має на це повноваження, тобто він уповноважений видавати накази (розпорядження) з питань рішення, що приймається.

4. Узгодженість, несуперечність. Рішення в процесі управління сталим розвитком має бути узгодженим із прийнятими раніше рішеннями та не допускати різночитань, оскільки це є важливим аспектом для забезпечення впровадження єдиної стратегії управління.

5. Своєчасність. Рішення не повинно відставати від потреб і задач об'єкта управління, а також випереджати їх. Воно має бути прийняте таким чином, аби забезпечити його виконання до певного терміну. Ці терміни мають бути реальні, оскільки їх надмірне скорочення майже завжди призводить до додаткових витрат.

6. Ресурсне забезпечення. Кожне рішення в процесі управління сталим розвитком має бути забезпечене відповідними ресурсами: матеріальними, трудовими, інформаційними, фінансовими тощо. Тому при прийнятті управлінських рішень необхідний ретельний аналіз потреб у ресурсах та можливостей забезпечення ними.

7. Контрольованість виконання. Необхідно забезпечити здійснення контролю за якісно-кількісними аспектами використання ресурсів й отриманих результатів задля проведення моніторингу оцінювання та визначення ефективності.

8. Гнучкість. Можливість коригування управлінського рішення в разі виникнення змін в умовах функціонування організації є проявом адаптивності (гнучкості) рішення.

Технологія управління сталим розвитком включає наступні фази управлінського циклу:

- збір та обробка інформації;
- ухвалення управлінського рішення;
- реалізація прийнятого рішення;
- організація контролю.

Проблему в процесі управління сталим розвитком можна розглядати з позицій:

– ситуаційного підходу – як відхилення стану об'єкта управління від визначених цілей на поточний період; управлінський вплив здійснюється, зазвичай, на вхідні параметри об'єкта для нормалізації вихідних параметрів;

– процесуального підходу – як відхилення передбаченого (за прогнозом) стану об'єкта управління від цілей, визначених на поточний та майбутні періоди; управлінський вплив передбачає вжиття заходів зміни моделі поведінки та характеру діяльності об'єкта управління.

Процес розробки та прийняття рішення при управлінні сталим розвитком передбачає виконання певних дій, які можна розподілити на два блоки.

I. Розробка управлінського рішення

- Аналіз ситуації: визначення факторів, які спричинили проблему, що пов'язана з економічними, екологічними і соціальними аспектами та потребує вирішення.
- Прогнозування наслідків: оцінювання можливих наслідків в разі відкладення рішення або вибору рішення, що виходить за межі раціональних варіантів.
- Встановлення критеріїв та обмежень: формулювання критеріїв, за якими буде оцінюватися рішення, та визначення обмежень, яких треба дотримуватися.
- Залучення компетентних осіб: пошук та залучення спеціалістів і експертів відповідного профілю, які допоможуть у розробці та оцінці можливих варіантів рішень.
- Збір та аналіз інформації: пошук і обробка релевантної інформації (даних, які стосуються лише даної ситуації, стану об'єкта управління, конкретної проблеми, мети тощо) для визначення характеристик проблеми та її обмежень.
- Формулювання мети та критеріїв управління: встановлення остаточних цілей та критеріїв для оцінки ефективності рішення при управлінні сталим розвитком.

II. Прийняття управлінського рішення

- Створення формалізованої моделі: обґрунтування та побудова моделі для вибору варіанту рішення.
- Визначення альтернативних варіантів рішення: розробка різних можливих варіантів досягнення мети.
- Вибір методу, моделювання: визначення методу, який буде використовуватися для прийняття рішення, та моделювання варіантів.
- Обґрунтування обраного варіанта: викладення аргументів, що підтримують обране рішення з економічної, соціальної та екологічної позицій.
- Консультації з експертами: обговорення обраного варіанта з експертами та потенційними виконавцями.
- Організація виконання рішення: запуск процесу реалізації обраного рішення.

- Стимулювання виконавців: вибір та застосування мотиваційних важелів задля забезпечення якості виконання рішення.
- Контроль: моніторинг виконання рішення, дотримання графіка (термінів) виконання, врахування економічних, екологічних і соціальних аспектів для оцінки результатів та наслідків.
- Зворотній зв'язок та корегування: забезпечення комунікації з виконавцями рішення, можлива корекція критеріїв та обмежень, якщо потрібно.

Таким чином, процес прийняття рішень в управлінні сталим розвитком включає кроки від діагностики проблеми із визначенням взаємопов'язаних економічних, екологічних і соціальних аспектів та розробки альтернатив її вирішення до практичної реалізації розробленого рішення з подальшим його контролем і корегуванням.

2.3 Стратегічні та тактичні рішення в управлінні сталим розвитком

Рішення в управлінні сталим розвитком, що в комплексі передбачають економічне зростання, захист і збереження довкілля та соціальний захист і розвиток, в залежності від терміну їхньої дії та значимості завдань бувають стратегічними та тактичними.

Стратегічні цілі спрямовані на розв'язання перспективних великомасштабних проблем у довгостроковій перспективі. Тактичні цілі, зі свого боку, є проміжними етапами в досягненні стратегічних цілей.

Під *стратегією сталого розвитку (sustainable development strategy)* зазвичай розуміють стратегію розвитку людства, цивілізації в цілому або окремого соціуму, наприклад, країни чи регіону. Стратегію сталого розвитку можна визначити як найбільш ефективну стратегію розвитку сучасної цивілізації, яку спрямовано на максимальне задоволення природних потреб людини, що перебуває у гармонії з природою та позбавлена соціальних негараздів. Стратегія сталого розвитку передбачає стійке економічне зростання суспільства, що не зашкоджує довкіллю та узгоджене із соціальним розвитком суспільства [44].

Стратегічні рішення стосуються найбільш значущих проблем організації, регіону чи територіальної громади та завжди пов'язані з невизначеністю майбутнього, яке спричинює складність таких рішень [41].

Стратегічні управлінські рішення – являють собою комплекс планованих, координуючих, мотиваційних та контролюючих впливів на об'єкт управління з метою досягнення конкретних результатів (цілей); відображають політику та напрями сталого розвитку країни, регіону, територіальної громади, організації тощо на тривалий час. Приймаються на довгострокову (не менш, ніж 3 – 5 років) перспективу.

Прийняття стратегічних управлінських рішень здійснюється при виконанні функцій управління в умовах обмеженої інформації, відносно невизначених інформаційних джерел, з урахуванням очікуваних або передбачуваних змін (див. рис. 2.1).

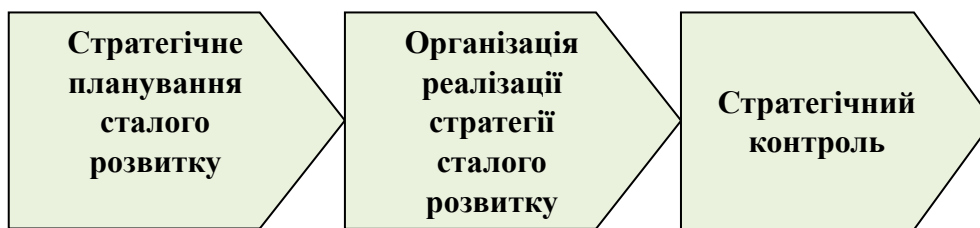


Рисунок 2.1 – Основні складові стратегічного управління сталим розвитком

Проведення процесу прийняття стратегічних рішень стосовно пошуку та вибору пріоритетних напрямків сталого розвитку має певні особливості.

- Важливим питанням в цьому процесі є забезпечення прийняття раціональних стратегічних рішень. Це є дуже важливим, оскільки очікуваний результат є величиною ймовірною, а витрати на його отримання носять реальний характер.
- У процесі прийняття стратегічних рішень неможливо діяти ізольовано, тому модель розробки та прийняття рішення носить колегіальний характер. Відбувається залучення фахівців, які допомагають у розробці рішень, формулюють критерії та межі для прийняття рішень, а також експертів, що здійснюють оцінку рішення щодо його ефективності та досягнення цілей.
- Оскільки інформація про можливі зміни стану об'єкта управління та його зовнішнього оточення може бути неповною або зовсім відсутньою, стратегічні рішення потребують ретельної підготовки. Процес розробки та ухвалення стратегічних рішень є складним і украй важливим, оскільки вони визначають засади для всіх інших рішень на різних рівнях управління сталим розвитком.

- Аби прийняти своєчасне та об'єктивне стратегічне рішення при управлінні сталим розвитком, необхідний достатній для цього обсяг економічної, екологічної, соціально-управлінської інформації. Слід зазначити, що негативний ефект може викликати, як недостатність такої інформації (прийняте рішення буде ґрунтуватися на неповній інформаційно-комунікаційній підтримці), так і надлишок (процес прийняття рішення буде ускладнений, оскільки необхідно «відсіяти» непотрібні дані).
- Для прийняття обґрунтованого стратегічного рішення система формування облікової та моніторингової інформації повинна забезпечити кожного суб'єкта управління – особу (колегіальний орган) – саме тією інформацією, яка потрібна, актуальна, в повному обсязі та у встановлений термін. Для цього необхідно передбачити достатній час як для пошуку відповідної інформації, так і її обробки та аналізу.
- На поточний момент облікові та моніторингові дані здатні відобразити лише ту інформацію, яка відноситься до минулого періоду. В сучасних умовах все більше зростає невизначеність зовнішнього середовища на підставі змін, що відбуваються на глобальному рівні, в галузях національної економіки, техніці та технології, суспільно-політичному та соціальному житті суспільства. Все це обумовлює високий рівень невизначеності і нестабільності умов функціонування об'єкта управління і створює загрозу отримання суттєвих відхилень від очікуваних результатів.
- Важливою складовою зовнішнього оточення об'єкта управління, особливо на локальному рівні, виступає формування взаємовідносин із стейкхолдерами. Саме їх підтримка прагнення організації (підприємства, компанії, територіальної громади) до визначення стратегічного напрямку сталого розвитку та розробки шляхів (завдань) досягнення сформульованої мети дуже важлива і сприяє успішній реалізації запланованого.

Прийняття рішень щодо стратегічного управління на різних рівнях, на яких формується система управління сталим розвитком (макрорівень, мезорівень, мікрорівень або локальний рівень), має враховувати відповідне законодавче підґрунтя та організаційно-методичні підходи до розробки стратегічних рішень.

Країни Європейського Союзу проявляють стабільну відданість стратегії сталого розвитку та вже досягли значних успіхів.

Відповідно до Європейської стратегії економічного розвитку «*EUROPE 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth*» (березень, 2010 р.) [67], метою якої визначено розумне, стале та всеосяжне зростання, у країнах членах ЄС були розроблені та прийняті до реалізації національні стратегії регіонального розвитку. У відповідності до них на місцевому рівні здійснено розробку стратегій розвитку конкретних регіонів та міст. В розроблених стратегічних програмах визначено не лише пріоритети розвитку щодо економічного зростання, раціонального використання ресурсів, підвищення добробуту населення та вирішення соціальних проблем певної території, але також враховано тенденції та загрози глобального розвитку.

Ще більш амбітні цілі щодо сталого розвитку містить стратегія ЄС у формі Європейської Зеленої Угоди (The European Green Deal) [68] – перетворення Європи до 2050 р. на континент із нульовим сумарним викидом парникових газів.

Вставка 2.2 **Прийняття рішень на муніципальному рівні в рамках стратегії ЄС «The European Green Deal»**

Франкфурт – один із засновників Кліматичного альянсу європейських міст (Climate Alliance of European Cities), фіналіст конкурсу «Європейська зелена столиця 2014 року» (European Green Capital 2014). Разом зі своїми партнерами місто прийняло рішення скорочувати викиди CO₂ на 10 % кожні п'ять років. У 2018 році тут запущено свій Генеральний план щодо 100 % пом'якшення наслідків зміни клімату, де головним є зобов'язання використовувати 100 % відновлюваної енергії та скоротити викиди CO₂ на 95 % до 2050 року.

Гент – перше бельгійське місто, яке підписало Угоду мерів з питань клімату та енергетики (Covenant of Mayors on climate and energy). Оновлений кліматичний план, зосереджений на соціальній кліматичній політиці, доводить реальність намірів міста для досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року.

Амстердам – для досягнення амбітних цілей щодо скорочення викидів CO₂ та поступової відмови від використання природного газу в місті створено програму «Кліматично нейтральний Амстердам до 2050 року» – дорожню карту для зменшення залежності від вугілля, нафти та газу. Ще одна велика програма спрямована на досягнення циркулярної економіки до 2050 року і включає ціль – скорочення використання ресурсів на 50 % до 2030 року.

Барселона – владою міста спільно з громадянами розроблено цілісний кліматичний план, який охоплює пом'якшення наслідків, адаптацію та стійкість, кліматичну справедливість і сприяння діям широкої громадськості. Цілі плану включають скорочення викидів парникових газів на 45 % до 2030 року та підвищення стійкості міста за рахунок збільшення кількості зелених насаджень і зменшення споживання питної води [65].

Незважаючи на велику різноманітність рішень щодо сталого розвитку, запропонованих в європейських містах, можна визначити окремі аспекти, які допоможуть муніципальним утворенням ефективно впроваджувати зміни на своїх територіях.

По-перше, ключовою є політична відданість визначеному курсу. Його ефективна реалізація можлива лише за наявності чітких політичних зобов'язань у місті.

По-друге, органи місцевого самоврядування мають унікальну можливість щодо залучення відповідних зацікавлених сторін задля розширення масштабів проектних рішень. Влада міста завжди повинна забезпечувати можливість співтворчості й співпраці з громадянами та бізнесом. Така взаємодія сприяє мотивації зміни поведінки в напрямку сталого розвитку на довготривалий період часу.

По-третє, муніципалітети мусять визначати чіткі цілі та плани дій, встановити індикатори для вимірювання прогресу, запровадити регулярний моніторинг та оцінку впливу дій і використовувати отриманий досвід для розробки нових цілей.

Кліматичні амбіції ЄС визначатимуть його політику у найближчі десятиліття. Україна має постійно аналізувати їх, аби оцінити вплив на вибудовування своєї енергетичної та кліматичної стратегії та позиції у перемовинах з ЄС. Ретельного опрацювання потребують питання участі нашої держави в європейській системі торгівлі викидами, розвитку новітніх технологій у сфері ВДЕ та водневої енергетики, впровадження механізму прикордонного вуглецевого регулювання [81].

Підписання Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом [52] має важливе значення для просування України на шляху до сталого розвитку, оскільки цей документ передбачає узгодження українського законодавства з нормативно-правовою базою ЄС практично в усіх сферах соціально-економічного розвитку, тому імплементація зобов'язань відіграє дієве значення у просуванні України до сталого розвитку.

Генеральний вектор сталого розвитку регіонів України визначено Державною стратегією регіонального розвитку на 2021 – 2027 роки, яка була розроблена відповідно до Цілей сталого розвитку України до 2030 року, затверджених Указом Президента України.

Стратегія є основним планувальним документом для реалізації секторальних стратегій розвитку, координації державної політики у різних сферах, досягнення ефективності використання державних ресурсів у територіальних громадах та регіонах в інтересах людини, єдності держави, сталого розвитку історичних населених місць та збереження традиційного характеру історичного середовища, збереження навколишнього природного середовища та сталого використання природних ресурсів для нинішнього та майбутніх поколінь українців [37].

Закони України «Про місцеве самоврядування в Україні» та «Про місцеві державні адміністрації», а також Державна стратегія регіонального розвитку на 2021 – 2027 роки – це підґрунтя для розробки стратегій регіонального розвитку, що забезпечує правомірність і узгодженість прийняття стратегічних управлінських рішень на регіональному рівні.

Вставка 2.3

Методичні аспекти розробки Стратегії регіонального розвитку Дніпропетровської області на період до 2027 року [38]

В основу методології розробки Стратегії регіонального розвитку Дніпропетровської області на період до 2027 року покладено концепцію сталого розвитку. Упровадження смарт-спеціалізації у стратегічне планування розвитку регіону здійснюється з метою забезпечення його сталого розвитку, підвищення ефективності управління інноваційними процесами, створення сприятливого середовища для інноваційної діяльності та підвищення рівня інноваційної та інвестиційної активності у регіоні. Такий підхід до розроблення регіональних стратегій є визнаним і широко апробованим у Європейському Союзі – у 12 країнах на регіональному та національному рівнях розроблено понад 120 стратегій на основі смарт-спеціалізації. Стратегія є логічним продовженням попередньої стратегії розвитку області (до 2020 року), що забезпечує спадковість стратегічного управління у регіоні.

Для визначення основних проблем розвитку області та побудови системи стратегічних цілей (пріоритетів) проведено узагальнений (на макрорівні регіону) SWOT-аналіз, використано інтегровані результати розроблення стратегій розвитку об'єднаних територіальних громад (станом на 01 вересня 2019 року в області їх було 62), у всіх укрупнених громадах проведено анкетування мешканців та підприємців (в кожній оброблено від 250 до 350 анкет), опитано понад 500 респондентів серед міського населення, проведено експертне опитування 108 осіб – спеціалістів високої кваліфікації (державні службовці, посадові особи місцевого самоврядування, лідери громадської думки), під час якого використано метод експертних оцінок.

Регулярно здійснювалось проведення обговорень (мозкових штурмів) серед членів робочої та експертних груп щодо: коректності вибору базового сценарію (з огляду на відповідність ситуації в області регіональним, національним і глобальним тенденціям розвитку); формулювання місії; стратегічного бачення; системи стратегічних цілей (пріоритетів); набору проєктів із реалізації стратегічних пріоритетів.

На різних етапах стратегічного процесу розробляються та приймаються рішення щодо сталого розвитку, реалізація яких передбачає довгострокові терміни.

Щоб забезпечити вагомість, обґрунтованість та майбутню результативність управлінських рішень, необхідно створити якісний інформаційний масив (інформаційну базу) для ухвалення рішень.

Інформаційний масив є упорядкованим зібранням різних типів інформації, яке органи управління використовують для здійснення керуючого впливу. Основна ціль створення інформаційного масиву полягає у підвищенні ефективності управління завдяки логічній систематизації інформації та її розподілу за різними рівнями управління відповідно до характеру поставлених завдань.

Розробка та прийняття стратегічних рішень щодо розвитку територіальної громади (об'єднаної територіальної громади) передбачає дотримання принципу несуперечності зі стратегіями вищого рівня: регіональною та національною.

Зміст стратегій сталого розвитку полягає в можливості передбачити тенденції розвитку територіальної соціально-економічної спільноти у взаємозв'язку із зовнішнім природним середовищем на достатньо передбачуваний період. Це виступає основою формування рішень щодо впливу на цей розвиток через систему цілей та заходів.

З огляду на те, що управлінське рішення є собою вибором, який дає відповідь на конкретні питання при здійсненні кожної з функцій управління, стратегічне планування сталого розвитку територіальної громади має визначальний характер. Саме від його обґрунтованої орієнтованості залежать подальші рішення, пов'язані з організацією провадження стратегії, розробкою мотиваційних важелів, забезпеченням моніторингу та оцінки досягнутих цілей сталого розвитку.

Стратегічне планування – це системна технологія обґрунтування та ухвалення найважливіших рішень щодо місцевого розвитку, визначення бажаного майбутнього стану території та способу його досягнення, що базується на ситуаційному аналізі зовнішнього оточення території та її внутрішнього потенціалу і полягає у формуванні узгоджених з територіальною громадою дій, на реалізації яких концентруються зусилля, ресурси основних суб'єктів місцевого розвитку [41].

У відповідності до законодавчого підґрунтя територіальні громади України мають повноваження, власні ресурси і можливість отримання зовнішніх ресурсів для планування простору та прогнозованого розвитку, тобто формування комфортного і безпечного середовища проживання мешканців громади.

Планування власного розвитку дозволяє територіальній громаді краще усвідомити його цілі, зрозуміти власні конкурентні переваги, а також небезпеки та загрози, які можуть на неї очікувати, сприяє ефективному та економічному використанню власних та зовнішніх ресурсів (фінансових, інфраструктурних, людських), впровадженню контролю за їх використанням, і, головне, – дає можливість відійти від способу «управління» методом «засипання ям» [42].

Вставка 2.4

Методичні засади підготовки Стратегії сталого розвитку
Петриківської Об'єднаної територіальної громади
на 2019 – 2027 [45].

У процесі підготовки Стратегії сталого розвитку Петриківської Об'єднаної територіальної громади на 2019 – 2027 роки застосовано методичку Партисипативної моделі стратегічного планування Фонду розвитку місцевої демократії (FRDL), що містить наступні принципи:

- залучення до роботи над стратегічним документом широкого представництва місцевого середовища (представників найважливіших установ, громадських організації, місцевих лідерів);
- прийняття перспективи сталого розвитку: аналітичні дослідження і рішення, які ухвалюються під час розробки стратегічних розв'язків, охоплюють чотири сфери – економічну, соціальну, екологічну та інфраструктурну;
- підготовку звіту про стан громади на основі аналізу наявних даних;
- проведення поглибленого соціального аналізу (що охоплює проведення соціологічних досліджень на репрезентативній вибірці мешканців стосовно громадської думки про умови життя і якість публічних послуг у громаді);
- перевірку напрацьованих рішень у ході реальних і ефективних громадських консультацій;
- врахування думки більшості мешканців під час вибору пріоритетів розвитку (соціологічні дослідження і консультації);
- тісну співпрацю між суспільними та інституціональними зацікавленими сторонами, працівниками органу місцевого самоврядування і консультантами під час опрацювання документів.

Бачення розвитку громади Петриківської ОТГ

(сформована в процесі партисипативного стратегічного планування)

Петриківська ОТГ – це всевітньо впізнаваний бренд високої якості життя, створений її мешканцями на основі місцевих козацьких традицій, які ґрунтуються на цінностях та моралі, виражених у різних видах мистецтва. Це місце, де у інноваційний спосіб поєднуються культура, історія, мистецтво, що веде до розвитку талантів, де можна жити у гармонії з природою, розвиваючи підприємництво, туризм, сільське господарство, інфраструктуру. Тут найважливішим є людина!

В сучасних умовах важливим є орієнтація бізнесу відповідно до стратегічного бачення національного уряду і місцевої влади в досягненні Цілей сталого розвитку, визначених в Національній доповіді «Цілі сталого розвитку: Україна» [31]. Саме цьому сприяє процес планування сталого розвитку на всіх рівнях: національному, галузевому, регіональному та місцевому.

Спільний інтерес і партнерство бізнесу, публічних інституцій (державної влади і місцевого самоврядування) та громадянського суспільства можуть забезпечити синергію в досягненні ЦСР (табл. 2.2) [20].

Таблиця 2.2 – Переваги залучення бізнесу до досягнення ЦСР [20]

Суспільні переваги в залученні бізнесу до досягнення ЦСР	Переваги для бізнесу від залучення до досягнення ЦСР
<p>1. Використання суттєвого впливу бізнесу на забезпечення економічного зростання, підвищення продуктивності праці та створення робочих місць – основних двигунів прогресу.</p> <p>2. Доступ до інновацій приватного сектора щодо технологій, продуктів, послуг, процесів та бізнес-моделей.</p> <p>3. Створення можливостей для досягнення масштабу за рахунок використання знань компаній щодо розробки бізнес-моделей для задоволення конкретних потреб клієнтів шляхом масштабування.</p> <p>4. Поєднання інвестицій державного сектора в рамках державної допомоги з корпоративними благодійними, соціальними чи комерційними інвестиціями бізнесу.</p> <p>5. Доступ до додаткових ноу-хау та навичок.</p> <p>6. Створення альянсів для сприяння відповідальній соціальній та екологічній практиці, а також розповсюдження більш широких цінностей і норм, а саме забезпечення захисту і поваги до прав людини, ефективного управління та підзвітності, а також посилення інтеграції та рівності.</p>	<p>1. Забезпечення довгострокового процвітання бізнесу за рахунок поліпшення стану навколишнього середовища та екосистем у сферах діяльності підприємств.</p> <p>2. Визначення та ефективне управління матеріальними ризиками та витратами.</p> <p>3. Створення репутації, стратегічне позиціонування на ринку та забезпечення так званої ліцензії на діяльність на відповідному ринку (створення владою сприятливого клімату для розвитку бізнесу на певній території).</p> <p>4. Зміцнення відносин з працівниками, споживачами та іншими зацікавленими сторонами на основі спільних цінностей і прагнень.</p> <p>5. Створення або спрощення доступу до нових ринків. Інновації технологій, продуктів, послуг та бізнес-моделей, які сприяють досягненню ЦСР, разом з іншим, забезпечують для бізнесу можливість отримати доступ до нових ринків та сприяють зростанню існуючих ринків за рахунок зміцнення конкурентоспроможності компаній.</p> <p>6. Вирівнювання ділової активності з баченням лідерства компанії та очікуванням своїх співробітників, споживачів і клієнтів.</p>

При прийнятті рішень щодо розвитку українських підприємств (організацій) слід знаходити рівновагу між бажанням досягти максимального прибутку та відповідальністю за внесок у соціальний розвиток території й покращення якості життя населення. Врахування бізнес-сектором досягнення ЦСР відкриває перед компаніями нові перспективи для майбутнього зростання та зміцнення їх корпоративної стійкості.

З точки зору стратегічного управління, підприємницька структура (компанія, підприємство) має фокусуватися не стільки на досягненні високих кількісних показників (наприклад, прибутку, ринкової частки і т.д.), скільки на забезпеченні їхнього високого потенціалу в майбутньому. Саме тому все більше акцентується уваги на важливості прийняття стратегічних рішень щодо розвитку підприємства.

Важливим є інкорпорація цілей і заходів щодо досягнення ЦСР у довгострокові бізнес-стратегії компаній. Зазначене завдання є складнішим та потребує пріоритезації проєктів, зокрема інвестиційних, що плануються для реалізації у середньо- та довгостроковій перспективі, відповідно до критеріїв, що відображають їх відповідність принципам ЦСР. Пріоритезація проєктів має здійснюватися таким чином, щоб забезпечити синергію між комерційним успіхом та соціальними й екологічними наслідками діяльності бізнесу [20].

Зовнішнє середовище організацій характеризується як складне, нестабільне, рухливе. Бізнес-середовище містить взаємозалежні чинники, має обмежену передбачуваність. Зовнішнє оточення може приймати три стани: сприятливий, нейтральний та агресивний. Варто відзначити, що для українських підприємств (організацій) зовнішнє середовище переважно має агресивний характер. Прийняти рішення для досягнення стабільності функціонування та подальшого розвитку підприємства у такому середовищі дуже складно.

Суб'єкти підприємницької діяльності сфери виробництва відіграють важливу роль у соціально-економічному розвитку країни, регіону, громади, забезпечуючи зайнятість населення та насичення ринку різноманітними товарами і послугами для задоволення суспільних потреб. Однак саме зростання обсягів промислового виробництва посилює техногенне навантаження на навколишнє природне середовище, сприяє появі екологічних проблем, які несуть загрози умовам життєдіяльності населення, формуючи гуманітарні проблеми. Тому успішне господарювання суб'єктів бізнесу потребує узгодженості їх економічної результативності, екологічної безпеки та соціальної відповідальності діяльності, тобто збалансованості економічної, екологічної та соціальної сфер, що відповідає засадам сталого розвитку [87].

Підприємства, які прагнуть до багаторічного успіху як на національному, так і на міжнародному рівні, приділяють значну увагу забезпеченню прийняття раціональних стратегічних рішень при управлінні сталим розвитком. Особливо це стосується виробничих підприємств, які при здійсненні виробничих процесів не тільки активно впливають на навколишнє природне середовище, а і використовують природні ресурси, насамперед, мінеральні.

Вставка 2.5

Стратегічні рішення компанії Ferrexpo

Для залізорудної компанії з виробництва залізорудних окатишів Ferrexpo поняття «відповідальне ведення бізнесу» означає діяльність, метою якої є забезпечення розвитку надійного і сталого бізнесу в інтересах усіх зацікавлених сторін: співробітників, членів місцевих громад, інвесторів та урядів країн фактичної присутності Ferrexpo. Компанія розуміє, що майбутнє світової спільноти вимагає змін у методах охорони навколишнього середовища. Це особливо важливо для компаній із ланцюга створення вартості у металургії, оскільки виробництво сталі є причиною 7 % глобальних прямих викидів парникових газів і, отже, є одним секторів з найбільшим обсягом викидів.

Вуглецевий слід Ferrexpo пов'язаний з трьома ключовими видами діяльності, а саме споживанням: дизельного палива на видобувних виробничих процесах (Score 1); електроенергії – на переробних процесах (Score 2), природного газу в пелетизаторі (Score 1).

Score 1 охоплює прямі викиди парникових газів, Score 2 – непрямі викиди, що пов'язані з придбанням електроенергії, Score 3 – викиди, які не контролює компанія, але на які опосередковано впливає у своєму ланцюжку створення вартості [71].

Компанії вже вдалося у 2022 році знизити викиди на 31 % від рівня 2019 року. Ferrexpo запустила комплекс сонячних батарей потужністю 5 МВт без "зеленого" тарифу на діючому промисловому майданчику Полтавського гірничо-збагачувального комбінату (ПГЗК).

Стратегічним рішенням компанії є намір досягти чистих нульових викидів у Score 1 та 2 до 2050 року та скоротити викиди в Score 3 на 50 % за цей період. Ferrexpo розглядає впровадження низки технологій декарбонізації, зокрема: технології акумуляторів у кар'єрних вантажівках; "зелений" водень у пелетизаторах; будівництво об'єктів відновлюваної енергетики [70].

Ефективне управління сталим розвитком організації, яке включає стратегічні, тактичні та оперативні завдання, може бути успішно реалізоване лише за допомогою дієвої інформаційної системи управління. Ця система ґрунтується на застосуванні сучасних програмних інтерфейсів, економіко-математичних методів та моделей, засобів об'єктно-орієнтованого програмування, а також новітніх засобів обчислювальної техніки та засобів зв'язку.

З метою втілення конкретного стратегічного плану (завдання) розробляються тактичні управлінські рішення. Залежно від тривалості їх дії вони можуть розроблятися на місяць, квартал або бути щорічними. Аби успішно реалізувати стратегію сталого розвитку об'єкта управління, такі рішення повинні прийматися регулярно. Інформаційною базою для формування тактичного рішення є дані оперативного управлінського обліку.

Тактичні управлінські рішення містять реалізацію функцій оперативного управління сталим розвитком та передбачають вирішення короткострокових завдань (місяць, квартал, рік).

Тактичні рішення, тобто ті, що стосуються поточної діяльності, приймаються без спеціальної обробки альтернатив, залучення фахівців чи експертів, оскільки рівень невизначеності тут мінімальний.

➤ *Приклад.* В рамках стратегічного плану впровадження сучасних цифрових технологій в систему управління містом з метою перетворення його на більш економічно ефективно та екологічно стійке прийнято рішення щодо використання певних технічних засобів. Датчики, вбудовані в будівлі та інфраструктурні мережі, сприяють використанню ВДЕ або дозволяють заощадити електроенергію (вмикання вуличних ліхтарів здійснюється лише у присутності об'єкта на дорозі). Датчики, smart-карти та цифрові камери подають дані в режимі реального часу в інтегровані системи управління, а великі дані (Big data) та аналітичні технології можуть слугувати інформацією для прийняття рішень та покращувати управління містом [81].

Висновки

- 1 Сутністю управлінського рішення є вибір, який містить відповідь на певні питання, що виникають у процесі реалізації кожної функції управління (планування, організування, мотивування, контролювання). Приймати рішення в процесі управління – значить вирішувати, яким чином досягти поставленої мети.
- 2 Імовірність правильного вибору можна суттєво підвищити, підходячи до прийняття рішення раціонально. Для цього потрібна якісна інформація, яка відповідає вимогам своєчасності, достовірності, повноти, комплексності тощо.
- 3 Рішення в процесі управління сталим розвитком має відповідати вимогам оптимальності, законності, повноважності, узгодженості й несуперечності, своєчасності, ресурсного забезпечення та контрольованості виконання.
- 4 В управлінні сталим розвитком процес прийняття рішень включає певну послідовність дій від діагностики проблеми із визначенням взаємопов'язаних економічних, екологічних і соціальних аспектів та розробки альтернатив її вирішення до практичної реалізації розробленого рішення з подальшим його контролем, аналізом і корегуванням.
- 5 Стратегічні рішення в управлінні сталим розвитком – це комплекс планованих, координуючих, мотиваційних та контролюючих впливів на об'єкт управління з метою досягнення конкретних результатів (цілей), які відображають політику та напрями сталого розвитку країни, регіону, територіальної громади, організації, тощо на довгострокову перспективу.
- 6 Основними складовими стратегічного управління сталим розвитком об'єкта управління є процеси стратегічного планування, організації реалізації стратегії сталого розвитку, стратегічного контролю (моніторингу та аналізу).
- 7 Прийняття рішень щодо стратегічного управління на різних рівнях, на яких формується система управління сталим розвитком (макрорівень, мезорівень, мікрорівень або локальний рівень), має враховувати відповідне законодавче підґрунтя та організаційно-методичні підходи до розробки стратегічних рішень.

- 8 Стратегічний план сприяє: встановленню пріоритетів щодо розвитку регіону, територіальної громади, організації; виявленню ключових організаційних проблем; формуванню команди виконавців та експертів; створенню систематизованої та обґрунтованої інформаційної бази для прийняття рішень; дієвому функціонуванню в змінному середовищі; забезпеченню неперервного організаційного контролю (моніторингу); оцінці ефективності використання ресурсів; визначенню доцільності прийнятих рішень у контексті майбутніх змін.
- 9 Європейський підхід до розроблення національних та регіональних стратегій визначає метою розумне, стає та всеосяжне зростання, базується на упровадженні смарт-спеціалізації у стратегічне планування з метою забезпечення сталого розвитку регіону; підвищення ефективності управління інноваційними процесами; створення сприятливого середовища для інноваційної діяльності; підвищення рівня інноваційної та інвестиційної активності регіону.
- 6 Тактичні управлінські рішення розробляються з метою втілення конкретного стратегічного плану сталого розвитку, містять реалізацію функцій оперативного управління та передбачають вирішення короткострокових завдань (місяць, квартал, рік).

Додаткову інформацію за питаннями, викладеними в цьому розділі зацікавлений читач може знайти в літературі [2, 8, 20, 29, 31, 36, 37, 41, 42, 44, 46, 47, 50, 57, 65, 70, 81, 87].

Питання для самоконтролю і завдання

Дайте відповіді на питання та поясніть їх на прикладах:

- Визначте поняття «прийняття рішення».
- Охарактеризуйте особливості розробки та прийняття раціонального рішення.
- Чому управлінське рішення має соціальний характер?
- Наведіть приклади, які рішення можна визнати як управлінські?
- Надайте характеристику видам управлінських рішень за характером діяльності.
- Якими головними ознаками характеризуються ключові управлінські проблеми?
- В чому особливості рішень в процесі управління сталим розвитком?
- Яким вимогам має відповідати рішення в процесі управління сталим розвитком? Охарактеризуйте їх.
- Які дії виконуються в процесі розробки управлінського рішення? Охарактеризуйте їх.
- Надайте характеристику діям, що виконуються в процесі прийняття управлінського рішення.
- Визначте, що уявляє собою релевантна інформація.
- Дайте визначення поняттю «стратегічні управлінські рішення».
- З яких складових формується стратегічне управління сталим розвитком? Надайте їм характеристику.
- Охарактеризуйте особливості розробки та прийняття рішень щодо стратегічного управління на макрорівні.
- Дотримання якого принципу передбачає розробка та прийняття стратегічних рішень щодо розвитку територіальної громади (об'єднаної територіальної громади)?
- Надайте характеристику інформаційному масиву (інформаційній базі) для ухвалення рішень.
- Визначте особливості формування тактичних управлінських рішень.

Завдання для виконання у класі

❶ Поясніть, що являє собою смарт-спеціалізація міста (регіону). Обґрунтуйте, чому рішення з упровадження смарт-спеціалізації доцільно приймати при розробці регіональної стратегії? Наведіть приклади.

❷ Наведіть приклад інкорпорації цілей і заходів щодо досягнення ЦСР у довгострокову бізнес-стратегію будь-якої компанії. Обґрунтуйте, які чинники визначили прийняття такого рішення.

❸ Проаналізуйте фактори, які суттєвим чином вплинули на процес прийняття стратегічних рішень стосовно пошуку та вибору пріоритетних напрямків сталого розвитку обраної територіальної громади.

❹ Дослідіть з використанням яких методичних засад, була розроблена стратегія розвитку обраного регіону України. Які прийнято рішення для реалізації розробленої стратегії?

❺ Які рішення, що були прийняті у європейських містах щодо забезпечення сталого розвитку, можна порекомендувати до розробки та провадження у Вашому населеному пункті? Відповідь обґрунтуйте.

❻ Наведіть приклад відповідального ведення бізнесу промисловим підприємством у Вашому місті (області). Які стратегічні та тактичні управлінські рішення були прийняті задля цього?

РОЗДІЛ 3

Системний підхід в процесах прийняття рішень

Питання для дискусії:

Особливості системного підходу. Елементи задачі прийняття рішень. Етапи процесу прийняття рішень. Визначення цілей. Генерування альтернатив. Критерії прийняття рішень. Специфіка визначення критеріїв. Невизначеність у процесах прийняття рішень.

Ключові терміни та поняття:

- Система
- Мета функціонування системи
- Системний підхід
- Особа, що приймає рішення
- Альтернативи
- Результат прийняття рішень
- Критерій
- Модель прийняття рішень
- Класифікація моделей
- Методи прийняття рішень

3.1 Основні принципи системного підходу

Системний підхід являє собою методологію, яка застосовується у багатьох науках і прикладних дослідженнях і полягає в тому, що об'єкт, який досліджується, розглядають як систему, враховуючи сукупність пов'язаних із нею зв'язків і застосовуючи для її дослідження методи різних наук.

Цей підхід передбачає аналіз проблеми у її взаємозв'язку із іншими системами і проблемами, що є надзвичайно важливим для прийняття рішень. Його переваги стають особливо суттєвими при аналізі складних систем, що характеризуються наявністю великої кількості елементів, складними зв'язками між елементами і з зовнішнім середовищем. Крім того, іноді причина проблеми може знаходитися поза системою і тоді рішення, прийняті на основі аналізу лише досліджуваної системи, можуть виявитися неефективними.

Система являє собою сукупність елементів, які пов'язані між собою певними зв'язками (механічними, енергетичними, інформаційними та ін.), взаємодіють між собою, і функціонують для досягнення певної мети.

Розглянемо основні принципи системного підходу.

➤ **Цілісність.** Кожен об'єкт (або процес) розглядається як система. Тобто необхідно виділити його з середовища, визначити межі системи, встановити, які елементи будуть включені у систему, а які ні. Визначення меж системи залежить від задачі, яка досліджується.

Важливими властивостями кожної з систем є емерджентність і синергія.

Це означає, що системі притаманні властивості, яких не мають її елементи, і ефективність функціонування системи є вищою, ніж сумарна ефективність її складових. Отже, досліджуючи окремі компоненти системи, не можна зробити висновок про її функціонування.

Прикладами можуть служити ситуації, коли окремі компоненти системи функціонують коректно, але через неправильні зв'язки між ними результат залишає бажати кращого. Кожен відділ в компанії може ефективно виконувати свої обов'язки, але якщо взаємодія між ними та управлінням не оптимізована, загальний результат може бути недосяжним. При проєктуванні будинку необхідно враховувати взаємозв'язки між всіма його елементами. Наприклад, параметри фундаменту потрібно обчислювати враховуючи висоту та матеріал стін і стелі. Також проведення комунікацій мусить бути узгодженим із загальним планом будинку. Не можна проєктувати будинок за його окремими частинами, не враховуючи їх взаємозв'язку.

➤ **Взаємозв'язок.** Системи взаємодіють між собою і зміни в одній з них викликають зміни в інших. Системний підхід передбачає дослідження різних аспектів проблеми як взаємопов'язаних складових однієї системи. Це дозволяє враховувати потенційні впливи кожного рішення на всі аспекти функціонування системи, забезпечуючи балансований підхід.

➤ **Цілеспрямованість.** Системний підхід починається із аналізу мети. А вже потім з неї виводиться функція. При розгляді проблеми прийняття рішень це означає, що одна і та сама ситуація може породжувати різні рішення, залежно від мети. Розглянемо просту проблему вибору маршруту аби дістатися з одного міста до іншого. Результат рішення може бути різним залежно від того що є метою: дістатися за найменший час, мінімізувати витрати на транспортування, побачити пам'ятки архітектури, здійснити прогулянку на природі, та ін.

Іншою особливістю системного підходу є **врахування довгострокових наслідків**. Він вимагає, замість фокусу на короткострокових вигодах, брати до уваги потенційні позитивні та негативні впливи на екологію, соціальну справедливість, економіку тощо і в довгостроковій перспективі також, що є особливо важливим з огляду на завдання і цілі сталого розвитку.

Крім того, для кожного рішення ми маємо врахувати його вплив на всі системи і учасників, які задіяні у його реалізації. Порушення цього принципу може призвести до того, що воно не буде реалізовано через протидію учасників процесу, інтереси яких порушені. Відомо багато прикладів, коли неврахування інтересів спільноти спричинило широкі соціальні протести, що призводило до відміни або корегування прийнятого рішення.

Отже, при прийнятті рішень слід враховувати, що у розв'язанні проблем сталого розвитку задіяно різні зацікавлені сторони: громади, бізнес, уряди, науковці тощо. Системний підхід вимагає зважати на цю різноманітність інтересів і це забезпечує більш ефективні рішення. Крім того, необхідно мати на увазі, що рішення можуть підсилювати одне одне.

Проблеми, які виникають у сучасному суспільстві, такі як зміни клімату, виснаження ресурсів, соціальні нерівності, потребують комплексних підходів для їх розв'язання. Зараз майже всі сфери суспільства взаємодіють на глобальному рівні. Системний підхід допомагає розглядати ці проблеми в контексті взаємодій між різними аспектами та сторонами, зрозуміти та врахувати взаємозв'язки між різними країнами, регіонами та галузями, що сприяє вирішенню глобальних викликів.

Завдяки розвитку технологій та аналітики зараз ми маємо доступ до великої кількості даних і засобів для аналізу. Системний підхід забезпечує використання цих ресурсів, методів математичного та імітаційного моделювання, сценарного аналізу для кращого розуміння складних систем й прийняття обґрунтованих рішень.

Вставка 3.1

Наведемо кілька прикладів, коли неврахування зв'язків із іншими системами та інтересів стейкхолдерів призвело до неефективності і проблем із реалізацією рішень

➤ Під час будівництва автомагістралі у Бразилії прокладання траси передбачало проходження через ліси, які є домівками для численних видів рослин і тварин, а також традиційними територіями місцевих корінних народів. В результаті уряд стикнувся із супротивом корінних народів та екологічних активістів, які організували несанкціоновані блокади будівельних робіт. Після того, як уряд вирішив продовжити будівництво, це спричинило масові протести як самих корінних народів, так і активістів з питань природоохорони. Руйнування лісових екосистем під час спорудження автомагістралі призвело до загострення проблем екології та втрати біорізноманіття. Місцеві корінні народи втратили доступ до своїх традиційних територій, що викликало соціальні конфлікти та погіршило їхні умови життя. Ця ситуація також привернула увагу міжнародних організацій та спровокувала міжнародний тиск на уряд Бразилії стосовно збереження природи та прав корінних народів [24].

➤ У 2019 році в Гонконзі розпочалися широкомасштабні акції протесту проти пропонованого законопроєкту щодо екстрадиції, який дозволяв б вивозити підозрюваних та засуджених осіб для судового розгляду на материковий Китай. Учасники протестів вважали, що такий закон може порушити права громадян та створити загрозу їхній особистій безпеці. Внаслідок масових акцій протесту, тиску громадськості та міжнародного висвітлення ситуації було досягнуто тимчасового призупинення розгляду цього законопроєкту⁶.

➤ Місцева влада прийняла рішення про використання території громадського парку для будівництва нового торгового центру. Проте рішення було прийнято без консультації з місцевими мешканцями та екологічними групами. Це призвело до протестів і судових справ. Приклади таких ситуацій досить поширені [32, 39, 53, 63].

➤ Якщо реструктуризація компанії відбувається без врахування інтересів робітників, то це призводить до масових протестів, страйків і судових позовів, що завдають збитків репутації та втрат фінансових ресурсів [4, 11, 21].

⁶ за матеріалами вікіпедії <https://cutt.ly/Cwk6laJe>

3.2 Задачі прийняття рішень та їхня класифікація

Прийняття рішень в роботі і в повсякденному житті є необхідністю, яку ми відчуваємо щодня. Цей процес, що визначає наше існування, іноді не помітний. Буває і навпаки, коли прийняття рішення вимагає часу, серйозного аналізу, збору інформації і великої обміркованості.

Коли ж мова йде про сучасні підприємства, організації, спільноти людей потрібно зважати на все більшу кількість факторів різної природи, які є предметом досліджень різних галузей знань, обробляти велику кількість даних та інформації. Крім того, іноді аби зрозуміти проблему потрібно розглянути її у взаємозв'язку із іншими, оскільки певні процеси відбуваються у національному та світовому масштабах.

В умовах необхідності врахування багатьох зовнішніх факторів, внутрішніх потужностей і зв'язків між складовими досліджуваних об'єктів особистого досвіду та інженерної інтуїції може бути недостатньо для знаходження ефективного рішення. Тоді доцільним є колективний підхід до прийняття рішень, коли у формуванні та аналізі моделі прийняття рішень беруть участь колективи розробників, що включають фахівців з різних галузей знань. Вони спільно аналізують ситуацію і взаємодіють між собою для вироблення оптимальних рішень, котрі враховували би всі аспекти сталого розвитку.

У світі, де завдання стають більш складними і інтерконектованими з ростом цивілізації, важливо розуміти, що ціна хибного рішення також зростає і може бути надзвичайно високою та негативно вплинути на сталий розвиток. Крім того реальні ситуації часто вимагають швидкого реагування. Тому, коли неможливо знайти найкраще рішення у прийнятний час, варто ухвалити «достатньо хороше» замість нескінченного пошуку ідеального варіанта, який може вже не бути актуальним. А це означає, що діяти доводиться в умовах неповної та неточної інформації.

З метою забезпечення ефективного прийняття рішень в умовах дефіциту часу та інформації, корисно використовувати комбінацію кількісних і якісних методів системного аналізу. Це дозволяє поставити завдання, виокремити ключові фактори і зв'язки між ними, а також отримати прийнятне рішення, засноване на об'єктивних даних.

Отже, системний підхід є незамінним інструментом для аналізу та розв'язання проблем прийняття рішень у складних ситуаціях, коли вибір альтернативи потребує аналізу складної, часом не повної інформації, особливо в контексті сталого розвитку, коли потрібно враховувати безліч факторів та забезпечити сталу реалізацію.

Вставка 3.2

Задача прийняття рішень

Розглянемо таку ситуацію. Перед нами поставлена задача дістатися (або доставити певний вантаж) з пункту А до пункту В. Наприклад, потрібно дістатися з дому до університету на заняття.

Це можна описати у такий спосіб:

Мета: дістатися з пункту А у пункт В.

Засоби: будь-які маршрути та транспортні можливості (громадський транспорт, власний транспорт, таксі, пішки, велосипед ...)

Необхідно забезпечити реалізацію цілі.

Якщо немає ніяких інших вимог, то загалом немає і задачі, оскільки можна взяти будь-який транспорт і обрати будь-який маршрут. Це не буде мати значення.

Аби виникла задача необхідно, щоб були поставлені вимоги стосовно досягнення мети. У цій задачі може бути, наприклад, вимога встигнути перемістися за певний час, або бути у кінцевому пункті у певний час, або витрати найменшу кількість грошей. Не всі умови, ми можемо оцінити кількісно, приміром, найбільш мальовничий маршрут, найбільш безпечний спосіб, приємне товариство і т.ін.

Крім того, можуть бути задані також і певні обмеження, найбільш поширеними є обмеження за часом і вартістю.

Коли відомі такі складові, то вже виникає задача прийняття рішень, оскільки кожен маршрут і транспорт має свої характеристики. Для маршруту, приміром, це довжина, якість покриття, безпека, знову ж таки мальовничий краєвид, або просто приємні спогади. Транспортні засоби також бувають різними за швидкістю, комфортом, вантажністю та іншими технологічними властивостями (якщо ми говоримо про перевезення). Може виявитися, що швидше буде їхати довшим маршрутом, але із якісним покриттям дороги, ніж коротким із вибоїнами та горбами, або скористатися для перевезення більш дорогим рефрижератором, ніж вантажівкою, якщо мова йде про продукт, що швидко псується.

Отже, проблема прийняття рішень виникає коли ми маємо певні критерії, вимоги, обмеження, які в тому числі можуть змінюватись і бути невизначеними.

Розглянемо деякі задачі, метою яких є прийняття рішень.

➤ Муніципалітет має вирішити, які заходи необхідно впровадити в першу чергу для зниження викидів CO₂ та поліпшення стану довкілля у місті. До розгляду пропонуються перелічені нижче варіанти.

- Розвиток громадського транспорту, запровадження нових його маршрутів та модернізація існуючих, заміна старих транспортних засобів на сучасні екологічні з метою зниження використання приватних автомобілів та викидів CO₂.
- Підтримка розвитку екологічних технологій та впровадження екологічних стандартів для підприємств та промислових комплексів у місті.
- Побудова нових зелених зон, парків, скверів та використання зелених дахів для зменшення ефекту "острова тепла" та збереження біорізноманіття.
- Запровадження системи сортування відходів та підтримка рециклінгових програм для зменшення кількості відходів на смітниках.
- Підтримка встановлення сонячних панелей, вітрогенераторів та інших альтернативних джерел енергії для забезпечення частини електроенергії міста.
- Запровадження стандартів зеленого будівництва для нових будівель та модернізація існуючих з метою зменшення споживання енергії та ефективного використання ресурсів.

➤ Вибір енергетичного джерела. Муніципалітет повинен вирішити, яке енергетичне джерело буде використовувати для постачання електроенергії місту. До розгляду взято такі варіанти: вугілля, нафта, газ, вітроенергія, сонячна енергія, гідроенергія тощо. Необхідно здійснити вибір, враховуючи вплив кожної альтернативи на забруднення, надійність постачання та вартість електроенергії.

➤ *Поліпшення системи управління відходами.* Підприємство повинно вибрати оптимальний спосіб управління відходами з метою зниження впливу на довкілля. Запропоновано розглянути різні можливості, такі як переробка, рециклінг, компостування тощо, та оцінити ефективність кожного варіанту.

➤ *Вибір зеленої ініціативи для підприємства.* Компанія має вирішити, яку зелену ініціативу впровадити для зменшення впливу своєї діяльності на довкілля. Серед альтернатив можна розглянути зменшення використання пластику, впровадження енергоефективних технологій, стимулювання використання громадського транспорту тощо. Необхідно врахувати позитивний вплив на навколишнє середовище та вартість впровадження ініціативи.

- *Розвиток сталого туризму в регіоні.* Місцеві організації та влада планують розвивати туризм у регіоні, зберігаючи природні ресурси та культурну спадщину. необхідно обрати варіанти, враховуючи різні аспекти, такі як екологічні стандарти, утримання традиційних громад та популяризація екологічних маршрутів.
- На підприємстві звільнилася посада головного інженера. Директор має призначити нового керівника, здійснивши вибір одного з можливих претендентів на цю посаду і враховуючи при цьому дані про їхню освіту, професіоналізм, досвід роботи, авторитет у колективі, вік, комунікабельність, стан здоров'я та інші чинники, кожен з яких до того ж має різну значимість при виборі.
- Існує група підприємств, які спеціалізуються на однотипній продукції та доставляють її споживачам, які розташовані у даному регіоні. Відомо обсяг продукції, який виробляють на кожному підприємстві й потреби кожного пункту споживання. Необхідно так організувати доставку продукції, щоб мінімізувати витрати на пробіг транспорту й перевезення вантажу.
- Припустимо, що на підприємстві існує можливість задіяти для перевезення вантажів кілька видів транспорту. Необхідно здійснити розподіл продукції за видами транспорту і маршрутами, щоб мінімізувати вартість доставки продукції та задовольнити потреби всіх споживачів.
- Сільськогосподарському підприємству необхідно відвантажити певний обсяг продукції протягом даного терміну, забезпечивши виконання вимог до якості та складу сировини, до сівозміни, завантаження обладнання та мінімальних сумарні витрат. Ця задача включає в себе такі підзадачі: планування вироблення продукції (площі які будуть задіяні під вирощування різних культур), забезпечення агротехнічних вимог, планування завантаженості устаткування; оптимізація перевезень та ін.
- *Розробка плану будівництва лікарні з метою якнайшвидшого введення її в експлуатацію.*
- *Вибір місця розташування сонячної електростанції, що обслуговує певний регіон, з огляду на мінімізацію витрат на постачання енергії споживачам і з урахуванням соціальних, екологічних та економічних вимог.*
- *Визначення оптимального плану використання різноманітних ресурсів.*
- *Планування видобувних робіт й управління ними в режимі усереднення.* Задачу даного типу можна сформулювати у такий спосіб. Корисні копалини, які видобуваються на окремих дільницях гірничого підприємства, мають різний вміст корисних і шкідливих компонентів, у той час як переробні підприємства (збагачувальні фабрики, металургійні заводи, електростанції) висувають до якості сировини досить жорсткі вимоги. Отже, необхідно спланувати видобуток корисної копалини на кожній дільниці таким чином, щоб загальний показник якості продукції відповідав вимогам споживачів, а виробничий процес був найбільш ефективним.

- Розподілити завдання серед ділянок підприємства із урахуванням плану випуску продукції, пропускної здатності транспортних колій, потужності кожної з ділянок, необхідності проведення ремонтних і підготовчих робіт.
- Визначити план підвозу на підприємство сировини від різних постачальників, виконання якого забезпечить мінімальну вартість перевезень, безперебійну роботу підприємства й належну якість сировини.
- Нехай існує обладнання кількох типів, яке можна використовувати на різних виробничих дільницях. Кількість обладнання кожного типу і його продуктивність (на кожній ділянці своя) відомі. Необхідно так розподілити устаткування, щоб загальний час його роботи, витрачений на виконання завдання, був мінімальним.
- Транспортування вантажів між підприємствами посідає значне місце у вантажообігу країни. Необхідно так спланувати перевезення та (або) будівництво нових підприємств, щоб транспортні витрати були мінімальними.
- Потрібно вибрати маршрути транспортування товару (кожен маршрут характеризується такими параметрами: протяжність, завантаженість, рівень безпеки, наявність технічного обслуговування, заправних станцій та ін.) і розподілити транспортні одиниці між маршрутами, враховуючи наявний парк техніки, можливість залучення додаткових засобів, необхідність виконати замовлення у визначений термін та ін. (*задачі оптимальної організації перевезень*).
- Вибрати обладнання для проведення робіт з урахуванням його вартості, продуктивності, екологічних вимог, кваліфікації персоналу та ін. (*задачі вибору*)
- Розробити проєкт «зеленого» підприємства.
- Визначити оптимальні умови технологічних процесів на підприємстві.
- *Задачі розподілу*, наприклад:
 - розподілити машини швидкої допомоги серед лікарень так, щоб мінімізувати час на виїзд до пацієнта;
 - розподілити машини між маршрутами;
 - розподілити службовців за видами робіт;
 - розподілити верстати серед робітників;
 - розподілити автомашини за екскаваторами.

Усі перелічені ситуації, як і багато інших, містять основні компоненти, які характеризують задачі прийняття рішень: альтернативи та критерій вибору.

Прийняття рішень у них являє собою свідомий вибір однієї з можливих альтернатив (залежно від конкретного змісту їх називають стратегіями, планами, варіантами) на основі певного принципу (критерію) оптимальності.

Цей вибір здійснює *особа, яка приймає рішення* (ОПР).

Під *прийняттям рішення* розуміємо вибір одного чи кількох варіантів вирішення проблеми з деякої вихідної множини варіантів (альтернатив).

Цю множину будемо називати множиною альтернатив X , а будь-яке рішення з неї – альтернативою x : $x \in X$.

Наслідком прийняття рішення назвемо подію (вихід), на можливість появи якої впливає дане рішення.

Система переваг – сукупність правил, які встановлюють пріоритети при виборі з багатьох альтернатив.

Рішення – підмножина множини альтернатив, утворена на основі системи переваг.

Особа, яка приймає рішення (ОПР) – суб'єкт, який задає пріоритети, на користь якого приймається рішення. Це людина, або група людей, яка має право вибору рішення і несе відповідальність за його наслідки.

Наприклад, ОПР може бути майстер, диспетчер, начальник зміни (цеху, відділу), керівник підприємства або рада директорів, муніципалітет, або керівник чи керівний орган регіону. Беручи за основу наявні дані (у тому числі й математичні розрахунки та дослідження), ОПР вибирає остаточний варіант рішення в межах своєї компетенції.

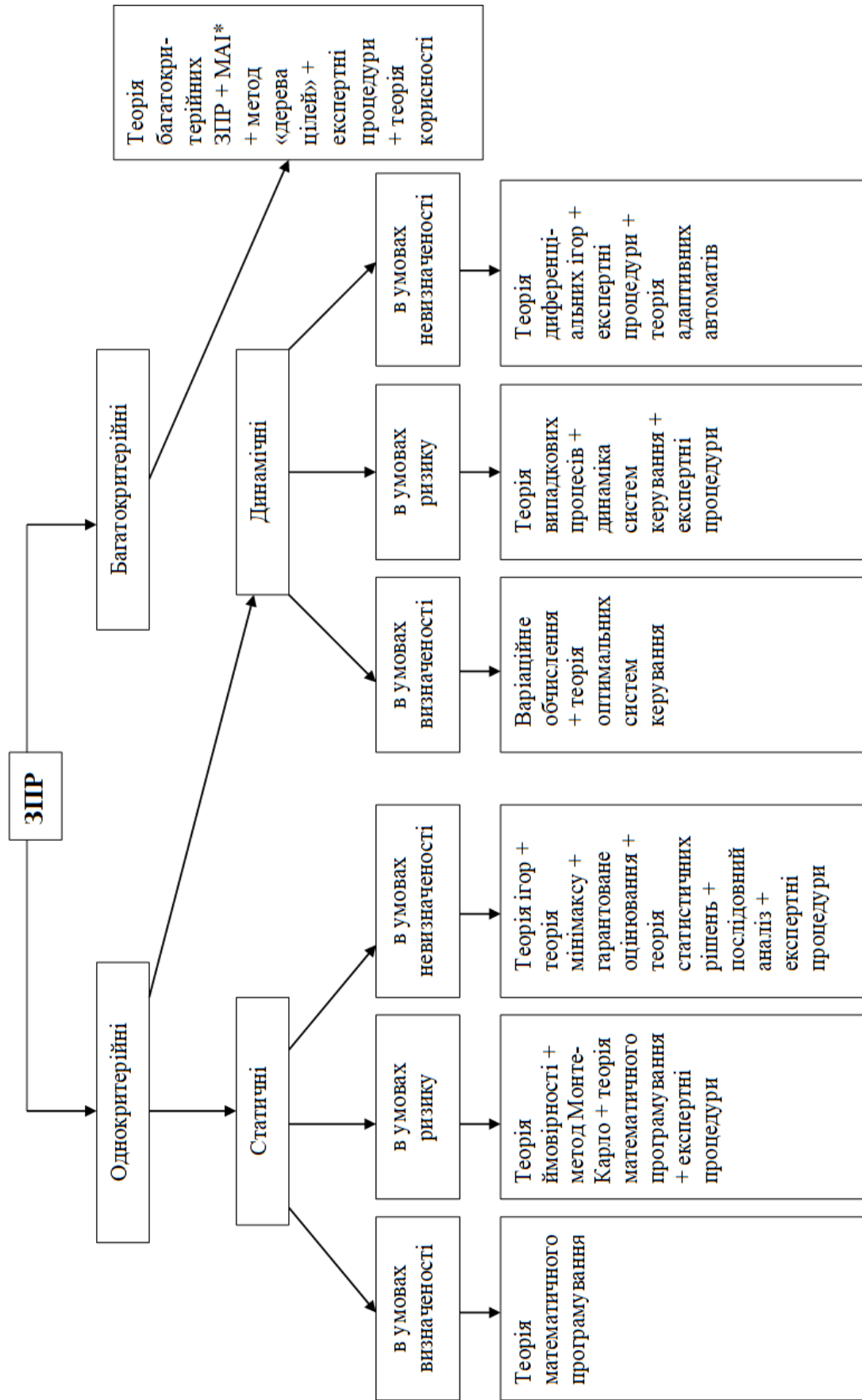
Як правило, ОПР прагне отримати найкраще (оптимальне, задовільне) з його погляду рішення. Його вибір залежить від інформації, яку має ОПР про цю предметну область, її кваліфікації, і навіть від того, як вона встановлює пріоритети, тобто від її стилю мислення, стратегії поведінки. Наприклад, хтось любить ризикувати, інший надмірно обережний, третій воліє обирати "золоту середину" і т.ін. Таким чином, ОПР має деяку свободу вибору. Однак, якщо не враховувати особливості вирішуваної проблеми, то отримане рішення може сильно розходитися з реальністю і призвести до негативних наслідків.

Назвемо основні елементи прийняття рішень [59].

Основні елементи задачі прийняття рішень

1. Особа, що приймає рішення.
2. Множина змінних, значення яких вибирає ОПР (варіанти, стратегії, плани, керівні дії).
3. Множина змінних, значення яких залежать від прийнятого рішення (результати, наслідки, вихідні змінні ситуації прийняття рішень).
4. Множина змінних, значення яких ОПР не регулює (параметри й зовнішнє середовище).
5. Інтервал часу, протягом якого приймаються рішення.
6. Математична модель задачі прийняття рішення, що являє собою множину співвідношень між параметрами, керівними діями й вихідними змінними.
7. Обмеження, що описують вимоги, викликані ситуацією прийняття рішення по відношенню до вихідних змінних задачі та керівних дій.
8. Цільова функція або критерій оптимальності, за допомогою якого оцінюють якість вибраного рішення.

Кожен з цих елементів може характеризуватися різним ступенем невизначеності й залежно від цього можна сформулювати різні класи задач прийняття рішень. Відповідно до класу задачі вибирають підхід до її розв'язування. Це можуть бути методи оптимізації, лінійного або нелінійного програмування, статистичні методи, аналітичні або числові методи розв'язування рівнянь різних класів, експертні методи системного аналізу тощо (рис. 3.1).



Рисуніок 3.1. Класифікація задач прийняття рішень і математичний апарат, що застосовується для їх розв'язування [59]
 * МАІ – метод аналізу ієрархій

3.3 Системний підхід до прийняття рішень

Сам процес прийняття рішень також можна розглядати як систему, що складається з деякого набору типових підсистем, у цьому випадку їх називають етапами, та їх елементів (процедур, дій, операцій). Процес прийняття рішень схематично показано на рис. 3.2. Розглянемо його більш детально.



Рисунок 3.2 – Етапи прийняття рішень

➤ **Виявлення і аналіз проблеми (постановка задачі).** Цей етап включає збір та аналіз інформації, оцінку її рівня, пошук аналогів, можливих варіантів дій, формування моделі прийняття рішень.

Загалом процес прийняття рішення починається із усвідомлення проблеми, тобто виявлення проблемної ситуації. Наприклад, освоєння нових видів продукції, перехід на енергозберігальні технології, розширення ринків збуту, впровадження рециклінгу. Проблема може бути відомою, а може з'явитися раптово в ході функціонування організації.

Визначають два типу ситуацій, які породжують проблему:

- ситуація нової проблеми – коли вихідним пунктом є сама проблема;
- ситуація нової можливості – коли вихідний пункт – нова можливість для виконання відомих виробничих або управлінських завдань.

Якщо проблем декілька, то варто провести їх ранжування, визначити найбільш пріоритетні і починати з першочергових.

На цьому етапі також потрібно виявити причинно-наслідкові зв'язки між факторами, діями та результатами.

Важливою складовою є наявна інформація про ситуацію, в якій приймається рішення, внутрішню та зовнішню середу функціонування об'єкта управління, про можливі шляхи розв'язання проблеми, цілі управління й можливі наслідки. Залежно від ситуації формування такої інформації може мати різний рівень складності, потребувати залучення фахівців-аналітиків та спеціалістів різних галузей.

Зауважимо, що збільшення кількості інформації не обов'язково підвищує якість рішення, тому важливо «фільтрувати» інформацію, виокремлюючи релевантну.

До методів збору та аналізу релевантної інформації відносяться: спостереження, інтерв'ювання, дослідження та аналіз консультативних висновків, результатів контролю (аудиту, моніторингу), облікової та звітної інформації тощо.

На цьому етапі також виділяють ті фактори, на які ОПР може впливати (варіанти, стратегії, плани, керівні дії), ті, які є результатами його рішення (результати, наслідки, вихідні змінні ситуації прийняття рішень) і ті, що не контролюються ОПР (параметри й зовнішнє середовище).

➤ **Системний аналіз задачі.** Включає структуризацію проблеми, визначення та врахування впливових факторів та обмежень, наслідків на кожному етапі дій, формування множини критеріїв, визначення серед них найбільш суттєвих, формування робочих варіантів рішень, оцінку наслідків за набором критеріїв.

Системний аналіз будь-якої проблеми починається із *визначення мети*. Саме мета буде основою того, які фактори вважати суттєвими, який тип моделі слід обирати і як оцінювати отримане рішення. Існує багато методів, які дозволяють структурувати проблему і допомагають визначити цілі і мету.

Наприклад, можна використовувати методи простого переліку цілей, формування “дерева цілей”, це дає змогу визначити ієрархічну структуру системи цілей і “критеріїв”, за якими можемо оцінити рівень їх досягнення. Зауважимо також, що сама мета також залежить від того, наскільки ми знаємо проблему і може змінюватись у процесі дослідження.

Тільки після визначення мети можна визначати фактори, механізми, закономірності, ресурси, які впливають на розвиток ситуації.

➤ **Виявлення альтернатив.** Генерування варіантів рішень можна здійснювати або безпосередньо, або за допомогою спеціальних експертних процедур. Технології генерування альтернатив досить різноманітні. Це можуть бути методи індивідуального творчого пошуку (метод аналогій, ідеалізації, інверсії), колективного пошуку («мозковий штурм», «конференція ідей», та інші), генерування альтернатив, які розраховані на різні інтервали часу та ін.

Загалом, варіант рішення вважають придатним для аналізу, якщо він наближає до досягнення однієї із цілей і не суперечить іншим.

Отже, множина альтернатив залежить від наявної бази знань, новизни завдання, типу проблемної ситуації.

Попередній аналіз запропонованих альтернатив дозволяє відкинути «слабкі» варіанти. Цей процес не є формалізованим. Зазвичай до нього залучають фахівців, які здатні оцінити ситуацію і відібрати найкращі варіанти рішень.

Критерії оцінювання. У процесі відбору базових варіантів слід керуватися певними критеріями, за якими можуть оцінюватись варіанти рішень. Як правило, критерій має оцінювати досягнення мети, але інколи вона описується кількома критеріями, або один критерій описує кілька цілей. Наведемо деякі загальні групи критеріїв, які можуть використовуватися для порівняння альтернатив при прийнятті рішень щодо сталого розвитку:

- економічні (собівартість, рентабельність, прибутковість тощо);
- технологічні (надійність, якість, термін експлуатації тощо);
- техніко-економічні (продуктивність, строк окупності, інвестиції, експлуатаційні витрати тощо);
- ергономічні (безпека, зручність тощо);
- психологічні (навички керівництва, індивідуальні особливості та ін.);
- соціальні (юридичні норми, соціальні наслідки та ін.);
- екологічні (природоохоронні норми, екологічні стандарти, екологічний моніторинг і наслідки).

Критерії оцінки мають бути такими, щоб вигоди досягалися не за рахунок обмеження чийось інтересів. Етичні аспекти передбачають виконання наступних розпоряджень: використовувати ресурси з метою громадського благополуччя; з'ясувати, чи узгоджені завдання, які висувають замовники, з інтересами останніх; оцінити наслідки роботи системи; визначити оптимальний проект як для всієї системи загалом, так і для всіх її підсистем; розуміти, що оцінки можуть бути не тільки економічними і враховувати це.

У процесі прийняття рішень інтереси людини мають відігравати не меншу роль, ніж технічні та економічні критерії.

Вставка 3.3

Процедура оцінювання наслідків рішення

Оцінюючи наслідки рішення корисно відповісти на такі питання:

- 1) що отримає ОНР у цьому варіанті рішення (гроші, час, зусилля, задоволення, престиж тощо);
- 2) що втрачає ОНР за такого рішення (гроші, час, і т.і.);
- 3) які нові завдання виникнуть у ОНР;
- 4) які обов'язки виникнуть у ОНР;
- 5) яка нова ситуація чекає на ОНР;
- 6) яких побічних дій ОНР повинен очікувати (позитивних і негативних);
- 7) чи принесе це рішення користь суспільству, іншим учасникам;
- 8) чи принесе це рішення шкоду;
- 9) чи виникнуть нові проблеми;
- 10) чи будуть потрібні нові рішення.

➤ **Оптимізація.** Вибір метода (моделі) оптимізації, агрегування критеріїв оцінки, знаходження підмножини оптимальних рішень.

Стратегія пошуку (висновку) рішення залежить від наявної інформації про завдання і включає спосіб вибору альтернатив, який визначається структурою переваг ОНР, та методом (моделлю) оптимізації, який обумовлює спосіб агрегування критеріїв. Зокрема, спосіб вибору альтернатив може передбачати пошук

- найкращого рішення,
 - ефективною (недомінованою) альтернативи,
 - задовільного рішення,
 - можливою альтернативи,
 - найбільш типовою альтернативи тощо.
 - найбільш
 - кращої
- альтернативи,

Метод (модель) оптимізації включає такі підходи як векторна оптимізація, використання функції корисності; інтерактивне програмування.

Під моделлю прийняття рішень розуміється процедура оцінювання, що допомагає робити вибір між варіантами.

У загальному випадку задачу прийняття рішень подають у вигляді такого кортежу:

$$\Sigma = \{X, I, S, K\},$$

де X – множина альтернатив; I – рівень інформації; S – метод пошуку (висновку) рішення; K – множина критеріїв оцінки альтернатив.

Основна складність при цьому виникає через наявність великої кількості суперечливих критеріїв, а також їх несумірність. Класифікація моделей може бути проведена за низкою ознак. За кількістю цілей (спосіб опису об'єкта) розрізняють одно- і багатоцільові моделі,

Залежно від проблемної ситуації (області застосування) можливі такі типи моделей: моделі компромісів, оптимізаційні моделі, діагностичні моделі тощо.

Моделі компромісів описують способи зважування та оцінки заміну у засобах та цілях і особливо суттєві для складних систем, що містять взаємозалежні підсистеми.

Оптимізаційні моделі в залежності від постановки завдання включають диференціальне обчислення, метод множників Лагранжа, методи лінійного програмування, цільове програмування, динамічне програмування, квадратичне та нелінійне програмування тощо.

Діагностичні моделі встановлюють способи систематичного пошуку несправностей при порушенні нормальної роботи системи та базуються на використанні методів розпізнавання образів, таксономії та класифікації.

Вибір і аналіз рішення. Вибір допустимих рішень (рішення), оцінювання якості рішення й можливості його покращення, прогнозування наступних дій.

Якщо проблему було правильно діагностовано і вона отримала чітке формулювання, проведено оцінювання реалістичних альтернатив, то прийняти рішення, тобто зробити вибір, порівняно просто. Проте, якщо проблема складна, альтернативи потребують глибокого та ґрунтовного аналізу, а інформація носить суб'єктивний характер, вибір прийнятної альтернативи може виявитися досить складним процесом.

Вибором альтернативи не завершується процес вирішення проблеми. Ухвалене рішення доводиться до безпосереднього виконавця. Реалізація прийнятого рішення залежить від усвідомлення виконавцем його важливості, обґрунтованості та справедливості. На підставі зворотного зв'язку здійснюється контроль виконання рішення, оцінка його результатів та наслідків.

Розглянемо тепер **інформаційне середовище завдання**. Воно може бути детермінованим, випадковим, нечітким.

Залежно від рівня вихідної інформації в теорії прийняття рішень застосовуються два підходи: класичний і поведінковий. При класичному підході кожен розв'язок x оцінюється деякою невід'ємною дійсною функцією виграшу $g(x)$ і оптимальним варіантом є розв'язок, який забезпечує її максимум. Цей підхід доцільно застосовувати у детермінованому середовищі та в умовах ризику. В умовах невизначеності й нечіткості кращі результати дає поведінковий підхід, за яким множину наслідків кожного варіанта $p(x)$ порівнюють із множиною допустимих наслідків при розв'язанні даної проблеми $D(x)$ і обирають рішення, для яких множина їх наслідків буде в межах множини допустимих наслідків. Остання формується ОПР, виходячи з умов та обмежень завдання.

Якщо параметри й зовнішні збурення (тобто вплив середовища) залишаються незмінними в часі, то математична модель буде *статичною*. В іншому випадку модель ситуації прийняття рішень буде динамічною. Опис статичної моделі можна подати у вигляді графіка, таблиці, функціональної залежності або алгоритму обчислення вихідних змінних.

Динамічні моделі описують за допомогою різних класів диференціальних або різницевих рівнянь.

Коли зовнішні збурення носять не випадковий характер, то маємо *детерміновану* модель прийняття рішень, якщо ж вони є випадковими, то отримуємо *стохастичну* модель. За такої умови вихідні змінні також будуть випадковими, а їхній розподіл буде залежати від розподілу зовнішніх збурень.

У тому разі, коли множина можливих альтернатив і критерій оптимальності цілком визначені, проблема прийняття рішень зводиться до задачі *оптимізації* [15, 22].

Коли ситуація потребує врахування кількох критеріїв – її описують за допомогою задачі багатокритеріальної оптимізації [59].

Якщо множину альтернатив визначено, критерій оптимальності невідомий, але відомі відношення переваги, визначені на множині альтернатив, то маємо справу із *задачею вибору*. Це досить поширена ситуація, оскільки кількісно оцінити кожну альтернативу не завжди можливо, але часто можна назвати, яка з двох альтернатив має переваги над іншою стосовно всіх чи кількох їх пар. Тоді ж, коли деякі або всі елементи задачі мають невизначеність типу «*нечіткість*», то маємо задачі *прийняття рішень у нечітких умовах* (це зокрема задачі нечіткого математичного програмування, задачі вибору в нечітких умовах тощо) [13].

Отже, у процесі прийняття рішень виникають ситуації, які мають той чи інший ступінь невизначеності, а тому якість рішення залежить від повноти врахування всіх чинників, що впливають на його наслідки. Нерідко ці чинники носять суб'єктивний характер, і це стосується як ОПР, так і самого процесу прийняття рішень. Крім того, орган управління не завжди має у своєму розпорядженні всю інформацію, яка необхідна для його обґрунтованих дій.

Таким чином, можна виділити основні труднощі, що виникають у процесі прийняття рішень,

1. Наявність великого числа критеріїв, які не завжди погоджені між собою.
2. Висока міра невизначеності, зумовлена недостатньою інформацією для обґрунтованого прийняття рішення. Види невизначеності та їх класифікацію можна знайти у посібниках [13, 59].

Наприклад, при проектуванні нового житлового комплексу постає завдання вибору джерела енергії для опалення та живлення будівель. При цьому необхідно враховувати критерії екологічної стійкості (вплив на забруднення повітря, викиди CO₂ та інші забруднюючі речовини), витрати на встановлення та обслуговування обладнання, незалежність від зовнішніх постачань (можливість житлового комплексу працювати без залежності від зовнішніх постачань енергії).

3.4 Моделі прийняття рішень

У теорії прийняття рішень розрізняють кілька підходів, залежно від того, які елементи вважають головними при аналізі цього процесу.

Згідно з теоретико-ігровою концепцією, прийняття рішень являє собою вибір кращої альтернативи з множини доступних.

Отже, невід'ємними компонентами такої моделі буде множина альтернатив та опис міркувань особи, яка приймає рішення. Зауважимо, що в реальних задачах альтернативи мають багато властивостей, які впливають на рішення.

Нехай деяка властивість альтернатив з множини Ω описується числом, тобто існує відображення $\varphi : \Omega \rightarrow R_1$. Тоді така властивість називається *критерієм*, а число $\varphi(x)$ – оцінкою альтернативи x за критерієм φ .

У задачах прийняття рішень критерії слугують для вираження «інтенсивності» істотних властивостей (ознак) рішень.

За своїм характером вони поділяються на кількісні та якісні. З кожним критерієм пов'язують множину допустимих перетворень Φ і говорять, що цей критерій має шкалу типу Φ .

Критерії, які мають шкалу, не менш досконалу, ніж інтервальна (тобто допустимими їх перетвореннями є множення на додатне число і додавання довільного числа r), називаються *кількісними*.

Критерії, що мають порядкову шкалу (до них віднесено всі монотонно зростаючі функції), називаються *якісними*. Значення якісного критерію має сенс порівнювати з іншими лише за відношеннями «більше», «менше», «дорівнює».

Однчасне врахування окремих властивостей альтернатив може являти собою складний процес. Тоді виділяють групи властивостей, які агрегують у вигляді аспектів.

Аспект – це складена властивість альтернатив, яка одночасно враховує всі властивості, що входять до певної групи. В окремому випадку аспект може бути критерієм.

Приклад 3.1. Транспортній агенції необхідно перевезти заданий обсяг вантажів. Диспетчер має визначити маршрут перевезень.

У цій задачі альтернативами виступають різні маршрути. Диспетчеру необхідно врахувати такі їхні властивості: протяжність (довжина), завантаженість, рівень безпеки, усі витрати, пов'язані з перевезенням, особливості технічного обслуговування та ін.

Поняття «технічне обслуговування» включає в себе кількість і розташування станцій обслуговування, їх потужність, завантаженість і термін виконання ремонтних робіт. Таким чином, ця характеристика являє собою аспект, що агрегує всі перелічені властивості.

Протяжність маршруту вимірюється в кілометрах, тобто виражається числом і тому його можна вважати критерієм.

У загальному випадку величина критерію залежить від двох груп факторів:

- контрольовані (керовані) фактори залежать від ОПР і являють собою її стратегію (вибір);
- неконтрольовані фактори, тобто ті, на які ОПР впливати не може, – це параметри задачі прийняття рішень, вони можуть бути, як зазначено вище, детермінованими, стохастичними або невизначеними.

Значення керованих факторів, зазвичай, лімітується низкою природних умов, наприклад, обмеженістю ресурсів. Ці умови є основою формування *обмежень* для задачі прийняття рішень.

Якщо ж у процесі прийняття рішень необхідно враховувати кілька властивостей альтернатив, то виникає проблема *багатокритеріального вибору*.

Нехай усі властивості k_1, k_2, \dots, k_m альтернатив, що враховуються при розв'язуванні задачі, є критеріями. Поставимо у відповідність k_j -му критерію j -ту вісь простору R_m ($j = 1, \dots, m$) і відобразимо множину Ω в цьому просторі, поставивши у відповідність кожній альтернативі $x \in \Omega$ точку: $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x))$, простору R_m , де φ_j – оцінка за критерієм k_j ($j = 1, \dots, m$).

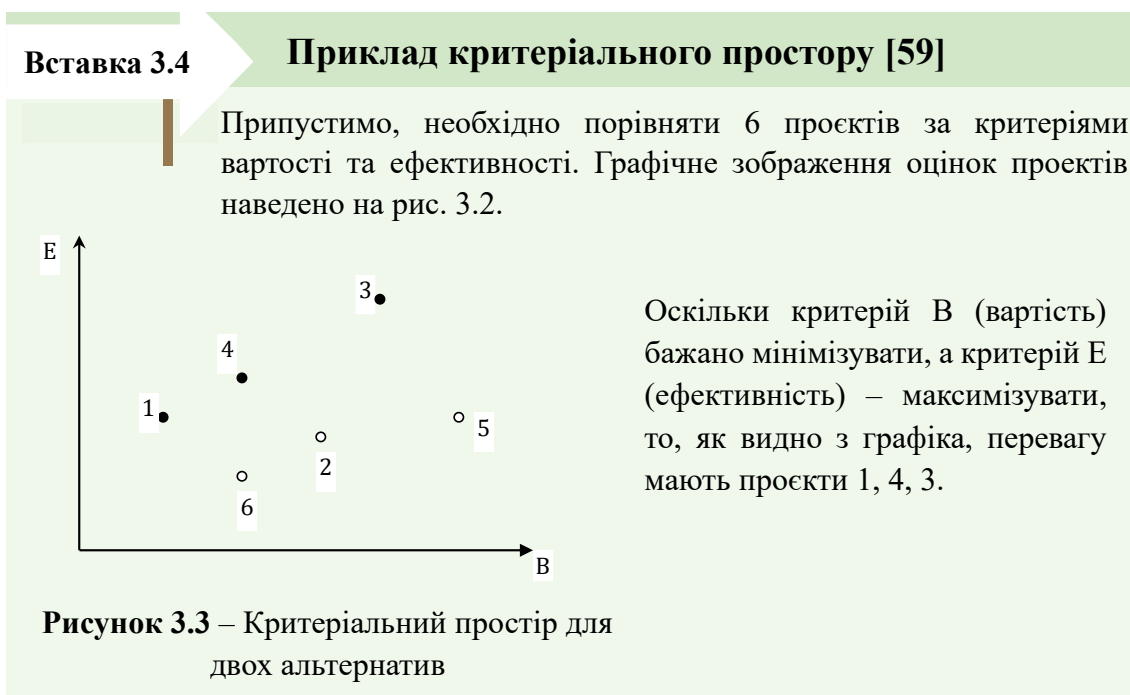
Критеріальним називається простір R_m , координати точок якого являють собою оцінки за відповідними критеріями.

Таким чином, у багатокритеріальній задачі порівняння альтернатив за перевагами здійснюється шляхом використання заданих на множині Ω числових функцій $\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$.

Для кожного критерію φ_j на числовій прямій (осі R_j) описують підмножину Y_j , з якої він набуває значень. Практично множину Y_j визначають відповідно до сенсу цього критерію.

Критерії φ_j (.) називаються частковими, або локальними. Вони утворюють векторний критерій: $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x))$.

Будемо вважати, що кожна альтернатива x повністю описується відповідною векторною оцінкою, тобто вектором $\varphi(x)$, тому вибір оптимального розв'язку зводиться до визначення оптимальної оцінки з множини досяжних: $Y = Y(x) = \{y \in R_m \mid y = \varphi(x), x \in X\}$. Приклад критеріального простору і альтернатив за наявності двох критеріїв показано на рис. 3.3.



У реальних задачах множину Y часто побудувати неможливо, тому розглядається деяка ширша множина $Y' \in R_m$, векторам з якої можна надати певного змісту.

Зауважимо, що в реальних ситуаціях надати кількісну оцінку кожній альтернативі не завжди можливо. Але якщо стосовно деяких (або всіх) пар альтернатив існує можливість встановити, яка в кожній з них краща, то для їх порівняння використовують апарат бінарних відношень і теорію вибору.

Висновки

- 1 Проблема прийняття рішень є ключовою у людській діяльності. Основні труднощі у процесі прийняття рішень виникають через велику кількість неузгоджених критеріїв та високу ступінь невизначеності, спричинену браком інформації. Це особливо актуально у контексті сталого розвитку, де рішення повинні бути спрямовані на збереження ресурсів та довкілля на довгу перспективу.
- 2 Системний підхід до прийняття рішень важливий в контексті сталого розвитку. Рішення мусять бути прийнятними для всіх систем, які зацікавлені в проблемі. Це означає, що загальносистемні рішення мають враховувати всі особливості і потреби різних стейкхолдерів, сприяючи досягненню цілей як глобальної системи, так і її підсистем.
- 3 Основними елементами задачі прийняття рішень є альтернативи, критерії, інформаційний простір та модель прийняття рішень. Для сталого розвитку ці елементи повинні бути ретельно розглянуті, зокрема, визначені альтернативи мають сприяти збереженню ресурсів та зниженню негативного впливу на довкілля.
- 4 Існують різні підходи до прийняття рішень: класичний і поведінковий. Обидва можуть бути застосовані для прийняття рішень в контексті сталого розвитку. Класичний підхід передбачає вибір рішення на основі заданної функції корисності, і може бути описаний у вигляді певної оптимізаційної задачі. Ситуаційний (поведінковий) підхід застосовується для слабо формалізованих задач, де немає числової оцінки кожної альтернативи і рішення обирають на основі їхньої належності до множини допустимих результатів.
- 5 Існують теоретико-ігрові, оптимізаційні, статистичні та інші моделі прийняття рішень відповідно до того, які елементи вважають головними при аналізі даного процесу.
- 6 Методи, які використовують у прийнятті рішень, залежать від природи задачі, наявної інформації та обраного підходу до її розв'язування.
- 7 Прийняття рішень для сталого розвитку вимагає системного підходу, де розглядаються всі аспекти впливу рішень на довкілля, економіку та суспільство. Такий підхід допоможе забезпечити довгострокову стійкість та збереження ресурсів для майбутніх поколінь.

Додаткову інформацію за питаннями, викладеними в цьому розділі, зацікавлений читач може знайти в літературі [8, 13, 16, 19, 28, 36, 59].

Питання для самоконтролю і завдання

1 Дайте відповіді на питання та поясніть їх на прикладах.

- Наведіть приклади задач прийняття рішень.
- Що означає системний підхід у прийнятті рішень і які його основні принципи?
- Які переваги системного підходу над традиційними методами прийняття рішень?
- Як визначити ключові компоненти системи при аналізі та прийнятті рішень?
- Як системний аналіз може допомогти вирішити складні проблеми в організаціях?
- Які інструменти і методи використовуються для моделювання системних процесів у прийнятті рішень?
- Як системний підхід впливає на збір та аналіз даних під час прийняття рішень?
- Яким чином системний підхід може сприяти інноваціям та покращенню якості рішень?
- Наведіть приклади успішного використання системного підходу у різних сферах, таких як бізнес, екологія, управління проектами та ін.
- Дайте визначення критерію, аспекту, принципу оптимальності, обмеження в теорії прийняття рішень.
- Які проблеми виникають у процесі прийняття рішень в контексті сталого розвитку?
- Від яких факторів залежить якість процесу прийняття рішень для сталого розвитку?
- За якими ознаками класифікують задачі прийняття рішень?
- Які можуть бути наслідки ігнорування системних зв'язків при прийнятті рішень? Наведіть приклади.
- Чому важливо залучати різні зацікавлені сторони (стейкхолдерів) до процесу прийняття рішень? Як системний підхід може полегшити цей процес?
- В яких сферах діяльності і організаціях системний підхід може бути найбільш корисним? Чому?
- Чи можна застосовувати системний підхід у повсякденному житті та особистому прийнятті рішень? Які переваги такого підходу в цьому контексті?
- Які етичні аспекти слід враховувати під час застосування системного підходу в прийнятті рішень?
- Як впровадження системного підходу може змінити підхід до управління організацією та допомогти досягти більшої ефективності?
- Який математичний апарат застосовується до розв'язування задач прийняття рішень?
- Які стратегічні фактори слід враховувати при прийнятті рішень щодо сталого розвитку в організації?
- Які ключові етапи системного підходу в процесах прийняття рішень і які інструменти можна використовувати на кожному з цих етапів?
- Чому системний аналіз є важливим елементом прийняття рішень у сферах, які стикаються з складними проблемами, такими як екологія, громадське здоров'я або економіка? Наведіть приклади.

2 *Опишіть множину допустимих альтернатив, параметри, обмеження та критерії у наведених нижче задачах*

1. Керівництво заводу розглядає перспективні проекти розвитку підприємства, зважаючи на принципи сталого розвитку. Серед них впровадження енергоефективних технологій, запровадження відновлюваних джерел енергії, впровадження системи утилізації відходів, зелені ініціативи в маркетингу та інші). Кожен з цих проектів має потенціал впливу на довкілля, суспільство та економіку і вимагає аналізу певних ресурсів та урахування різних факторів (фінансових витрат, використання природних ресурсів, вплив на довкілля, термінів реалізації, відповідності кадрового потенціалу, вплив на розвиток спільноти та інших чинників), які є суттєвими під час вибору.

З огляду на аспекти сталого розвитку завдання керівництва полягає в знаходженні балансу між збереженням ресурсів та зниженням негативного впливу на довкілля, забезпеченням соціальної відповідальності та забезпеченням стійкості економічного зростання підприємства. Ураховуючи ці фактори, керівництво має прийняти рішення щодо вибору проектів, які відповідають вимогам сталого розвитку та мають позитивний вплив на різні аспекти підприємства та суспільства в цілому.

2. Беручи до уваги інформацію про наявні на підприємстві основні фонди, кадровий потенціал, сировину, інфраструктуру, а також про партнерів, конкурентів, ринкову кон'юнктуру, вплив державного регулювання, фінансову підтримку, необхідно здійснити вибір напряму його діяльності (розвиток основного виробництва, перепрофілювання, збільшення експорту, можливість виходу на ринки або відмови від них і т. ін.).

3. Місцева влада в регіоні зіткнулася з викликами забезпечення сталого розвитку та зменшення впливу на довкілля. Один з головних аспектів – це споживання енергії та велика залежність від традиційних джерел, що призводить до викидів CO₂ та екологічних проблем. Влада планує розглянути можливості розвитку альтернативних джерел енергії (сонячні електростанції, вітрові турбіни, біомасові технології, гідроенергетика, геотермальні технології) для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Визначити, які з альтернативних джерел енергії доцільно розвивати у даному регіоні, враховуючи їх вплив на довкілля, ефективність та вартість їхнього впровадження.

3 На прикладі певного виробничого підприємства з вашого регіону сформулюйте можливі задачі прийняття рішень. Опишіть їх можливі змістові постановки. Виділіть множину допустимих альтернатив, параметри, обмеження та критерії.

Завдання для виконання у класі

Опишіть множину допустимих альтернатив, параметри, обмеження та критерії у наведених нижче задачах.

① Муніципалітет має вирішити, які заходи необхідно впровадити для зниження викидів CO₂ та поліпшення стану довкілля у місті. Можливі заходи, що можуть бути розглянуті:

- Розвиток громадського транспорту: Запровадження нових маршрутів та модернізація існуючих, з метою зниження використання приватних автомобілів та викидів CO₂.
- Підтримка екологічних технологій: Підтримка розвитку екологічних технологій та впровадження екологічних стандартів для підприємств та промислових комплексів у місті.
- Зелені зони та зелені дахи: Побудова нових зелених зон, парків, скверів та використання зелених дахів для зменшення ефекту "острова тепла" та збереження біорізноманіття.
- Рециклінг та утилізація відходів: Запровадження системи сортування відходів та підтримка рециклінгових програм для зменшення кількості відходів на смітниках.
- Сприяння використанню альтернативних джерел енергії: Підтримка встановлення сонячних панелей, вітрогенераторів та інших альтернативних джерел енергії для забезпечення частини електроенергії міста.
- Зелені будівництво та енергоефективність: Запровадження стандартів зеленого будівництва для нових будівель та модернізація існуючих з метою зменшення споживання енергії та ефективного використання ресурсів.

② Сільська рада має прийняти рішення щодо постачання енергії для села, яке раніше залежало від дизельного генератора. Однак існує можливість переходу на альтернативні джерела енергії, а саме:

- сонячні панелі,
- вітрові турбіни,
- біогазова установка.

Які критерії можуть бути розглянуті у цій ситуації?

③ Власник ферми має прийняти рішення про оптимальне використання водних ресурсів на фермі, він обирає серед таких варіантів:

- застосування крапельного поливу,
- збір та зберігання дощової води,
- використання місцевих водойм для зрошення та ін.

Які критерії можуть бути розглянуті у цій ситуації?

4 Розвиток сталого транспорту в місті. Міська влада стикається з проблемами забруднення повітря та трафіка. Влада має прийняти рішення про розвиток сталого транспорту. Опишіть можливі альтернативи та критерії в цій ситуації.

5 Забудовник має намір звести новий житловий комплекс. Він мусить обрати джерело енергії для опалення та живлення будівель. Є три можливі варіанти джерел енергії: природний газ, сонячні панелі та біомаса.

Відомо, що природний газ може бути відносно економічним та забезпечувати незалежність від зовнішніх постачань, але він є недостатньо екологічно стійким через викиди CO₂. Сонячним панелям притаманний позитивний ефект на довкілля та незалежність від зовнішніх постачань, але вартість встановлення може бути високою. Біомаса, як джерело енергії, може бути відносно екологічно стійким та доступним за вартістю, але може потребувати зовнішніх постачань сировини.

Опишіть які критерії необхідно застосувати у цій ситуації. Чи вони узгоджуються між собою? Яким чином можна оцінити ці критерії.

6 Підприємство в контексті сталого розвитку планує запровадити кілька соціально-відповідальних проєктів, спрямованих на покращення умов праці, розвиток освітніх програм для працівників, підтримку місцевих спільнот. Запропонуйте варіанти проєктів для реалізації і оберіть кілька критеріїв із запропонованих нижче для оцінювання альтернатив.

Можливі критерії

1. Вплив на довкілля: оцінка викидів, забруднення, використання природних ресурсів та інших аспектів, що можуть впливати на природне середовище.
2. Збереження біорізноманіття: розгляд можливостей збереження та відновлення біологічної різноманітності.
3. Використання енергії та ресурсів: застосування відновлюваних джерел енергії, оптимізація споживання ресурсів.
4. Взаємодія з громадськістю: залучення громади та стейкхолдерів до проєктів, забезпечення прозорості та комунікації.
5. Забезпечення гідних умов праці, здоров'я та безпеки, розвитку кадрового потенціалу.
6. Сприяння розвитку місцевої економіки: Вплив проєкту на зайнятість, розвиток інфраструктури, стимулювання підприємництва.
7. Фінансова стійкість: Аналіз вартості проєкту, очікуваних доходів та витрат, оцінка рентабельності.
8. Визначення відповідності проєкту стратегії сталого розвитку та довгострокових цілей підприємства.
9. Вплив проєкту на зростання економіки регіону, створення робочих місць та інвестицій.
10. Культурна сприйнятливість: Аналіз впливу проєкту на культурну спадщину та традиції місцевої спільноти.
11. Забезпечення доступності: Розгляд можливостей доступу до послуг та продукції для всіх верств суспільства.

РОЗДІЛ 4

Статистичне та економетричне моделювання як інструмент прийняття рішень

Питання для дискусії:

Поняття моделювання та адекватності моделі. Сутність прогнозування. Етапи моделювання. Формування інформаційної бази моделі. Типи трендових моделей. Параметризація та верифікація трендових моделей. Автокореляція. Авторегресійна модель. Оцінювання сезонної компоненти. Встановлення взаємозв'язків із застосуванням кореляційного та регресійного аналізу. Модель класичної парної регресії. Метод найменших квадратів. Моделювання нелінійних залежностей. Перевірка якості економетричних моделей. Коефіцієнт еластичності та гранична продуктивність. Модель класичної множинної регресії.

Ключові терміни та поняття:

- Моделювання
- Модель
- Адекватність
- Прогноз
- Період упередження
- Екстраполяція
- Ретроспекція
- Специфікація моделі
- Параметризація моделі
- Верифікація моделі
- Статистична сукупність
- Тренд
- Тенденція
- Метод найменших квадратів
- Коефіцієнт детермінації
- Коефіцієнт кореляції
- Помилка вибірки
- Критерій Стьюдента
- Критерій Фішера
- Автокореляція
- Часовий лаг
- Автокореляційна функція
- Корелограма
- Циклічний коефіцієнт автокореляції першого порядку
- Авторегресійна функція
- Сезонність
- Залежна змінна
- Незалежна змінна
- Парна залежність
- Множинна залежність
- Рівняння регресії
- Кореляційне поле
- Лінія регресії
- Відхилення
- Нахил
- Перетин
- Гранична продуктивність
- Коефіцієнт еластичності
- Лінеарізація
- Коефіцієнт множинної детермінації
- Функція попиту
- Виробнича функція
- Коефіцієнт масштабованості

4.1 Моделювання та прогнозування в контексті управління сталим розвитком підприємства

➔ Поняття моделювання та адекватності моделі

Управлінська діяльність відрізняється інтелектуальним характером, оскільки завжди присутній процес вироблення, ухвалення та практичної реалізації управлінських рішень, покликаних змінювати стан і перебіг суспільних процесів, підвищувати рівень використання всіх видів ресурсів, а опосередковано – свідомість і поведінку членів суспільства задля забезпечення сталого розвитку людства.

Багато в чому управлінська діяльність є інформаційною, тому що пов'язана з отриманням, осмисленням, систематизацією, аналізом, зберіганням та розповсюдженням соціально-економічної і, перш за все, управлінської інформації. Для виконання всіх цих функцій необхідно мати навички кількісної обробки та моделювання керованих соціально-економічних систем (процесів).

Моделювання ґрунтується на принципі аналогії, коли вивчається не сам реальний об'єкт, а розглядається подібний та більш доступний об'єкт – його модель. Тобто **моделювання** засновано на дослідженні економічних систем за допомогою побудови та вивчення їхніх моделей.

Модель являє собою ідеальний чи матеріальний об'єкт, який наближено відтворює основні елементи та найбільш істотні зв'язки й відносини досліджуваного об'єкта

Використання моделі є виправданим у тих випадках, коли об'єкт управління безпосередньо дослідити неможливо або дослідження вимагає значних матеріальних і фінансових витрат, а також витрат часу.

Особливо актуальною є побудова моделі при вивченні закономірностей масових процесів, які недоступні прямому спостереженню або їх неможливо відтворити в результаті експерименту. Закономірності розвитку соціально-економічних явищ і процесів формуються під впливом безлічі факторів, які, в свою чергу, пов'язані між собою. Такі явища і процеси мають стохастичний (ймовірнісний) характер і тому моделі об'єктів управління, внутрішньою властивістю яких є невизначеність, дозволяють передбачати перспективи їхнього розвитку та ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення. Такими, зокрема, є статистичні та економетричні моделі, що належать до класу математичних і описані у формі рівнянь, функцій та алгоритмів.

Метою моделювання є виявлення тенденцій розвитку, притаманних досліджуваному об'єкту, аналіз і врахування взаємозв'язків з факторами зовнішнього та внутрішнього середовища, передбачення майбутніх станів об'єкта (системи, процесу, явища) в реальних або передбачуваних умовах функціонування.

Отже, моделювання має допомогти менеджерам усіх ланок управління відповісти на одне з актуальніших питань: «Що буде в разі ...?» та оцінити як перспективи отримання певних результатів бізнесу, так і можливі наслідки настання тих чи інших подій.

Математична модель, здебільшого, враховує лише ті властивості об'єкта моделювання, які його відображають та становлять інтерес з огляду на цілі та завдання конкретного дослідження. Отже, з огляду на цілі моделювання, тобто вивчення одного й того самого об'єкта з різних точок зору та в різних аспектах, можливо отримати різні його математичні описи (моделі).

Певні висновки, одержані з використанням моделей, поширюються на реальність, тому основною вимогою до них є подібність до досліджуваних реальних об'єктів – **адекватність**. Отже, оскільки моделювання є способом заміщення реального об'єкта його аналогом, то виникає питання: в якому ступені аналог має відповідати вихідному об'єкту?

Якщо побудувати модель, котра на 100 % відповідає об'єкту моделювання, то, вочевидь, точність ухвалених на її основі рішень буде максимальною, а збиток від застосування – мінімальний. Але витрати на її побудову будуть непомірно великими, адже необхідно відтворити всі особливості, внутрішні та зовнішні зв'язки об'єкта моделювання, а це потребує залучення значної кількості фахівців з різних сфер та витрат на збирання й обробку необхідної інформації. У протилежному випадку, коли модель абсолютно не відповідає об'єкту моделювання і не схожа на реальний об'єкт, точність ухвалених рішень буде мінімальною за максимально можливого збитку. Разом з тим, витрат на побудову такої моделі не буде.

Відтак, на практиці модель створюється виходячі з компромісу між витратами на її побудову та збитком від неточності її застосування, що досягається шляхом врахування в моделі тільки істотних аспектів (чинників), які характеризують об'єкт і цікавлять дослідника в конкретних умовах, і відкиданням решти.

Моделювання соціально-економічних явищ і процесів вимагає наявності професійних знань про об'єкт дослідження (в сфері макро- та мікроекономіки, економічних основ управління), а також про методи математичного та статистичного аналізу.

Виокремлюють такі три елементи процесу моделювання:

- суб'єкт моделювання, тобто дослідник;
- об'єкт дослідження, тобто об'єкт-оригінал (наприклад, підприємство чи його структурний підрозділ, вид діяльності, етап процесу господарювання, економічне явище тощо);
- модель, що описує об'єкт з точки зору суб'єкта моделювання.

Розділ 4 Статистичне та економетричне моделювання як інструмент прийняття рішень

В управлінні підприємствами, зокрема з метою забезпечення їхнього сталого розвитку, використовують різноманітні види моделей (див. рис. 4.1).

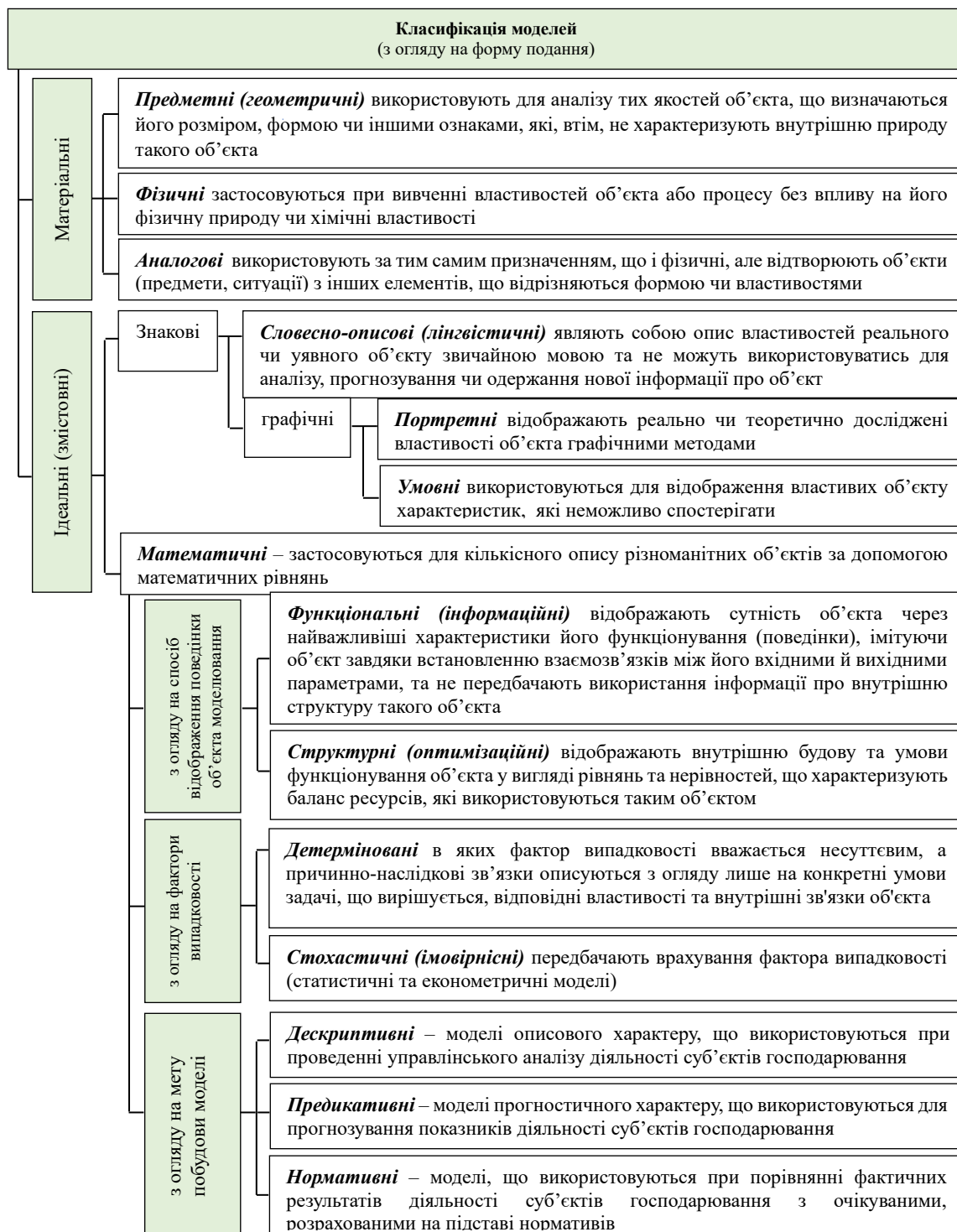


Рисунок 4.1 – Класифікація моделей для прийняття рішень в сфері управління сталим розвитком підприємства

Отже, з огляду на важливість передбачення наслідків управлінських рішень, що ухвалюються та реалізують суб'єктами господарювання у мінливому середовищі, дієвими інструментами є статистичне моделювання динаміки показників діяльності та економетричне моделювання залежностей між ними.

Статистичні та економетричні моделі належать до стохастичних моделей, які враховують імовірнісний характер розвитку соціально-економічних явищ та процесів.

До напрямів використання статистичних і економетричних моделей в менеджменті, зокрема при обґрунтуванні рішень задля забезпечення сталого розвитку підприємств, можна віднести такі:

- проведення аналізу та контролю тенденції зміни показників соціально-економічного стану об'єктів управління – регіонів, міст, галузей, господарських організацій (підприємств), домогосподарств або окремих індивідів, ринків певних товарів, а також прогнозування їхнього подальшого розвитку за принципами сталості;
- проведення кількісного аналізу факторів внутрішнього та зовнішнього середовища об'єктів управління, які обумовлюють формування тенденції зміни показників соціально-економічного стану та розвитку таких об'єктів;
- моделювання залежностей, що характеризують функціонування та розвиток об'єктів управління в цілому, а також окремих явищ і процесів, зокрема з урахуванням запровадження рішень щодо забезпечення сталості;
- прогнозування стану об'єктів управління з урахуванням змін його внутрішнього і зовнішнього середовища в умовах імплементації принципів сталого розвитку у системи управління.

Приклади статистичних і економетричних моделей

Вставка 4.1

- моделі динаміки попиту на товар (окремий товар, групу товарів) та пропозиції товару, зокрема виробленого відповідно до різних видів добровільних стандартів сталого розвитку;
- моделі динаміки валового виробництва підприємств певної галузі (за окремими галузями промисловості); обсягів діяльності за певними видами економічної діяльності; обсягів виробництва окремого підприємства тощо в умовах забезпечення сталості;
- модель динаміки чисельності працездатного населення; кількості працівників підприємства (окремої категорії персоналу) тощо як характеристик сталості соціальної складової сталого розвитку;
 - функції попиту на товар;
 - функції пропозиції;
 - функції витрат, зокрема на підтримку екологічних проєктів в рамках забезпечення сталості;
- виробничі функції тощо.

➔ Сутність прогнозування

Сучасне середовище господарювання характеризується мінливістю, внаслідок чого передбачення майбутнього та пошук ефективних управлінських рішень відбувається в умовах невизначеності чи неповної визначеності. Як зазначає А.М. Єріна, «інструментом мінімізації невизначеності слугує прогнозування, а *прогнозом* називають науково обґрунтований висновок про майбутні події, про перспективи розвитку процесів, про можливі наслідки управлінських рішень» [12, с. 8].

Оскільки прогнозування здійснюється в різних сферах суспільного життя, то виділяють різні види прогнозів, зокрема класифікація прогнозів з огляду на специфіку об'єктів прогнозування подана на рис. 4.2.

Прогнозування ґрунтується на результатах системних наукових досліджень, які зокрема включають формалізований опис об'єкту дослідження (наприклад, його внутрішньої будови та взаємозв'язків, а також зв'язків із зовнішнім середовищем) та узгодження одержаних висновків про стан об'єкта та його розвиток із теоретичними уявленнями. При проведенні досліджень можуть використовуватися різноманітні методи прогнозування (статистичні, економетричні, функціонально-ієрархічні, структурної аналогії, імітаційного моделювання, експертні оцінки тощо), що зумовлено наявністю у кожного з них певних переваг і недоліків, отже, і певної сфери застосування.

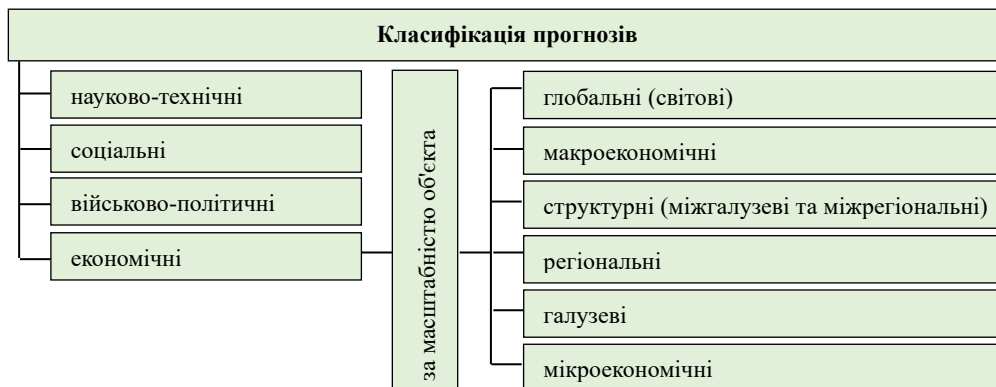


Рисунок 4.2 – Класифікація прогнозів (складено за [12, с. 9])

Як наголошує А.М. Єріна, «при прогнозуванні соціально-економічних процесів перевага віддається статистичним методам, прогнозним результатом яких є очікувані у майбутньому значення характеристик процесу» [12, с. 9].

Слід зауважити, що прогноз (зокрема із застосуванням статистичних і економетричних методів) завжди носить умовний характер, оскільки передбачає або незмінність умов, за яких він визначається, або формування певних умов. Відтак, якщо в майбутньому умови зміняться порівняно із передбаченими під час визначення прогнозу, то і ймовірність його реалізації буде вкрай низька.

Стосовно статистичного прогнозу також необхідно пам'ятати, що він має чітку визначеність у часі, тобто певний часовий горизонт, який називають *періодом упередження* або *глибиною прогнозу*.

З огляду на глибину прогнозу розрізняють *короткострокові* прогнози, що здійснюються на період до 1 року, *середньострокові* (із періодом прогнозування до 5 років) та *довгострокові*, котрі здійснюються на період понад 5 років. Глибина прогнозу залежить від поставленої мети та специфіки об'єкта прогнозування, але обов'язково має враховувати виявлені в результаті дослідження закономірності, тенденції, інтенсивність динаміки, сезонні коливання тощо.

Передумовою для статистичного та економетричного прогнозування є, передусім, стабільність значень прогнозованої величини, закону її розподілу та взаємозв'язків з іншими величинами. За виконання таких умов одержують *точковий* та / або *інтервальний прогнози*.

Точковий прогноз являє собою конкретне числове значення прогнозованої величини.

Інтервальний прогноз – це інтервал значень, до якого з певною ймовірністю належатиме прогнозована величина.

Поширення на майбутнє виявлених в певному періоді закономірностей і зв'язків називають *екстраполяцією*, яка вважається основним інструментом прогнозування.

З огляду на механізм формування та подальшого розвитку соціально-економічних процесів (явищ) використовують такі методи екстраполяції:

1. Статистичне прогнозування динаміки (тенденцій і коливань).
2. Багатофакторне прогнозування із застосуванням економетричних моделей.

Ці методи відрізняються способом описування об'єкта моделювання, а саме:

– при статистичному прогнозуванні динаміки вивчають передісторію розвитку процесу (явища) з метою виявлення загальних і усталених тенденцій. При цьому не вивчають причини формування процесу (явища), а закономірності його розвитку розглядають як функцію часу.

– при економетричному моделюванні причинно-наслідкових зв'язків процес (явище) розглядають як функцію певної множини факторів, вплив котрих, зокрема, може аналізуватись із деяким запізненням (лагом).

Відмінність підходів до дослідження соціально-економічних явищ і процесів зумовлює і відмінність у формуванні інформаційної бази прогнозування їхнього розвитку: для статистичного прогнозування динаміки використовують одномірні динамічні ряди, а для багатофакторного прогнозування – певну кількість варіаційних рядів.

Оскільки соціально-економічні процеси (явища) мають стохастичний (імовірнісний) характер, то і результати прогнозування їхнього розвитку мусять перевірятися на точність та обґрунтованість, тобто обов'язковим етапом є **верифікація прогнозів**. Вона може здійснюватися з використанням різних критеріїв і процедур, але найбільш поширеним є **ретроспективне оцінювання прогнозу**, що передбачає оцінювання якості прогнозу для минулого часу.

Процедура ретроспективного оцінювання прогнозу передбачає такі кроки:

1. Ряд динаміки досліджуваного показника поділяється на дві частини (рис. 4.3), як правило у співвідношенні 3:1:

- першу частину, яку називають **ретроспекцією (передісторією)**, складають значення показника для $t = 1, 2, 3, \dots, p$;
- другу частину становлять значення показника, коли $t = p + 1, p + 2, p + 3, \dots, T$, і вони являють собою прогнозний період.

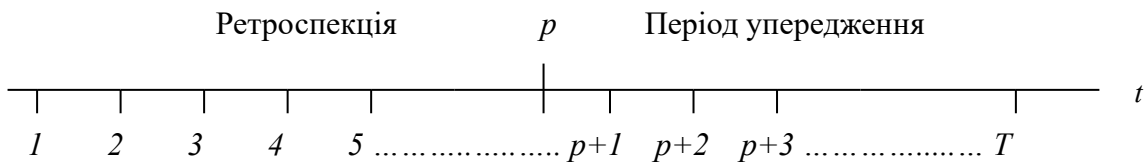


Рисунок 4.3 – Схема ретроспективної перевірки точності прогнозу для $v = 1$ [12, с. 10]

2. За даними ретроспекції моделюють закономірність динаміки, тобто будують модель, на основі котрої розраховують прогнозні значення досліджуваного показника y_{p+v} для прогнозного періоду v .

Визначають похибки прогнозу (всього $T - p$ значень) $\varepsilon_t = y_t - \hat{y}_t$, де y_t, \hat{y}_t – фактичні та прогнозні рівні ряду динаміки.

3. Обчислюють середню похибку прогнозу як узагальнювальну оцінку його точності [12, с. 11]

$$\text{абсолютну } \bar{\varepsilon}_t = \frac{\sum |\varepsilon_t|}{T - p} \quad (4.1) \quad \text{та} \quad \text{квадратичну } s = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_t^2}{T - p}} \quad (4.2).$$

4. Якщо результат оцінювання точності прогнозу відповідає рівню точності, визначеному при постановці мети дослідження (наприклад, середня квадратична похибка не перевищує 15%), то прогнозна модель визнається прийнятною і використовується на практиці для прогнозування за межі вихідного ряду динаміки (на перспективу).

Оскільки точкові прогнози щодо розвитку соціально-економічних явищ на практиці справджуються доволі рідко, то, як правило, будують інтервальні прогнози шляхом визначення довірчих меж точкового прогнозу. Процедура визначення інтервальних прогнозів буде розглянута далі.

Етапи моделювання

В узагальненому вигляді процес математичного моделювання, зокрема, статистичного та економетричного, можна розкласти на такі етапи:

➤ *Етап 1. Формулювання теорії або гіпотези* щодо економічних об'єктів в цілому чи процесів, що в них відбуваються, зокрема.

На цьому етапі здійснюється постановка мети дослідження, визначається ознака (множина ознак), яка характеризує економічний об'єкт, а також визначення просторових і часових меж статистичної сукупності даних відповідно до обраної ознаки (ознак).

Мета при цьому визначається з огляду на кінцеве призначення моделі, наприклад, аналіз тенденцій розвитку певного процесу або аналіз чинників, які впливають на його розвиток, тощо. Слід пам'ятати, що залежно від мети дослідження один і той самий об'єкт можна описати різними моделями.

Встановлення ознаки (множини ознак), яка характеризує економічний об'єкт, відбувається з огляду на її значимість, інформативність, а також з урахуванням можливості вимірювання й точності такого вимірювання, діапазону варіації, трудомісткості збирання інформації.

➤ *Етап 2. Формування інформаційної бази та статистичний аналіз даних.*

Він передбачає збирання вибіркового даних (формування статистичної сукупності), їхній статистичний аналіз з метою встановлення однорідності, а також в разі економетричного моделювання – оцінювання взаємозв'язків між ознаками. Результатом цього етапу є формування однорідної сукупності достовірних статистичних даних.

Слід зазначити, що в статистичному та економетричному моделюванні статистична сукупність завжди розглядається або як класична вибірка, або як гіпотетична генеральна сукупність. «Класична вибірка – це частина генеральної сукупності, відібрана для обстеження за принципами вибіркового методу. Гіпотетична генеральна сукупність оперує не кількістю елементів, а кількістю можливих наслідків функціонування об'єкта моделювання в одних і тих самих умовах. Отже, фактичні дані, навіть якщо вони є результатом суцільного обстеження сукупності, розглядаються як випадкові реалізації стохастичного, непередбачуваного процесу. Це дає підстави для ймовірнісного оцінювання результатів моделювання» [12, с. 7].

➤ *Етап 3. Специфікація моделі* – вибір раціонального типу математичної моделі.

Оскільки основне призначення статистичних та економетричних моделей полягає у подальшому практичному застосуванні, то для зручності обчислювальних процедур та подальшого аналізу функціональна форма моделі має бути якомога простішою, але, водночас, відображати основні риси досліджуваного соціально-економічного об'єкта.

- *Етап 4. Параметризація моделі* – оцінювання її параметрів.

Через відносну простоту обчислювальних процедур найбільш застосованим є метод Ейткена або метод найменших квадратів (МНК). Слід зауважити, що для застосування МНК мають виконуватись певні вимоги, в разі невиконання котрих модель має бути специфікована наново або має бути застосований інший метод оцінювання параметрів (наприклад, метод моментів або метод максимальної правдоподібності).

- *Етап 5. Верифікація моделі* передбачає її перевірку на адекватність реальним умовам із застосуванням критеріїв математичної статистики.

➡ *Етап 6. Економічна інтерпретація одержаних результатів та прогнозування* подальшої поведінки соціально-економічного об'єкта.

Інтерпретація результатів моделювання вимагає від дослідника ґрунтовних фахових знань в сфері економіки та управління, адже не базується на жодних шаблонах. Разом з тим, вона має бути змістовною, тобто походити зі змісту параметрів моделі, її статистичних характеристик тощо.

➡ **Формування інформаційної бази моделі**

Інформаційною базою для побудови статистичних та економетричних моделей є результати статистичних спостережень за об'єктом моделювання, в результаті яких формують **статистичну сукупність** – статистичні дані, які мають певні спільні властивості та характеризують об'єкт моделювання.

Статистичне моделювання та прогнозування динаміки проводиться за даними **рядів динаміка (часових рядів)** y_1, y_2, \dots, y_t , які відображають процес зміни досліджуваних ознак в часі. Тут y_1, y_2, \dots, y_t – рівні ряду динаміки, що характеризують об'єкт моделювання станом на певну дату або за певний період; $1, 2, \dots, t$ – послідовні дати (періоди), тобто умовний час.

Для прогнозування можна використовувати лише ті ряди динаміки, які не містять якісних стрибків.

Під час моделювання причинно-наслідкових зв'язків економетричними методами використовують статистичні дані, які характеризують явище або процес у просторовому аспекті, тобто **варіаційні ряди** (як правило, дискретні).

Як при статистичному, так і при економетричному моделюванні можуть використовуватися тільки однорідні сукупності, тобто всі одиниці котрих характеризуються спільними властивостями та є однакісними.

Причини неоднорідності сукупностей, що характеризують соціально-економічні процеси (явища), процедури оцінювання ступеня однорідності, зокрема з огляду на виявлення аномальних значень, та закону розподілу випадкових величин детально викладено в [12, 23, 40].

При економетричному моделюванні ознаки, що характеризують причинно-наслідкові зв'язки об'єкта моделювання, обов'язково перевіряються на наявність взаємозв'язків між ними – мультиколінеарності. Основні принципи виявлення мультиколінеарності із застосуванням кореляційного аналізу розглянуто в [9, 26, 30, 60].

4.2 Моделювання та прогнозування динаміки

Процеси розвитку соціально-економічних явищ, зокрема, які відбуваються в організаціях й їхньому зовнішньому середовищі та спрямовані на забезпечення сталого розвитку, віддзеркалюються в рядах динаміки різноманітних економічних показників. Такі процеси характеризуються двома взаємопов'язаними властивостями: динамічністю й інерційністю. Динамічність процесу розвитку проявляється у зміні значень показників та їхній варіації, а інерційність – у сталості механізму формування самого процесу, спрямованості динаміки та її інтенсивності протягом певного часу. Отже, у будь-який момент (період) t ряд динаміки одночасно несе в собі як залишки минулого, так і основи сучасного, котрі в сукупності формують зародки майбутнього.

Характер зміни рівнів ряду динаміки формується під впливом безлічі факторів довгострокової та короткострокової дії. Внаслідок цього в рядах динаміки можуть мати місце періоди тривалого зростання чи зменшення рівнів, причому різними темпами, періоди чергування зростання та зменшення з певною періодичністю, регулярні сезонні піднесення та спади, а також випадкові коливання.

З огляду на характер коливань рівнів ряду динаміки їх поділяють на стаціонарні та нестаціонарні.

Стаціонарними вважають такі динамічні ряди, в яких рівні коливаються навколо постійної середньої. Разом з тим, більшість рядів динаміки соціально-економічних показників характеризується постійною зміною рівнів з нерегулярними коливаннями, коли піки та западини чергуються з різною інтенсивністю, тому такі ряди є **нестаціонарними**.

Як зазначалося вище, при моделюванні процесів розвитку соціально-економічних явищ вони розглядаються як функція часу і при цьому абстрагуються від причинного механізму формування властивих таким процесам особливостей. Саме змінна часу t акумулює комплекс постійно діючих умов і причин, безпосередньо не являючи собою фактор розвитку соціально-економічних явищ.

При моделюванні процесу розвитку соціально-економічних явищ його умовно поділяють на чотири складові [12, с. 57]:

- довгострокову, детерміновану часом еволюцію – тренд $f(t)$;
- періодичні коливання різних частот C_t ;
- сезонні коливання S_t ;
- випадкові коливання ε_t (залишки), що відображають стохастичну природу соціально-економічних явищ і процесу їхнього розвитку.

Зв'язок між названими складовими у загальному вигляді описують адитивно або мультиплікативно, а саме:

$$y_t = f(t) + C_t + S_t + \varepsilon_t,$$

$$y_t = f(t) C_t S_t \varepsilon_t.$$

Застосування таких математичних формул уможливиює, залежно від мети моделювання, дослідження тренду, елімінуючи періодичні та сезонні коливання, або вивчати коливання, елімінуючи тренд.

➔ Типи трендових моделей

Важливою складовою динамічних процесів є основний напрям їхнього розвитку, що характеризується тенденцією середньої. При моделюванні динаміки тенденцію подають у вигляді плавної траєкторії та описують **трендом** (трендовою моделлю), що відображає **тенденцію** – закономірність розвитку соціально-економічних явищ

$$\hat{y}_t = f(t),$$

де t – умовний час (змінна часу), $t = 1, 2, \dots, T$.

Найбільш поширені типи трендових моделей

– лінійний тренд	$\hat{y}_t = a + bt;$	(4.3)
– параболічний тренд	$\hat{y}_t = a + b_1 t + b_2 t^2;$	(4.4)
– степеневий тренд	$\hat{y}_t = at^b;$	(4.5)
– показовий тренд	$\hat{y}_t = ab^t;$	(4.6)
– експоненційний тренд	$\hat{y}_t = ae^{bt}$ та $\hat{y}_t = e^{a+bt};$	(4.7)
– логарифмічний тренд	$\hat{y}_t = a + b \ln t;$	(4.8)
– гіперболічний тренд	$\hat{y}_t = a + \frac{b}{t}.$	(4.9)

Отже, тренд відображає залежність результативної ознаки від факторної ознаки t у середньому, тобто за своєю сутністю є рівнянням регресії. На основі такого тренду здійснюється вирівнювання ряду динаміки та прогнозування подальшого розвитку процесу.

Процедура моделювання динамічних рядів, як зазначалось вище, передбачає специфікацію тренду, тобто вибір типу функції, яка б адекватно описувала характер динаміки. При цьому перевагу надають тим функціям, параметри котрих мають конкретну інтерпретацію та можуть бути використані на практиці.

Вставка 4.2

Особливості застосування трендових моделей

При використанні трендових моделей важливо пам'ятати

- *лінійний* тренд застосовують для опису процесів, які рівномірно змінюються в часі та мають стабільні прирости u ;
- *параболічний* тренд використовують для опису процесів, які характеризуються рівноприскореним зростанням/зменшенням u . Форма параболи визначається параметром b_2 : при $b_2 > 0$ гілки параболи спрямовані вгору (парабола має мінімум), а при $b_2 < 0$ гілки параболи спрямовані вниз (парабола має максимум). При визначенні екстремуму (max, min) похідну параболи прирівнюють до нуля та розв'язують систему рівнянь відносно t ;
- *степеневий* тренд застосовують для опису процесів, які характеризуються або прискореним зростанням (тоді $b > 0$ та приймає парні й непарні цілі значення чи $b > 1$ та приймає парні і непарні нецілі значення), уповільненим зростанням (тоді $0 < b < 1$ та набуває парних й непарних нецілих значень), а також спадом (тоді $b < 0$ та може набувати будь-яких значень – цілих і не цілих, а також парних і не парних). Для економічних процесів та явищ типовим випадком є той, коли $a \geq 0$.
- *показовий* та *експоненційний* тренди використовують для опису процесів, які мають стабільну відносну швидкість (темпи приросту) u . У показовому тренді $y_t = ab^t$ параметр b характеризує середню відносну швидкість зміни значення y , зокрема, коли $b > 1$ y зростає з постійним темпом, а коли $b < 1$ – зменшується, параметр a – абсолютний приріст пропорційний досягнутому рівню.

➔ Параметризація трендових моделей

Параметризація (оцінювання параметрів) трендових моделей найчастіше здійснюється *методом найменших квадратів* (МНК), в основу котрого покладено принцип мінімізації суми квадратів відхилень фактичних значень y_t від теоретичних \hat{y}_t (визначених за трендом), а саме:

$$F = \sum_{i=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2 \rightarrow \min. \quad (4.10)$$

Слід зазначити, що із застосуванням МНК можливе обчислення тільки лінійних за параметрами трендів (рівнянь регресії). Так, параметри a та b лінійного тренду $\hat{y}_t = a + bt$ визначають за формулами

$$b = \frac{\frac{\sum_{t=1}^T y_t t}{T} - \bar{y}_t \bar{t}}{S_t^2}, \quad (4.11)$$

$$a = \hat{y}_t - bt, \quad (4.12)$$

де \bar{y}_t, \bar{t} – середні значення вихідних змінних, що визначаються за формулами $\bar{y}_t = \frac{\sum_{t=1}^T y_t}{T}$

та $\bar{t} = \frac{\sum_{t=1}^T t}{T}$ відповідно; S_t^2 – дисперсія змінної t , що визначається за формулою

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T t^2}{T} - \bar{t}^2}.$$

Слід зазначити, що при моделюванні соціально-економічних процесів (явищ) із використанням лінійних трендів параметр b таких трендів характеризує середню абсолютну зміну рівнів ряду динаміки з плином часу, тобто він показує, на скільки одиниць в середньому збільшується/зменшується досліджуваний показник y з кожним періодом (моментом).

Вставка 4.3

Побудова лінійної трендової моделі

Приклад 4.1 Досліджується динаміка обсягу інвестицій в «зелені» технології та сертифікацію системи екологічного менеджменту організації (табл. 4.1, стовпчики 1 – 2).

Таблиця 4.1 – Обсяги інвестицій та допоміжні розрахунки

Роки, t	Вихідні дані		Допоміжні розрахунки		
	Обсяг інвестицій, млн грн, y		t^2	y^2	$t \cdot y$
1	2	3	4	5	
1	520	1	270400	520	
2	480	4	230400	960	
3	400	9	160000	1200	
4	420	16	176400	1680	
5	390	25	152100	1950	
Сума	15	2210	55	989300	6310
Середнє	3	442	11	197860	1262

На основі вихідних даних та допоміжних розрахунків (табл. 4.1, стовпчики 3 – 5) обчислюємо середні квадратичні відхилення змінних:

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum t^2}{T} - \bar{t}^2} = \sqrt{11 - 3^2} = 1,4142, \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{T} - \bar{y}^2} = \sqrt{197860 - 442^2} = 49,96$$

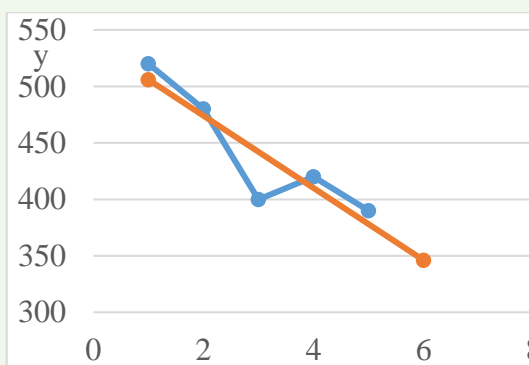
$$\text{Обчислюємо параметри лінійного тренду: } b = \frac{\frac{\sum_{i=1}^T y_i t}{T} - \bar{y}_i \bar{t}}{S_t^2} = \frac{1262 - 442 \cdot 3}{1,4142^2} = -32,0,$$

тобто щороку обсяг інвестицій в «зелені» технології та сертифікацію системи екологічного менеджменту організації зменшується в середньому на 32 млн грн;

$$a = \bar{y} - b \bar{t} = 442 - (-32,0) \cdot 3 = 538,0.$$

Отже, лінійний тренд має вигляд $\hat{y}_t = 538,0 - 32,0t$.

Зобразимо ряд динаміки обсягу інвестицій у вигляді лінійного графіка (рис. 4.4). для цього обчислюємо координати двох його точок, задавши довільні значення t :



$$y(t = 1) = 538 - 32,0 \cdot 1 = 506 \text{ млн грн;}$$

$$y(t = 5) = 538 - 32,0 \cdot 5 = 378 \text{ млн грн.}$$

Відобразимо на графіку (рис. 4.4) пряму лінію, що проходить через точки (1; 506) та (5; 378).

Вона наочно показує тенденцію обсягу інвестицій в «зелені» технології та сертифікацію системи екологічного менеджменту організації до зменшення

Рисунок 4.4 – Динаміка обсягу інвестицій в «зелені» технології та сертифікацію системи екологічного менеджменту організації

Коли МНК застосовують для обчислення параметрів нелінійних трендів, останні перетворюють до лінійного вигляду описаними нижче способами.

1. Параболічний тренд $\hat{y}_t = a + b_1 t + b_2 t^2$ зводять до лінійного вигляду заміною: $t = t_1$ та $t_2 = t^2$. В результаті отримують лінійне за параметрами рівняння такого вигляду: $y_t = a + b_1 t_1 + b_2 t_2$. Параметри a , b_1 та b_2 рівняння обчислюють за допомогою МНК.

2. Степеневий тренд $\hat{y}_t = at^b$ перетворюють у лінійний вигляд шляхом логарифмування. В разі використання натурального логарифма отримують такий вираз:

$$\ln y_t = \ln a + b \ln t.$$

Беручи до уваги, що $\ln y_t = Y_t$, $\ln a = A$ та $\ln t = T$, у свою чергу, отримують рівняння $Y_t = A + b \cdot T$. Воно є лінійним за параметрами A та b . Їх можна обчислити МНК стосовно логарифмованих вихідних змінних (умовного часу t та рівнів ряду динаміки y_t), після чого повертаються до вихідного степеневому тренду, обчисливши параметр $a = e^A$.

3. Показовий тренд $\hat{y}_t = ab^t$ також зводять до лінійного вигляду шляхом логарифмування. У разі використання натурального логарифма отримуємо наступний вираз:

$$\ln y_t = \ln a + \ln b \cdot t.$$

Вважаємо, що $\ln y_t = Y_t$, $\ln a = A$ та $\ln b = B$, тоді рівняння набуває такого вигляду: $Y_t = A + B \cdot t$. Воно є лінійним за параметрами A та B , які можна обчислити МНК стосовно логарифмованих рівнів ряду динаміки y_t та вихідних значень умовного часу t . Після визначення параметрів необхідно повернутися до вихідного показового тренду, обчисливши вихідні параметри $a = e^A$ та $b = e^B$.

4. Експоненційний тренд типу $\hat{y}_t = ae^{bt}$ так само приводиться до лінійного вигляду через логарифмування. В разі використання натурального логарифма отримують вираз

$$\ln y_t = \ln a + b \cdot t.$$

Нехай $\ln y_t = Y_t$ та $\ln a = A$, тоді записуємо лінійне за параметрами A та b рівняння $Y_t = A + b \cdot t$. Значення параметрів можна обчислити за допомогою МНК стосовно логарифмованих рівнів ряду динаміки y_t та вихідних значень умовного часу t , після чого повертаються до вихідного експоненційного тренду, обчисливши параметр $a = e^A$.

Експоненційний тренд типу $\hat{y}_t = e^{a+bt}$ зводять до лінійного вигляду шляхом логарифмування, використовуючи натуральний логарифм \ln , в результаті чого отримують такий вираз: $\ln y_t = a + b \cdot t$.

Приймаючи $\ln y_t = Y_t$, отримують рівняння: $Y_t = a + b \cdot t$, лінійне за параметрами a та b , які можна обчислити МНК стосовно логарифмованих рівнів ряду динаміки y_t та вихідних значень умовного часу t .

5. Логарифмічний тренд $y_t = a + b \ln t$ перетворюють у лінійний простою заміною: $\ln t = T$. В результаті отримують лінійне рівняння $y_t = a + bT$. Параметри a та b цього рівняння обчислюються МНК стосовно вихідних рівнів ряду динаміки y_t та логарифмованих значень умовного часу t .

6. Гіперболічний тренд $\hat{y}_t = a + \frac{b}{t}$ зводять до лінійного вигляду такою заміною: $1/t = T$, в результаті чого отримують лінійне за параметрами рівняння $y_t = a + b \cdot T$. Його параметри a та b обчислюють МНК стосовно вихідних рівнів ряду динаміки y_t та обернених значень умовного часу t .

➤ Верифікація трендових моделей

Побудовані трендові моделі мають перевірятись на адекватність реальним умовам із застосуванням критеріїв математичної статистики, тобто бути верифікованими.

У першу чергу перевіряється ступінь достовірності апроксимації динаміки (щільність взаємозв'язку між ознаками y_t та t) побудованою моделлю із застосуванням **коефіцієнта детермінації**

$$r^2 = \frac{Q_{\text{регр}}}{Q_{\text{заг}}} \quad (4.13) \quad \text{або} \quad r^2 = \frac{Q_{\text{заг}} - Q_{\text{зал}}}{Q_{\text{заг}}} \quad (4.14) \quad \text{або} \quad r^2 = 1 - \frac{Q_{\text{зал}}}{Q_{\text{заг}}} \quad (4.15),$$

де $Q_{\text{регр}} = \sum_1^T (\hat{y}_t - \bar{y}_t)^2$ – регресійне (факторне) розсіювання, зумовлене впливом на y_t включеної у модель факторної ознаки t ;

$Q_{\text{заг}} = \sum_1^T (y_t - \bar{y}_t)^2$ – загальне (повне) розсіювання, зумовлене впливом на y_t усіх можливих факторів;

$Q_{\text{зал}} = \sum_1^T (y_t - \hat{y}_t)^2$ – залишкове розсіювання, зумовлене впливом на y_t не включених у модель факторів.

Коефіцієнт детермінації характеризує частку варіації y_t , що пояснюється варіацією ознаки t . Цей показник може набувати значень від 0 до 1, причому за відсутності зв'язку $r^2 = 0$, а якщо зв'язок функціональний, то $r^2 = 1$.

Слід зазначити, що при моделюванні динаміки із застосуванням лінійного тренду коефіцієнт детермінації може бути розрахований як квадрат коефіцієнта кореляції (парного коефіцієнта кореляції Пірсона), тобто:

$$r = \sqrt{r^2}, \quad (4.16)$$

а також його можна визначити за формулою

$$r = \frac{\frac{\sum y_t t}{T} - \bar{y} \cdot \bar{t}}{S_y S_t}, \quad (4.17)$$

де \bar{y}_t , \bar{t} – середні значення рівнів ряду динаміки та умовного часу відповідно; S_y , S_t – середні квадратичні відхилення рівнів ряду динаміки та умовного часу відповідно, що обчислюються за такими формулами:

$$\bar{y}_t = \frac{\sum y_t}{T} \quad (4.19); \quad \bar{t} = \frac{\sum t}{T} \quad (4.20);$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum y_t^2}{T} - \bar{y}_t^2} \quad (4.21); \quad S_t = \sqrt{\frac{\sum t^2}{T} - \bar{t}^2} \quad (4.22).$$

Коефіцієнт кореляції характеризує щільність статистичного взаємозв'язку між випадковими величинами y_t та t , може набувати значень від -1 до $+1$. Чим ближче його абсолютне значення до одиниці, тим сильнішою є залежність, а чим він ближчий до нуля – тим вона слабше.

Приклад 4.2. Перевіримо якість лінійної трендової моделі, побудованої у прикладі 4.1.

За результатами розрахунків (див. приклад 4.1) отримано такі значення: $S_t = 1,4142$, $S_y = 49,96$, $T = 5$, $m = 1$. Використовуючи допоміжні розрахунки у табл. 4.1 (стовпчики 1 – 5), обчислюємо коефіцієнт кореляції:

$$r = \frac{\frac{\sum t_i y_i}{T} - \bar{t} \bar{y}}{S_t S_y} = \frac{1262 - 3 \cdot 442}{1,41 \cdot 49,96} = -0,91.$$

Оскільки $r = -0,91 < 0$, то спостерігається тенденція до зменшення обсягів інвестицій в «зелені» технології та сертифікацію системи екологічного менеджменту організації.

Коефіцієнт детермінації $r^2 = (-0,91)^2 = 0,82$.

Оскільки $0,5 \leq r^2 = 0,82 < 1$, то лінійний тренд описує тенденцію зміни обсягів інвестицій з високим ступенем достовірності.

Наступним кроком верифікації моделі є оцінювання статистичної значущості коефіцієнта кореляції r та параметрів (a , b_1 , b_2 , ..., b_m) побудованої моделі. Така необхідність обумовлена тим, що при побудові моделей використовують не всю генеральну сукупність даних, а класичну вибірку. Внаслідок цього результати розрахунків, виконані за вибіркою (вибіркові значення), відрізняються від тих результатів, які були б отримані за генеральною сукупністю (генеральних значень).

Відмінність вибірових значень від генеральних називають *помилкою вибірки*. Якщо генеральне значення показника не дорівнює 0, то його називають *статистично значущим*. З огляду на те, що одержати генеральне значення неможливо, то значущість показника встановлюють за його вибіровим значенням із застосуванням *критерія значущості (статистики Стьюдента, t-тесту)*.

Опишемо процедуру оцінювання значущості коефіцієнта кореляції

1. Обчислюють помилку коефіцієнта кореляції, обумовлену обмеженим обсягом вибірки,

$$S_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{T-m-1}}, \quad (4.23)$$

де T – довжина ряду динаміки;

$(m+1)$ – число параметрів (коефіцієнтів) функції регресії (тренду).

2. Обчислюють коефіцієнт (критерій) значущості коефіцієнта кореляції

$$t_r = \frac{|r|}{S_r}. \quad (4.24)$$

3. За довідковими таблицями розподілу Стьюдента визначають критичне (табличне) значення критерія Стьюдента $t_{\text{табл}}$, що залежить від прийнятого рівня значущості α та ступеня вільності $(T-m-1)$.

4. Порівнюють розраховане значення статистики Стьюдента t_r із критичним (табличним) значенням $t_{\text{табл}}$. Якщо $t_r > t_{\text{табл}}$, то коефіцієнт кореляції визнається значущим із довірчою ймовірністю $(1-\alpha)$. У протилежному випадку коефіцієнт кореляції визнається не значущим.

Оцінювання значущості параметрів $(a, b_1, b_2, \dots, b_m)$ трендових моделей здійснюється за аналогічною процедурою шляхом розрахунку статистики Стьюдента відповідних параметрів $t_a, t_{b_1}, \dots, t_{b_m}$.

Зауважимо, що відмінність у процедурі оцінювання значущості параметрів моделей полягає лише у формулах, за якими обчислюються помилки відповідних параметрів.

➔ *Приклад 4.3.* Перевіримо значущість коефіцієнтів регресії для лінії тренду, побудованої у прикладі 4.1. За результатами розрахунків у попередньому прикладі: $r_{yt} = -0,91$, $r_{yt}^2 = 0,82$, $T = 5$, $m = 1$.

Обчислюємо помилку коефіцієнта кореляції, обумовлену обмеженим обсягом вибірки,

$$S_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{T-m-1}} = \sqrt{\frac{1-(-0,91)^2}{5-1-1}} = 0,24.$$

Обчислюємо критерій значущості коефіцієнта кореляції (критерій Стьюдента), тобто

$$t_r = \frac{|r|}{s_r} = \frac{|-0,91|}{0,24} = 3,7.$$

Визначаємо критичне (табличне) значення критерію Стьюдента для рівня значущості $\alpha = 0,05$ та ступеня свободи $T - m - 1 = 5 - 1 - 1 = 3$ за фрагментом таблиці розподілу Стьюдента (табл. 4.2): $t_{табл}(3;0,05) = 3,18$.

Таблиця 4.2 – Статистика Стьюдента $t_{табл}$ для рівня значущості $\alpha = 0,05$ (фрагмент)

v	$t_{табл}$	v	$t_{табл}$	v	$t_{табл}$
1	12,71	9	2,26	25	2,06
2	4,30	10	2,23	30	2,04
3	3,18	12	2,18	40	2,02
4	2,78	14	2,15	50	2,01
5	2,57	16	2,12	60	2,00
6	2,45	18	2,10	80	1,99
7	2,37	20	2,09	100	1,98
8	2,31	22	2,07	∞	1,96

Оскільки $t_r = 3,7 > t_{табл} = 3,18$, то із довірчою ймовірністю 95 % коефіцієнт кореляції є значущим, тобто підтверджується висновок про тенденцію обсягів інвестицій в «зелені» технології та сертифікацію системи екологічного менеджменту організації до зменшення та про достовірність її апроксимації лінійним трендом.

Зауважимо, що для опису динаміки можна застосовувати різні типи математичних моделей, тому поряд з оцінюванням значущості коефіцієнта кореляції та параметрів моделі сама модель також має оцінюватись на адекватність реальним умовам. Тобто необхідно перевірити, чи правильно і коректно вона відображає динаміку показника (зв'язок між досліджуваними ознаками).

Для перевірки моделі на адекватність застосовують **критерій Фішера (критерій адекватності, F-тест)**, що розраховується за такою формулою:

$$F = \frac{r^2 / \nu_1}{(1-r^2) / \nu_2}, \quad (4.25)$$

де ν_1, ν_2 – ступені свободи, $\nu_1 = m, \nu_2 = T - m - 1$.

Розраховане значення статистики Фішера F порівнюють з критичним (табличним) значенням $F_{табл}$, яке обирають з довідкових таблиць розподілу Фішера з огляду на прийнятий рівень значимості α та ступені вільності ν_1 й ν_2 . Якщо $F_r > F_{табл}$, то розрахована модель є адекватною з довірчою ймовірністю $(1 - \alpha)$. У протилежному випадку модель є не адекватною.

➤ *Приклад 4.4.* Перевіримо адекватність побудованого у прикладі 4.1 рівня за критерієм Фішера. За результатами розрахунків у попередньому прикладі: $r_{yt}^2 = 0,82$, $T = 5$, $m = 1$.

Обчислимо критерій адекватності (критерій Фішера), а саме:

$$F = \frac{r^2 / \nu_1}{(1-r^2) / \nu_2} = \frac{0,82/1}{(1-0,82)/(5-1-1)} = 3,71.$$

За фрагментом таблиці розподілу Фішера (табл. 4.3) знаходимо критичне значення критерію Фішера для рівня значущості $\alpha = 0,05$ та ступенів свободи $\nu_1 = 1$, $\nu_2 = 3$: $F_{\text{табл}}(1; 3; 0,05) = 10,13$.

Таблиця 4.3 – Статистика Фішера $F_{\text{табл}}$ для рівня значущості $\alpha = 0,05$ (фрагмент)

ν_2	ν_1				
	1	2	3	...	∞
1	161,45	199,50	215,71	...	254,32
2	18,51	19,00	19,16	...	19,50
3	10,13	9,55	9,28	...	8,53
4	7,71	6,94	6,59	...	5,63
5	6,61	5,79	5,41	...	4,36
6	5,99	5,14	4,76	...	3,67
7	5,59	4,74	4,35	...	3,23
10	4,96	4,10	3,71	...	2,54
14	4,60	3,74	3,34	...	2,13
20	4,35	3,49	3,10	...	1,84
40	4,08	3,23	2,84	...	1,51
100	3,94	3,09	2,70	...	1,26
400	3,86	3,02	2,63	...	1,07
∞	3,84	2,99	2,60	...	1,00

Оскільки $F = 13,71 > F_{\text{табл}} = 10,13$, то із довірчою ймовірністю 95 % лінійний тренд адекватно описує тенденцію обсягів інвестицій в «зелені» технології та сертифікацію системи екологічного менеджменту організації до зменшення.

Зауважимо, що неадекватність моделі може бути викликана як недостатнім обсягом вибірки, так і тим, що обраний тип математичної моделі не відповідає характеру залежності. Отже, для розв'язання проблеми неадекватності моделі рекомендовано збільшити обсяг вибірки та повторно розрахувати модель і перевірити її адекватність. Якщо ж вона знову виявиться неадекватною, то доцільно перейти до інших типів моделей.

➔ Автокореляція. Авторегресійна модель

Деяким динамічним рядам властива залежність рівнів, тобто коли значення y_t певною мірою залежить від попередніх значень y_{t-1}, y_{t-2} і т.д. Таку статистичну залежність називають **автокореляцією**. Вона проявляється як відставання (запізнення) одного економічного явища (причини) порівняно з іншим, пов'язаним з ним явищем (наслідком). Таке відставання називають **часовим лагом**.

В економіці лаги виникають через особливості психології людей як суб'єктів економічних відносин; через неможливість миттєвого впровадження технологічних інновацій та через інституційні чинники та інерційність механізмів формування економічних явищ та процесів.

Математичною мірою ступеня залежності рівнів ряду є **коефіцієнт автокореляції** r_p , який можна визначати з часовим лагом $p = 1, 2, \dots, k$. Відповідно коли $p = 1$, розраховують коефіцієнт автокореляції першого порядку, коли $p = 2$ – другого порядку і т.д.

Коефіцієнт автокореляції r_p характеризує щільність статистичного зв'язку між рівнями первинного ряду динаміки й значеннями того ж ряду, зсуненими на p моментів (періодів).

Із збільшенням лагу p кількість пар корельованих рівнів зменшується, а саме: при $p = 1$ довжина корельованих рядів менша за первинний ряд на один рівень; при $p = 2$ – на два рівні і т. д. (див. табл. 4.4). Тому на практиці, коли розраховують коефіцієнти автокореляції, величину лагу беруть згідно з таким правилом: $k \leq \frac{n}{4}$.

Таблиця 4.4 – Зменшення довжини корельованих рядів динаміки

Умовний час, t	Рівень ряду, y_t	Часовий лаг		
		$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$
1	y_1	–	–	–
2	y_2	y_1	–	–
3	y_3	y_2	y_1	–
...
$T - 2$	y_{T-2}	y_{T-3}	y_{T-4}	y_{T-5}
$T - 1$	y_{T-1}	y_{T-2}	y_{T-3}	y_{T-4}
T	y_T	y_{T-1}	y_{T-2}	y_{T-3}

Значення коефіцієнта автокореляції r_p розраховують за такою формулою:

$$r_p = \frac{\frac{\sum_{t=1+p}^T y_t y_{t-p}}{T-p} - \bar{y}_t \bar{y}_{t-p}}{S_{y_t} S_{y_{t-p}}}, \quad (4.26)$$

де \bar{y}_t, \bar{y}_{t-p} – середні значення рівнів ряду динаміки; $S_{y_t}, S_{y_{t-p}}$ – середні квадратичні відхилення рівнів ряду динаміки, що визначаються за такими формулами:

$$\bar{y}_t = \frac{\sum_{t=1+p}^T y_t}{T-p} \quad (4.27);$$

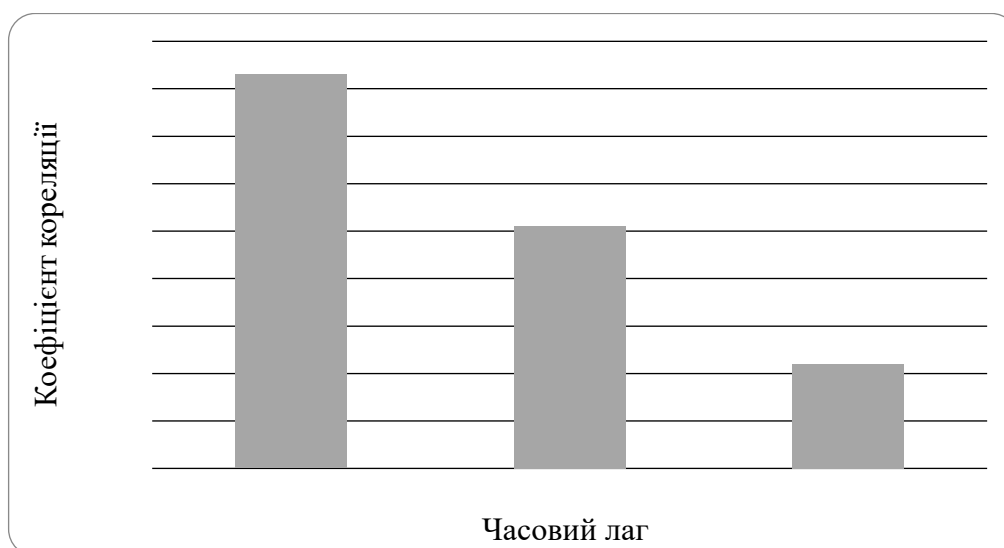
$$\bar{y}_{t-p} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} y_t}{T-p} \quad (4.28);$$

$$S_{y_t} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1+p}^T y_t^2}{T-p} - \bar{y}_t^2} \quad (4.29);$$

$$S_{y_{t-p}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T-1} y_t^2}{T-p} - \bar{y}_{t-p}^2} \quad (4.30).$$

Коефіцієнт автокореляції не виходить за межі ± 1 , причому чим ближче його абсолютне значення до одиниці, тим сильніше залежність поточних рівнів динамічного ряду від попередніх.

Послідовність коефіцієнтів автокореляції r_p називають **автокореляційною функцією** та зображують у вигляді **корелограми** – графіка чи гістограми з абсцисою p та ординатою r_p (рис. 4.5).



Рисуюнок 4.5 – Корелограма автокореляційної функції

За характером зміни автокореляційної функції роблять висновок і про характер динаміки, а саме:

- поступове згасання автокореляційної функції свідчить про нестационарність процесу;
- відносно високі значення коефіцієнта автокореляції, коли $p = z, 2z, 3z \dots$, притаманні випадкам регулярних (періодичних) коливань;
- згасаючі хвилі однакової частоти мають місце за наявності сезонних коливань;
- усі значення r_p , близькі до нуля, свідчать про відсутність у ряді динаміки тенденції та циклічних коливань або про наявність нелінійної тенденції, що вимагає додаткових досліджень.

На практиці найчастіше використовують значення коефіцієнта автокореляції першого порядку r_{p1} , який характеризує ступінь залежності двох послідовних членів ряду. Коли $|r_{p1}| \rightarrow 1$, то це свідчить про наявність в ряді динаміки лінійного тренду, якщо $|r_{p1}| \rightarrow 0$ – то рівні ряду визнаються незалежними.

Отже, наявність тренду (детермінованої складової в ряді динаміки) можна перевіряти із застосуванням автокореляційної функції.

На відміну від детермінованої складової ряду динаміки, яка описується трендом, випадкова складова ε_t не пов'язана із плином часу. Отже, перевірка гіпотези про адекватність моделі реальному процесу передбачає аналіз випадкової складової. Її незалежність від умовного часу t є неодмінною умовою при застосуванні МНК для оцінювання параметрів тренду. Тобто ряд динаміки випадкової складової ε_t має бути стаціонарним.

Якщо трендова модель специфікована правильно, то випадкова складова ε_t являє собою стаціонарний випадковий процес з математичним сподіванням $M(\varepsilon) = 0$ та дисперсією

$$S_{\text{зал}}^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{n - m - 1}, \quad (4.31)$$

де n – обсяг вибірки (або довжина ряду динаміки T); $(m + 1)$ – число параметрів тренду (коефіцієнтів функції регресії).

Для оцінювання наявності автокореляції залишків ε_t використовують **циклічний коефіцієнт автокореляції першого порядку** r_1 , який обчислюють на основі рядів динаміки залишків ε_t з лагом $p = 1$ (тобто між $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \dots, \varepsilon_T$ та $\varepsilon_T, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_{T-1}$) за спрощеною (з огляду на припущення, що $\sum \varepsilon_t = \sum \varepsilon_{t+1} = 0$) формулою, а саме:

$$r_1 = \frac{\sum_1^T \varepsilon_t \varepsilon_{t+1}}{\sum_1^T \varepsilon_t^2} . \quad (4.32)$$

Зауважимо, що для розрахунку цього коефіцієнта для збереження первісного обсягу вибірки першому значенню ε_1 ставлять у відповідність значення ε_T , тобто рівні ряду циклічно повторюють.

Розраховане значення циклічного коефіцієнта автокореляції порівнюють з критичним значенням, вибраним з довідкових таблиць для додатних і від'ємних значень цього показника. Якщо розраховане значення r_1 менше критичного (тобто $r_1 < r_{1\text{табл}}$), то автокореляція залишків вважається неістотною, тобто випадкова складова являє собою стаціонарний процес. У протилежному випадку роблять висновок про неадекватність детермінованої складової реальному процесу.

Більш детально з порядком виявлення автокореляції можна ознайомитися у [9, 12, 26, 30]

У разі, коли в ряді динаміки виявлено автокореляцію, внутрішню структуру такого ряду описують *авторегресійною функцією*

$$y_t = a + b_1 y_{t-1} + b_2 y_{t-2} + \dots + b_p y_{t-p} + \varepsilon_t, \quad (4.33)$$

де p – лаг автокореляції, $p = 1, 2, \dots, k$; a, b_1, b_2, \dots, b_p – параметри (коефіцієнти) авторегресії.

Коефіцієнти авторегресії розраховують МНК. Зокрема, коефіцієнти авторегресії першого порядку $y_t = a + b y_{t-1}$ розраховуються за такими формулами:

$$b = r_{p1} \frac{S_{y_t}}{S_{y_{t-1}}}, \quad (4.34)$$

$$a = \bar{y}_t + b \bar{y}_{t-1}, \quad (4.35)$$

де r_{p1} – коефіцієнт автокореляції першого порядку.

Авторегресія порядку p функціонально зв'язана з автокореляційною функцією

$$r_p = b_1 r_{p-1} + b_2 r_{p-2} + \dots + b_p, \quad (4.36)$$

де $p = 1, 2, \dots, k$ – лаг автокореляції.

Коли лаг відсутній та рівні ряду залежать лише від самих себе ($p = 0$), то $r_0 = 1$ і коефіцієнт авторегресії першого порядку $y_t = b_1 y_{t-1} + \varepsilon_t$ (рівняння записано без вільного члена, що здійснюється для спрощення обчислювальних процедур) дорівнює коефіцієнту автокореляції першого порядку ($b_1 = r_1$).

Для авторегресії другого порядку $y_t = b_1 y_{t-1} + b_2 y_{t-2} + \varepsilon_t$ коефіцієнти визначають за такими формулами:

$$b_1 = -\frac{r_1(1-r_2)}{1-r_1^2}, \quad (4.37)$$

$$b_2 = -\frac{r_2 - r_1^2}{1 - r_1^2}. \quad (4.38)$$

Слід зауважити, що при моделюванні соціально-економічних процесів, більшість котрих за своєю природою є нестационарними, авторегресійну функцію поєднують з іншими методами аналізу динаміки, наприклад, трендом, експоненційною ковзною, середньою ковзною різних порядків, сезонною хвилею тощо. Такий підхід дозволяє підвищити точність моделей та сферу їхнього практичного застосування.

Більш детально з порядком виявлення авторегресії можна ознайомитися у [9, 12, 26, 30]

➔ **Екстраполяція**

Кінцевою метою статистичного моделювання динаміки є прогнозування, тобто розрахунок майбутніх значень досліджуваного показника.

У разі виявлення в динамічному ряді тенденції, як вже відзначалось раніше, її можна продовжити за межі такого ряду.

Екстраполяція тренда – це процедура продовження тенденції за межі динамічного ряду. Вона ґрунтується на припущенні, що у майбутньому зберезуються умови, які визначали тенденцію у минулому.

У математичному формулюванні екстраполяція являє собою визначення такої функції:

$$y_{t+\tau} = f(y_t^*, \tau),$$

де $y_{t+\tau}$ – прогнозне значення на період упередження τ ; y_t^* – база екстраполяції.

Для отримання прогнозних значень у трендові моделі підставляють відповідні значення умовного часу ($T + \tau$), причому за базу прогнозування найчастіше беруть останній в ряді рівень T .

На основі екстраполяції тренда визначають *точковий прогноз*, який є малоймовірним через стохастичну природу самого тренда, зумовлену, передусім, похибками параметрів. Як зазначалось вище, причиною таких похибок є обмежений обсяг вибірки, кожне із спостережень y_t в котрій містить випадкову компоненту ε_t .

Випадкова компонента матиме місце і у майбутньому, тому виникає необхідність її врахування. Це можна зробити шляхом визначення *інтервального прогнозу* у вигляді довірчого інтервалу, до якого з певною ймовірністю потраплятимуть можливі значення $y_{T+\tau}$. Межі довірчого інтервалу визначають за такою формулою:

$$y_{t+\tau} \pm t_{табл} S_{\tau}, \quad (4.39)$$

де S_{τ} – середня квадратична похибка прогнозу, величина якої, зокрема, залежить від залишкової дисперсії $S_{зал}^2$ (варіації рівнів вихідного ряду динаміки відносно тренда).

Отже, ширина довірчого інтервалу залежить від похибки прогнозу та прийнятої ймовірності висновку $(1 - \alpha)$.

Похибки прогнозу для різних типів трендових моделей визначаються за різними формулами. Так, для лінійного тренда за умови прийняття за базу прогнозування останнього рівня ряду y_T середня квадратична похибка прогнозу розраховується за такою формулою:

$$S_{\tau} = S_{зал} \sqrt{1 + \frac{1}{T} + \frac{3(2\tau + T - 1)^2}{T(T^2 - 1)}}. \quad (4.40)$$

Як бачимо, при прогнозуванні за лінійним трендом похибка прогнозу залежить від залишкової дисперсії $S_{зал}^2$, яка у цьому випадку обчислюється за формулою $S_{зал} = S_y \sqrt{(1-r^2) \frac{T}{T-2}}$, довжини ряду динаміки T (передісторії) та від періоду упередження τ . Таки чином, прогноз буде тим точнішим, чим довшим є період передісторії. Збільшення ж періоду упередження τ при незмінній довжині передісторії веде до збільшення похибки прогнозу.

➤ *Приклад 4.5.* На основі побудованого у прикладі 4.1 лінійного тренда, побудуємо точковий та інтервальний прогнози на наступний рік.

За результатами розрахунків у попередньому прикладі маємо таке рівняння для лінії тренда: $y = 538 - 32t$.

Крім того за результатами обчислень $S_y = 49,96$, $r^2 = 0,82$, $T = 5$, $m = 1$.

Обчислимо точковий прогноз на наступний рік. Для цього вважаємо, що $t = 1$, за базу прогнозування візьмемо обсяг інвестицій у 5-му році, тобто

$$y_{T+1} = 538 - 32,0 \cdot (5+1) = 346.$$

Отже, у наступному році з імовірністю 95 % обсягів інвестицій в «зелені» технології та сертифікацію системи екологічного менеджменту організації становитиме 346 млн грн.

Тепер побудуємо інтервальний прогноз на наступний рік. Для цього обчислимо залишкове розсіювання:

$$S_{\text{зал}} = S_y \sqrt{(1-r^2) \frac{T}{T-2}} = 49,96 \sqrt{(1-0,82) \frac{5}{5-2}} = 27,36;$$

та середню квадратичну похибку прогнозу:

$$S_\tau = S_{\text{зал}} \sqrt{1 + \frac{1}{T} + \frac{3(2\tau + T - 1)^2}{T(T^2 - 1)}} = 27,36 \sqrt{1 + \frac{1}{5} + \frac{3 \cdot (2 \cdot 1 + 5 - 1)^2}{5 \cdot (5^2 - 1)}} = 39,65.$$

Тепер обчислимо нижню та верхню межі довірчого інтервалу, а саме:

$$y_{T+1} - t_{\text{табл}} S_\tau = 346 - 39,65 \cdot 3,18 = 219,9 \text{ млн грн};$$

$$y_{T+1} + t_{\text{табл}} S_\tau = 346 + 39,65 \cdot 3,18 = 472,1 \text{ млн грн}.$$

Отже, у наступному році з імовірністю 95 % обсягів інвестицій в «зелені» технології та сертифікацію системи екологічного менеджменту організації становитиме не менше 219,9 млн грн та не більше 472,1 млн грн.

➔ Оцінювання сезонної компоненти

Регулярні, систематичні зміни рівнів ряду динаміки, викликані різноманітними причинами, зокрема зміною пор року, природними явищами (періодами опадів, засух тощо), періодичністю дозрівання врожаю, звичаями та традиціями тощо, називають **сезонністю**.

При прогнозуванні розвитку соціально-економічних явищ сезонні коливання рівнів ряду враховують, виходячи з гіпотези, що у майбутньому збережеться як тенденція, так і характер коливань. Отже, прогноз на певний період (місяць чи квартал), визначений на основі екстраполяції тренда $\hat{y}_{t+\tau}$, корегується відповідним індексом сезонності I_t у такий спосіб:

$$\hat{y}_{t+\tau}^* = \hat{y}_{t+\tau} \cdot I_t. \quad (4.41)$$

Детально порядок обчислення індексу сезонності розглянуто в [6, 7].

➤ *Приклад 4.6.* Помісячна динаміка обсягів викидів пилу в повітря при видобутку вапняку відкритим способом (у тонах) протягом року описується трендом $\hat{y}_t = 25 + 0,4t$, згідно з яким теоретичний обсяг викидів у січні наступного року ($\tau = 1$) передбачається у розмірі $\hat{y}_{t+1} = 25 + 0,4 \cdot (12 + 1) = 30,2$ тон. Якщо індекс сезонності січня становить $I_1 = 0,78$, то скорегований з огляду на сезонність прогнозний обсяг викидів пилу становитиме: $\hat{y}_{12+1}^* = 30,2 \cdot 0,78 = 23,6$ тон.

У тих випадках, коли через перерозподіл впливу факторів у динаміці соціально-економічних показників не виявляють чітко вираженої тенденції розвитку, для прогнозування можна використовувати експоненційне згладжування (ковзну середню). У такому разі інтервал згладжування ковзної середньої доцільно брати таким, що дорівнює сезонному циклу (4 або 12), а корегування згладжених значень здійснюється так само, як і у випадку лінійного тренда.

З процедурою експоненційного згладжування детальніше можна ознайомитися у [6, 7], з порядком побудови сезонно-декомпозиційної моделі Холта – Вінтера та періодичних функцій – у [9, 12].

4.3 Моделювання взаємозв'язків і прогнозування стану об'єкту управління

➤ *Встановлення взаємозв'язків із застосуванням кореляційного та регресійного аналізу*

Поводження будь-якого соціально-економічного об'єкта (окремої особи, підприємства, регіону тощо) може бути охарактеризовано різноманітними як кількісними, так і якісними показниками, зміна котрих, у свою чергу, відбувається під впливом ще більшого числа факторів. Зокрема, забезпечення сталого розвитку передбачає врахування комплексу соціальних, економічних та екологічних аспектів розвитку об'єктів управління, що додатково ускладнює процес ухвалення управлінських рішень.

Під час опису таких складних об'єктів врахування усіх можливих факторів є неможливим та й недоцільним, оскільки деякі з них не спричиняють істотного впливу на об'єкт і їх можна проігнорувати. Отже, важливою задачею є виокремлення найбільш значимих факторів. Її вирішення має відбуватись з урахуванням надбань економічної науки щодо виявлення та дослідження сталих причинно-наслідкових зв'язків між економічними показниками, а також з урахуванням сучасних підходів до забезпечення сталого розвитку.

Динамічність економічного середовища визначає й специфічні умови дослідження економетричних об'єктів – неможливість проведення наукових експериментів для отримання достовірних вихідних даних про об'єкт та підтвердження адекватності одержаних результатів реальним процесам. Використання ж реальних (емпіричних) статистичних даних вимагає застосування інструментарію статистики та економетрики, зокрема кореляційного та регресійного аналізу.

У переважній більшості випадків між економічними показниками не існує функціонального зв'язку, тобто кожному значенню одного показника відповідає не одне, а кілька значень іншого показника. Поясненням такого явища може бути наявність інших неврахованих факторів або їхній непрямий вплив, наявність випадкових чинників тощо.

Тому в економіці переважають не функціональні, а статистичні залежності, зокрема **кореляційні**, які проявляються у зміні середніх значень однієї величини внаслідок зміни іншої.

Функціональною називають залежність, при якій кожному значенню однієї величини відповідає єдине значення іншої.

Статистичною є залежність, коли зміна розподілу однієї величини спричиняє зміну розподілу іншої.

Кореляційною називають залежність, коли зміна розподілу однієї величини викликає зміну середнього значення іншої.

Кореляційний аналіз дозволяє визначити й оцінити силу взаємозв'язку між змінними, у найпростішому випадку – парою змінних x та y . При цьому не є принциповим питання щодо логічної підпорядкованості між ними, тобто вони не визначаються як первинна (незалежна) та вторинна (залежна) змінні.

Хоча результати такого аналізу й можуть використовуватися на практиці, але більш цікавим є можливість керування зміною тієї чи іншої ознаки за рахунок зміни одного чи кількох визначених факторів. Для цього необхідно виділити одну ознаку (показник) як **залежну змінну (результативну змінну чи результативну ознаку)** y , а інший (інші) – як **незалежну змінну (факторну ознаку)** – x .

З огляду на кількість врахованих факторних ознак розрізняють залежності:

- **парні (однофакторні)**, коли враховується вплив на результативну ознаку y однієї факторної ознаки x ;
- **множинні (багатофакторні)**, де враховується вплив на результативну ознаку y декількох (двох, трьох чи більше) факторних ознак x_1, x_2, \dots, x_m (m – кількість врахованих факторів).

Оскільки реальні (емпіричні) значення результативної ознаки Y не завжди збігаються з її умовним математичним сподіванням $M(Y/X = x)$ та можуть бути різними за одного й того ж значення факторної змінної, виникає необхідність як виокремлення детермінованої складової, так і врахування стохастичної (ймовірнісної) природи залежності між ознаками. В результаті цього залежність між результативною та факторною(ими) ознаками описують такими співвідношеннями:

для випадку множинної залежності $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) + \varepsilon$;

для випадку парної залежності $Y = f(x) + \varepsilon$,

де $f(x), f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ – детермінована складова; ε – випадкова складова (похибка).

Вставка 4.4

Приклади залежностей між економічними показниками

Найчастіше в економіці та управлінні використовують такі залежності

- *функція витрат*, що відображає взаємозв'язок між витратами підприємства на реалізацію екологічних проєктів та обсягом викидів забруднюючих речовин (парна модель);
- *функція попиту*, що відображає залежність попиту на продукцію, що промаркована на відповідність певним добровільним стандартам, від ціни цієї продукції й доходів покупця (двофакторна модель);
- *виробнича функція*, що відображає залежність обсягу валової продукції підприємства, виготовленої з використанням екологічно безпечних технологій, від вартості інноваційних основних засобів, величини трудових ресурсів та вартості оборотних засобів (трифакторна модель).

Детермінована складова $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ являє собою **функцію регресії** (функцію регресії Y на X) та описує залежність між факторними змінними (x_1, x_2, \dots, x_m) та умовним математичним сподіванням залежної змінної $M(Y/X = x)$.

Зауважимо, що наявність у зазначених співвідношеннях випадкової складової ε обумовлена декількома причинами:

- по-перше, обчислення параметрів функції регресії в ідеальному випадку має відбуватись за даними генеральної сукупності. Але на практиці отримати такий обсяг інформації неможливо, тому обчислення виконують за даними статистичних вибірок обмеженого обсягу, що тягне за собою певну похибку у вимірюваннях. Також можливе виникнення похибки в разі опису неперервними функціями дискретних за структурою статистичних даних;
- по-друге, як вже зазначалось раніше, врахувати в залежностях усю сукупність факторів, які спричиняють вплив на досліджувану ознаку, неможливо. Дійсно, деякі чинники спричиняють неістотний вплив на об'єкт дослідження, а інші взагалі є принципово випадковими, як-то, наприклад, погодні умови чи, так званий, «людський фактор», причому останній є характерним саме для соціально-економічних процесів (явищ);
- по-третє, в багатьох випадках до моделі включаються змінні, які, в свою чергу, є комбінацією інших змінних, тобто вони є так званими агрегованими змінними;

- по-четверте, до збільшення похибки призводить неправильна специфікація моделі, тобто хибний вибір функціональної форми залежності внаслідок слабкої вивченості чи мінливості досліджуваних процесів (явищ).

Отже, саме з метою врахування наслідків дії на досліджуваний соціально-економічний об'єкт комплексу перелічених та інших причин і вводять випадкову складову.

Для визначення детермінованої складової $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ (тобто функції регресії) необхідно мати генеральну сукупність $(X_1, X_2, \dots, X_m, Y)$, що через низку причин неможливо, тому для проведення досліджень в економіці та управлінні використовують статистичні вибірки обмеженого обсягу $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}, y_i)$, за якими з приблизно однаковою точністю сукупність даних можна описати різними функціями. Отже, на практиці при дослідженні залежності між змінними використовують **рівняння регресії (емпіричні рівняння регресії)**, яке набуває вигляду

$$\hat{y}(x) = a + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_mx^m, \quad (4.42)$$

де a, b_1, b_2, \dots, b_m – параметри (коефіцієнти) рівняння регресії.

Основним завданням при моделюванні взаємозв'язків із використанням регресійних моделей є визначення параметрів рівняння регресії a, b_1, b_2, \dots, b_m .

Рівняння регресії, що описують взаємозв'язок між результативною та факторною(ими) ознаками певного соціально-економічного об'єкта, називають **економетричними моделями**. Вихідними даними для побудови економетричних моделей є результати статистичних спостережень – вибірки обмеженого обсягу (n одиниць) щодо змінних $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}, y_i$, які перевірені на однорідність та закон розподілу.

Модель класичної парної регресії

У загальному вигляді **класична парна вибіркова лінійна регресія** встановлює залежність між парою випадкових величин (незалежною ознакою x та залежною ознакою y) у вигляді лінійного рівняння регресії

$$y_i = a + bx_i + \varepsilon_i, \quad (4.43)$$

де y_i – вектор спостережень за залежною змінною y ; x_i – вектор спостережень за незалежною змінною x ; a, b – невідомі параметри (коефіцієнти) рівняння регресії, які є оцінками параметрів α та β функції регресії; ε_i – вектор випадкових відхилень (похибок).

Отже, величина y_i розглядається як результат взаємодії двох складових: не випадкової (детермінованої) $a + bx_i$ та випадкової (стохастичної) ε_i .

Наведене рівняння є лінійним за параметрам a та b , обчислення яких є основною задачею економетричного моделювання (обчислення рівняння регресії). Оскільки побудова регресійних моделей здійснюється за вибілковими даними, отриманим в результаті статистичного спостереження за поведінкою реальних соціально-економічних об'єктів, то розглянуте рівняння регресії ще називають емпіричним.

Кореляційне поле та лінія регресії. Статистичні дані про величину факторної та результативної ознак можна зобразити графічно у вигляді точкової діаграми (рис. 4.6, а). Цей графік, що відображує значення досліджуваних ознак x та y , має назву **кореляційного поля** або **діаграми розсіювання**. За щільністю точок кореляційного поля можна скласти попереднє уявлення про щільність взаємозв'язку між ознаками, про спрямованість цього взаємозв'язку, а за формою цього поля – визначити, які саме види рівнянь регресії доцільно обчислювати для опису залежності між факторною та результативною ознаками.

У кореляційному полі можна виділити лінію симетрії – **лінію регресії** (рис. 4.6, б), яка є графічним відображенням рівняння регресії, тобто форму залежності між парою досліджуваних ознак. Іншими словами, лінія регресії відображає, як у середньому змінюється результативна ознака y при зміні факторної ознаки x .

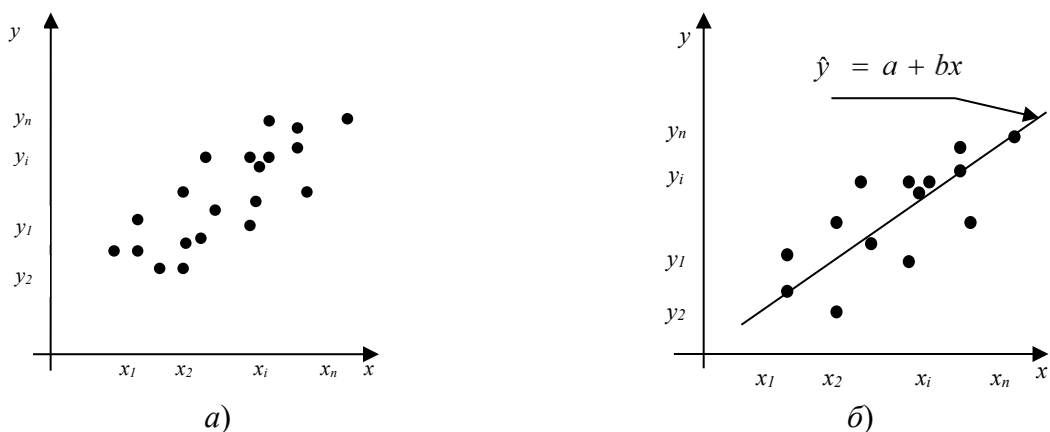


Рисунок 4.6 – Кореляційне поле: а) діаграма розсіювання; б) лінія регресії

З рисунків 4.6, а та 4.6, б видно, що точки кореляційного поля розташовані дещо хаотично. Однією з причин цього, як зазначалось вище, є наявність впливу на результативну ознаку y не лише врахованої факторної ознаки x , а й інших факторів. В економетрії невраховані фактори прийнято називати «збурювачами».

Для кожної точки кореляційного поля i можна визначити її **відхилення** (залишки) від лінії регресії, котре графічно виглядає як відрізок між точкою кореляційного поля y_i та точкою, що відповідає тому ж значенню x_i та належить лінії регресії \hat{y}_i , тобто

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i. \quad (4.44)$$

Якщо б на результативну ознаку y не впливали інші фактори, окрім факторної ознаки x , то залишки були б відсутні ($\varepsilon_i = 0$), і усі точки кореляційного поля належали б лінії регресії.

➔ **Коефіцієнти кореляції та детермінації**

Для кількісної оцінки щільності лінійного взаємозв'язку між факторною та результативною ознаками застосовують парний коефіцієнт кореляції Пірсона та коефіцієнт детермінації.

Коефіцієнт кореляції Пірсона (парний коефіцієнт кореляції) визначають за такою формулою:

$$r = \frac{\sum y_i x_i - \bar{y} \cdot \bar{x}}{S_y S_x}, \quad (4.45)$$

де \bar{x} , \bar{y} – середні значення відповідно факторної та результативної ознак; S_x , S_y – середні квадратичні відхилення відповідно факторної та результативної ознак, тобто

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2}, \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2}.$$

Парний коефіцієнт кореляції надає загальну (описову) характеристику щільності (сили) лінійного взаємозв'язку між ознаками x та y , а також його напрямку та може набувати значень у такому інтервалі: $-1 \leq r \leq 1$, тобто $0 \leq |r| \leq 1$.

Про силу взаємозв'язку судять за абсолютним значенням коефіцієнта кореляції (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Градація значень коефіцієнта кореляції Пірсона r

Інтервал зміни	Характеристика щільності лінійного взаємозв'язку
$0,7 \leq |r| \leq 1$	Взаємозв'язок щільний (тісний)
$0,3 \leq |r| \leq 0,7$	Взаємозв'язок середньої щільності (середній)
$0 < |r| \leq 0,3$	Взаємозв'язок слабкої щільності (слабкий)
$|r| = 1$	Варіація y повністю пояснюється варіацією x (взаємозв'язок функціональний)
$r = 0$	Варіація y не пояснюється варіацією x (лінійний взаємозв'язок відсутній)

Напрямок взаємозв'язку визначають за знаком коефіцієнта кореляції, а саме:

- додатні значення ($r_{yx} \geq 0$) свідчать про прямий взаємозв'язок між x та y , тобто зростання однієї змінної приведе до зростання іншої;
- від'ємні значення ($r_{yx} \leq 0$) свідчать про обернений взаємозв'язок між x та y , тобто зростання однієї змінної викликає зменшення іншої.

Якщо коефіцієнт набув значення 0, то можна говорити про відсутність лінійного зв'язку між ознаками (але не про його відсутність взагалі). У випадках, коли коефіцієнт кореляції дорівнює 1 або -1 , то взаємозв'язок між факторною ознакою x та результативною ознакою y вважають функціональним, тобто вся варіація y пояснюється варіацією врахованої ознаки x .

Коефіцієнт детермінації надає більш точну кількісну характеристику щільності взаємозв'язку між факторною x та результативною y ознаками. Його обчислюють як квадрат коефіцієнта кореляції r^2 . Цей показник може набувати значень в інтервалі $0 \leq r^2 \leq 1$. За коефіцієнтом детермінації визначають, яка частка варіації результативної ознаки y пояснюється варіацією факторної ознаки x (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Градація коефіцієнта детермінації r^2

Інтервал зміни	Характеристика щільності взаємозв'язку
$0,5 \leq r^2 < 1$	50 % та більше варіації y пояснюється варіацією x , тобто залежність щільна
$0,1 \leq r^2 < 0,5$	10 – 50 % варіації y пояснюється варіацією x , тобто залежність середньої щільності
$0 < r^2 < 0,1$	Менше 10 % варіації y пояснюється варіацією x , тобто залежність слабка

Вставка 4.5

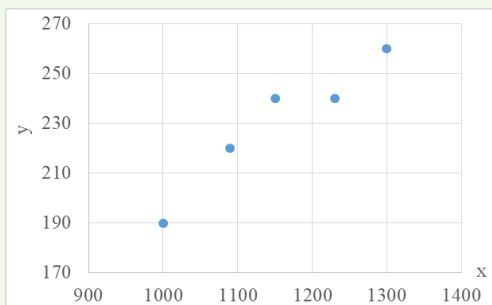
Моделювання залежності

Приклад 4.7. Досліджується залежність обсягу експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, від обсягу інвестицій у «зелені» технології (табл. 4.7, стовпчики 1 – 2).

Таблиця 4.7 – Обсяги інвестицій, експорту та допоміжні розрахунки

	Вихідні дані		Допоміжні розрахунки		
	Обсяг інвестицій, x , млрд грн	Обсяг експорту, y , млн дол.	x^2	y^2	$x \cdot y$
	1	2	3	4	5
	1000	190	1000000	36100	190000
	1090	220	1188100	48400	239800
	1150	240	1322500	57600	276000
	1230	240	1512900	57600	295200
	1300	260	1690000	67600	338000
Сума	5770	1150	6713500	267300	1339000
Середнє	1154	230	1342700	53460	267800

На основі вихідних даних та допоміжних розрахунків (табл. 4.7, стовпчики 3 – 5) обчислюємо середні квадратичні відхилення змінних і коефіцієнт кореляції, а саме:



$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2} = \sqrt{1342700 - 1154^2} = 104,80;$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2} = \sqrt{53460 - 230^2} = 23,66;$$

$$r = \frac{\frac{\sum y_i x_i}{n} - \bar{y} \cdot \bar{x}}{S_y S_x} = \frac{267800 - 1154 \cdot 230}{104,80 \cdot 23,66} = 0,9596$$

Рисунок 4.7 – Кореляційне поле (діаграма розсіювання)

Як бачимо, значення коефіцієнта кореляції $0,7 \leq |r| = 0,9596 \leq 1$, отже, кореляційний зв'язок між обсягами експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, та інвестицій у «зелені» технології щільний. А оскільки $r = 0,9596 > 0$, то зв'язок між обсягами експорту продукції та інвестицій є прямо пропорційним, тобто зі збільшенням обсягу інвестицій збільшується обсяг експорту.

Коефіцієнт детермінації $r^2 = 0,9596^2 = 0,9209$. Це означає, що 92,09 % варіації обсягу експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, пояснюється варіацією обсягу інвестицій у «зелені» технології, а 7,091 % варіації обсягу експорту пояснюється впливом інших факторів. Графічне подання кореляційного поля у вигляді точкової діаграми показано на рис. 4.7.

➔ **Метод найменших квадратів**

Для обчислення параметрів (тобто коефіцієнтів a, b_1, b_2, \dots, b_m) лінійних рівнянь регресії $\hat{y} = a + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_mx^m$ застосовують метод найменших квадратів (МНК) або метод Ейткена.

Простішим випадком такої регресії є парна економетрична модель $\hat{y}_i = a + bx_i$, на прикладі котрої розглянемо сутність МНК.

У кореляційному полі можна провести безліч прямих, тобто ліній регресії, серед яких необхідно визначити ту, що буде найбільш точно описувати залежність між результативною та факторною ознаками. З рис. 4.8 видно, що чим більше точки кореляційного поля наближені до лінії регресії, тим точніше ця лінія буде описувати залежність.

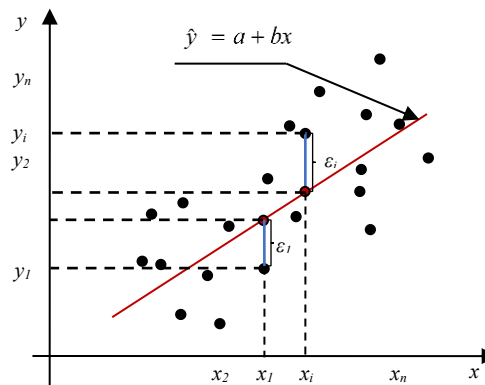


Рисунок 4.8 – Розсіювання точок кореляційного поля відносно лінії регресії

Оскільки відстань кожної точки кореляційного поля від лінії регресії є довжиною відповідного відрізка, тобто відхиленням $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$, то **сутність МНК** можна сформулювати таким чином: лінія регресії має таким чином проходити поміж точок кореляційного поля, щоб сума квадратів відхилень цих точок від лінії регресії була мінімальною, тобто

$$F = \sum \varepsilon_i^2 \rightarrow \min$$

або

$$F = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min$$

з урахуванням, що $\hat{y} = a + bx$, отримують

$$F = \sum (y_i - a - bx_i)^2 \rightarrow \min.$$

Для визначення параметрів a та b , які мінімізують функцію F , необхідно розв'язати таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a} = -2\Sigma(y_i - a - bx_i) = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial b} = -2\Sigma(y_i - a - bx_i) \cdot x_i = 0. \end{cases}$$

Виконавши перетворення, отримуємо нормальну систему, тобто

$$\begin{cases} a + b\bar{x} = \bar{y}, \\ a\bar{x} + b\frac{\Sigma x_i^2}{n} = \frac{\Sigma y_i x_i}{n}. \end{cases}$$

Для її розв'язування можна використовувати різні методи, зокрема спосіб підстановки. Для цього з першого рівняння системи виразимо змінну a :

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \tag{4.46}$$

та отриманий вираз підставимо у друге рівняння системи

$$(\bar{y} - b\bar{x})\bar{x} + b\frac{\Sigma x_i^2}{n} = \frac{\Sigma y_i x_i}{n}.$$

Враховуючи, що $r = \frac{\Sigma y_i x_i - \bar{y} \cdot \bar{x}}{S_y S_x}$ та $S_x^2 = \frac{\Sigma x_i^2}{n} - \bar{x}^2$, отримуємо таку формулу для обчислення параметра b :

$$b = r \frac{S_y}{S_x}. \tag{4.47}$$

Отже, між коефіцієнтом b лінійного рівняння регресії та коефіцієнтом кореляції існує прямий зв'язок.

Коефіцієнт b називають **нахилом** через те, що він чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу лінії регресії до осі абсцис (ox): якщо кут нахилу гострий, то коефіцієнт b набуває додатних значень, а якщо тупий – від'ємних.

У лінійних рівняннях регресії b є коефіцієнтом біля факторної ознаки x та вказує на величину абсолютної зміни результативної ознаки у при зміні факторної ознаки x на одну одиницю, а тому в економетричних моделях, що описують залежність між економічними показниками, цей коефіцієнт є **граничною продуктивністю**.

Стосовно параметра a , тобто вільного члена лінійного рівняння регресії, то в більшості випадків економічного змісту він не має. Цей коефіцієнт називають **перетином**, оскільки він показує, чому дорівнюватиме результативна ознака у за умови, що $x = 0$, тобто точку перетину лінії регресії з віссю ординат OY .

Вставка 4.6

Метод найменших квадратів

Приклад 4.8. за даними з приклада 6.7 побудувати лінійну лінію регресії методом найменших квадратів

За результатами розрахунків у прикладі 6.7 маємо, що $S_x = 104,80$, $S_y = 23,66$, $r_{yt} = 0,95696$, $r_{yt}^2 = 0,9209$, $n = 5$, $m = 1$.

Обчислимо параметри лінійного рівняння регресії, а саме:

$$b = r \frac{S_y}{S_x} = 0,9596 \cdot \frac{23,66}{104,8} = 0,22.$$

Відтак, збільшення обсягу інвестицій у «зелені» технології на 1 млрд грн у середньому приводить до збільшення обсягу експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, на 0,22 млн дол.

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = 230 - 0,22 \cdot 1154 = -20,05.$$

Отже, лінійне рівняння залежності обсягу експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, від обсягу інвестицій у «зелені» технології має такий вигляд:

$$\hat{y} = -20,05 + 0,22x.$$

Зобразимо лінію регресії графічно, для цього обчислимо координати двох точок, які їй належать, задавши довільні значення x , тобто

$$y(x = 1000) = -20,05 + 0,22 \cdot 1000 = 196,6 \text{ млн дол.};$$

$$y(x = 1300) = -20,05 + 0,22 \cdot 1300 = 266,0 \text{ млн дол.}$$

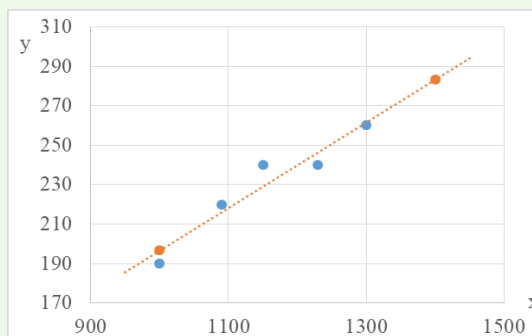


Рисунок 4.9 – графічне зображення лінії регресії до приклада 6.8

Відобразимо на графіку (рис. 4.9) пряму лінію, що проходить через точки (1000; 196,6) та (1300; 266,0) та показує залежність обсягу експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, від обсягу інвестицій у «зелені» технології.

➔ **Моделювання нелінійних залежностей**

Лінійні рівняння регресії є лише окремими випадками регресійних рівнянь, до того ж на практиці вони досить рідко є найбільше відповідними для опису емпіричних даних. У більшості випадків в економічних дослідженнях використовують нелінійні моделі регресії – *криві зростання*.

Нелінійні моделі кривих зростання

– степенева (мультиплікативна)	$\hat{y} = ax^b$	(4.48)
– показова (експоненційна)	$\hat{y} = ab^x$;	(4.49)
– логарифмічна	$\hat{y} = a + b \ln x$;	(4.50)
– параболічна (поліноміальна, квадратична)	$\hat{y} = a + b_1x + b_2x^2$;	(4.51)
– гіперболічна (зворотня)	$\hat{y} = a + \frac{b}{x}$	(4.52)
– експоненційна модифікована крива	$\hat{y} = ab^x + c$;	(4.53)
– крива Гомперця	$\hat{y} = e^{ab^x+c}$	(4.54)
– логістична крива	$\hat{y} = \frac{1}{ab^x + c}$	(4.55)

Для обчислення параметрів деяких нелінійних моделей застосування МНК можливе лише після певних математичних перетворень вихідних рівнянь задля їхнього приведення до лінійної форми, тобто необхідно проводити *лінеарізацію* моделей. Наприклад, оскільки степеневі, експоненційні та логарифмічні рівняння регресії є нелінійними як за параметрами, так і за змінними, то спочатку необхідно привести їх до лінійної форми шляхом логарифмічних перетворень. Параболічну та гіперболічну функції зводять до лінійної форми шляхом заміни змінних, оскільки вони є нелінійним тільки за змінними, а за параметрами – лінійними. Принципи перетворень аналогічні тим, що застосовуються для перетворення нелінійних трендів до лінійної форми і були викладені вище. Для обчислення ж параметрів інших вищенаведених нелінійних залежностей можуть застосовуватись спеціальні спрощені методи.

➤ **Степенева модель** є однією з найбільш поширених форм кривих, які застосовуються для опису прискореного та уповільненого зростання, а також спаду. Для економічних процесів та явищ типовим випадком є той, коли $a \geq 0$.

Параметр b може набувати цілих і не цілих значень, в останньому випадку розглядають лише випадок, коли $x \geq 0$.

Степеневими рівняннями описують попит на різні категорії товарів (наприклад, криві Торнквіста), будують виробничі функції Кобба-Дугласа та криві байдужості.

В економетричних дослідженнях лінеаризація ступеневої моделі виконується шляхом логарифмування в переважній більшості випадків за експонентою, тобто обчислюють натуральні логарифми. Для зворотного перетворення коефіцієнт a вихідного ступеневого рівняння розраховують за такою формулою: $a = e^A$.

➤ **Показові (експоненційні) криві** набули найбільшого розповсюдження у фінансах, оскільки їх застосовують при приведенні витрат та інвестицій до поточного часу, але їх використовують й у тих випадках, коли необхідно визначити темпи росту або приросту певних соціально-економічних показників. В цілому експоненціальні рівняння застосовують для опису швидко зростаючих чи спадних економічних процесів, причому розглядають два випадки: $b > 0$ відповідає зростаючій до нескінченності функції та $b < 0$ відповідає спадній до 0 функції.

Слід зазначити, що експоненційна модель може набувати різних форм, наприклад: $\hat{y} = ae^{bx}$ та $\hat{y} = e^{a+bx}$.

➤ **Параболічну модель** використовують для опису рівноприскореного зростання чи зменшення досліджуваних показників у випадках, коли на певному інтервалі зміни фактору x змінюється і характер його зв'язку з результативною ознакою y . Для опису соціально-економічних процесів (явищ) використовують переважно ті частини параболи, що відповідають $x \geq 0$.

➤ **Логарифмічну модель** доцільно застосовувати для опису процесів (явищ), які характеризуються повільним зменшенням показників, або коли прискорення зміни показників уповільнюється зі збільшенням факторної ознаки x .

➤ **Гіперболічну (зворотну) модель** використовують для опису зменшення (збільшення) досліджуваних показників у тих випадках, коли таке зменшення (збільшення) уповільнюється зі зростанням факторної ознаки x та асимптотично прямує до певної межі («стелі», якщо $b < 0$, або «підлоги», коли $b > 0$).

➤ **Експоненційну модифіковану криву (модифіковану експоненту)** використовують для опису розвитку соціально-економічних процесів (явищ), що характеризуються як зростанням (яке поступово прискорюється), так і зменшенням, але в обох випадках ці процеси обмежені знизу.

➤ **Криву Гомперця** використовують для опису процесів, які мають обмеження знизу чи зверху, отже, доволі часто саме її застосовують у маркетингових дослідженнях ринків та попиту, а також для обґрунтування рішень щодо збуту продукції.

➤ **Логістичну криву**, що належить до s-подібних кривих, доцільно використовувати для дослідження процесів, яким після повільного зростання від «підлоги» характерне стрімке зростання із подальшим уповільненням з асимптотичним наближенням до «стелі».

Зауважимо, що для обчислення параметрів модифікованої експоненти, кривої Гомперця та логістичної кривої застосовують спеціальні методи обчислення.

Більш детально із сферою та порядком використання модифікованої експоненти, кривої Гомперця та логістичної кривої можна ознайомитися у [9, 26].

➔ **Перевірка якості економетричних моделей**

Побудовані економетричні моделі мають бути верифіковані із застосуванням загальноприйнятих критеріїв математичної статистики.

Спочатку перевіряємо значимість коефіцієнта кореляції та параметрів рівняння регресії за критерієм Стьюдента. Порядок цього процесу для парної економетричної моделі зводиться до таких кроків:

1. Обчислюють помилки коефіцієнта кореляції та параметрів (a , b), обумовлені обмеженим обсягом вибірки:

$$S_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - m - 1}}, \quad (4.56)$$

$$S_a = S_{\text{зал}} \sqrt{\frac{1}{n} \left(1 + \frac{\bar{x}^2}{S_x^2} \right)}, \quad (4.57)$$

$$S_b = \frac{S_{\text{зал}}}{S_x \sqrt{n}}, \quad (4.58)$$

де n – обсяг вибірки; m – кількість врахованих у рівнянні факторних ознак (для парного рівняння $m=1$); $S_{\text{зал}}$ – залишкове розсіювання, що обчислюється за формулою

$$S_{\text{зал}} = S_y \sqrt{(1 - r^2) \frac{n}{n - 2}}.$$

2. Розраховують коефіцієнти (критерії) значущості коефіцієнта кореляції та параметрів рівняння регресії:

$$t_r = \frac{|r|}{S_r}, \quad (4.59) \quad t_a = \frac{|a|}{S_a} \quad (4.60) \quad t_b = \frac{|b|}{S_b} \quad (4.61)$$

3. Із довідкових таблиць розподілу Стьюдента визначають критичне (табличне) значення критерію Стьюдента $t_{\text{табл}}$, що залежить від прийнятого рівня значущості α та ступеня свободи ($n - m - 1$).

4. Порівнюють розраховані значення статистики Стьюдента t_r , t_a та t_b із критичним (табличним) значенням $t_{\text{табл}}$. Якщо розраховані значення більші табличних, то відповідний коефіцієнт визнається значимим із довірчою ймовірністю $(1 - \alpha)$. У протилежному випадку – коефіцієнт, що оцінюється, є незначущим.

Вставка 4.7

Оцінювання якості економетричної моделі

Приклад 4.9. Перевіримо якість лінії регресії, побудованої у прикладі 4.8.

Скористаємось результатами, розрахованими у прикладах 4.7, 4.8, а саме: $S_x = 104,80$, $S_y = 23,66$, $r = 0,95696$, $r^2 = 0,9209$, $n = 5$, $m = 1$.

Для перевірки значущості коефіцієнта кореляції спочатку обчислимо помилку коефіцієнта кореляції, а саме:

$$S_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-m-1}} = \sqrt{\frac{1-0,95696^2}{5-1-1}} = 0,1624 .$$

Тепер обчислимо значення критерію Стьюдента: $t_r = \frac{0,95696}{0,1624} = 5,91$.

Визначаємо критичне значення критерію Стьюдента для рівня значущості $\alpha = 0,05$ (див. табл. 4.2), а саме: $t_{\text{табл}}(3; 0,05) = 3,18$.

Оскільки $t_r = 5,91 > t_{\text{табл}} = 3,18$, то коефіцієнт кореляції r є значущим, отже, висновок про щільний й прямий взаємозв'язок між обсягом експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, та обсягом інвестицій у «зелені» технології підтверджується.

На наступному етапі економетрична модель оцінюється на адекватність реальним умовам із застосуванням критерію Фішера (критерію адекватності, F -тесту), який обчислюється за такою формулою:

$$F = \frac{r^2/v_1}{(1-r^2)/v_2}, \quad (4.62)$$

де v_1, v_2 – ступені свободи, $v_1 = m$, $v_2 = n - m - 1$.

Розраховане значення статистики Фішера F порівнюють з критичним (табличним) значенням $F_{\text{табл}}$, яке обирають з довідкових таблиць розподілу Фішера з огляду на прийнятий рівень значущості α та ступені свободи v_1 та v_2 . Якщо $F_r > F_{\text{табл}}$, то розрахована модель є адекватною з довірчою ймовірністю $(1 - \alpha)$. У протилежному випадку модель є неадекватною.

Вставка 4.8

Перевірка адекватності економетричної моделі

Приклад 4.10. Перевіримо адекватність моделі побудованої у прикладі 4.8.

Використаємо результати розрахунків попередніх прикладів: $S_x = 104,80$, $S_y = 23,66$, $r = 0,95696$, $r^2 = 0,9209$, $n = 5$, $m = 1$. Тепер обчислюємо значення критерія Фішера, а саме:

$$F = \frac{r^2 / V_1}{(1-r^2) / V_2} = \frac{0,9596/1}{(1-0,9596)/(5-1-1)} = 34,92.$$

Визначаємо критичне значення критерію Фішера для рівня значимості $\alpha = 0,05$ (див. табл. 4.3), $F_{\text{табл}}(1; 5; 0,05) = 6,61$.

Оскільки $F = 34,92 > F_{\text{табл}} = 6,61$, можна зробити висновок, що лінійне рівняння регресії адекватно описує залежність обсягу експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, від обсягу інвестицій у «зелені» технології.

Як зазначалось раніше, неадекватність моделі може бути викликана як недостатнім обсягом вибірки, так і невідповідністю обраного типу рівняння регресії характеру залежності між досліджуваними показниками.

➔ **Коефіцієнт еластичності та гранична продуктивність**

Коефіцієнт еластичності $E_y(x)$ показує на скільки відсотків зміниться результативна ознака y , якщо факторну ознаку x змінити на 1 %. Цей показник характеризує відносну зміну результативної ознаки y при відносній зміні факторної ознаки x .

Загальна для усіх типів регресійних моделей формула коефіцієнта еластичності має такий вигляд:

$$E_y(x) = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{dy \cdot x}{dx \cdot y},$$

де dx/x , dy/y – відносний приріст x та y ; dx , dy – абсолютний приріст x та y .

Оскільки співвідношення $\frac{dy}{dx}$ у різний спосіб визначається для різних типів рівнянь регресії, то для різних рівнянь одержимо різні кінцеві формули коефіцієнта еластичності.

Розглянемо два найпоширеніші типи рівнянь.

1. Для лінійної економетричної моделі $\hat{y} = a + bx$ похідна $\frac{dy}{dx} = b$, отже,

$$Ey(x) = b \frac{x}{y} = b \frac{x}{a + bx}.$$

Як бачимо, у лінійних моделях коефіцієнт еластичності залежить від x , тобто еластичність не є сталою величиною. Тому на практиці при розрахунках за вищенаведеною формулою використовують середні значення змінних x та y , тобто використовують таку формулу

$$Ey(x) = b \frac{\bar{x}}{\bar{y}}. \quad (4.63)$$

2. Для степеневі економетричної моделі $\hat{y} = ax^b$ похідна $\frac{dy}{dx} = bax^{b-1}$, отже,

$$Ey(x) = bax^{b-1} \frac{x}{y} = \frac{bax^b}{y} = b. \quad (4.64)$$

Отже, у степеневих моделях коефіцієнт еластичності є величиною сталою.

Зауважимо, що коефіцієнт еластичності може набувати як додатних, так і від'ємних значень. Наприклад, у функціях попиту (вони описують залежність попиту на певний товар від його ціни, ціни інших товарів та доходу) еластичність попиту i -го блага за його ціною від'ємна, за доходом – додатна, а за ціною інших благ може набувати різних значень. Зокрема, якщо вона від'ємна, то два товари є взаємовиключними, якщо еластичність додатна, то такі товари взаємозамінні, а якщо ж еластичність дорівнює 0, то товари незалежні один від одного (тобто індиферентні). Виключенням можуть бути лише товари так званого «нижчого порядку», для яких еластичність за ціною додатна. Прикладом таких благ може служити хліб.

➤ *Приклад 4.11.* Дослідимо за допомогою коефіцієнта еластичності модель, побудовану у прикладі 4.7. За результатами розрахунків маємо: $\bar{x} = 1154$ млрд грн; $\bar{y} = 230$ млн дол., $\hat{y} = -20,05 + 0,22x$ обчислюємо коефіцієнт еластичності, а саме:

$$Ey(x) = b \frac{\bar{x}}{\bar{y}} = 0,22 \cdot \frac{1154}{230} = 1,1.$$

Отже, в разі збільшення обсягу інвестицій у «зелені» технології на 1 % обсяг експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, збільшиться на 1,1 %.

Гранична продуктивність $P_y(x)$ показує на скільки одиниць зміниться результативна ознака y , якщо факторна ознака x зміниться на 1 одиницю. Тобто цей показник характеризує абсолютний приріст результативної ознаки y при абсолютному прирості факторної ознаки x .

Загальна для всіх типів регресійних моделей формула граничної продуктивності має такий вигляд:

$$P_y(x) = \frac{dy}{dx}.$$

Вона набуває різного виду залежно від типу рівняння регресії, а саме:

1) для лінійних економетричних моделей, як зазначалось вище, граничною продуктивністю є параметр b , тобто

$$P_y(x) = b ; \quad (4.65)$$

2) для степеневих економетричних моделей

$$P_y(x) = b \frac{\bar{y}}{\bar{x}}. \quad (4.66)$$

➤ *Приклад 4.12.* За результатами розрахунків у попередньому прикладі: $\hat{y} = -20,05 + 0,22x$, отже визначимо граничну продуктивність, а саме:

$$P_y(x) = b = 0,22.$$

Відтак, в разі збільшення обсягу інвестицій у «зелені» технології на 1 млрд грн обсяг експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, збільшиться на 0,22 млн дол.

➔ *Модель класичної множинної регресії*

Складність економічних систем як об'єктів досліджень обумовлена наявністю численних взаємозв'язків, якими вони можуть бути охарактеризовані. Тобто таким системам притаманні множинні залежності, коли результативна ознака залежить не від одного, а від багатьох чинників. Моделювання залежностей у таких системах передбачає оцінювання сукупного впливу врахованих факторних ознак x_1, x_2, \dots, x_m на результативну ознаку y із застосуванням коефіцієнта множинної детермінації та множинного коефіцієнта кореляції.

Коефіцієнт множинної детермінації характеризує частку варіації результативної ознаки y , що пояснюється варіацією всієї сукупності факторних ознак (x_1, x_2, \dots, x_m) .

Обчислюють множинний коефіцієнт детермінації за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{|Q|}{A_{1,1}}, \quad (4.67)$$

де $|Q|$ – визначник кореляційної матриці; $A_{1,1}$ – алгебраїчне доповнення до елемента матриці, що знаходиться на перетинанні 1-го рядка і 1-го стовпця.

Він має такі ж межі коливання, що і парний коефіцієнт детермінації.

Множинний коефіцієнт кореляції R вимірює щільність кореляційного зв'язку між результативною ознакою y та всією сукупністю факторних ознак x_1, x_2, \dots, x_m й визначається за такою формулою:

$$R = \sqrt{R^2}. \quad (4.68)$$

Множинний коефіцієнт кореляції може набувати значень в інтервалі від 0 до 1 та, на відміну від парного коефіцієнта кореляції, не характеризує напрямок взаємозв'язку між ознаками.

Моделювання залежності між результативною та факторними ознаками здійснюється шляхом побудови **множинного (багатофакторного) рівняння регресії (економетричної моделі)**.

Множинні економетричні моделі, як і парні, можуть бути різних типів, наприклад, лінійні $\hat{y} = a + b_1x_1 + \dots + b_mx_m$ або степеневі $y = ax_1^{b_1} \cdot \dots \cdot x_m^{b_m}$.

Параметри лінійних множинних економетричних моделей (та зведених до лінійної форми нелінійних моделей) визначаються методом найменших квадратів. Кожен параметр b_i у множинній моделі характеризує зміну результативної ознаки y при зміні відповідної факторної ознаки x_i за умови, що інші враховані факторні ознаки залишаються незмінними.

Оцінювання значимості параметрів множинних економетричних моделей та адекватності таких моделей проводиться аналогічно парним рівнянням регресії. Економічна інтерпретація побудованих моделей також передбачає розрахунок коефіцієнтів еластичності та граничних продуктивностей.

Більш детально з порядком обчислення множинних економетричних моделей та їхньою верифікацією можна ознайомитися у [9, 26, 30].

Класичними прикладами множинних економетричних моделей є функції попиту та виробничі функції, принципи побудови котрих розглянемо детальніше.

Попит споживача на деякий досліджуваний товар залежить від його доходу, ціни цього товару, а також цін на інші товари, що або доповнюють, або замінюють досліджуваний. Залежність попиту від перелічених чинників описують за допомогою **функції попиту**, яка має такий загальний вигляд:

$$S_i = f(P_1, P_2, \dots, P_m, D) ,$$

де S_i – попит на i -ий товар; P_i – ціна i -го товару; D – дохід споживача.

Основні форми функцій попиту

Лінійна	$S_i = a + \sum_{i=1}^m b_i P_i + cD ,$	(4.69)
---------	---	--------

Степенева	$S_i = aP_1^{b_1} \cdot P_2^{b_2} \cdot \dots \cdot P_i^{b_i} \cdot \dots \cdot P_m^{b_m} \cdot D^c$	(4.70)
-----------	--	--------

Параметри функцій попиту визначають методом найменших квадратів.

Зауважимо, що важливим показником функції попиту є еластичність попиту за ціною і за доходом. Зокрема, між еластичностями цін і доходу (за умови врахування всього споживчого кошика товарів) має виконуватися таке співвідношення:

$$ES_i(P_1) + ES_i(P_2) + \dots + ES_i(P_m) + ES_i(D) = 0. \quad (4.71)$$

Виконання цієї умови свідчить про раціональну поведінку споживача в певних економічних умовах.

Оскільки на практиці врахувати весь споживчий кошик неможливо, то будують функції попиту i -го блага від ціни i -го блага та доходу або функції попиту від цін основних груп товарів і доходу. Будують також різні модифікації цих моделей, у котрих враховують тільки ціни.

Більш детально з сутністю функцій попиту та особливостями їхньої побудови можна ознайомитися у [26, 30].

Виробнича функція – це функція, що відбиває взаємозв'язок між обсягами витрат ресурсів і обсягом випуску продукції.

У макроекономіці прийнято вважати, що результативна ознака y – це максимально можливий обсяг випуску продукції при заданих витратах ресурсів x_1, x_2, \dots, x_m . У мікроекономіці ж із застосуванням виробничої функції описують статистичний зв'язок між витратами ресурсів і випуском продукції. Використовують для цього степеневе рівняння регресії, яке називають *виробничою функцією Кобба – Дугласа*:

$$\hat{y} = ax_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_m^{b_m} . \quad (4.72)$$

Зазвичай ресурсами, тобто факторними змінними, в моделях Кобба – Дугласа виступають виробничі засоби, трудові та фінансові ресурси тощо, а результативною ознакою y , як правило, є обсяг випуску валової або товарної продукції.

Ця форма виробничої функції придатна для опису залежності на короткостроковий період, коли технічний прогрес не істотно впливає на динаміку обсягу валової продукції. Якщо ж необхідно врахувати вплив технічного прогресу, то виробничу функцію Кобба – Дугласа записують у такому вигляді:

$$\hat{y} = ax_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_m^{b_m} k^t , \quad (4.73)$$

де k – коефіцієнт зростання обсягу валової продукції, котре обумовлено впливом технічного прогресу; t – умовний час.

З огляду на кількість видів ресурсів, що беруться до уваги у виробничій функції, виокремлюють одноресурсні, дворесурсні та інші моделі. На практиці для промислових підприємств найчастіше будують дворесурсні моделі, в яких враховують $x_1 = K$ – капітал (вартість основних засобів) та $x_2 = L$ – трудові ресурси (трудовитрати або кількість працівників), а для аграрного сектора економіки – триресурсні виробничі функції, в котрих додатково зважають на $x_3 = R$ – земельні ресурси. Поряд із названими доволі часто постає необхідність врахування й обсягу фінансових ресурсів (F).

Параметризація виробничих функцій здійснюється методом найменших квадратів з попередньою лінеаризацією, процедура котрої розглядалася вище.

Коефіцієнти виробничої функції Кобба – Дугласа b_1, b_2, \dots, b_m є еластичностями обсягу випуску продукції за відповідними ресурсами, а їхня сума являє собою **коефіцієнт масштабованості**, котрий відображає властивість масштабованості відповідного виробництва, тобто

$$B = b_1 + b_2 + \dots + b_m. \quad (4.74)$$

Якщо $B = 1$, то збільшення обсягу всіх ресурсів в k -разів призводить до збільшення обсягу випуску продукції також у k -разів, тобто виробництво індивідуентне до масштабів. У випадку $B < 1$ збільшення обсягу ресурсів в k -разів стимулює збільшення випуску

продукції в $k^B < k$ разів, отже, ефективнішим є виробництво менших масштабів. За умови, що $B > 1$, доцільно збільшувати масштаби виробництва, оскільки збільшення обсягів ресурсів у k -разів забезпечить збільшення обсягу випуску продукції у k^B разів.

Слід зазначити, що виробнича функція Кобба – Дугласа при наближенні до границі є некоректною, оскільки передбачає можливість виготовлення певного обсягу валової продукції за різних співвідношень між витратами ресурсів, зокрема в разі істотного збільшення вартості основних засобів при кардинальному скороченні обсягу трудових ресурсів (тобто створення так званого безлюдного виробництва) або навпаки – у випадку мінімального використання основних засобів при залученні великих обсягів трудових ресурсів (тобто використовувати переважно ручну працю). У зв'язку з цим при побудові економетричних моделей аналізу виробництва також застосовують такі виробничі функції, як CES-функцію, виробничу функцію Леонтьєва й ін.

Більш детально з сутністю функцій попиту та особливостями їхньої побудови можна ознайомитися у [26, 30].

➔ Прогнозування наслідків впливу на об'єкт управління із застосуванням економетричних моделей

При прогнозуванні наслідків впливу на об'єкт управління із застосуванням економетричних моделей можна отримати відповіді на три типи запитань:

1. *Чому буде дорівнювати результативна ознака y , якщо факторна ознака x набуде певного значення?*

Для відповіді у розраховану модель підставляють задане значення x та обчислюють відповідне значення y .

➤ *Приклад 4.13.* За результатами розрахунку економетричної моделі залежності обсягу експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, від обсягу інвестицій у «зелені» технології (див. приклад 4.7) $y = -20,05 + 0,22x$ обчислимо обсяг експорту продукції, за умови, що обсяг інвестицій становитиме 1500 млрд грн, а саме:

$$y(x = 1500) = -20,05 + 0,22 \cdot 1500 = 309,95 \text{ млн дол.}$$

Отже, якщо обсяг інвестицій у «зелені» технології дорівнюватиме 1300 млрд грн, обсяг експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, складатиме 309,95 млн дол.

2. На скільки зміниться результативна ознака y , якщо факторна ознака x зміниться на певну величину?

Для відповіді на це запитання можна використати коефіцієнт еластичності (який показує відносну характеристику таких змін) та граничну продуктивність (вона дозволяє визначити абсолютну характеристику змін). Приклади обчислення названих показників розглядалися вище.

3. Якою має бути величина факторної ознаки x , щоб отримати бажане значення результативної ознаки y ?

Для відповіді у розраховану модель необхідно підставити задане значення y та обчислити відповідне значення x .

➤ *Приклад 4.14.* За результатами розрахунку економетричної моделі залежності обсягу експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, від обсягу інвестицій у «зелені» технології $\hat{y} = -20,05 + 0,22x$ обчислюємо величину інвестицій, необхідних для забезпечення обсягу експорту продукції 320 млн дол, а саме:

$$-20,05 + 0,22 \cdot x = 320, \text{ отже, } x = (320 + 20,05) / 0,22 = 1545,68 \text{ млрд грн.}$$

Отже, заданий обсяг експорту продукції, маркованої на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку, можна забезпечити в разі інвестування в «зелені» технології 1545,68 млрд грн.

Одержані в такий спосіб прогнозні значення мають достовірність на рівні значимості $(1 - \alpha)$.

Висновки

- 1 Кореляційний аналіз дозволяє виявляти статистичні взаємозв'язки між соціальними, економічними й екологічними показниками, що характеризують рівень сталості розвитку організації в цілому та її окремих складових, завдяки чому стає можливим цілеспрямований управлінський вплив на виявлені фактори та оперативне реагування на ті чи інші відхилення від заданої траєкторії сталого розвитку організації.
- 2 Статистичне моделювання динаміки розвитку соціально-економічних явищ і процесів полягає у виявленні тенденції, сезонних та періодичних коливань показників діяльності організації, а також випадкових коливань з метою подальшого обґрунтування управлінських рішень щодо забезпечення сталості розвитку організації в цілому та її окремих складових (соціальної, економічної, екологічної).
- 3 На основі статистичних моделей динаміки шляхом екстраполяції визначають точкові та інтервальні прогнози досліджуваних соціально-економічних та екологічних показників, які характеризують внутрішнє та зовнішнє середовище організації, що дозволяє із заданою ймовірністю визначати майбутній стан організації та розробляти випереджальні управлінські рішення, орієнтовані як на нівелювання негативної спрямованості розвитку, так і на реалізацію сприятливих умов задля забезпечення сталості організації.
- 4 Застосування економетричних моделей в процесі прийняття управлінських рішень, спрямованих на забезпечення сталого розвитку організацій, дозволяє прогнозувати наслідки впливу на фактори соціального, економічного та екологічного характеру як внутрішнього, так і зовнішнього походження, а також визначати необхідний рівень впливу таких факторів задля досягнення поставленої організацією мети.

Додаткову інформацію за питаннями, викладеними в цьому розділі, зацікавлений читач може знайти в літературі [3, 6, 7, 9, 12, 23, 26, 33, 40, 46, 49, 51, 61, 74, 80, 82]

Питання для самоконтроля і завдання

1 Надайте відповіді на такі питання:

- Дайте визначення понять «моделювання» та «модель».
- Що розуміють під адекватністю моделі?
- На які групи поділяють моделі?
- З якою метою застосовують статистичні й економетричні моделі в управлінні сталим розвитком? наведіть приклади
- Що являє собою прогноз?
- Що розуміють під періодом упередження (глибиною прогнозу)?
- Що розуміють під екстраполяцією?
- Що розуміють під верифікацією прогнозів?
- Охарактеризуйте процедуру ретроспективного оцінювання прогнозу.
- Охарактеризуйте етапи математичного моделювання соціально-економічних процесів (явищ).
- Якими взаємопов'язаними властивостями характеризуються процеси розвитку соціально-економічних явищ?
- На які види поділяють ряди динаміки з огляду на характер коливань їхніх рівнів?
- На які складові умовно поділяють процес розвитку соціально-економічних явищ з метою його моделювання?
- У який спосіб при моделюванні процесів розвитку соціально-економічних явищ враховують комплекс постійно діючих умов і причин, за яких формуються та розвиваються такі процеси?
- Що розуміють під тенденцією розвитку соціально-економічних процесів (явищ) та трендом (трендовою моделлю)?
- За допомогою яких типів трендових моделей здійснюють моделювання динаміки соціально-економічних показників?
- Який метод найчастіше використовують для параметризації (оцінювання параметрів) трендових моделей та який принцип покладено в його основу?
- Що характеризує параметр b лінійного тренда?
- Які перетворення необхідно провести над нелінійними трендовими моделями з метою подальшого застосування МНК?
- Який показник характеризує достовірність апроксимації динаміки трендом?
- Що розуміють під помилкою вибірки? В якому випадку вибіркоче значення показника вважають статистично значущим?
- Який критерій використовують для встановлення статистичної значущості коефіцієнта кореляції та параметрів тренда?
- Який критерій використовують для перевірки трендової моделі на адекватність?
- Що розуміють під автокореляцією?
- Що являє собою часовий лаг?

- Що характеризує коефіцієнт автокореляції?
- Що називають автокореляційною функцією та корелограмою?
- За яких значень циклічного коефіцієнта кореляції першого порядку роблять висновок про неістотність автокореляції випадкової складової ε_t ?
- Що являє собою авторегресійна функція? В яких випадках її застосовують?
- З якою метою визначають інтервальний прогноз рівнів ряду динаміки?
- Від чого залежить ширина довірчого інтервалу прогнозних значень ряду динаміки?
- Що розуміють під сезонністю та в який спосіб корегується визначене на основі екстраполяції тренда прогнозне значення показника в разі наявності сезонності?
- При моделюванні взаємозв'язків які змінні є залежними (результативними ознаками) та незалежними (факторними ознаками)?
- Як класифікують рівняння регресії з огляду на кількість врахованих факторних ознак?
- Що називають кореляційним полем (діаграмою розсіювання) та які висновки роблять, виходячи з його щільності та форми?
- Що називають лінією регресії та збурювачами?
- Що являють собою відхилення (залишки) та як їх визначають?
- Який вигляд має лінійне рівняння регресії (економетрична модель)?
- Який метод застосовують для обчислення параметрів лінійних рівнянь регресії?
- Який з параметрів лінійної економетричної моделі називають перетином, а який – нахилом та які висновки роблять, виходячи з їхніх значень?
- Які типи рівнянь регресії використовують при дослідженні залежностей між показниками, що описують соціально-економічні процеси (явища)?
- Які висновки роблять, виходячи із значення та знаку парного коефіцієнта кореляції? Які рівні градації цього показника?
- Що показує коефіцієнт детермінації? Які існують рівні його градації?
- Яким чином пов'язані парний коефіцієнт кореляції та коефіцієнт b (нахил) парної економетричної моделі?
- Який критерій використовують для визначення значущості коефіцієнта кореляції та в якому випадку він є значущим?
- Який критерій використовують для визначення адекватності економетричної моделі? Коли модель вважається адекватною?
- Який показник називають коефіцієнтом еластичності та яким чином його розраховують для лінійних і степеневих моделей?
- Який показник називають граничною продуктивністю та яким чином його розраховують для лінійних і степеневих моделей?
- В яких випадках розраховують множинний коефіцієнт кореляції та множинний коефіцієнт детермінації? Які висновки роблять, виходячи з їхніх значень?
- У випадку множинної регресії, який висновок роблять за параметром при певній факторній ознаці?
- Охарактеризуйте сутність функцій попиту та виробничих функцій.

2 Досліджується динаміка інноваційного внеску дослідників у глобальний інноваційний індекс (вихідні дані подано у табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Вихідні дані задачі 2

Час, t , міс.	Інноваційний внесок, y , ФТЕ/тис. населення
1	1,05
2	1,00
3	0,99
4	0,84
5	0,80

1. Обчислити коефіцієнти кореляції та детермінації (коефіцієнт достовірності апроксимації). Подати ряд динаміки графічно.

2. Обчислити параметри лінійного тренда. Виконати прогнозування рівня інноваційного внеску дослідників у глобальний інноваційний індекс. Зобразити тренд графічно.

3. Оцінити значимість коефіцієнта кореляції (за t -тестом Стьюдента) та адекватність лінійного тренда (за F -тестом Фішера).

За результатами обчислень зробити висновки.

2 Досліджується залежність між обсягом ВВП країн та їхнім екологічним слідом (вихідні дані подано у табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Вихідні дані задачі 2

ВВП, x , млрд дол. США	Екологічний слід, y , глобальні га
5,2	1,18
5,9	1,62
9,3	1,74
11,5	2,12
16,4	3,09

1. Обчислити коефіцієнт кореляції та детермінації. Показати графічно кореляційне поле.

2. Побудувати лінійне рівняння регресії. Подати графічно лінію регресії. Використовуючи побудоване рівняння, визначити, яким буде величина екологічного сліду країни, якщо ВВП становитиме 18 млрд дол. США.

3. Оцінити значущість коефіцієнта кореляції (за t -тестом Стьюдента) та адекватність лінійного рівняння регресії (за F -тестом Фішера).

За результатами обчислень зробити висновки.

Завдання для виконання у класі

① Досліджується динаміка витрат на реалізацію екологічних проєктів підприємства (вихідні дані подано у табл. 4.10).

1. З'ясувати чи наявна залежність між досліджуваними факторами. Для цього обчислити коефіцієнти кореляції та детермінації (коефіцієнт достовірності апроксимації) і подати ряд динаміки графічно.

2. Обчислити параметри лінійного тренду. Виконати прогнозування величини витрат на реалізацію екологічних проєктів на наступний місяць. Побудувати графік.

3. Оцінити значущість коефіцієнта кореляції (за t -тестом Стьюдента) та адекватність лінійного тренда (за F -тестом Фішера).

4. За результатами досліджень зробити висновки.

Таблиця 4.10 – Вихідні дані задачі 1

Час, t , міс.	Витрати, y , тис. грн
1	21
2	20
3	23
4	22
5	30

② Досліджується залежність витрат на соціальну складову сталого розвитку підприємства (на реалізацію соціальних проєктів) від кількості його працівників. Необхідно

1. Обчислити коефіцієнт кореляції та детермінації. Подати графічно кореляційне поле.

2. Обчислити параметри лінійного рівняння регресії. Зобразити лінію регресії. Визначити, якими будуть витрати на соціальну складову сталого розвитку підприємства, якщо кількість працівників становитиме 3 тис. осіб.

3. Оцінити значущість коефіцієнта кореляції (за t -тестом Стьюдента) та адекватність лінійного рівняння регресії (за F -тестом Фішера).

4. За результатами обчислень зробити висновки.

Вихідні дані задачі подано у табл. 4.11

Таблиця 4.11 – Вихідні дані задачі 2

Кількість працівників, x , тис. осіб	Витрати, y , млн грн
1	1,7
2	3,5
3	3,8
4	4,5
6	5,8

РОЗДІЛ 5

Багатокритеріальні моделі прийняття рішень

Питання для дискусії:

Багатокритеріальна задача прийняття рішень. Проблеми, що виникають при наявності багатьох критеріїв. Необхідність компромісу. Способи агрегування критеріїв. Метод аналізу ієрархій. Попарне порівняння альтернатив. Узгодження суджень. Переваги та недоліки методу аналізу ієрархій. Застосування МАІ в задачах сталого розвитку.

Ключові терміни та поняття:

- Багатокритеріальний вибір
- Нормалізація
- Пріоритет
- Агрегування критеріїв
- Методи врахування пріоритетів
- Метод аналізу ієрархій
- Ієрархія
- Рівень ієрархії
- Матриця порівнянь
- Індекс узгодженості
- Відношення узгодженості
- Випадкова узгодженість
- Нормалізований власний вектор матриці
- Локальні пріоритети
- Глобальні пріоритети

5.1 Загальна проблема багатокритеріального вибору

Однією із складнощів, які виникають у процесі прийняття рішень, є наявність багатьох критеріїв, які не завжди погоджені між собою, а іноді і протирічають один одному.

Багатокритеріальний вибір є ситуацією, коли маємо справу зі списком альтернатив, і для кожної з них необхідно враховувати кілька критеріїв або показників, щоб визначити оптимальний вибір.

Отже, ми маємо справу з багатьма конфлікуючими цілями, на які потрібно зважати при прийнятті рішення.

Такі проблеми дуже часто виникають у багатьох сферах, де потрібно зробити вибір між різними альтернативами. Розглянемо кілька прикладів.

- При виборі інвестиційних проєктів чи розробці нового продукту необхідно брати до уваги критерії, такі як прибутковість, ризики, вартість, потенціал для росту, вплив на навколишнє середовище, та інші.
- Планування нових будівель чи інфраструктурних проєктів також потребує врахування багатьох критеріїв, таких як вартість будівництва, зручність розташування, наявність комунікацій, вплив на навколишнє середовище, розвиток територіальних громад.
- При виборі методу лікування чи медичної процедури потрібно мати на увазі такі критерії, як ефективність лікування, побічні ефекти, вартість, тривалість реабілітації.

Просте питання: «Що приготувати на сніданок?» – теж є проблемою багатокритеріального вибору, оскільки сніданок має бути корисним, смачним, не займати багато часу на приготування, не дорогим,...



Коли всі критерії є кількісними, то маємо задачу багатокритеріальної оптимізації, для якої розроблено методи розв'язування, але, навіть у такому випадку, рішення, яке є оптимальним для одного критерію, не обов'язково буде таким (а найчастіше зовсім не буде) для іншого критерію і виникає проблема пошуку компромісних рішень.

Крім того, критерії можуть бути різними за своїм впливом на кінцевий результат і мати різну значущість для ОПР і на це також необхідно зважати. Визначення вагомості кожного критерію також є складним завданням, оскільки погляди різних зацікавлених сторін на важливість певних критеріїв можуть не співпадати.

Проблеми, що виникають в контексті багатокритеріального вибору

Конфлікт цілей: Різним критеріям можуть відповідати різні найкращі розв'язки і оптимізація одного критерію може погіршити результат за іншим.

Врахування значущості критеріїв: Різні критерії можуть мати різну значущість для ОПР.

Необхідність пошуку компромісу: Як об'єднати різнорідні дані з різних критеріїв так, щоб отримати чітке розуміння про кожну альтернативу?

Дослідження багатокритеріальних задач включає розробку двох типів методів: перші спрямовані на зменшення кількості критеріїв, тут основним є формулювання основних факторів – методів згортки, нормалізації та врахування пріоритетів; другі – на редукцію множини допустимих альтернатив, їх дослідження включає визначення множини ефективних (непокращуваних) альтернатив і застосування різних принципів компромісу (див. літературу [59]). Звісно, ці підходи можуть комбінуватися.

Якщо ж серед критеріїв є якісні, що дуже часто трапляється при дослідженні складних систем, то і без того не тривіальна задача ще більш ускладнюється, оскільки наявність якісних критеріїв неодмінно викликає суб'єктивізм при оцінюванні. Отже, необхідні методи, які дозволять знизити можливість помилки і зменшать вплив суб'єктивного фактора при розв'язуванні. До них відносяться методи багатокритеріального аналізу, такі як аналіз ієрархій, метод вагового відношення, метод ELECTRE, метод TOPSIS та інші. Вони допомагають структурувати процес прийняття рішень і знаходити компромісні рішення, які у найкращий спосіб враховують всі важливі критерії.

5.2 Метод аналізу ієрархій

Метод аналізу ієрархій⁷ (MAI) – це структурований процес організації та аналізу складних рішень. Його основою є строгі математичні виведення з одного боку і врахування психологічних особливостей людини з іншої.

Розробником методу є американський вчений Томас Лорі Сааті (Thomas Lorie Saaty). Він вперше представив його у 70-х роках минулого століття, і з тих пір MAI знайшов широке застосування для аналізу складних проблем у різних галузях діяльності.

Особливістю методу є те, що він не дає оптимального рішення, але дозволяє обрати найкраще, виходячи із уявлень і міркувань ОПР. До того ж його застосування допомагає ОПР розібратися у проблемі, структурувати її і прийти до кращого її розуміння.

MAI забезпечує раціональну основу для структурування проблеми прийняття рішень, для подання та кількісної оцінки її елементів, зв'язку цих елементів із загальними цілями та для оцінки альтернативних рішень.

Основою метода є попарні порівняння альтернатив для здійснення яких залучають експертів. Причому для різних критеріїв можна запрошувати різних експертів, тим самим забезпечуючи фахову оцінку для кожного з критеріїв.

Ще одною особливістю метода є його універсальність. Він може бути застосований для розв'язування задач у різних галузях і сферах.

Вставка 5.1

Застосування MAI

Найбільш часто MAI застосовують для розв'язування таких задач

- ✓ Вибір – обрання однієї альтернативи із заданого набору альтернатив;
- ✓ Ранжування – впорядкування набору альтернатив від найбільш до найменш бажаної;
- ✓ Визначення відносних переваг альтернатив
- ✓ Розподіл ресурсів між альтернативами;
- ✓ Бенчмаркінг – порівняння процесів у власній організації з найкращими практиками інших організацій;
- ✓ Управління якістю;
- ✓ Розробка сценаріїв – визначення дій для досягнення бажаного результату.

Коротка схема метода показана на рис. 5.1.

⁷ англ. Analytic hierarchy process (AHP), можна також зустріти назву *метод аналітичної ієрархії*



Рисунок 5.1 – Схема методу аналізу ієрархій

Вона включає:

- визначення цілі;
- побудову ієрархії (структуризація проблеми, ранжування цілей, визначення зв'язків між елементами);
- отримання суджень від експертів і на цій основі заповнення матриць порівнянь;
- розрахунок локальних пріоритетів і перевірку узгодженості матриць порівнянь;
- розрахунок глобальних пріоритетів;
- інтерпретація і аналіз отриманих результатів.

Розглянемо кожен з цих етапів більш детально.

➔ **Визначення проблеми.** У попередніх розділах ми вже говорили про важливість цього етапу для прийняття рішень і про методи, які для цього застосовуються. Нагадаємо тільки, що тут необхідно визначити, що є проблемою, і що саме потрібно про неї дізнатися, тобто визначити мету прийняття рішення.

➔ **Побудова ієрархії**

При аналізі реальної системи число елементів і їх взаємозв'язків зазвичай настільки велике, що перевищує здатність експертів сприймати інформацію в повному обсязі. В цьому випадку реальність поділяється на складові частини за допомогою ієрархії.

Ієрархія є певним типом системи, заснованим на припущенні, що елементи системи можуть групуватися в окрему множину. Елементи кожної групи знаходяться під впливом елементів деякої цілком визначеної групи і, у свою чергу, впливають на елементи іншої групи, але елементи у кожній групі незалежні.

Ієрархія – система, що складається з підсистем, котрі функціонують як ціле на одному рівні і є складовими системи більш високого рівня, стаючи її підсистемами.

Опишемо термінологію, пов'язану із ієрархією.

Вузол, елемент – це загальна назва будь-якого критерію, фактора, альтернативи, при її включенні в ієрархію.

Рівень – це група всіх рівноправних, однотипних вузлів.

Зв'язок – вплив одного елемента ієрархії на інший. На схемі він зазвичай позначається стрілкою. У домінантній ієрархії всі зв'язки спрямовані від елементів вищого рівня до нижчого. У ієрархії із зворотними зв'язками наявні також зв'язки від нижчого рівня до більш високого.

Кластер – група елементів одного рівня, підпорядкованих одному елементу вищого рівня.

Вузол вищого рівня, від якого спрямований зв'язок до елементів нижчого рівня, називається *батьківським*. Всі підпорядковані йому елементи називають його *нащадками*.

Існує декілька видів ієрархій.

- *Домінантна* – ієрархія з основою у вершині (схоже на перевернуте дерево), саме вона показана на рис. 5.2.
- *Холархія* – доміантна ієрархія із зворотним зв'язком.
- *Китайський ящик* (або модулярні ієрархії) – ієрархія, зростаюча в розмірах від простих елементів до усе більш крупних сукупностей.
-

Рівні ієрархії

перший

другий

третій

четвертий

п'ятий

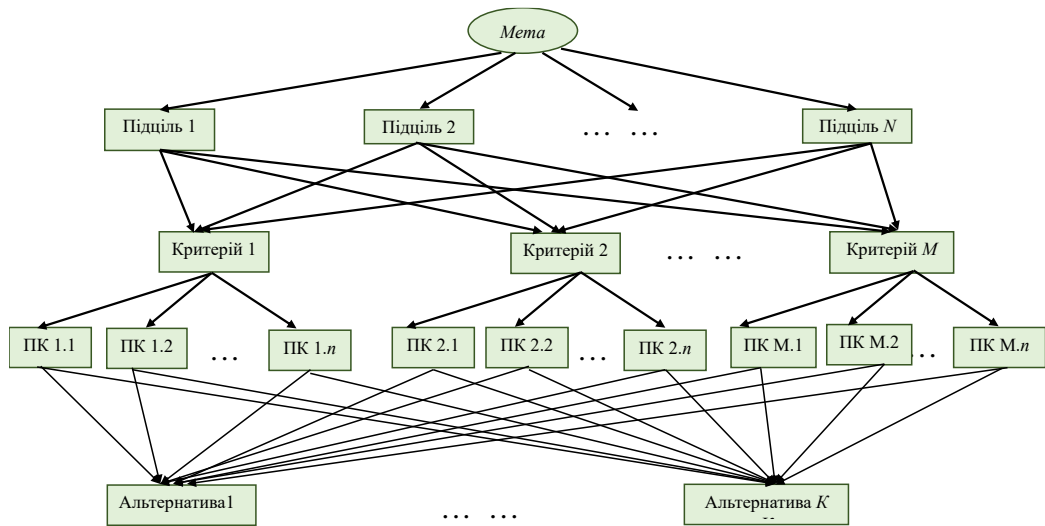


Рисунок 5.2 – Приклад ієрархії

Ієрархія називається *повною*, якщо кожен елемент заданого рівня функціонує як критерій для всіх елементів нижчого рівня, в інших випадках – ієрархія *неповна*. На рис. 5.3 показано приклад повної ієрархії.

Домінантні ієрархії є найбільш поширеними. Вони поділяються на два типи:

- ієрархія прямого процесу, яка відображає існуючий стан проблеми стосовно найбільш ймовірного або логічного майбутнього (умови «сьогодення» передбачають те, що буде «завтра»)
- ієрархія зворотного процесу, що визначає політики управління для досягнення бажаного майбутнього.

Побудова ієрархії відповідає природній здібності людей думати логічно і творчо, визначати події, встановлювати співвідношення і спиратися, таким чином, на принцип ідентичності і декомпозиції.

На практиці не існує встановленої процедури генерування цілей, критеріїв і видів діяльності для включення в ієрархію.

Зазвичай ієрархія будується з вершини (мета – з погляду управління) через проміжні рівні (критерії, від яких залежить досягнення цієї мети) до найнижчого рівня (який часто є переліком альтернатив). Загальну структуру ієрархії подано на рис. 5.2.

У найпростішій ієрархії може бути всього три рівні: мета, критерії, альтернативи (рис. 5.3). Трохи розширений варіант: мета, критерії, підкритерії, альтернативи (рис. 5.2).

Для вирішення складних проблем, ієрархія яких не може бути зведена до 3-х або 4-х рівнів, можлива подана нижче їх декомпозиція.

У вершині ієрархії встановлюється єдиний елемент – *фокус* – формулювання досліджуваної проблеми.

Другий (не обов'язковий) рівень включає різні економічні, політичні і соціальні сили, що впливають на результат.

Третій – це актори, які реально впливають на ситуацію шляхом маніпулювання цими силами.

Четвертий рівень включає переслідувані цілі кожного актора.

П'ятий (не обов'язковий) описує політики акторів, за допомогою яких вони намагаються досягти своїх цілей.

Шостий рівень – альтернативні можливі сценарії або результати, які застосовує актор заради досягнення своїх цілей.

Сьомий – це узагальнений результат (реалізація і взаємодія можливих альтернативних сценаріїв розвитку проблеми).

Загальний порядок побудови ієрархії	
<i>Ієрархія прямого процесу</i>	<i>Ієрархія зворотного процесу</i>
1. Макрообмеження довкілля.	1. Попередні сценарії.
2. Соціальні і політичні обмеження.	2. Проблеми і можливості.
3. Сили.	3. Актори і коаліції.
4. Цілі.	4. Цілі акторів.
5. Актори.	5. Політики Акторів.
6. Цілі акторів.	6. Окремі політики управління, що впливають на результат.
7. Політики Акторів.	
8. Контрастні сценарії.	
9. Узагальнений сценарій.	

Вставка 5.2

Побудова ієрархії

Розглянемо завдання вибору джерела енергії для забезпечення «зеленої ферми».

Під час вибору джерела енергії для забезпечення «зеленої ферми» слід врахувати наявність таких критеріїв вибору: вплив на забруднення повітря, води та ґрунту, вартість встановлення та обслуговування, енергетичну ефективність, можливість забезпечення енергією протягом всього року, вплив на здоров'я та життя населення, сумісність з існуючими системами та обладнанням та інші.

Цьому відповідає ієрархія, показана на рис. 5.3, на першому рівні якої знаходиться мета – «Джерело енергії», на другому чинники, що уточнюють ціль – критерії, і нарешті, на останньому рівні три різні варіанти джерел енергії (наприклад, В1 – термосонячні системи, В2 – вітрові турбіни, В3 – біогазові установки), які мають бути оцінені по відношенню до критеріїв другого рівня.

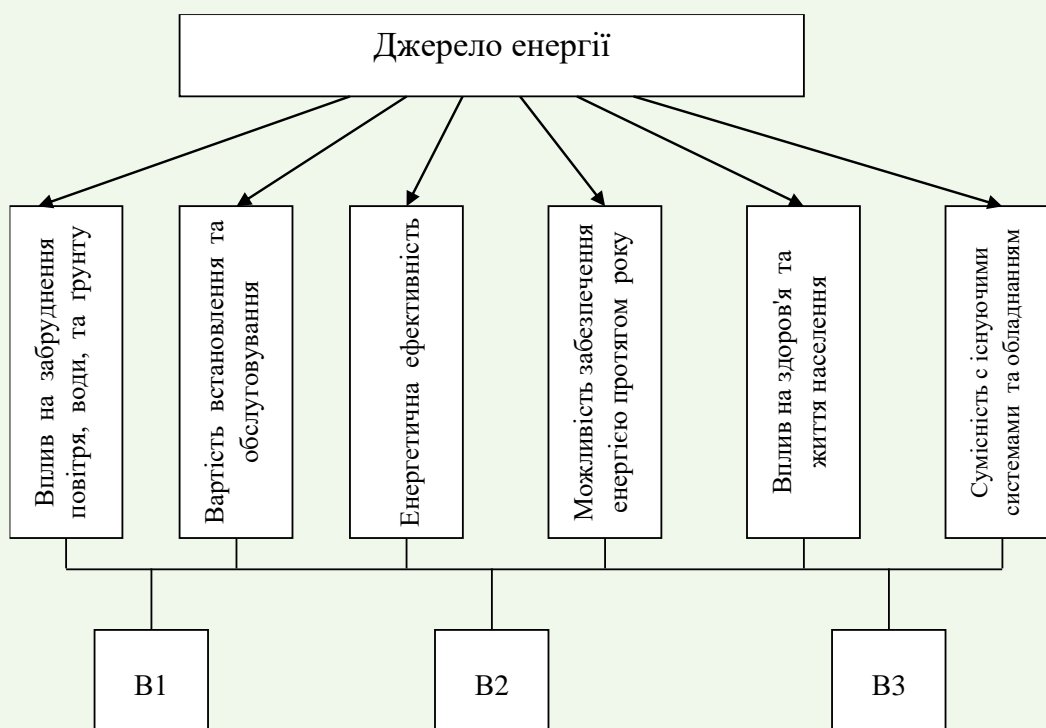


Рисунок 5.3 – Приклад ієрархії для вибору джерела енергії

При побудові ієрархії слід пам'ятати, що основні цілі встановлюються на її вершині, їх підцілі безпосередньо нижче за вершину, сили, що обмежують акторів (дійових осіб) ще нижче. Сили домінують над рівнем самих акторів, які, в свою чергу, домінують над рівнем своїх цілей, нижче за яких буде рівень їх можливих дій, і в самому низі знаходиться рівень різних можливих результатів.

Існують певні правила, які допомагають правильно побудувати ієрархію, а саме:

- не розміщувати більш ніж дев'ять елементів на одному рівні, оскільки експерименти показали, що з точки зору точності пріоритетів проблематично оцінити велику кількість факторів одночасно;
- елементи на одному рівні повинні бути порівнянними між собою за якісними та кількісними характеристиками, і мусять мати однакову значущість.
- елемент вищого рівня пов'язується не більш ніж із дев'ятьма елементами нижчого рівня.

Якщо на одному рівні більше ніж 9 критеріїв, варто їх агрегувати. Наприклад, розбити на групи: економічні, технологічні, соціальні, екологічні, тощо. Іноді таке розбиття може бути незручним, приміром, якась група може містити тільки один елемент, або є критерії, що не вписуються у таку класифікацію. Тоді можна ввести групу «інші» і додати в неї такі критерії (рис. 5.4). При подальшому розгляді ця група може бути розподілена між іншими, або залишитися.

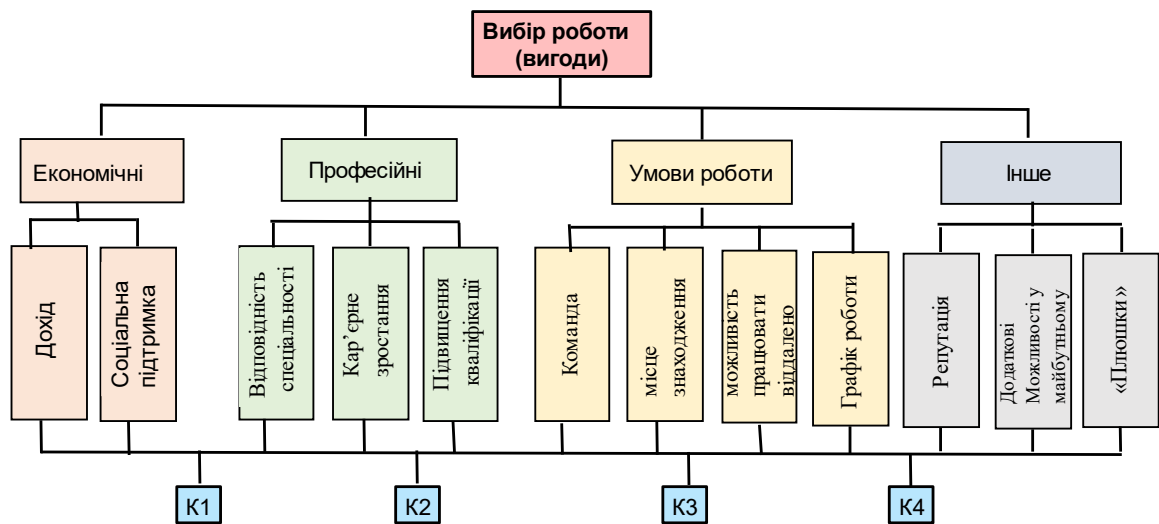


Рисунок 5.4 – Приклад ієрархії для вибору нового місця роботи



Проведення попарних порівнянь і заповнення матриць порівнянь

У МАІ елементи задачі порівнюються попарно по відношенню до їх дії («вазі» або «інтенсивності») на спільну для них характеристику. Отримані парні порівняння складають масив чисел, який оформлюється у вигляді такої матриці:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

Припустимо A_1, A_2, \dots, A_n – це множина із n елементів, а w_1, w_2, \dots, w_n – відповідно їх пріоритети, або інтенсивності. За допомогою МАІ порівнюється пріоритет (інтенсивність), кожного елемента з пріоритетом (інтенсивністю), будь-якого іншого елемента множини по відношенню до спільної для них властивості або мети.

Коли проблему подано ієрархічно, то матрицю складають для порівняння відносної важливості критеріїв на другому рівні по відношенню до батьківського елемента на першому рівні. Далі матриці мають бути побудовані для парних порівнянь кожної альтернативи на третьому рівні по відношенню до батьківських критеріїв другого рівня і так далі.

Коли доводиться порівнювати елементи, для яких існує система вимірів, то при заповнюванні матриць порівнянь можна використовувати відношення дійсних мір, наприклад, таким чином:

	A_1	A_2	A_3	\dots	A_n
A_1	$\frac{w_1}{w_1}$	$\frac{w_2}{w_1}$	$\frac{w_3}{w_1}$	\dots	$\frac{w_n}{w_1}$
	$\frac{w_2}{w_1}$	$\frac{w_2}{w_2}$	$\frac{w_3}{w_2}$	\dots	$\frac{w_n}{w_2}$
A_2	$\frac{w_1}{w_2}$	$\frac{w_2}{w_2}$	$\frac{w_3}{w_2}$	\dots	$\frac{w_n}{w_2}$
	$\frac{w_3}{w_3}$	$\frac{w_3}{w_3}$	$\frac{w_3}{w_3}$	\dots	$\frac{w_n}{w_3}$
A_3	$\frac{w_1}{w_3}$	$\frac{w_2}{w_3}$	$\frac{w_3}{w_3}$	\dots	$\frac{w_n}{w_3}$
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
	$\frac{w_n}{w_n}$	$\frac{w_n}{w_n}$	$\frac{w_n}{w_n}$	\dots	$\frac{w_n}{w_n}$
A_n	$\frac{w_1}{w_n}$	$\frac{w_2}{w_n}$	$\frac{w_3}{w_n}$	\dots	$\frac{w_n}{w_n}$

У випадку ж економічних, політичних і інших задач, парні порівняння можна проводити з використанням думок про відносну важливість компонентів. Ці думки описуються за спеціально розробленою шкалою відносної важливості (табл. 5.1), так званою шкалою Сааті. Її ефективність доведено теоретично при порівнянні з багатьма іншими шкалами.

Таблиця 5.1 – Шкала Сааті

Значення	Відносна важливість
1	однакова важливість
3	помірна перевага одного над іншим
5	істотна перевага одного над іншим
7	значна перевага одного над іншим
9	дуже сильна перевага одного над іншим
2, 4, 6, 8	відповідні проміжні значення

➤ *Побудова матриць порівнянь*

Матрицю порівнянь складають таким чином.

Порівняння починають з лівого верхнього елемента матриці. Визначають на скільки він важливіше чим другий. При порівнянні елемента із самим собою відношення дорівнює одиниці. Якщо перший елемент важливіший, ніж другий, то використовується ціле число зі шкали, інакше застосовується зворотня величина. У будь-якому випадку зворотні один до одного відношення заносяться у симетричні позиції матриці. Тому матриці завжди будуть додатними і зворотно симетричними (тобто $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ для всіх значень i, j), для їх заповнення необхідно врахувати лише $n(n - 1)/2$ думок, де n – загальна кількість порівнюваних елементів.

Отже, сформулюємо правила заповнення матриці порівнянь.

Правило 1

Якщо $a_{ij} = \alpha$, то $a_{ji} = \frac{1}{\alpha}$.

Правило 2

Якщо думки такі, що A_i має однакову з A_j відносну важливість, то $a_{ij} = a_{ji} = 1$; зокрема $a_{ii} = 1$ для всіх i .

Правило 3

Всі вічка матриці заповнюються значеннями однієї і тієї ж шкали.

Якщо записати порівнювану ціль вгорі, а порівнювані елементи зліва і зверху, на перерізі відповідного рядка та стовпця записуються переваги критеріїв. Так, в прикладі із вибором джерела енергії (рис. 5.3), критерії другого рівня необхідно порівняти попарно по відношенню до спільної цілі першого рівня. Для цього заповнюється таблиця (див. табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Заповнення матриці порівнянь

Критерії	Вплив на забруднення повітря, води та ґрунту	Вартість встановлення та обслуговування	Енергетична ефективність	Можливість забезпечення енергією протягом всього року	Вплив на здоров'я та життя населення	Сумісність з існуючими системами та обладнанням
Вплив на забруднення повітря, води та ґрунту	1	$\frac{1}{a_{21}}$	...	...	...	...
Вартість встановлення та обслуговування	a_{21}	1	...	...	...	...
Енергетична ефективність	...	...	1	...	...	...
Можливість забезпечення енергією протягом всього року	...	...	...	1	...	...
Вплив на здоров'я та життя населення	...	...	...	...	1	...
Сумісність з існуючими системами та обладнанням	...	...	...	...	...	1

Для порівняння альтернатив буде потрібна вже не одна, а шість матриць, оскільки необхідно їх порівняти за кожним з шести критеріїв (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Матриця порівнянь альтернатив за критеріями

Критерій	B1	B2	B3
B1	1		
B2		1	
B3			1

Отже, для розв'язання задачі вибору буде потрібно заповнити 7 матриць.

Для ієрархії, показаної на рис. 5.4 буде необхідно заповнити: 1 рівень – одна матриця порівнянь (4×4); 2 рівень «критерії» – 4 матриці: економічні 2×2, професійні 3×3, умови роботи 4×4, інші 3×3; 3 рівень «альтернативи» – 12 матриць 4×4 (по одній за кожним з критеріїв).

➔ Обчислення пріоритетів

Обчислення локальних пріоритетів

За допомогою заповнених матриць парних порівнянь критеріїв при подальшій математичній обробці формуються вектори пріоритетів, які описують відносну силу, величину, бажаність, "цінність" кожного окремого об'єкта.

Пріоритет це число, від 0 до 1, за значенням якого можна оцінити важливість, або цінність даного елемента. Сума пріоритетів елементів одного кластера дорівнює 1.

Вектор локальних пріоритетів являє собою нормалізований головний власний вектор матриці.

Такі вектори необхідно обчислити для кожної з матриць порівнянь.

Вставка 5.3 **Обчислення власного вектора матриці**

Розрахунки можна проводити різними способами, а саме:

1. Підсумовувати елементи кожного рядка і нормалізувати діленням кожної суми на суму всіх елементів; сума отриманих результатів дорівнюватиме одиниці. Перший елемент результуючого вектору буде пріоритетом першого об'єкта, другий - другого об'єкта і так далі
2. Підсумувати елементи кожного стовпця і отримати зворотні величини цих сум. Нормалізувати їх так, щоб їх сума дорівнювала одиниці, розділити кожну зворотню величину на суму всіх зворотніх величин.
3. Розділити елементи кожного стовпця на суму елементів цього стовпця (тобто нормалізувати стовпець), потім скласти елементи кожного отриманого рядка і розділити цю суму на число елементів рядка.
4. Помножити n елементів кожного рядка і витягувати корінь n -ої степені. Нормалізувати отримані числа.
5. Підносити матрицю до довільно великих степенів. Обчислювати суми елементів рядків і нормалізувати отримані суми.

Найбільш точним є останній спосіб. Проте без відповідної комп'ютерної підтримки він є досить складним. На практиці використовують переважно четвертий спосіб.

Розглянемо його більш детально

Припустимо маємо матрицю $A(n, n)$.

1. Компонента власного вектора i -го рядка обчислюється за такою формулою:

$$b_i = \sqrt[n]{a_{i1} \times a_{i2} \times a_{i3} \times \dots \times a_{in}}. \quad (5.1)$$

2. Після того, як отримані компоненти власного вектора (b_1, b_2, \dots, b_n) для всіх n рядків матриці порівнянь, проводиться його нормалізація. Для цього обчислюється сума компонент власного вектора $\sum_{i=1}^n b_i$. Потім кожен елемент b_i ділиться на знайдену суму. Таким чином, отримуємо нормалізований власний вектор, тобто

$$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \left(\frac{b_1}{\sum b_i}, \frac{b_2}{\sum b_i}, \dots, \frac{b_n}{\sum b_i} \right). \quad (5.2)$$

Пріоритети синтезуються, починаючи з другого рівня вниз.

Обчислення глобальних пріоритетів

Для обчислення глобальних пріоритетів локальні пріоритети за певним критерієм перемножують на пріоритет цього критерію на попередньому рівні і підсумовують за кожним з елементів відповідно до критеріїв, на які впливає цей елемент. Кожен елемент другого рівня множать на одиницю, тобто на вагу єдиної цілі самого верхнього рівня. Це дає складений, або *глобальний пріоритет* того елемента, який потім використовується для зважування локальних пріоритетів елементів, що порівнюються по відношенню до нього як до критерію і розташовані рівнем нижче. Процедура продовжується до самого нижнього рівня.

Якщо отримані пріоритети k -го рівня, то пріоритети для елементів $(k + 1)$ рівня обчислюють за формулою:

$$x_j^{k+1} = \sum_{i=1}^n x_i^k b_{ij}, \quad (5.3)$$

де x_j^{k+1} – глобальний пріоритет j -го критерію $(k + 1)$ рівня, x_i^k – глобальний пріоритет i -го критерія k рівня, b_{ij} – локальний пріоритет j -го критерія $(k + 1)$ рівня за i -м критерієм k – го рівня.

Коли обчислено всі пріоритети для елементів нижнього рівня (тобто для альтернатив) особа, що приймає рішення, обирає альтернативу, базуючись на одержаних результатах.

Розглянемо приклад обчислення пріоритетів.

Приклад 5.1. Припустимо, маємо таку матрицю порівнянь для деякої ієрархії:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/5 & 1/7 \\ 1/2 & 1 & 1/6 & 1/9 \\ 5 & 6 & 1 & 1/4 \\ 7 & 9 & 4 & 1 \end{pmatrix}.$$

Обчислимо для неї вектор локальних пріоритетів.

Результати обчислень показано у табл. 5.4

Таблиця 5.4 – Обчислення локальних пріоритетів

	K1	K2	K3	K4	$\prod_j a_{ij}$	$b_i = \sqrt[4]{\prod_j a_{ij}}$	$\frac{b_i}{\sum b_i}$
K1	1	2	1/5	1/7	0,057143	0,489	0,076
K2	0,5	1	1/6	1/9	0,009259	0,310	0,048
K3	5	6	1	1/4	7,5	1,655	0,257
K4	7	9	4	1	252	3,984	0,619
					сума	6,438	1

Отриманий вектор пріоритетів показано у останньому стовпчику.

➔ Узгодженість матриць

Важливою особливістю МАІ є можливість перевірити узгодженість суджень експертів. Це дозволяє уникнути помилок, пов'язаних із помилками при заповненні матриці порівнянь.

Під *узгодженістю* матриці розуміється її числова узгодженість і транзитивність.

Якщо при обчисленні відхилень від узгодженості вони будуть перевищувати допустимі межі, то судження потрібно перевірити ще раз.

Наведемо алгоритм перевірки узгодженості матриці.

Обчислення індексу узгодженості (ІУ)

1. Підсумовується кожен стовець матриці суджень.
2. Сума елементів першого стовця матриці порівнянь множиться на величину першої компоненти нормалізованого вектора пріоритетів, сума другого стовця на другу компоненту і так далі.
3. Отримані числа підсумовують. Їх суму позначимо λ_{\max} .
4. Обчислюємо індекс узгодженості (ІУ) за такою формулою:

$$ІУ = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1), \quad (5.4)$$

де n – число порівнюваних елементів.

5. Обчислюємо відношення узгодженості (ВУ):

$$ВУ = ІУ/n_{\text{вип}}, \quad (5.5)$$

де $n_{\text{вип}}$ – число випадкової узгодженості.

Число випадкової узгодженості – це узгодженість матриці, заповненої випадково. Для його обчислення генерують випадково заповнені матриці, обчислюють їх узгодженості, і підраховують середнє значення.

Випадкові узгодженості для матриць різного порядку подано у табл. 5.5. Величина ВУ має бути близько 10 % або менш, аби бути прийнятною. В деяких випадках допускається ВУ до 20 %, але не більше. Якщо матриця виявилася неузгодженою, то необхідно перевірити судження експерта.

Таблиця 5.5 – Число випадкової узгодженості

Порядок матриці	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Випадкова узгодженість	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Перевіримо узгодженість матриці з прикладу 5.1. Результати обчислень запишемо у табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Перевірка узгодженості матриці

Дохід	K1	K2	K3	K4	Локальний пріоритет x_i	$A_j x_i$
K1	1	2	1/5	1/7	0,07594	1,025
K2	0,5	1	1/6	1/9	0,048181	0,867
K3	5	6	1	1/4	0,257037	1,379
K4	7	9	4	1	0,618842	0,931
$A_j = \sum_{i=1}^3 a_{i,j}$	13,5	18	5,366667	1,503968	$\lambda_{\max} = \sum A_j x_i$	4,202

Тепер обчислимо ІУ та ВУ, враховуючи, що у цьому прикладі розмірність матриці $n = 4$, а число випадкової узгодженості для матриці розмірності 4 $n_{\text{вип}} = 0,9$ (див. табл. 5.5):

$$IY = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} = \frac{(4,202 - 4)}{(4 - 1)} = 0,0673,$$

$$VY = \frac{IY}{n_{\text{вип}}} = \frac{0,0673}{0,9} = 0,075.$$

Оскільки ВУ складає 7,5 %, матрицю вважаємо узгодженою.

5.3 Приклад застосування МАІ

Розглянемо застосування методу на такому прикладі.

Постановка задачі. Припустимо, деяке місто стикається з серйозними екологічними проблемами, пов'язаними із забрудненням повітря внаслідок використання автомобільного транспорту. Забруднене повітря є причиною багатьох захворювань та має негативний вплив на якість життя мешканців. Досягнення сталого розвитку у цьому контексті передбачає покращення якості повітря, зменшення викидів забруднюючих речовин та підвищення життєздатності міста. У зв'язку із цим міська рада прагне визначити та обрати для реалізації проєкт, спрямований на покращення стану повітря та досягнення цілей сталого розвитку, враховуючи екологічні, соціальні та економічні аспекти. Після попереднього аналізу стану проблеми та впливових факторів до розгляду було взято три проєкти, а саме:

A1 – Створення мережі велосипедних доріжок та пішохідних зон у центрі міста;

A2 – Перехід на електричний громадський транспорт;

A3 – Розширення зелених зон і парків.

Кожен варіант розглядається із позиції, які вигоди він принесе для розвитку міста. Аналіз та порівняння проєктів потрібно здійснити на основі критеріїв сталості, включаючи вартість, вплив на довкілля, здоров'я громади та інші фактори.

Вплив на навколишнє середовище. Оцінка впливу кожного варіанту на природне середовище, фауну та флору включає відповіді на такі питання: як цей проєкт буде сприяти зниженню забруднення повітря у місті, викидів CO₂ та інших забруднювачів, як він вплине на біорізноманіття, чи буде виникати необхідність проведення додаткових природоохоронних заходів та рекомендацій, чи буде у результаті реалізації проєкта порушений природний баланс регіону?

Соціальний вплив. Аналіз того, як кожен варіант вплине на життя та громадську активність в місті. Він включає покращення якості життя, створення нових робочих місць, сприяння розвитку туризму та торгівлі, підвищення рівня життя, підтримку місцевих спільнот.

Економічні фактори. Оцінка економічних переваг та витрат для кожного варіанта, капітальні витрати, передбачуваний дохід від реалізації проєкту, можливості залучення інвестицій та інших джерел фінансування для розвитку міста.

Зауважимо, що використовуючи МАІ, ми можемо скласти різні ієрархії. Серед критеріїв можуть бути такі, що оцінюють вигоди проєкту, і такі, що оцінюють витрати. Тому при побудові ієрархії необхідно їх розрізнити і врахувати при порівнянні альтернатив.

Охарактеризуємо запропоновані альтернативи за вигодами, розбивши їх на економічні, соціальні та екологічні.

A1 – Мережа велосипедних доріжок та пішохідних зон.

Економічні вигоди включають: збільшення доходів міста, дякуючи розвитку туризму, рекреаційних послуг, торгівлі та інших суміжних галузей; зменшення транспортних витрат для мешканців, зокрема, на пальне, стоянки, обслуговування автомобілів; можливість створення робочих місць під час будівництва та обслуговування інфраструктури.

Екологічними вигодами перш за все стануть зменшення викидів CO₂ внаслідок зменшення використання автомобілів, скорочення обсягу транспортних викидів шкідливих речовин в повітря в результаті використання екологічно чистих видів транспорту, покращення якості повітря та сприяння здоров'ю завдяки зменшенню забруднення повітря.

Соціальні вигоди передбачають покращення безпеки дорожнього руху через зменшення аварій та постраждалих на вулицях міста, зменшення заторів і скорочення часу в дорозі для мешканців. Крім того, очікується збільшення доступності до громадських послуг: освіти, робочих місць, медичних установ і ін.

A2 – Перехід на електричний громадський транспорт.

Економічними вигодами є підвищення ефективності витрат міста через зменшення витрат на пальне та обслуговування автопарку міського громадського транспорту. Крім того з'явиться можливість для залучення інвестицій у виробництво електротранспорту та інфраструктури зарядки.

Очікувані екологічні вигоди – це зменшення викидів CO₂ завдяки використанню електричного транспорту та зменшення викидів шкідливих речовин, що впливають на якість повітря.

Соціальні вигоди передбачають підвищення зручності та доступності електричного громадського транспорту для різних груп населення, включаючи осіб з інвалідністю, появу робочих місць у виробництві і обслуговуванні електричного транспорту.

A3 – Розширення зелених зон і парків.

Економічні вигоди очікуються від збільшення доходів громади в результаті розвитку туризму, зростання вартості нерухомості в районах та підвищення привабливості міста для нових підприємств та інвесторів, створення робочих місць в сфері туризму, ландшафтного дизайну, догляду за парками та інших суміжних галузях.

Екологічні вигоди включають збереження природного середовища та відновлення місцевої природи та біорізноманіття, очищення повітря та води дякуючи спроможностям зелених зон та парків зменшувати рівні забруднення повітря та підтримувати якість води в річках та озерах, та зменшення викидів CO₂ внаслідок збільшення площі зелених зон та парків, які поглинають цей газ.

Соціальні вигоди мають у своєму складі покращення якості життя мешканців міста через доступність до рекреаційних зон, відпочинку та заняттям спорту у природному середовищі, зміцнення громадської спільноти через використання зелених зон і парків як місць для зустрічей та спілкування. Крім того, очікується позитивний вплив природи на фізичне і психічне здоров'я людей та зменшення стресу та захворювань.

Підсумовуючи можна виділити такі економічні чинники, що впливають на вибір. Це вигоди, пов'язані із збільшенням доходів міста завдяки розвитку туризму, рекреаційних послуг, торгівлі та інших суміжних галузей; зменшення витрат на транспорт, включаючи паливе, стоянки та обслуговування автомобілів для мешканців. Виникне також можливість додаткового залучення місцевого населення на будівельні роботи та на роботу з обслуговування нової інфраструктури. Соціальні вигоди проєктів – це підвищення якості життя, безпеки руху, позитивний вплив на фізичне і психічне здоров'я людини. Вигоди середовища безпосередньо пов'язані із зменшенням викидів CO₂ та інших шкідливих викидів від транспорту і психологічним комфортом жителів.

В результаті експертами була побудована така ієрархія вигід (рис. 5.5).



Рисунок 5.5 – Ієрархія вигід

Після створення ієрархії проблеми необхідно приступити до заповнення матриць парних порівнянь. Матриця парних порівнянь для другого рівня ієрархії вигід має вигляд, показаний у табл. 5.7 (вважаємо, що експерт заповнив її з врахуванням інтересів і думок громади і керівництва).

Таблиця 5.7 – Матриця порівнянь для критеріїв другого рівня

Вигоди	Економічні	Соціальні	Екологічні
Економічні	1	4	0,5
Соціальні	0,25	1	0,25
Екологічні	2	4	1

З вигляду заповненої матриці виходить, що експерт при вирішенні проблеми віддає перевагу (хоча і незначну) досягненню екологічних вигід над соціальними і економічними. Це природно, оскільки метою є покращення стану атмосферного повітря у місті. Після цього для даної матриці розраховуються локальні пріоритети і перевіряється її узгодженість згідно з описаною вище методикою.

Розрахунок пріоритетів другого рівня проводимо четвертим способом.

1. Компонента власного вектора для i -го рядка обчислюється за формулою (5.1).

Для даної матриці маємо:

$$b_1 = \sqrt[3]{a_{11} \times a_{12} \times a_{13}} = \sqrt[3]{1 \times 4 \times 0,5} = 1,26,$$

$$b_2 = \sqrt[3]{a_{21} \times a_{22} \times a_{23}} = \sqrt[3]{0,25 \times 1 \times 0,25} = 0,40,$$

$$b_3 = \sqrt[3]{a_{31} \times a_{32} \times a_{33}} = \sqrt[3]{2 \times 4 \times 1} = 2.$$

2. Після того, як обчислено всі компоненти власного вектора (b_1, b_2, b_3) , проводиться його нормалізація. Для цього розраховуємо суму компонент власного вектора: $\sum_{i=1}^3 b_i = 1,26 + 0,40 + 2 = 3,66$. Потім кожен елемент b_i ділимо на знайдену суму. Таким чином, отримуємо нормалізований власний вектор. Сума його компонент вже дорівнює одиниці.

$$\bar{X} = \left(\frac{1,26}{3,66}, \frac{0,4}{3,66}, \frac{2}{3,66} \right) = (0,3445; 0,1085; 0,5469).$$

Отже, елементи другого рівня мають такі пріоритети:

Критерій	Пріоритет
Економічні вигоди	0,34
Соціальні вигоди	0,11
Екологічні вигоди	0,55

Перевіримо узгодженість цієї матриці.

Для зручності запишемо розрахунки у таблицю 5.8

Таблиця 5.8 – Перевірка узгодженості матриці

Вигоди	Економічні	Соціальні	Екологічні	Пріоритет x_i	$A_j x_i$
Економічні	1	4	0,5	0,34	0,9796
Соціальні	0,25	1	0,25	0,11	1,08
Екологічні	2	4	1	0,55	0,98
$A_j = \sum_{i=1}^3 a_{i,j}$	3,25	9	1,75	$\lambda_{\max} = \sum A_j x_i = 3,054$	

Обчислимо ІУ за формулою (5.4), коли $n = 3$ – число порівнюваних елементів.

$$IY = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) = (3,054 - 3)/2 = 0,0268.$$

Відношення узгодженості ВУ обчислимо за формулою (5.5), враховуючи, що для матриці розмірності $n = 3$ випадкова узгодженість $n_{\text{вип}} = 0,58$ (згідно з табл. (5.5)).

$$VY = IY/n_{\text{вип}} = 0,0268 / 0,58 = 0,046.$$

Величина ВУ має бути близько 10 % або менше, аби бути прийнятною. В нашому випадку $VY = 4,6$ %. Тобто, умови виконано, матриця добре узгоджена. У випадку, коли матриця неузгоджена, необхідно перевірити судження експерта, знову її заповнити і обчислити її узгодженість.

Тепер потрібно для кожного з критеріїв другого рівня скласти матриці порівнянь елементів третього рівня, які із ними пов'язані.

Припустимо, що за думками експертів складено такі матриці парних порівнянь для критеріїв третього рівня.

Таблиця 5.9 – Матриця порівнянь кластера Економічні вигоди

Економічні вигоди	Підвищення доходу	Залучення інвестицій	Нові робочі місця	Розвиток інфраструктури
Підвищення доходу	1	3	5	0,5
Залучення інвестицій	1/3	1	4	0,2
Нові робочі місця	0,2	0,25	1	0,25
Розвиток інфраструктури	2	5	4	1

Таблиця 5.10 – Матриця порівнянь кластера Соціальні вигоди

Соціальні вигоди	Підвищення безпеки	Підвищення якості життя	Зміцнення громадської спільноти
Підвищення безпеки	1	0,2	2
Підвищення якості життя	5	1	5
Зміцнення громадської спільноти	0,5	0,2	1

Таблиця 5.11 – Матриця порівнянь кластера Екологічні вигоди

Екологічні вигоди	Зменшення викидів CO ₂	Зменшення шкідливих викидів	Збереження біорізноманіття
Зменшення викидів CO ₂	1	3	5
Зменшення шкідливих викидів	1/3	1	3
Збереження біорізноманіття	0,2	1/3	1

Для кожної з цих матриць обчислюємо вектор локальних пріоритетів, перевіряємо узгодженість і потім обчислюємо глобальні пріоритети для всіх елементів рівня.

Узгодженість матриць і обчислення локальних пріоритетів проводиться так само, як у попередньому випадку. Наведемо результати розрахунків.

Таблиця 5.12 – Локальні пріоритети та узгодженість критеріїв другого рівня

Критерій		Локальний пріоритет критерію	Відношення узгодженості
Економічні вигоди	Підвищення доходу	0,32	ВУ=0,084
	Залучення інвестицій	0,14	
	Нові робочі місця	0,06	
	Розвиток інфраструктури	0,48	
Соціальні вигоди	Підвищення безпеки	0,18	ВУ=0,046
	Підвищення якості життя	0,71	
	Зміцнення громадської спільноти	0,11	
Екологічні вигоди	Зменшення викидів CO ₂	0,64	ВУ=0,033
	Зменшення шкідливих викидів	0,26	
	Збереження біорізноманіття	0,10	

Тепер необхідно обчислити глобальні пріоритети критеріїв третього рівня за формулою (5.3), результати запишемо в табл. 5.13.

Таблиця 5.13 – Обчислення глобальних пріоритерів

Критерій другого рівня	Глобальний пріоритет критерію вищого (другого) рівня, x_i^k	Критерій третього рівня	Локальний пріоритет критерію, b_{ij}	Глобальний пріоритет критерію третього рівня x_j^{k+1} $= \sum_{i=1}^n x_i^k b_{ij}$
Економічні вигоди	0,34	Підвищення доходу	0,32	0,1088
		Залучення інвестицій	0,14	0,0476
		Нові робочі місця	0,06	0,0204
		Розвиток інфраструктури	0,48	0,1632
Соціальні вигоди	0,11	Підвищення безпеки	0,18	0,0198
		Підвищення якості життя	0,71	0,0781
		Зміцнення громадської спільноти	0,11	0,0121
Екологічні вигоди	0,55	Зменшення викидів CO ₂	0,64	0,352
		Зменшення шкідливих викидів	0,26	0,143
		Збереження біорізноманіття	0,10	0,055

Що стосується останнього (четвертого) рівня, то для нього необхідно скласти дев'ять (за числом критеріїв – елементів третього рівня) матриць для порівняння альтернатив. Після того, як всі вони будуть заповнені та буде перевірена узгодженість думок експертів при заповненні кожної з них і, в разі задовільного значення ВУ стосовно цих матриць, будуть розраховані локальні пріоритети порівнюваних альтернатив. Приміром, результати розрахунків для критерія «Створення нових робочих місць» наведено нижче (табл. 5.14)

Таблиця 5.14 – Матриця порівнянь та локальні пріоритети за критерієм «Створення нових робочих місць»

	A1	A2	A3	Локальний пріоритет	ВУ
A1	1	0,2	0,25	0,09	0,074
A2	5	1	3	0,63	
A3	4	0,333333333	1	0,28	

Знаючи локальні пріоритети всіх елементів ієрархії, можна переходити до етапу *синтезу глобальних пріоритетів*. результати обчислень показано у табл. 5.15

Таблиця 5. 15

Критерії третього рівня	Глобальні пріоритети критеріїв третього рівня, x_i^k	Локальні пріоритети альтернатив за i -м критерієм, b_{ij}		
		A1	A2	A3
Підвищення доходу	0,1088	0,087	0,282	0,631
Залучення інвестицій	0,0476	0,117	0,683	0,2
Нові робочі місця	0,0204	0,093	0,627	0,28
Розвиток інфраструктури	0,1632	0,117	0,268	0,615
Підвищення безпеки	0,0198	0,637	0,258	0,105
Підвищення якості життя	0,0781	0,109	0,309	0,582
Зміцнення громадської спільноти	0,0121	0,149	0,16	0,691
Зменшення викидів CO2	0,352	0,078	0,635	0,287
Зменшення шкідливих викидів	0,143	0,186	0,687	0,127
Збереження біорізноманіття	0,055	0,179	0,112	0,709
Глобальні пріоритети альтернатив $x_j^{k+1} = \sum_{i=1}^n x_i^k b_{ij}$		0,123	0,479	0,398

Отже, за вигодами альтернативні проєкти мають такі пріоритети:

A1: Створення мережі велосипедних доріжок та пішохідних зон у центрі міста – 0,123;

A2: Перехід на електричний громадський транспорт – 0,479;

A3: Розширення зелених зон і парків – 0,39.

Якщо враховувати тільки вигоди, то найбільший пріоритет має проєкт A2 і тому саме він має бути обраним.

Для більш повного аналізу ситуації можна також розглянути ієрархію витрат, а потім об'єднати отримані результати.

Як і вигоди, витрати, пов'язані із вибором тієї або іншої альтернативи розвитку міста, включають чинники економічного і соціального плану, а також середовища. Основні економічні витрати: капітальні вкладення на будівництво, витрати на управління і експлуатацію, а також потребу у відшкодуванні власникам землі, де буде проводитися будівництво. При плануванні соціальних наслідків слід зважувати на можливість негативного впливу наслідків зміни стилю життя, що існує, необхідність організації навчання населення правилам безпеки, організацію переходів, огорож для доріжок, потребу у навчанні нового персоналу. Витрати, пов'язані з середовищем, повинні враховувати можливу шкоду, що заподіюється екосистемі кожною з альтернатив. Наприклад, можливе забруднення повітря під час будівництва, порушення природних зон при прокладанні маршрутів, також слід мати на увазі можливі впливи на міські пейзажі і на культурні цінності.

Опишемо витрати за кожною з альтернатив.

A1 Мережа велосипедних доріжок та пішохідних зон

Економічні витрати складаються з капіталовкладень (витрати на проєктування та будівництво велосипедних доріжок й пішохідних зон, з урахуванням придбання земельних ділянок, матеріалів, роботи з вирівнювання ґрунту та асфальтування); витрат на обслуговування та ремонт (регулярні витрати на обслуговування, ремонт та утримання інфраструктури, включаючи роботи з ремонту асфальту, розмітки, сигнальних систем і освітлення); адміністративних витрат (оплата персоналу, який відповідає за управління та координацію проєкта, а також ведення обліку та звітності). Зауважимо, що ці витрати можуть бути вельми значними і перевищити очікувані користі.

Екологічні витрати включають видалення дерев, рослин та природних об'єктів для створення мережі велосипедних доріжок та пішохідних зон; викиди CO₂ та інших забруднюючих речовин в процесі будівництва, пов'язані зі зведенням інфраструктури. Крім того, виробництво і доставка будівельних матеріалів, також можуть мати екологічний вплив.

Соціальні витрати складаються з коштів на безпеку (встановлення захисних засобів для забезпечення пішоходів та велосипедистів); необхідність розробки освітніх програм з безпеки на дорогах та використання велосипедних доріжок та пішохідних зон. Потреба у земельних ділянках для розширення доріг та тротуарів може викликати конфлікти з власниками землі та вимагати відшкодування їхніх прав. Реконструкція доріг

та введення нових елементів інфраструктури може спричинити тимчасові затори й перешкоди на дорогах, що негативно вплине на рух автомобільного транспорту та господарську діяльність. Будівництво може супроводжуватися забрудненням довкілля шумом, пилом і викидами, що вплине на якість життя мешканців.

Вплив на навколишнє середовище включає забруднення під час будівництва. Крім того, будівництво та розширення інфраструктури може вплинути на природне середовище, включаючи знищення зелених зон або природних біотопів

A2 Перехід на електричний громадський транспорт

Економічні витрати містять у своєму складі закупівлю та підтримку електричних транспортних засобів, розробку та будівництво інфраструктури для їх зарядки (електричні станції) і перебування пасажирів, та витрати на обслуговування й ремонт інфраструктури, яка підтримує роботу електричного громадського транспорту.

Екологічні витрати – це перш за все вплив на довкілля під час будівництва та завантаження енергетичної системи, оскільки збільшення попиту на електроенергію для зарядки транспортних засобів може потребувати додаткової потужності та змін у виробництві електроенергії.

Соціальні витрати передбачають можливі незручності у транспортному русі, викликані його змінами та реконструкцією інфраструктури, необхідність навчання водіїв та технічного персоналу роботі з електричними транспортними засобами. З метою покриття витрат на електричний транспорт може знадобитися підвищення вартості квитків для пасажирів. Крім того, можливі конфлікти з власниками землі або місцевими громадами у зв'язку з будівництвом транспортної інфраструктури.

Потрібно також враховувати, що розширення електричного громадського транспорту може вплинути на зовнішній вигляд міста та культурну спадщину.

A3 Розширення зелених зон і парків

Економічні витрати включають придбання земельних ділянок для розширення зелених зон і парків, а також їхнє обслуговування та підтримку (регулярний догляд включаючи садіння та догляд за рослинами), розробку та будівництво інфраструктури в парках (стежки, мости, лавки, дитячі майданчики, освітлення тощо).

Екологічні витрати. Необхідно враховувати, що розширення парків може вплинути на існуючі екосистеми, включаючи знищення природних біотопів. Крім того, очікувані зміни в зовнішньому вигляді міста можуть мати як позитивні, так і негативні аспекти.

Соціальні витрати передбачають необхідність забезпечення зручності та безпеки для користувачів парків та зелених зон, підтримку відносин з місцевими громадами. Крім того, розширення парків може вимагати відчуження земельних ділянок, які раніше використовувалися для інших цілей, що може викликати конфлікти із власниками, громадою та мешканцями, які вже користуються цими зонами або розважаються в них.

Отже, в результаті була побудована така ієрархія витрат:

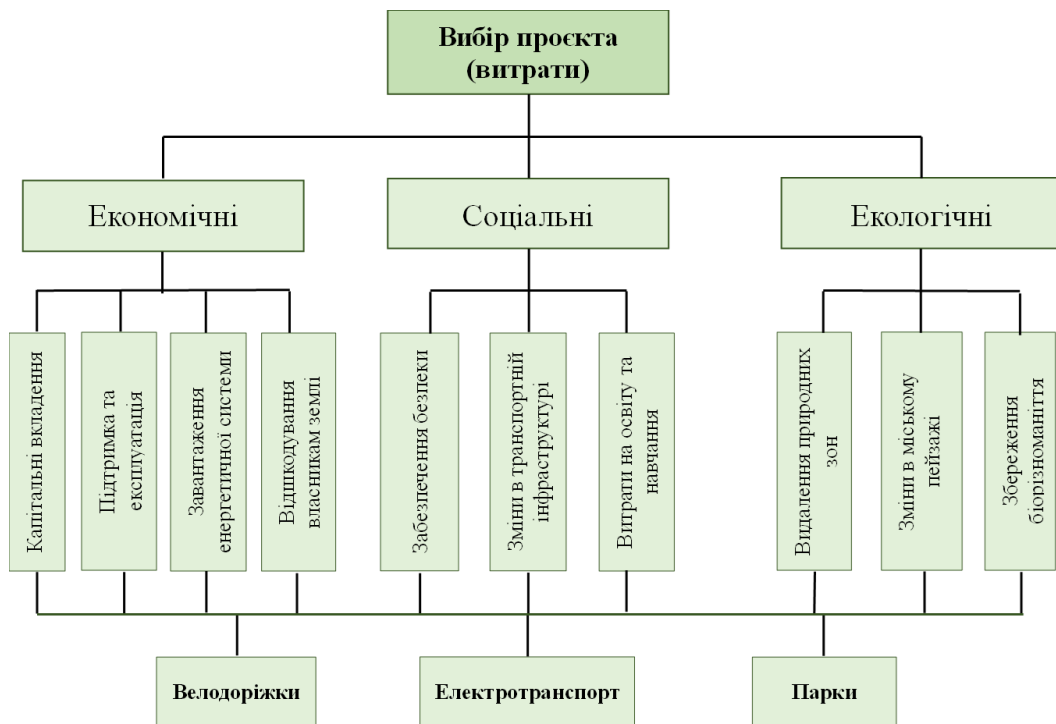


Рисунок 5.6 – Ієрархія витрат

Повторюючи описані вище розрахунки для цієї ієрархії, отримаємо глобальні пріоритети проєктів з точки зору можливих витрат.

Зауважимо, що при заповненні матриці порівнянь для ієрархії витрат потрібно враховувати напрям оптимізації. Тобто, якщо проєкт 1 буде потребувати менше витрат, ніж проєкт 2, то він буде кращим, отже буде переважати проєкт 2 за шкалою Сааті. Тоді отримані пріоритети для витрат будуть відповідати напрямку максимізації, тобто більший пріоритет буде мати найменш витратний проєкт.

Але, при заповненні матриць порівнянь за таким правилом: «якщо проєкт 1 потребує більших витрат, ніж проєкт 2, то він переважає його за витратами», метою стане мінімізація – таким чином, в результаті найменш витратний проєкт буде мати менший пріоритет.

Отже, перш ніж заповнювати матриці порівнянь потрібно визначитися із напрямом оптимізації і правилом заповнення, і потім враховувати це при подальшому аналізі і об’єднанні результатів за вигодами та витратами.

Припустимо, за результатами розрахунків отримані такі пріоритети для ієрархії витрат: $A_1 = 0,137$, $A_2 = 0,564$, $A_3 = 0,299$ (найбільший пріоритет відповідає найбільш витратній альтернативі). Відтак, за результатами витрат, потрібно обирати альтернативу A_1 – Мережа велосипедних доріжок та пішохідних зон.

Результати обчислень можна об’єднати, застосовуючи різні види згорток (див. п. 5.1). Наприклад, можна розглянути відношення вигід до витрат, або їх різницю, чи застосувати інші методи. Результати подано у табл. 5.16

Таблиця 5.16 – Врахування результатів обчислень за ієрархіями вигід та витрат

	A1	A2	A3
Вигоди	0,123	0,479	0,398
Витрати	0,137	0,564	0,299
Вигоди / витрати	1,19	0,86	1,40
Вигоди – витрати	0,07	- 0,08	0,02

Спираючись на критерій «вартість – ефективність», визначимо проект з найбільшим відношенням вигід до витрат. В даному завданні це А3 – Розширення зелених зон і парків. Розгляд різниці вигід і витрат також дає в як найбільш прийнятну альтернативу А3.

Остаточне рішення буде ухвалювати ОПР.

Отже, МАІ широко застосовується до прийняття рішень в найрізноманітніших областях, особливо за умов слабкої структурованості, оскільки дозволяє структурувати проблему шляхом декомпозиції та побудови ієрархії, працює з даними, отриманими як дослідним, так і експертним шляхом і дозволяє оцінити послідовність тверджень експертів.

Підсумовуючи, можна визначити такі переваги та недоліки МАІ.

Переваги методу аналізу ієрархій

- Універсальність. Може бути застосований щодо задач прийняття рішень у різних галузях.
- Дозволяє у зрозумілий та раціональний спосіб структурувати складну проблему прийняття рішень у вигляді ієрархії, порівняти та виконати кількісну оцінку альтернативних варіантів рішення.
- Для оцінки відносної величини факторів за допомогою парних порівнянь використовується досвід окремих експертів. Отже, можна задіяти експертів з різних галузей для оцінки за різними критеріями.
- Включає перевірку узгодженості думок експерта, тобто дає змогу виявити некоректні оцінки.
- Застосовані критерії можуть бути як кількісними, так і якісними.

Недоліки методу аналізу ієрархій

- Необхідність отримання великого обсягу інформації від експертів
- Великий об'єм обчислень.

Висновки

① Однією із проблем у прийнятті рішень є наявність великого числа критеріїв, які не завжди погоджені між собою. Така ситуація може бути описана математичними моделями задач багатокритеріальної оптимізації або як задача багатокритеріального вибору. В задачах сталого розвитку, як правило, присутні економічні, екологічні, соціальні та технологічні критерії.

② Метод аналізу ієрархій (МАІ) є структурованою процедурою організації та аналізу складних рішень, що дозволяє обрати найкраще, виходячи із уявлень і міркувань ОПР. Його застосування допомагає розібратися у проблемі, структурувати її і прийти до кращого її розуміння.

③ МАІ може бути застосований для задач із кількісними і якісними критеріями. Це важливо для врахування різних аспектів сталого розвитку, таких як якість середовища та соціальні показники.

④ Для оцінювання альтернатив за критеріями можуть бути залучені різні експерти. Це допомагає уникнути однобічного погляду і сприяє об'єктивному оцінюванню. Важливою особливістю МАІ є можливість перевірити узгодженість суджень експертів для попередження помилок при заповненні матриць порівнянь.

⑤ МАІ дозволяє оцінювати як позитивні, так і негативні наслідки рішень з точки зору сталого розвитку. Це дозволяє забезпечити збалансований підхід до обрання рішень. При заповненні матриць порівнянь важливо враховувати напрямок оптимізації.

⑥ Складність застосування метода полягає у необхідності отримання великого обсягу інформації від експертів і у значному об'ємі обчислень. Проте з розвитком комп'ютерних технологій і доступністю програмних інструментів для МАІ ця складність може бути зменшена.

В цілому, МАІ є потужним інструментом для вирішення складних задач сталого розвитку, оскільки він дозволяє структурувати, узгоджувати та аналізувати різноманітні критерії та допомагає знаходити оптимальні рішення, які враховують багатоаспектність цього процесу. Однак важливо зважати на специфічні особливості кожного випадку і збирати коректну інформацію та експертні думки для точного застосування методу.

Додаткову інформацію стосовно матеріалу, викладеного у цьому розділі, можна знайти у літературі [16, 19, 47, 73, 79, 87].

Питання для самоконтролю і завдання

Дайте відповіді на питання та поясніть їх на прикладах:

- Сформулюйте задачу прийняття рішень при багатьох критеріях.
- Які складнощі виникають при прийнятті рішень в умовах багатьох критеріїв? Наведіть приклади.
- Чим відрізняються кількісні і якісні критерії?
- Сформулюйте ідею методу аналізу ієрархій.
- Для яких задач сталого розвитку можна застосовувати МАІ?
- Назвіть етапи реалізації МАІ.
- Дайте визначення ієрархії. Які види ієрархій існують? Наведіть приклади.
- Які правила побудови ієрархії?
- Що являє собою вектор локальних пріоритетів?
- Які способи обчислення нормалізованого власного вектора матриці ви знаєте? Опишіть один з них.
- Які правила заповнення матриці попарних порівнянь?
- Що означає властивість зворотної симетричності матриці?
- Як проводиться перевірка узгодженості суджень експертів?
- Який рівень узгодженості вважається прийнятним?
- Сформулюйте переваги і недоліки методу аналізу ієрархій.
- Наведіть приклади задач прийняття рішень для розв'язування яких можна застосовувати МАІ.

Обчислити локальні пріоритети та перевірити узгодженість таких матриць порівнянь

$$a) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 1/2 \\ 1/5 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$б) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 3 \\ 1/7 & 1 & 1/4 \\ 1/3 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$в) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 6 & 3 \\ 2 & 1 & 3 & 5 \\ 1/6 & 1/3 & 1 & 1/7 \\ 1/3 & 1/5 & 7 & 1 \end{pmatrix}$$

$$г) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 2 \\ 3 & 1 & 1/3 & 5 \\ 5 & 3 & 1 & 7 \\ 1/2 & 1/5 & 1/7 & 1 \end{pmatrix}$$

Застосовуючи метод аналізу ієрархій, розв'яжіть подані нижче задачі.

- 1 Вибір оптимального джерела енергії для екологічно стійкого житлового комплексу.

Припустимо, розглядається проєкт будівництва житлового комплексу, який прагне досягти максимальної енергоефективності та зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Необхідно визначити оптимальне джерело енергії для комплексу, враховуючи такі критерії, як екологічна чистота, вартість впровадження, стабільність постачання, вплив на забруднення повітря та водних ресурсів.

Етапи виконання завдання.

1. Визначити можливі альтернативи джерела енергії для екологічно стійкого житлового комплексу (наприклад, сонячна енергія, вітрова енергія, біопаливо, геотермальна енергія тощо).

2. Створити ієрархічну структуру, включаючи критерії та підкритерії, такі як "екологічна чистота", "вартість впровадження", "стабільність постачання" та "вплив на забруднення".

3. Заповнити матриці порівнянь для критеріїв, підкритеріїв та альтернатив шляхом експертної оцінки їх важливості для сталого розвитку.

4. Провести порівняння між джерелами енергії (наприклад, сонячна енергія, вітрова енергія, біопаливо, геотермальна енергія тощо) згідно з кожним підкритерієм та надати їм відповідні оцінки.

5. Оцінити узгодженість отриманих матриць порівнянь та внести корективи, якщо це необхідно.

6. Обчислити остаточних рейтинг альтернатив.

7. Зробити вибір оптимального джерела енергії для житлового комплексу з урахуванням найкращих оцінок та вагових коефіцієнтів.

② Вибір найбільш ефективного способу транспорту для підвищення доступності та зменшення впливу на довкілля в міському середовищі. Міста зіштовхуються з проблемами заторів, забрудненням повітря та низькою доступністю транспорту для мешканців. Треба вибрати найкращий вид транспорту для поліпшення мобільності в місті, враховуючи такі критерії: ефективність, екологічність, вартість та соціальна прийнятність.

Етапи виконання завдання.

1. Визначити можливі альтернативи (наприклад, автомобілі, громадський транспорт, велосипеди, електричні скутери) та критерії їх оцінювання.

2. Створити ієрархічну структуру, що включає критерії та підкритерії, такі як «швидкість та ефективність», «екологічність», «вартість», «доступність для різних соціальних груп».

3. Заповнити матриці порівнянь для критеріїв, підкритеріїв та альтернатив з огляду на думку експертів і важливість кожного критерію для розв'язання задачі.

4. Порівняти різні види транспорту з точки зору кожного підкритерію та надати їм відповідні оцінки.

5. Провести аналіз узгодженості матриць порівнянь, за потреби, скорегувати судження.

6. Обчислити глобальні пріоритети та знайти оптимальний вид транспорту для міста.

③ Вибір джерела енергії. Місцеве самоврядування має прийняти рішення щодо постачання енергії для села, яке раніше залежало від дизельного генератора, однак існує можливість переходу на альтернативні джерела енергії. Оберіть одну з альтернатив: сонячні панелі, вітрові турбіни, біогазова установка. Необхідно врахувати такі критерії: вартість впровадження та обслуговування, стійкість постачання енергії, вплив на навколишнє середовище, забезпечення енергією для розвитку громади, сумісність з існуючими системами та обладнанням, необхідність постачання ресурсів зовні та інші.

④ Збереження водних ресурсів на фермі. Власник повинен прийняти рішення про оптимальне використання водних ресурсів. До розгляду взято такі альтернативи: застосування крапельного поливу, збір та зберігання дощової води, використання місцевих водойм для зрошення. Критеріями вибору є вартість впровадження, ефективність збереження водних ресурсів, вплив на родючість ґрунту та врожай, збереження довкілля, можливість використання протягом всього періоду.

⑤ Вибір екологічно безпечного матеріалу для пакування продукції. Підприємство, впроваджуючи програму сталого розвитку, має вибрати екологічно безпечний матеріал для пакування своєї продукції. До розгляду запропоновано такі альтернативи: біорозкладний полімер, папір та картон, вторинна переробка пластику. Оберіть матеріал для пакування продукції, використовуючи такі критерії: екологічна відповідність матеріалу, ефективність в упаковці продукції, вартість та доступність матеріалу, вплив на зменшення використання одноразових пластикових упаковок.

Завдання для виконання у класі

- 1 *Екологічна політика міста.* Муніципалітет має вирішити, які заходи необхідно впровадити для зниження викидів CO₂ та поліпшення стану довкілля у місті. До розгляду пропонується кілька альтернативних проєктів. Необхідно скласти їх рейтинг, з урахуванням переваг та обмежень кожного заходу, а також впливу на стан забруднення та здоров'я громадян.

Проєкти, які пропонуються до розгляду:

- *Розвиток громадського транспорту:* Запровадження нових маршрутів громадського транспорту та модернізація існуючих з метою зниження використання приватних автомобілів та викидів CO₂.
- *Підтримка екологічних технологій:* Підтримка розвитку екологічних технологій та впровадження екологічних стандартів для підприємств та промислових комплексів у місті.
- *Зелені зони та зелені дахи:* Побудова нових зелених зон, парків, скверів та використання зелених дахів для зменшення ефекту "острова тепла" та збереження біорізноманіття.
- *Рециклінг та утилізація відходів:* Запровадження системи сортування відходів та підтримка рециклінгових програм для зменшення кількості відходів на смітниках.
- *Сприяння використанню альтернативних джерел енергії:* Підтримка встановлення сонячних панелей, вітрогенераторів та інших альтернативних джерел енергії для забезпечення частини електроенергії міста.
- *Зелені будівництво та енергоефективність:* Запровадження стандартів зеленого будівництва для нових будівель та модернізація існуючих з метою зменшення споживання енергії та ефективного використання ресурсів.

Етапи розв'язування задачі:

1. Визначити можливі критерії для оцінювання проєктів.
2. Створити ієрархічну структуру, включаючи критерії та підкритерії.
3. Заповнити матриці порівнянь і визначити пріоритети для кожного критерію та підкритерію. Для здійснення порівнянь використовувати консультації з експертами та доступну інформацію за проблемою.
4. Заповнити матриці порівнянь для оцінювання альтернатив за критеріями.
5. Провести оцінку узгодженості матриць та внести зміни у судження за потреби.
6. Обчислити глобальні пріоритети альтернатив.

2) Вибір постачальників у глобальному бізнесі. Уявіть компанію, яка діє на міжнародному ринку і має вибрати постачальників матеріалів з різних країн. Враховуючи системні аспекти, такі як транспортні логістика, геополітичний контекст, економічні фактори та якість продукції, необхідно скласти рейтинг постачальників для прийняття оптимальних рішень.

3) Вибір енергетичного джерела для міста: муніципалітет повинен вирішити, яке джерело буде використовувати для постачання електроенергії міста. До розгляду взято такі альтернативи: вугілля, нафта, газ, вітроенергія, сонячна енергія, гідроенергія тощо. Оберіть одну з них зважаючи на такі критерії: вплив на забруднення, стійкість постачання, ефективність, технологічні аспекти, вартість електроенергії та ін.

4) Поліпшення системи управління відходами. Підприємство мусить вибрати оптимальний спосіб управління відходами з метою зниження впливу на довкілля. Необхідно розглянути різні можливості, такі як переробка, рециклінг, компостування тощо, та оцінити ефективність кожного варіанту. Запропонуйте кілька критеріїв оцінювання альтернатив та розв'яжіть задачу вибору.

5) Вибір зеленої ініціативи для підприємства. Компанія має вирішити, яку зелену ініціативу впровадити для зменшення впливу своєї діяльності на довкілля. Потрібно визначити можливі заходи, такі як зменшення використання пластику, впровадження енергоефективних технологій, стимулювання використання громадського транспорту тощо, та врахувати позитивний вплив на навколишнє середовище і вартість впровадження.

6) Розвиток сталого туризму в регіоні. Місцеві організації та влада вирішили розвивати туризм у регіоні, зберігаючи його природні ресурси та культурну спадщину краю. Необхідно запропонувати кілька програм, враховуючи такі аспекти: екологічні стандарти, утримання традиційних громад, популяризація екологічних маршрутів та ін.

7) Обчислити локальні пріоритети та перевірити узгодженість таких матриць порівнянь:

$$a) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 7 \\ 1/3 & 1 & 4 \\ 1/7 & 1/4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$б) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 1/7 & 6 \\ 7 & 1 & 5 \\ 1/6 & 1/5 & 1 \end{pmatrix}$$

$$в) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 1/2 \\ 1/5 & 1 & 4 \\ 2 & 1/4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$г) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/7 \\ 3 & 1 & 5 \\ 7 & 1/5 & 1 \end{pmatrix}$$

РОЗДІЛ 6

Моделі прийняття рішень в умовах невизначеності

Питання для дискусії:

Типи та джерела невизначеності. Поняття інформаційної ситуації. Класифікація інформаційних ситуацій. Критерій прийняття рішень. Прийняття рішень в умовах ризику. Критерій прийняття рішень. Критерії Байєса, мінімуму дисперсії, модальний. Прийняття рішень при антагоністичній поведінці середовища. Критерії Севіджа і Вальда. Прийняття рішень в умовах часткової невизначеності. Критерій Гурвіца

Ключові терміни та поняття:

- Інформаційна ситуація
- Критерій прийняття рішень
- Ситуація прийняття рішень
- Оцінний функціонал
- Критерій Байєса
- Множини Байєса
- Критерій мінімуму дисперсії
- Критерій максимізації ймовірності оцінного функціонала
- Модальний критерій
- Критерій Севіджа
- Критерій Вальда
- Критерій Бернуллі – Лапласа
- Критерій Гурвіца
- Множини Гурвіца
- Критерій Ходжеса – Лемана

6.1 Невизначеність у задачах прийняття рішень

Якість прийнятих рішень у будь-якій сфері суттєво залежить від надійності та обсягу доступної інформації, на основі якої особа, відповідальна за прийняття рішення (ОПР), здійснює свій вибір. В реальності ОПР не завжди має доступ до всієї інформації, котра необхідна для обґрунтованого вибору. Це становить одну з основних вад, що виникають під час прийняття рішень і є причиною виникнення невизначеності.

Невизначеність у прийнятті рішень зумовлено недостатньою надійністю й кількістю інформації, на основі якої ОПР здійснює свій вибір.

Невизначеність у прийнятті рішень потребує для свого опису спеціального математичного апарату, що дає можливість її врахування і, отже, залежить від того, яка саме невизначеність притаманна ситуації прийняття рішень.

Серед методів, які використовуються для опису ситуацій із невизначеністю, фігурують теорія ймовірностей, теорія ігор, статистичні методи, теорія нечітких множин, якісні методи системного аналізу та інші.

Історично першим для врахування невизначеності був розроблений апарат теорії ймовірності. В рамках цього підходу невизначеність ситуації описується ймовірнісною мірою, котра характеризує можливість появи попередньо заданих ймовірнісних виходів (елементів, або підмножин деякої множини).

У теорії ігор невизначеність виникає внаслідок конфлікту та антагоністичних інтересів гравців, які діють за певних правил гри.

У теорії статистичних рішень одним із гравців виступає природа, тобто пасивний гравець, поведінка якого описується законами розподілу ймовірності.

У задачах системного аналізу [16] загалом виділяють три види невизначеності: невизначеність цілей; ситуаційну і природну невизначеність (невизначеність знань про можливі ситуації у процесі функціонування складних систем); інформаційну невизначеність (невизначеність поведінки навколишнього середовища та дій реального партнера чи супротивника).

Різні ступені градації невизначеності в теорії прийняття рішень називають інформаційними ситуаціями [59].

Розглянемо деякі види невизначеності, що виникають у процесах прийняття рішень та управління.

Розрізняють такі типи невизначеності:

- невідомість – відсутність інформації про об’єкт або ситуацію;
- неповнота – тип невизначеності до якого відносяться ситуації, де наявна інформація для прийняття рішень є неповною, наприклад, через те, що в процесі виявлення, оброблення, зберігання інформації дані можуть бути спотворені або частково втрачені;
- недостатність – стосується ситуації, коли доступних даних не вистачає для обґрунтованого прийняття рішення;
- неадекватність – описує ситуації, коли певні елементи задачі описано лише за аналогією з уже розв’язуваними;
- недовизначеність – лише наближені, неточні описи деяких задач.

Схематично співвідношення між названими типами невизначеності й відповідними теоріями зображено на рис. 6.1.

Причини виникнення невизначеності [13]

1. Принципова невизначеність, зумовлена неможливістю отримати інформацію взагалі, наприклад, на даному рівні розвитку наукових знань.
2. Невизначеність, спричинена загальним числом об’єктів або елементів системи, приміром, коли їх кількість перевищує 10^9 .
3. Невизначеність, викликана браком інформації або її невірогідністю через технічні, соціальні або інші причини.
4. Невизначеність, породжена занадто високою або недоступною ціною встановлення визначеності.
5. Невизначеність, яку створює особа, що приймає рішення, унаслідок її некомпетентності, недостатнього досвіду й знань про фактори, котрі впливають на процес.
6. Невизначеність як наслідок обмежень у системі прийняття рішень (обмеження за часом й елементами простору параметрів, що характеризують фактори прийняття рішень);
7. Невизначеність, спричинена неантагоністичною поведінкою супротивника, який має вплив на процес прийняття рішень.

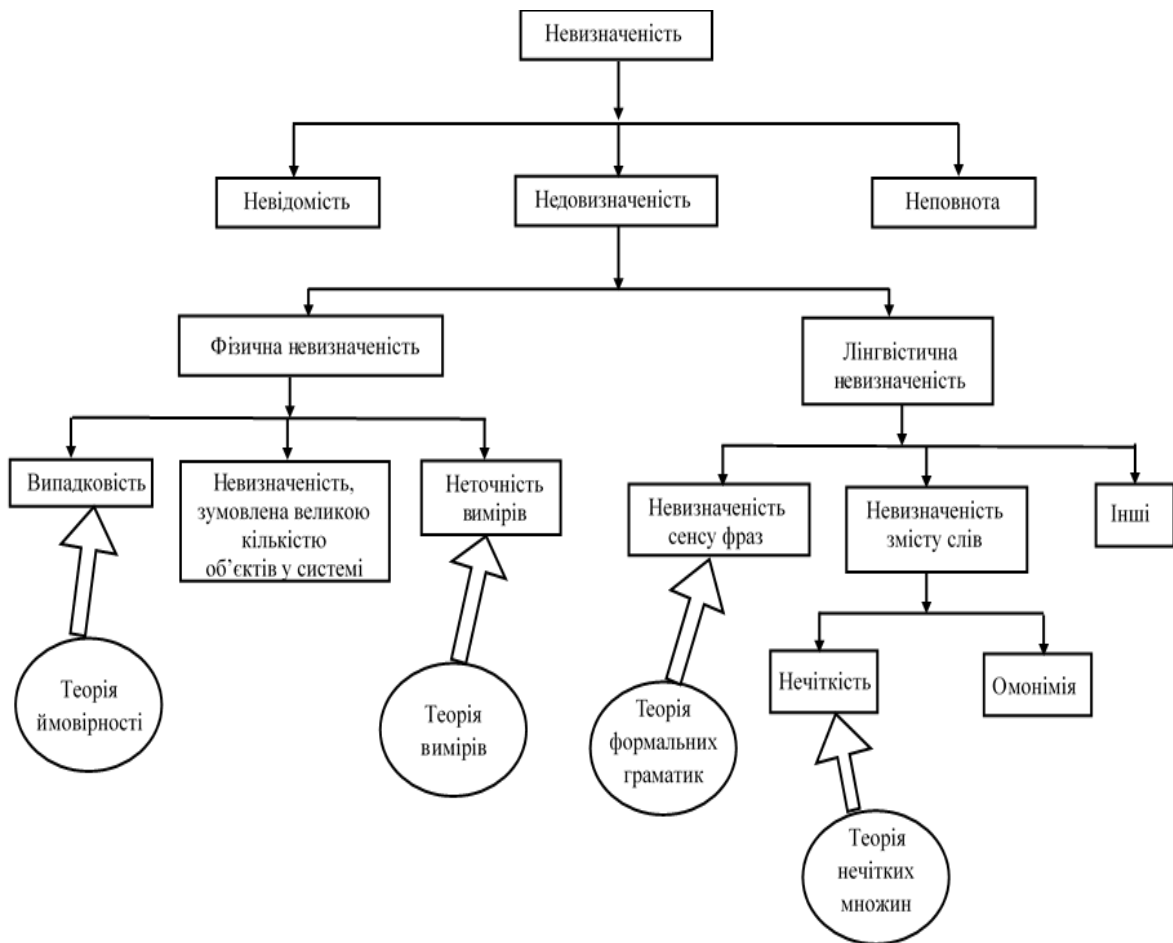


Рисунок 6.1 – Класифікація невизначеності та методів її моделювання [13]

Можна стверджувати, що зараз теорія прийняття рішень в умовах невизначеності дуже активно розвивається і запропоновані тут класифікації і схеми не є вичерпними. Велика кількість моделей пов'язана із використанням апарату нечітких множин – це нечітке математичне програмування, вибір на основі нечітких відношень, нечітка арифметика та інші. Для подолання невизначеності цілей використовують моделі багатокритеріальної оптимізації, когнітивного моделювання, методи системного аналізу, різноманітні методи експертного оцінювання. Докладніше про них можна дізнатися у літературі, яка наведена у списку джерел.

У цьому розділі ми зупинимось на статичних ігрових моделях прийняття рішень, в яких середовище не виступає свідомим супротивником. Їх ще називають «гра з природою».

6.2 Поняття про ситуацію прийняття рішень

Розглянемо тепер ситуацію, коли якість рішення залежить від зовнішніх факторів, на які ОПР (або орган управління) не впливає. Будемо також вважати, що ці параметри й збурення незмінні в часі, тобто модель є статичною.

Статична модель прийняття рішень, яка базується на теоретико-ігровій концепції, добре відома й поширена в багатьох реальних обставинах разового вибору варіантів (планів, дій, альтернатив, стратегій і т. д.), пов'язаних із невизначеним впливом середовища на ситуацію вибору, який проводить орган прийняття рішень.

Досліджуючи статичні моделі прийняття рішень, будемо виходити із схеми, у якій передбачено такі припущення:

- 1) орган управління має в наявності множину взаємовиключних рішень: $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$, одне з яких необхідно вибрати;
- 2) середовище S описується множиною взаємовиключних станів: $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$, і може перебувати в одному з них, однак на момент прийняття рішення органу управління невідомо, у якому саме стані воно перебуває (або буде перебувати);
- 3) визначено оцінний функціонал: $F = \{f_{j,k}\}$, який характеризує «виграш» або «програш» органу управління при виборі ним рішення $\varphi_k \in \Phi$, якщо середовище буде перебувати (або перебуває) в стані $\theta_j \in \Theta$.

Під *ситуацією прийняття рішень* будемо розуміти трійку $\{\Phi, \Theta, F\}$, у якій $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ – множина можливих рішень органу управління; $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ – множина можливих станів середовища; $F = \{f_{j,k}\}$ – оцінний функціонал, тут $f_{j,k} = f(\theta_j, \varphi_k)$.

У розгорнутій формі ситуація прийняття рішень характеризується такою матрицею:

	φ_1	φ_2	\dots	φ_k	\dots	φ_m
θ_1	f_{11}	f_{12}	\dots	f_{1k}	\dots	f_{1m}
θ_2	f_{21}	f_{22}	\dots	f_{2k}	\dots	f_{2m}
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
θ_j	f_{j1}	f_{j2}	\dots	f_{jk}	\dots	f_{jm}
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
θ_n	f_{n1}	f_{n2}	\dots	f_{nk}	\dots	f_{nm}

Розглянемо детальніше кожен з елементів ситуації прийняття рішень.

$\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ – множина можливих рішень органу управління. Це альтернативи, варіанти, плани, проекти і т.і., серед яких має бути обране рішення. Зауважимо, що рішенням може слугувати: елемент множини можливих рішень, який обирає ОПР; документ, що регламентує діяльність системи управління, котрий затверджено у встановленому порядку і який є обов'язковим для виконання підпорядкованими підсистемами; розпорядження щодо виконання тієї чи іншої дії або процесу; послідовність дій, спрямована на досягнення мети; деякий матеріальний об'єкт, число і т.д.; реакція системи на вхідний вплив. Згідно з цією моделлю реалізації підлягає тільки одне з рішень (альтернатив).

$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ – множина можливих станів середовища. Являє собою ситуації, які до прийняття рішення органу управління невідомі. При формуванні цієї множини потрібно пам'ятати, що ніякі два стани не можуть відбутися одночасно, а один із них обов'язково відбудеться. Якщо говорити в термінах теорії ймовірності, ці події мають утворювати повну групу несумісних подій. Крім того, це мають бути випадкові ситуації, які або відбуваються, або ні. Наприклад, ми не можемо вважати станами середовища дні тижня. Оскільки настання понеділка або вівторка не відбувається із певною ймовірністю, залежно від зовнішніх факторів, ми знаємо який день буде завтра або через тиждень.

З категорією оцінного функціонала тісно пов'язані такі поняття як ефективність, корисність, втрати, ризик тощо. При цьому вибір тієї чи іншої форми функціонала залежить від конкретних задач управління. Зазвичай використовують дві його форми: ті, що визначають корисність, або ті, що визначають втрати.

Якщо оцінний функціонал визначає ефективність, корисність, прибуток і т. і., тобто орган управління, приймаючи рішення, має його максимізувати, то говорять, що він має *додатний інгредієнт*. У цьому випадку оцінний функціонал позначають індексом «+», тобто $F = F^+ = \{f_{j,k}^+\}$.

Коли орган управління виходить із потреби досягнення мінімуму оцінного функціонала (тобто він відображає витрати, ризик), то це означає, що він має *від'ємний інгредієнт*. Цей факт записують таким чином: $F = F^- = \{f_{j,k}^-\}$.

Інформаційною ситуацією прийняття рішень будемо називати ступінь градації невизначеності у виборі середовищем своїх станів із заданої множини Θ в момент прийняття рішення органом управління.

Критерієм прийняття рішень будемо називати алгоритм, визначений для кожної ситуації прийняття рішень та інформаційної ситуації I , що дозволяє обрати єдине оптимальне рішення φ_0 з множини Φ або встановити множину таких рішень, які називають *еквівалентними* за даним критерієм.

Виділяють такі інформаційні ситуації [59]:

I_1 – коли задано розподіл апіорних імовірностей на елементах множини станів середовища θ , цю ситуацію називають також ситуацією прийняття рішень в умовах ризику;

I_2 – має місце заданий розподіл імовірностей з невідомими параметрами;

I_3 – задано системи лінійних відношень порядків на компонентах апіорного розподілу станів середовища C ;

I_4 – коли розподіл імовірностей на множині станів середовища θ невідомий;

I_5 – наявність антагоністичних інтересів середовища в процесі прийняття рішення;

I_6 – «проміжний» між I_1 та I_5 вибір середовищем своїх станів;

I_7 – існування нечіткої множини станів середовища.

У кожній інформаційній ситуації I можливе застосування кількох критеріїв. Вибір конкретного з них виконує ОПР.

Виходячи з цих припущень, процес прийняття рішень в умовах невизначеності може бути описаний схемою, поданою на рис. 6.2.

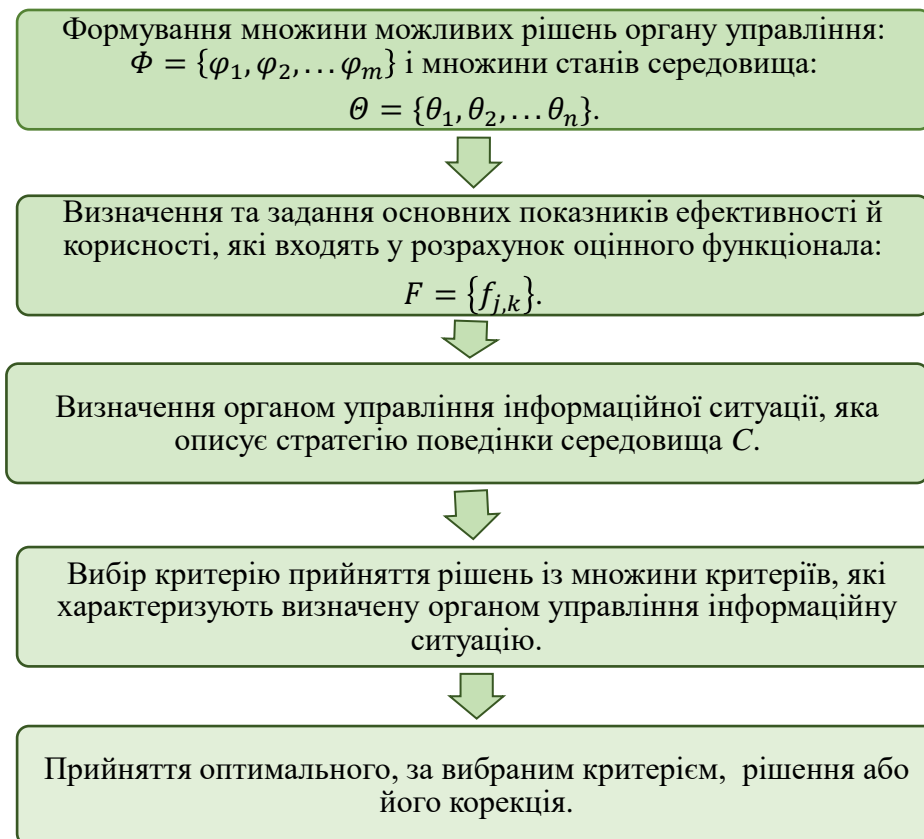


Рисунок 6.2 – Схема процесу прийняття рішень

6.3 Прийняття рішень в умовах ризику

Перша інформаційна ситуація I_1 характеризується заданим розподілом апіорних імовірностей на елементах множини θ , а саме: $p = (p_1, p_2 \dots p_n)$, тут $p_j = p(\theta = \theta_j)$, $\sum_{j=1}^n p_j = 1$. Вона є дуже поширеною при моделюванні практичних задач прийняття рішень в умовах ризику, оскільки дозволяє ефективно використовувати конструктивні методи теорії ймовірності в процесі розробки цілого наукового напрямку – теорії статистичних рішень.

Вставка 6.1

Визначення апіорного розподілу ймовірності

Визначення апіорного розподілу ймовірності можна здійснити за допомогою об'єктивного і суб'єктивного підходів.

У реальних задачах розрахунок апіорного розподілу

$$p = (p_1, p_2 \dots p_n),$$

зазвичай, здійснюється або шляхом обробки великого обсягу статистичного матеріалу, або на основі аналітичних методів, які базуються на гіпотезах про поведінку середовища та на застосуванні методів і теорем теорії ймовірності. Отриманий у такий спосіб апіорний розподіл імовірності називають *об'єктивним*.

Зауважимо, що обидва ці методи дають деякою мірою наближені результати, оскільки певні труднощі й обмеження (вони стосуються вартості, часу тощо) виникають при обробці статистичних даних. Коли ж йдеться про використання аналітичних методів, доводиться робити певні припущення, які шкодять точності опису процесу.

Разом з тим, іноді застосування цих методів неможливе, оскільки немає достатньої кількості статистичного матеріалу, середовище характеризується складною «поведінкою», внаслідок чого аналітичні методи потребують додаткових досліджень, що зумовлює значні витрати коштів і часу. У цих умовах орган прийняття рішень може використати для визначення значень апіорного розподілу ймовірності думки та уявлення досвідчених експертів, які добре орієнтуються в ситуації. Таке визначення ймовірності називається *суб'єктивним*.

Ця інформаційна ситуація є досить дослідженою, для прийняття рішень тут розроблено досить багато критеріїв. Розглянемо деякі із них.

➔ **Критерій Байєса (середнього значення)**

Сенс цього критерію полягає в максимізації математичного сподівання оцінного функціонала.

Згідно з критерієм Байєса, оптимальними рішеннями $\varphi_{k_0} \in \Phi$ (або множиною таких рішень) вважають ті, для яких математичне сподівання оцінного функціонала набуває найбільшого (або найменшого) можливого значення, а саме:

$$\varphi_{k_0} : B^+(\varphi_{k_0}, p) = \max_{\varphi_k \in \Phi} B^+(\varphi_k, p), \quad B^+(\varphi_k, p) = \sum_{j=1}^n p_j f_{jk}^+, \quad k = 1, m \quad (6.1)$$

для функціонала із додатним інгредієнтом;

$$\varphi_{k_0} : B^-(\varphi_{k_0}, p) = \min_{\varphi_k \in \Phi} B^-(\varphi_k, p), \quad k = 1, m, \quad B^-(\varphi_k, p) = \sum_{j=1}^n p_j f_{jk}^- \quad (6.2)$$

для функціонала із від'ємним інгредієнтом.

Критерій Байєса є найбільш використовуваним в інформаційній ситуації I_1 . Його доцільно застосовувати тоді, коли ситуація повторюється багато разів, оскільки за таких умов максимізується середнє значення корисності (або мінімізується середній ризик).

➔ **Критерій мінімуму дисперсії оцінного функціонала**

Для кожного рішення $\varphi_k \in \Phi$ визначимо середнє значення $B^+(\varphi_k, p)$ оцінного функціонала та дисперсію σ_k^2 в такому вигляді:

$$B^+(\varphi_k, p) = \sum_{j=1}^n p_j f_{jk}^+, \quad (6.3)$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{j=1}^n p_j (f_{jk}^+ - B^+(\varphi_k, p))^2. \quad (6.4)$$

Дисперсія описує розсіювання випадкових значень оцінного функціонала для рішення φ_k відносно його середнього значення $B^+(\varphi_k, p)$.

Сутність критерію мінімізації дисперсії оцінного функціонала полягає в тому, щоб знайти рішення $\varphi_{k_0} \in \Phi$, для якого буде справедливою така рівність:

$$\sigma_k^2(p, \varphi_{k_0}) = \min_{\varphi_k \in \Phi} \sigma_k^2(p, \varphi_k). \quad (6.5)$$

Основним недоліком цього критерію є те, що дисперсія на рішенні $\varphi_{k_1} \in \Phi$ може виявитися меншою ніж на рішенні $\varphi_{k_2} \in \Phi$, в той час коли $B^+(\varphi_{k_1}, p) < B^+(\varphi_{k_2}, p)$. Інакше кажучи, критерій мінімуму дисперсії з одного боку є допоміжним, а з іншого – його прийняття потребує довизначення й невеликої зміни вигляду дисперсії σ_k^2 , наприклад, одним із поданих нижче способів:

$$\sigma_k^2 = \sum_{j=1}^n p_j (f_{jk}^+ - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B^+(\varphi_i, p))^2 \quad (6.6)$$

або

$$\sigma_k^2 = \sum_{j=1}^n p_j (f_{jk}^+ - \max_{\varphi_i \in \Phi} B^+(\varphi_i, p))^2. \quad (6.7)$$

Якщо оцінний функціонал задано у формі від'ємного інгредієнта, а саме: $F = F^- = \{f_{jk}^-\}$, то рішення $\varphi_{k_0} \in \Phi$ також можна знайти, використовуючи умову (6.5), але тут величину σ_k^2 визначають одним із таких способів:

$$\sigma_k^2 = \sum_{j=1}^n p_j (f_{jk}^- - B^-(\varphi_k, p))^2, \quad (6.8)$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{j=1}^n p_j (f_{jk}^- - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B^-(\varphi_i, p))^2 \quad (6.9)$$

або

$$\sigma_k^2 = \sum_{j=1}^n p_j (f_{jk}^- - \min_{\varphi_i \in \Phi} B^-(\varphi_i, p))^2. \quad (6.10)$$

причому, $B^-(\varphi_k, p) = \sum_{j=1}^n p_j f_{jk}^-$.



Критерій максимізації ймовірності розподілу оцінного функціонала

Ідея цього критерію полягає у забезпеченні із максимальною ймовірністю значення оцінного функціонала не гірше ніж задане (не менше для функціонала із додатним інгредієнтом та не більше для функціонала із від'ємним).

Опишемо схему застосування критерію.

1. Фіксуємо величину α , яка задовольняє таку умову: $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$, причому $\alpha_1 = \min_j \min_k f_{jk}^+$ і $\alpha_2 = \max_j \max_k f_{jk}^+$.

2. Для кожного рішення $\varphi_k \in \Phi$ визначаємо ймовірність $p(f_{jk}^+ \geq \alpha)$ того, що значення оцінного функціонала буде не меншим за величину α , коли середовище перебуває у стані θ_j й обрано рішення φ_k .

3. Визначаємо рішення $\varphi_{k_0} \in \Phi$, для якого ця ймовірність буде максимальною, а саме:

$$\varphi_{k_0}: p(f_{jk_0}^+ \geq \alpha) = \max_{\varphi_k \in \Phi} p(f_{jk}^+ \geq \alpha). \quad (6.11)$$

При використанні цього критерію орган управління виходить із необхідності прийняття конкретного рівня величини α й оптимальними вважаються ті рішення, для яких виконується умова (6.11).

Коли значення ймовірності α й рішення φ_k фіксовані, то нерівність: $f_{jk}^+ \geq \alpha$, показує множину станів середовища $\theta_{\alpha k}$, для яких вона є правильною, а ймовірність $p(f_{jk}^+ \geq \alpha)$ обчислюється у такий спосіб:

$$p(f_{jk}^+ \geq \alpha) = \sum_{\theta_j \in \theta_{\alpha k}} p(f_{jk}^+ \geq \alpha), \quad \theta_{\alpha k} = \{\theta_j: f_{jk}^+ \geq \alpha\}. \quad (6.12)$$

Якщо оцінний функціонал має від'ємний інгредієнт F^- , то відповідно належить визначити ймовірність $p(f_{jk}^- \leq \alpha)$, і критерій набуває такого вигляду:

$$\varphi_{k_0}: p(f_{j_{k_0}}^- \leq \alpha) = \max_{\varphi_k \in \Phi} p(f_{jk}^- \leq \alpha), \quad (6.13)$$

тут $p(f_{jk}^- \leq \alpha) = \sum_{\theta_j \in \theta_{\alpha k}} p(f_{jk}^- \leq \alpha)$, $\theta_{\alpha k} = \{\theta_j: f_{jk}^- \leq \alpha\}$.

➔ Модальний критерій

Ідея цього критерію полягає в тому, що орган прийняття рішення виходить із найбільш імовірного стану середовища. Припустимо, що існує єдине значення j^* , яке забезпечує виконання такої умови:

$$p(\theta_{j^*}) = \max_{\theta_j \in \Theta} p(\theta_j). \quad (6.14)$$

Тоді орган управління вважає, що середовище перебуває саме у стані θ_{j^*} і обирає рішення φ_0 , для якого $f_{j_0}^+ = \max_k f_{j^*k}^+$, коли функціонал має додатний інгредієнт, або $f_{j_0}^- = \min_k f_{j^*k}^-$, коли функціонал характеризується від'ємним інгредієнтом.

Зауважимо, що тут можлива ситуація, коли максимальне значення ймовірності досягається одночасно на кількох елементах множини Θ , тобто

$$p(\theta_{j_1}) = p(\theta_{j_2}) = \dots = p(\theta_{j_s}) = \max_{\theta_j \in \Theta} p(\theta_j),$$

тоді оптимальне рішення необхідно обирати, виходячи з такої умови:

$$\frac{1}{s} \sum_{r=1}^s f_{j_r,0}^+ = \max_{\varphi_k \in \Phi} \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s f_{j_r,k}^+. \quad (6.15)$$

Перевагою модального критерію є його простота. По-перше, достатньо лише виявити найбільш імовірні стани середовища. До того ж немає необхідності навіть знати числові значення цих ймовірностей. По-друге, розрахунок значень оцінного функціонала можна виконувати лише для найбільш імовірних станів, що значно підвищує швидкість прийняття рішень.

Серед недоліків критерію слід назвати можливість того, що рішення, оптимальне за модальним критерієм, не завжди буде мати найбільше байсове значення.

⇒ Комбінований критерій

Являє собою комбінацію критеріїв Байєса та мінімуму дисперсії, де враховано природне бажання органу управління забезпечити найкраще середнє значення (критерій Байєса) та мінімальну дисперсію.

Виберемо величину λ , $0 \leq \lambda \leq 1$ і для кожного з рішень φ_k , $k = 1, 2, \dots, m$ обчислимо значення критерію за такою формулою:

$$k(\varphi_k, p) = (1 - \lambda) \left(B^+(\varphi_k, p) \right)^2 - \lambda \sigma^2(\varphi_k, p). \quad (6.16)$$

Найкращим вважають рішення φ_0 , для якого виконано таку умову:

$$k(\varphi_0, p) = \max_{\varphi_k \in \Phi} k(\varphi_k, p).$$

Зауважимо, що при цьому значення коефіцієнта λ встановлюють з огляду на те, якому саме критерію (Байєса чи мінімуму дисперсії) потрібно надати більшу перевагу. Якщо $\lambda = 0$, то критерій $k(\varphi_k, p)$ збігається з критерієм Байєса, а коли $\lambda = 1$ – із критерієм мінімуму дисперсії.

⇒ Умовні рішення

Припустимо, що в ситуації прийняття рішень I можна застосовувати критерії з деякої множини: $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$. Один із них вважають головним, а для інших критеріїв задають обмеження такого вигляду: $c_i \leq k_i \leq c_i, i = 1, n$.

У такому разі рішення, прийняте органом управління за головним критерієм, називають *умовним*.

Тут належить взяти до уваги такі міркування:

1) оскільки пошук оптимальних рішень за описаних умов зводиться до перебору варіантів, то обмеження у вигляді рівностей не завжди доцільно застосувати, бо вони можуть призвести до відсутності рішень (задача взагалі не буде мати жодного допустимого рішення);

2) умовне рішення можна обрати і без головного критерію, тоді воно буде являти собою розв'язок такої системи нерівностей:

$$c_i \leq k_i \leq c_i, \quad i = 1, n.$$

Розглянемо приклад використання критеріїв прийняття рішень в умовах ризику на прикладі поданої нижче задачі.

➤ *Приклад 6.1.* Припустимо, ферма займається вирощуванням органічних продуктів. Для цього задіяна команда з працівників, які виконують різноманітні роботи для підтримки екологічного вирощування продуктів. Керівництво стоїть перед завданням прийняти рішення щодо оптимізації кількості працівників у команді. До розгляду взято кілька можливих варіантів:

φ_1 – залишити кількість працівників без змін;

φ_2 – збільшити кількість фермерів, додавши тимчасових працівників, які працюватимуть за змінним графіком;

φ_3 – збільшити загальну кількість працівників і розширити виробництво за рахунок розширення асортименту продукції;

φ_4 – зменшити кількість працівників.

Після консультації з експертами були визначені такі можливі ситуації стосовно попиту на органічну продукцію:

θ_1 – попит на органічні продукти буде зростати швидко (суттєве збільшення попиту);

θ_2 – попит на органічні продукти помірно зростає (несуттєве збільшення попиту);

θ_3 – попит на органічні продукти залишається стабільним;

θ_4 – попит на органічні продукти зменшується;

θ_5 – існує зростаючий попит на нові види органічної продукції.

Експерти також оцінили ймовірність кожної ситуації та ефективність (у балах від 0 до 10) прийнятих при цьому рішень, враховуючи необхідні витрати на впровадження рішення та передбачуваний дохід. Результати представлено у поданій нижче таблиці (матриця ситуації прийняття рішень).

p		φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
0,1	θ_1	6	8	10	0
0,35	θ_2	8	9	7	3
0,15	θ_3	10	6	6	3
0,1	θ_4	8	0	0	8
0,3	θ_5	6	8	10	0

Необхідно вибрати оптимальне рішення.

Враховуючи, що відомо ймовірності кожного з можливих станів середовища, можна розв'язувати задачу, використовуючи критерії першої інформаційної ситуації.

Критерій Байєса. Оскільки в нашій задачі для оцінювання можливих рішень використовується функціонал із додатним інгредієнтом (він описує ефективність рішень), то будемо використовувати формули (6.1).

Обчислимо байєсові значення для кожного з рішень, а саме:

$$B^+(\varphi_1, p) = \sum_{i=1}^5 f_{i1} p_i = 6 \cdot 0,1 + 8 \cdot 0,35 + 10 \cdot 0,15 + 8 \cdot 0,1 + 6 \cdot 0,3 = 7,5;$$

$$B^+(\varphi_2, p) = \sum_{i=1}^5 f_{i2} p_i = 8 \cdot 0,1 + 9 \cdot 0,35 + 6 \cdot 0,15 + 0 \cdot 0,1 + 8 \cdot 0,3 = 7,25;$$

$$B^+(\varphi_3, p) = \sum_{i=1}^5 f_{i3} p_i = 10 \cdot 0,1 + 7 \cdot 0,35 + 6 \cdot 0,15 + 0 \cdot 0,1 + 10 \cdot 0,3 = 7,35;$$

$$B^+(\varphi_4, p) = \sum_{i=1}^5 f_{i4} p_i = 0 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,35 + 3 \cdot 0,15 + 8 \cdot 0,1 + 0 \cdot 0,3 = 2,3.$$

Легко помітити, що найбільше байєсове значення має рішення φ_1 : $B(\varphi_1, p) = 7,5$, тому його вибір можна вважати раціональним, отже, потрібно залишити кількість робітників незмінною.

Критерій мінімуму дисперсії оцінного функціонала. За формулою (6.4) обчислимо значення дисперсії для кожного із можливих рішень, тобто

$$\sigma^2(\varphi_1, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i1} - 7,5)^2 p_i = 2,25 \cdot 0,1 + 0,25 \cdot 0,35 + 6,25 \cdot 0,15 + 0,25 \cdot 0,1 + 2,25 \cdot 0,3 = 1,95,$$

$$\sigma^2(\varphi_2, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i2} - 7,25)^2 p_i = 0,5625 \cdot 0,1 + 3,0625 \cdot 0,35 + 1,5625 \cdot 0,15 + 52,5625 \cdot 0,1 + 7,0225 \cdot 0,3 = 6,7875,$$

$$\sigma^2(\varphi_3, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i3} - 7,35)^2 p_i = 7,0225 \cdot 0,1 + 0,1225 \cdot 0,35 + 1,8225 \cdot 0,15 + 54,0225 \cdot 0,1 + 7,0225 \cdot 0,3 = 8,5275,$$

$$\sigma^2(\varphi_4, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i4} - 2,3)^2 p_i = 5,29 \cdot 0,1 + 0,49 \cdot 0,35 + 0,49 \cdot 0,15 + 32,49 \cdot 0,1 + 5,29 \cdot 0,3 = 5,61.$$

Найменше значення дисперсії також має рішення φ_1 , яке передбачає збереження кількості працівників, тому його вибір за цим критерієм буде раціональним.

Зауважимо, що за критерієм Байєса рішення φ_1 , φ_2 , φ_3 мають близькі значення, отже, якщо використовувати тільки цей критерій, доцільно взяти до уваги і ці рішення. Критерій мінімуму дисперсії у даному випадку може слугувати додатковим. Для нашої задачі він підтверджує вибір рішення φ_1 . Тобто воно не тільки краще за критерієм Байєса, але є ще й найбільш стабільним.

Розглянемо модифікації критерія мінімуму дисперсії.

Перша описується формулою (6.6). Обчислимо спочатку середнє байєсове значення за всіма критеріями, а саме:

$$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m B^+(\varphi_j, p) = 6,1.$$

Тепер обчислимо значення дисперсій відносно цього значення, а саме:

$$\sigma_1^2(\varphi_1, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i1} - 6,1)^2 p_i = 3,91,$$

$$\sigma_2^2(\varphi_2, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i2} - 6,1)^2 p_i = 8,11,$$

$$\sigma_3^2(\varphi_3, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i3} - 6,1)^2 p_i = 10,09,$$

$$\sigma_4^2(\varphi_4, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i4} - 6,1)^2 p_i = 20,05.$$

Вочевидь, мінімальне значення дисперсії отримано для рішення φ_1 , тому вибір цієї альтернативи можна вважати раціональним.

Друга модифікація описується формулою (6.7). Максимальне байєсове значення дорівнює 7,5. Обчислимо відхилення значень оцінного функціонала від нього для кожного з рішень, а саме:

$$\sigma_1^2(\varphi_1, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i1} - 7,5)^2 p_i = 1,95,$$

$$\sigma_2^2(\varphi_2, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i2} - 7,5)^2 p_i = 6,85,$$

$$\sigma_3^2(\varphi_3, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i3} - 7,5)^2 p_i = 8,55,$$

$$\sigma_4^2(\varphi_4, p) = \sum_{i=1}^5 (f_{i4} - 7,5)^2 p_i = 32,65.$$

Мінімальне значення модифікованої дисперсії знов відповідає рішенню φ_1 , тому його вибір можна вважати раціональним.

Тепер розв'яжемо задачу за допомогою критерію *максимізації ймовірності розподілу* оцінного функціонала.

Обчислимо необхідні параметри: $\alpha_1 = \min_i \min_j f_{ij}$ та $\alpha_2 = \max_i \max_j f_{ij}$. За нашими даними $\alpha_1 = 0$ і $\alpha_2 = 10$.

Тепер оберемо число α , яке задовольняє таку умову: $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$, припустимо, що $\alpha = 7$.

За формулами (6.12) обчислимо ймовірності $p(f_k^+ \geq \alpha)$ для кожного рішення φ_k , тобто

$$\varphi_1: p(f_1^+ \geq 7) = 0,35 + 0,15 + 0,1 = 0,6;$$

$$\varphi_2: p(f_2^+ \geq 7) = 0,1 + 0,35 + 0,3 = 0,75;$$

$$\varphi_3: p(f_3^+ \geq 7) = 0,1 + 0,35 + 0,3 = 0,75;$$

$$\varphi_4: p(f_4^+ \geq 7) = 0,1.$$

Максимальне значення ймовірності мають дві альтернативи: φ_2 та φ_3 . Отже, раціональними за цим критерієм можна вважати такі рішення: збільшити кількість робітників, додавши тимчасових працівників, які працюватимуть за змінним графіком або збільшити їх загальну кількість і розширити виробництво за рахунок розширення асортименту продукції.

Застосуємо тепер для розв'язування задачі *модальний критерій*.

Із цією метою визначимо стан середовища, який має найбільшу ймовірність. Для сформульованої задачі це буде стан θ_2 – несуттєве збільшення попиту, його ймовірність дорівнює 0,35. Оцінки рішень стосовно цього стану мають такі значення: $f_{21}^+ = 8$, $f_{22}^+ = 9$, $f_{23}^+ = 7$, $f_{24}^+ = 3$.

Найбільше значення відповідає рішенню φ_2 , тому його вибір можна вважати раціональним – тобто необхідно збільшити кількість робітників, додавши тимчасових, які працюватимуть за змінним графіком.

Оскільки рішення φ_1 виявилось оптимальним і за критерієм Байеса і за критерієм мінімуму дисперсії, застосовувати комбінований критерій немає сенсу. Запишемо результати, розраховані за допомогою різних критеріїв, у таблицю (табл. 6.1).

Аналізуючи результати, можна зробити висновок, що використання різних критеріїв може дати різні оптимальні альтернативи, а тому, перш ніж приймати рішення, необхідно визначити, за яким критерієм воно буде обиратися, враховуючи умови задачі та вимоги до нього. Наприклад, у розглянутій нами задачі альтернатива φ_4 не буде оптимальною стосовно жодного з критеріїв, альтернатива φ_3 буде оптимальною лише за критерієм максимізації ймовірності розподілу оцінного функціонала. Отже, особі, що приймає рішення, треба вибирати між двома альтернативами: φ_1 – не змінювати кількості робітників; φ_2 – збільшити їх кількість, додавши тимчасових, які працюватимуть за змінним графіком.

Таблиця 6.1 – Результати обчислення та прийняття рішень за різними критеріями в умовах ризику

Назва критерію	Значення критерію стосовно рішень				Оптимальне рішення
	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	
Байеса	7,5	7,25	7,35	2,3	φ_1
Мінімуму дисперсії	1,95	6,7875	8,5275	5,61	φ_1
Модифікація 1	3,91	8,11	10,09	20,05	φ_2
Модифікація 2	1,95	6,85	8,55	32,65	φ_1
Максимізації ймовірності розподілу оцінного функціонала	0,6	0,75	0,75	0,1	φ_2, φ_3
Модальний	8	9	7	3	φ_2

Можна також розглянути варіанти згортки критеріїв за одним із правил. Наприклад, за лінійною згорткою, правилом Парето, мінімального ризику або іншими.

➔ Множини Байєса

Як ми вже говорили, апіорний розподіл ймовірності в першій інформаційній ситуації можна визначити теоретично (використовуючи закони розподілу ймовірності), на основі статистичних методів, або оцінок експертів. Жоден з цих методів не гарантує відсутності помилок. тому дуже важливим питанням є те, як вплинуть ці помилки на якість рішення. Чи призведе помилка у апіорному розподілі ймовірності до зміни рішення?

Цю проблему можна дослідити. Розглянемо її на прикладі критерію Байєса. Позначимо через Δ множину можливих значень вектора апіорного розподілу ймовірності, а саме:

$$\Delta = \left\{ (p_1, \dots, p_n) : 0 \leq p_j \leq 1, j = 1, \dots, n, \sum_{j=1}^n p_j = 1 \right\},$$

і розглянемо $(n - 1)$ -вимірний симплекс:

$$P_{n-1} = \left\{ (p_1, \dots, p_{n-1}) : 0 \leq p_j \leq 1, j = 1, \dots, n-1, \sum_{j=1}^{n-1} p_j \leq 1 \right\}. \quad (6.18)$$

Він являє собою проєкцію плоскої множини Δ , на $(n - 1)$ -вимірний простір значень перших $(n - 1)$ компонент вектора апіорного розподілу $p = (p_1, \dots, p_n)$.

Суть задачі полягає в розбитті симплекса P_{n-1} на множини $S_{\varphi_k} \subset P_{n-1}$, $k = 1, \dots, m$, котрі задовольняють такі умови:

- 1) $S_{\varphi_i} \cap S_{\varphi_k} = \emptyset$, коли $i \neq k$, де \emptyset – порожня множина;
- 2) $\bigcup_{k=1}^m S_{\varphi_k} = P_{n-1}$.
- 3) Рішення $\varphi_k \in \Phi$ буде оптимальним за критерієм Байєса, якщо $p \in S_{\varphi_k}$.

При цьому множину S_{φ_k} будемо називати **байєсовою множиною** значень апіорних ймовірностей: $p = (p_1, \dots, p_n)$, стосовно рішення φ_k , саме рішення $\varphi_k \in \Phi$ для ймовірності $p \in S_{\varphi_k}$ назвемо **байєсовим** рішенням, а величину $B^+(p, \varphi_k)$ на байєсовому рішенні φ_k – оптимальним байєсовим значенням оцінного функціонала.

Визначимо **байєсову поверхню** оптимальних байєсових значень оцінного функціонала F^+ (або просто байєсову поверхню) для всіх ймовірностей $p \in \Delta$ у такий спосіб:

$$B^+(p) = \max_{\varphi_k \in \Phi} B^+(p, \varphi_k). \quad (6.19)$$

Якщо орган прийняття рішень має інформацію про байєсові множини, то він може порівняно просто приймати оптимальні (за критерієм Байєса) рішення, навіть коли апіорний розподіл імовірностей $p = (p_1, \dots, p_n)$, станів середовища S визначено неточно, але проблема побудови самих байєсових множин являє собою досить складну математичну задачу розбиття $(n - 1)$ -вимірного симплекса на підмножини (особливо, коли $n \geq 4$). У літературі описано кілька методів побудови байєсових множин: геометричний, функціональний, метод контрольної точки [59], метод оптимального розбиття множин [58, 59].

Розглянемо один з них.

➤ *Геометричний метод побудови байєсових множин*

Зауважимо, що цей метод можна застосовувати лише для невеликого числа станів середовища, зокрема, коли $n \leq 4$.

У загальному випадку геометричний метод побудови байєсової множини в $(n - 1)$ -вимірному просторі значень p_1, \dots, p_{n-1} для обраного рішення $\varphi_k \in \Phi$ можна описати таким чином:

Кожна з множин S_{φ_k} буде являти собою множину точок p , які задовольняють таку систему нерівностей:

$$b_{\varphi_i \varphi_k}^+(p) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m, p_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n - 1, \sum_{j=1}^{n-1} p_j \leq 1, \quad (6.20)$$

тут

$$b_{\varphi_i \varphi_k}^+(p) = \sum_{j=1}^{n-1} p_j (f_{ji}^+ - f_{jk}^+) + (1 - \sum_{j=1}^{n-1} p_j) (f_{ni}^+ - f_{nk}^+). \quad (6.21)$$

Отже, маємо систему $(n + m - 1)$ нерівностей. Звідси випливає, що кожна з множин S_{φ_k} являє собою опуклий замкнутий багатогранник у $(n - 1)$ -вимірному просторі, який повністю описується своїми вершинами.

Для знаходження вершин множини S_{φ_k} слід розглядати всілякі комбінації, складені з $(n - 1)$ -го рівняння такого вигляду:

$$b_{\varphi_i \varphi_k}^+(p) = 0, p_j = 0, \sum_{j=1}^{n-1} p_j = 1. \quad (6.22)$$

яких може бути не більше за C_{m+n-1}^{n-1} .

Отже, вершинами множини S_{φ_k} будуть точки: $\bar{p} = (p_1, p_2, \dots, p_{n-1})$, що задовольняють систему нерівностей (6.20) і систему з $(n - 1)$ -го рівняння (6.22) з ненульовим визначником. Зауважимо, що цей спосіб не є раціональним, оскільки число комбінацій досить велике.

Розглянемо кілька прикладів побудови байєсових множин.

Вставка 4.2

Побудова байєсових множин

Приклад 6.2. Задача побудови байєсових множин для випадку трьох можливих рішень $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\}$, і двох станів середовища $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$, тобто, коли $n = 2$ і $m = 3$.

Тоді оцінний функціонал задають такою матрицею:

$$\begin{array}{c|ccc} & \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 \\ p & \theta_1 & f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ 1-p & \theta_2 & f_{21} & f_{22} & f_{23} \end{array} .$$

Для побудови розбиття спочатку запишемо байєсові значення функціонала для кожного з рішень, тобто

$$B^+(p, \varphi_1) = pf_{11} + (1-p)f_{21},$$

$$B^+(p, \varphi_2) = pf_{12} + (1-p)f_{22},$$

$$B^+(p, \varphi_3) = pf_{13} + (1-p)f_{23}.$$

Байєсову поверхню визначаємо за формулою $B^+(p) = \max_{\varphi_k \in \Phi} B^+(p, \varphi_k)$, тоді границі множин являють собою точки, в яких проходить зміна лінії поверхні.

Отже, для визначення границь потрібно побудувати такі рівняння:

$$\Gamma_{\varphi_1\varphi_2} : B^+(p, \varphi_1) = B^+(p, \varphi_2),$$

$$\Gamma_{\varphi_1\varphi_3} : B^+(p, \varphi_1) = B^+(p, \varphi_3),$$

$$\Gamma_{\varphi_2\varphi_3} : B^+(p, \varphi_2) = B^+(p, \varphi_3),$$

тут $\Gamma_{\varphi_i\varphi_j}$ – границя між множинами S_{φ_i} та S_{φ_j} .

.Розглянемо приклад із числовими значеннями.

➤ *Приклад 6.3.* Припустимо, що оцінний функціонал задано таким чином:

$$\begin{array}{cccc} & \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 & \varphi_4 \\ \theta_1 & 10 & 4 & -3 & 5 \\ \theta_2 & -2 & 5 & 8 & 2 \end{array}$$

Тоді байєсові значення для кожного рішення набувають такого вигляду:

$$B^+(p, \varphi_1) = 10p + (-2)(1-p) = 10p - 2 + 2p = 12p - 2,$$

$$B^+(p, \varphi_2) = 4p + 5(1-p) = 4p + 5 - 5p = -p + 5,$$

$$B^+(p, \varphi_3) = -3p + 8(1-p) = -3p + 8 - 8p = -11p + 8,$$

$$B^+(p, \varphi_4) = 5p + 2(1-p) = 5p + 2 - 2p = 3p + 2.$$

Побудуємо на координатній площині графіки цих функцій (див. рис. 6.3). Штриховою лінією на рисунку позначено байєсову поверхню $B^+(p)$.

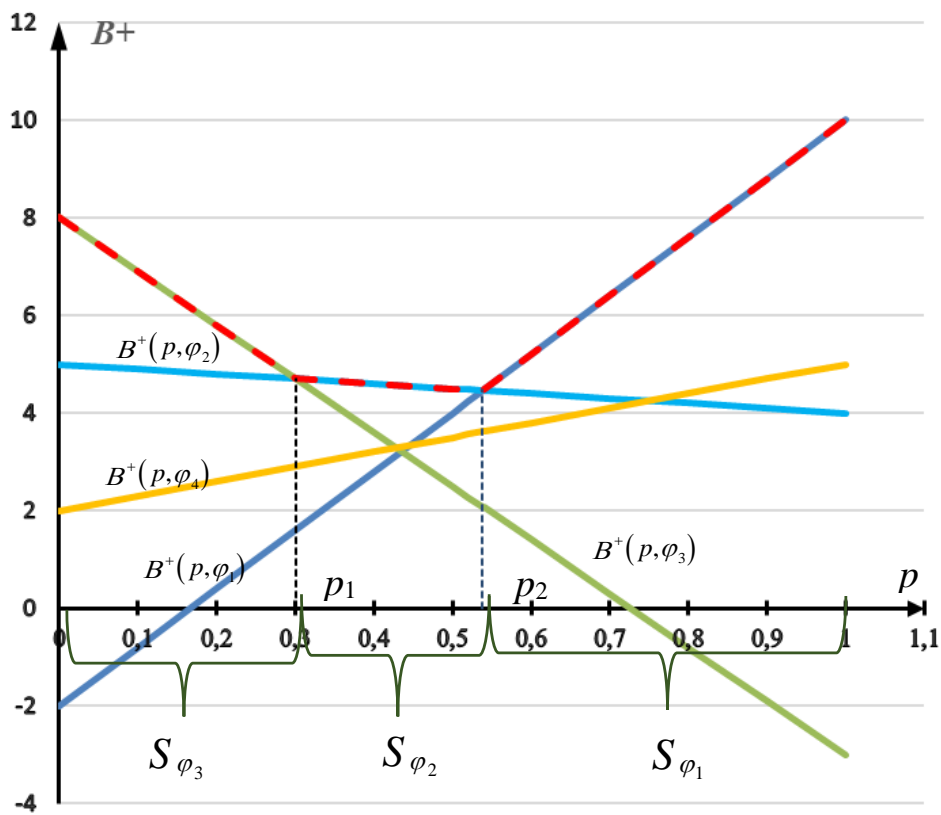


Рисунок 6.3. – Графічне зображення байєсової поверхні та байєсових множин до прикладу 6.3

Очевидно, що

$$B^+(p) = \begin{cases} B^+(p, \varphi_3), & 0 \leq p \leq p_1, \\ B^+(p, \varphi_2), & p_1 \leq p \leq p_2, \\ B^+(p, \varphi_1), & p_2 \leq p \leq 1. \end{cases}$$

Байєсові множини будуть мати такий вигляд: $S_{\varphi_1} = [p_2, 1]$, $S_{\varphi_2} = [p_1, p_2]$, $S_{\varphi_3} = [0, p_1]$, $S_{\varphi_4} = \emptyset$ відповідно.

Для обчислення значень ймовірностей p_1 і p_2 складемо такі рівняння:

$$\begin{aligned} p_1: B^+(p, \varphi_2) &= B^+(p, \varphi_3), & p_2: B^+(p, \varphi_2) &= B^+(p, \varphi_1), \\ -p + 5 &= -11p + 8, & -p + 5 &= 12p - 2, \\ 10p &= 3, & -13p &= -7, \\ p_1 &= 0,3. & p_2 &= \frac{7}{13} = 0,5385. \end{aligned}$$

Отже, остаточно байєсові множини набувають такого вигляду:

$$S_{\varphi_1} = [0,5385;1], S_{\varphi_2} = [0,3;0,5385], S_{\varphi_3} = [0;0,3], S_{\varphi_4} = \emptyset.$$

Це дозволяє зробити висновок, що для жодного з значень ймовірності рішення φ_4 не буде оптимальним, і його можна виключити з розгляду. Для інших рішень достатньо знати у якій інтервал попадає значення ймовірності, і на основі цього можна обирати оптимальне. Але якщо похибка визначення ймовірності буде більшою, ніж відстань до границі множини – то рішення не буде стійким, помилка може призвести до його зміни. Докладніше про стійкість та чутливість рішень описано у літературі [59].

➤ *Приклад 6.4.* Розглянемо задачу побудови байєсових множин для випадку наявності трьох можливих рішень $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\}$ і трьох станів середовища $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$, тобто коли $n=3$ і $m=3$. Припустимо, що оцінний функціонал задано такою матрицею:

$$\begin{array}{c|ccc} & \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 \\ p_1 & \theta_1 & 5 & 1 & 4 \\ p_2 & \theta_2 & 4 & 3 & 1 \\ 1-p_1-p_2 & \theta_3 & 1 & 4 & 5 \end{array}.$$

Запишемо байєсові значення функціонала для кожного з можливих рішень, а саме:

$$B^+(p, \varphi_1) = 5p_1 + 4p_2 + 1(1-p_1-p_2) = 4p_1 + 3p_2 + 1,$$

$$B^+(p, \varphi_2) = 1p_1 + 3p_2 + 4(1-p_1-p_2) = -3p_1 - p_2 + 4,$$

$$B^+(p, \varphi_3) = 4p_1 + p_2 + 5(1-p_1-p_2) = -p_1 - 4p_2 + 5.$$

Тепер складемо рівняння границь:

$$\Gamma_{\varphi_1, \varphi_2} : B^+(p, \varphi_1) = B^+(p, \varphi_2),$$

$$4p_1 + 3p_2 + 1 = -3p_1 - p_2 + 4,$$

$$4p_2 = -7p_1 + 3,$$

$$p_2 = -1,75p_1 + 0,75.$$

$$\Gamma_{\varphi_1, \varphi_3} : B^+(p, \varphi_1) = B^+(p, \varphi_3),$$

$$4p_1 + 3p_2 + 1 = -p_1 - 4p_2 + 5,$$

$$7p_2 = -4p_1 + 4,$$

$$p_2 = -0,71p_1 + 0,57.$$

$$\Gamma_{\varphi_2, \varphi_3} : B^+(p, \varphi_2) = B^+(p, \varphi_3),$$

$$-3p_1 - p_2 + 4 = -p_1 - 4p_2 + 5,$$

$$3p_2 = 2p_1 + 1,$$

$$p_2 = 0,667p_1 + 0,33.$$

За результатами обчислень побудуємо на координатній площині отримані зображення границь (див. рис. 6.4).

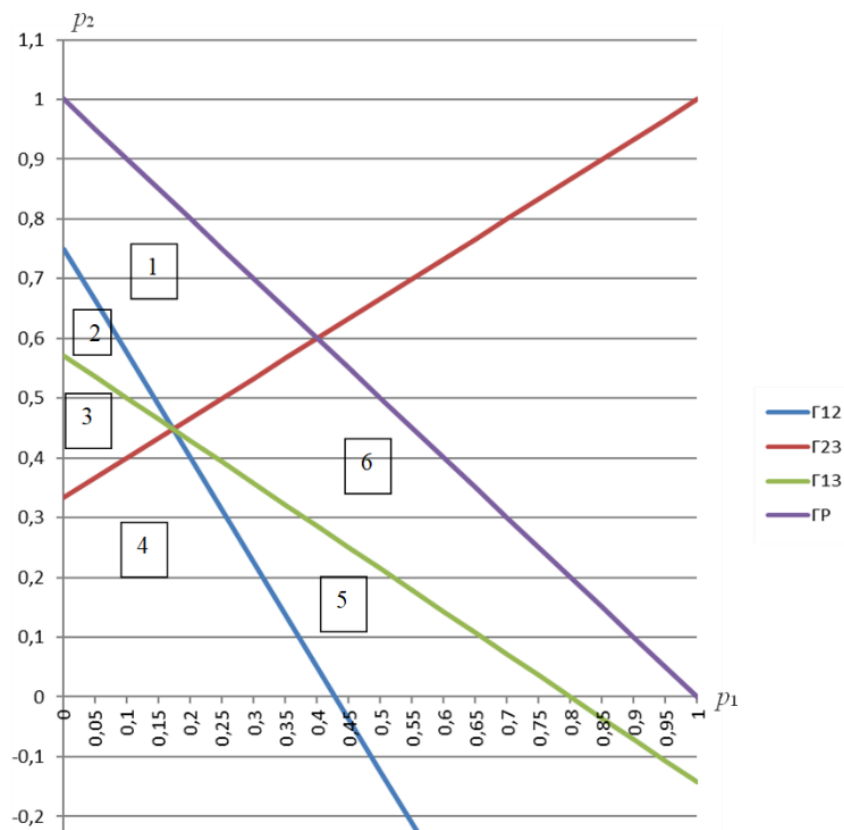


Рисунок 6.4 – Границі підмножин, отримані за результатами розрахунків у прикладі 6.4

Як бачимо, вихідну область розбито на 6 підмножин, і всі границі перетинаються у одній точці. Це є їхньою властивістю. У даному випадку точка перетину належить до симплекса, але, загалом, це не є обов'язковим. Точка перетину може бути і поза вихідною множиною ймовірностей, і, загалом, може статися так, що у симплексі буде міститися тільки одна множина.

Визначимо тепер, яке рішення є оптимальним для кожної з множин. Для цього в кожній з них виберемо довільну точку й обчислимо байєсові значення стосовно кожного з рішень у цій точці. Максимальне значення відповідатиме шуканій байєсовій множині. Результати розрахунків зведемо в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Результати обчислення байєсових значень оцінного функціонала в кожній із підмножин

Підмножина	Координати точки		Байєсові значення			Максимальне значення	Належність до байєсової множини
	p_1	p_2	$B^+(p, \varphi_1)$	$B^+(p, \varphi_2)$	$B^+(p, \varphi_3)$		
1	0	0,8	3,4	3,2	1,8	3,4	S_{φ_1}
2	0	0,7	3,1	3,3	2,2	3,3	S_{φ_2}
3	0	0,4	2,2	3,6	3,4	3,6	S_{φ_2}
4	0	0	1	4	5	5	S_{φ_3}
5	0,5	0	3	2,5	4,5	4,5	S_{φ_3}
6	1	0	5	1	4	5	S_{φ_1}

Враховуючи отримані результати, остаточно маємо такі байєсові множини:

$$S_{\varphi_1} = \begin{cases} p_1 + p_2 \leq 1, \\ p_2 \geq -1,75p_1 + 0,75, \\ p_2 \geq -0,71p_1 + 0,57, \\ p_1, p_2 \geq 0. \end{cases} \quad S_{\varphi_2} = \begin{cases} p_2 \leq -1,75p_1 + 0,75, \\ p_2 \geq 0,667p_1 + 0,33, \\ p_1, p_2 \geq 0. \end{cases} \quad S_{\varphi_3} = \begin{cases} p_1 + p_2 \leq 1, \\ p_2 \leq -0,71p_1 + 0,57, \\ p_2 \leq 0,667p_1 + 0,33, \\ p_1, p_2 \geq 0. \end{cases}$$

Графічне зображення отриманих байєсових множин показано на рис. 6.4.

Відмітимо деякі властивості байєсових множин.

1. Байєсові множини S_{φ_k} є опуклими для кожного рішення $\varphi_k \in \Phi$.
2. Вони утворюють розбиття вихідного симплекса P_{n-1} , тобто $S_{\varphi_i} \cap S_{\varphi_k} = \emptyset$, коли $i \neq k$, де \emptyset – порожня множина і $\bigcup_{k=1}^m S_{\varphi_k} = P_{n-1}$.
3. Границі байєсових множин $\Gamma_{\varphi_i, \varphi_k}$ отримують як проєкцію ребер байєсової поверхні $B^+(p) = \max_{\varphi_k \in \Phi} B^+(p, \varphi_k)$ на симплекс P_{n-1} .

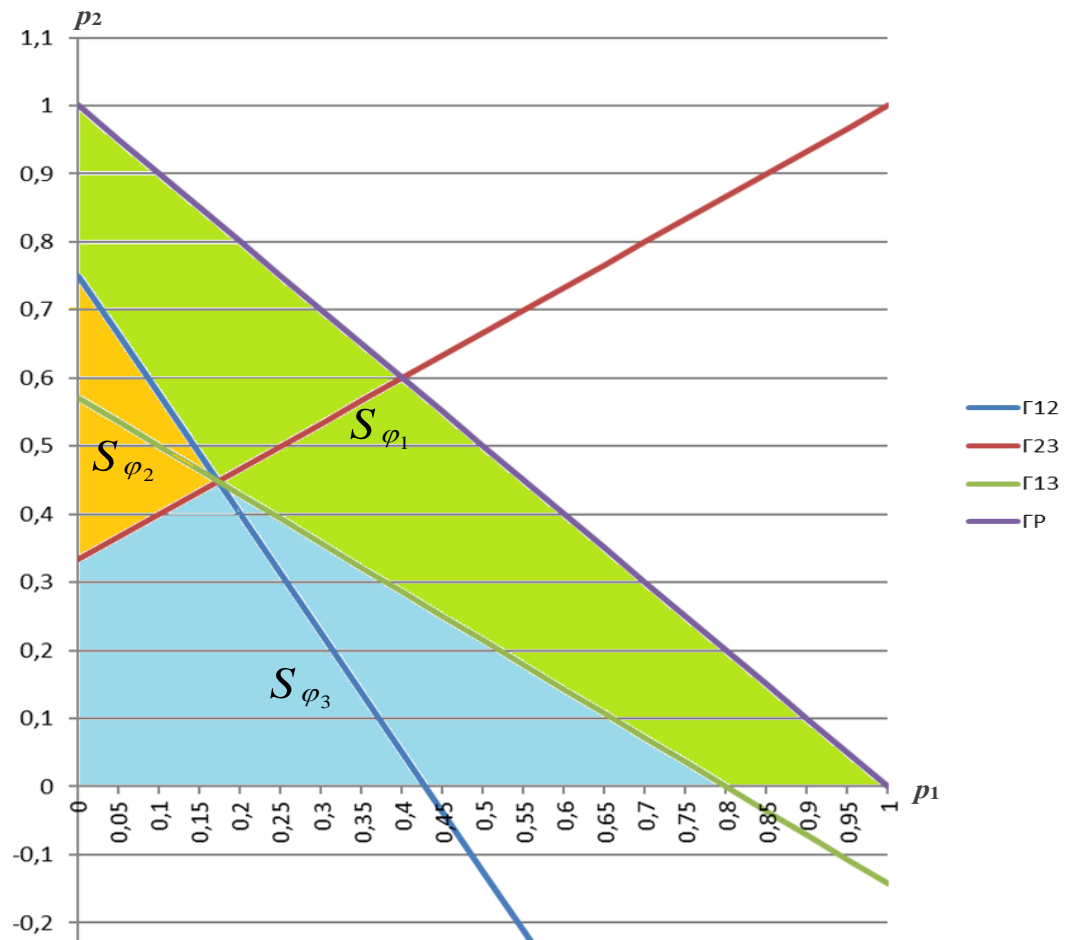


Рисунок 6.4– Графічне подання байесових множин (приклад 6.4)

➤ *Метод статистичних випробувань*

Розглянемо ще один з методів побудови байесових множин. У загальному вигляді його схему можна описати у такий спосіб.

1. Беремо реалізацію випадкового рівномірно розподіленого вектора $p = (p_1, \dots, p_n)$.

2. Обчислюємо байесові значення для рішень $\varphi_k, k = 1, 2, \dots, m$ за формулою: $B^+(\varphi_k, p) = \sum_{j=1}^n p_j f_{jk}^+$ і знаходимо оптимальне рішення.

$$\varphi_{k_0} : B^+(\varphi_{k_0}, p) = \max_{\varphi_k \in \Phi} B^+(\varphi_k, p).$$

3. Повторюємо кроки 1 та 2 N разів.

Задавши точність δ і вважаючи величину N достатньо великою (такою, щоб можна було застосовувати оцінки нормального розподілу), кількість реалізацій можна визначити як $N \approx 9\sigma^2/\delta^2$. Тут σ^2 – оцінка дисперсії.

6.4 Прийняття рішень в умовах повної невизначеності

Розглянемо тепер критерії прийняття рішень, які застосовуються в інших інформаційних ситуаціях. Почнемо із ситуації I_4 , характерної невідомим розподілом імовірності $p = (p_1, p_2 \dots p_n)$, $p_j = p(\theta = \theta_j)$, $\sum_{j=1}^n p_j = 1$ на множині станів середовища $\theta_1 \dots \theta_n$, а також відсутністю активної протидії середовища цілям прийняття рішень.

У певному сенсі, така ситуація відповідає моделі пасивної «поведінки» середовища в теорії статистичних рішень. Іншими словами, вона відображає повну відсутність у ОПР даних про поведінку середовища. У реальних умовах такі ситуації пов'язані із впровадженням у виробництво нового обладнання або при реалізації нових зразків товару, коли попит на продукцію повністю невідомий і т. д.

Розглянемо критерії прийняття рішень, які можуть бути застосовані в цій ситуації. Умовно їх можна поділити на дві групи: критерії інтегральних значень та оцінкові критерії.

Охарактеризуємо різновиди інтегральних критеріїв.

➔ Критерій максимальної міри байєсових множин

Маємо ситуацію прийняття рішень $\{\Phi, \Theta, F\}$. Позначимо через $S_{\varphi_1}, S_{\varphi_2}, \dots, S_{\varphi_m}$ байєсові множини рішень $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ відповідно, а через $\mu(S_{\varphi_1}), \mu(S_{\varphi_2}), \dots, \mu(S_{\varphi_m})$ міри цих множин. Оскільки в ситуації I_4 розподіл імовірності невідомий, то доцільним у виборі рішення можна вважати принцип максимальної міри байєсових множин. Він відповідає припущенню, що істинним для середовища S із більшою ймовірністю буде апріорний розподіл з байєсової множини, яка має більшу міру.

Таким чином, оптимальним вважається рішення $\varphi_{k_0} \in \Phi$, яке задовольняє таку умову:

$$\mu(\varphi_{k_0}) = \max_{\varphi_k \in \Phi} \mu(\varphi_k). \quad (6.23)$$

Недоліком цього критерію є те, що оптимальне рішення φ_{k_0} не завжди може задовольняти бажану для органу прийняття рішень умову, наприклад, таку:

$$\int_{S_{\varphi_0}} B^+(\varphi_0, p) dp \geq \int_{S_{\varphi_k}} B^+(\varphi_k, p) dp,$$

де величина $\int_{S_{\varphi_k}} B^+(\varphi_k, p) dp$ характеризує інтегральне байєсове значення оцінкового функціонала.

➔ **Критерій максимального інтегрального байєсового значення оцінного функціонала**

Інтегральним байєсовим значенням оцінного функціонала на рішенні φ_k називається величина $\int_{S_{\varphi_k}} B^+(\varphi_k, p) dp$.

Відповідно до названого критерію оптимальним будемо вважати рішення φ_{k_0} , що задовольняє таку умову:

$$\int_{S_{\varphi_0}} B^+(\varphi_0, p) dp = \max_{\varphi_k \in \Phi} \int_{S_{\varphi_k}} B^+(\varphi_k, p) dp. \quad (6.24)$$

Недолік цього критерію полягає в тому, що оптимальне рішення φ_{k_0} не завжди може відповідати бажаній для органу прийняття рішень умові, наприклад:

$$\mu(\varphi_{k_0}) \geq \mu(\varphi_k).$$

➔ **Критерій максимального інтегрального потенціалу**

Недоліки описаних вище критеріїв можуть бути певної мірою нейтралізовані, якщо застосувати принцип вибору, в основі якого лежить поняття потенціалу рішення.

Інтегральним потенціалом рішення $\varphi_k \in \Phi$ називають таку величину:

$$\pi_{\varphi_k} = \frac{\int_{S_{\varphi_k}} B^+(\varphi_k, p) dp}{1 - \mu(\varphi_k) / \mu(P_{n-1})}. \quad (6.25)$$

Оптимальним стосовно критерію максимального потенціалу вважається рішення $\varphi_{k_0} \in \Phi$, яке задовольняє таку умову:

$$\pi_{\varphi_{k_0}} = \max_{\varphi_k \in \Phi} \pi_{\varphi_k}.$$

Вочевидь, цей критерій є згорткою попередніх двох.

Розглянемо на прикладі застосування описаних вище критеріїв.

➤ **Приклад 6.5.** Розглянемо ситуацію прийняття рішень з прикладу 6.3. Матриця оцінного функціонала має такий вигляд:

	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	10	4	-3	5
θ_2	-2	5	8	2

Відповідні цій ситуації множини Байєса було побудовано у прикладі 6.3, а саме:

$$S_{\varphi_1} = [0, 5385; 1],$$

$$S_{\varphi_2} = [0, 3; 0, 5385],$$

$$S_{\varphi_3} = [0; 0, 3],$$

$$S_{\varphi_4} = \emptyset.$$

Визначимо міри цих множин. Легко переконатися, що

$$\mu(S_{\varphi_1}) = 1 - 0,5385 = 0,4615;$$

$$\mu(S_{\varphi_2}) = 0,5385 - 0,3 = 0,2385;$$

$$\mu(S_{\varphi_3}) = 0,3,$$

$$\mu(S_{\varphi_4}) = 0.$$

Як бачимо, за критерієм максимальної міри байєсових множин оптимальним буде рішення φ_1 , бо саме йому відповідає множина найбільшої міри.

Тепер обчислимо інтегральні байєсові значення стосовно кожного з рішень. Як було встановлено вище (див. приклад 6.3), байєсові значення оцінного функціонала мають такий вигляд:

$$B^+(\varphi_1, p) = 12p - 2, \quad B^+(\varphi_2, p) = -p + 5, \quad B^+(\varphi_3, p) = -11p + 8, \quad B^+(\varphi_4, p) = 3p + 2$$

тому

$$\int_{S_{\varphi_1}} B^+(\varphi_1, p) dp = \int_{0,5385}^1 (12p - 2) dp = 6p^2 - 2p \Big|_{0,5385}^1 = 3,3371,$$

$$\int_{S_{\varphi_2}} B^+(\varphi_2, p) dp = \int_{0,3}^{0,5385} (-p + 5) dp = -0,5p^2 + 5p \Big|_{0,3}^{0,5385} = 1,092,$$

$$\int_{S_{\varphi_3}} B^+(\varphi_3, p) dp = \int_0^{0,3} (-11p + 8) dp = -5,5p^2 + 8p \Big|_0^{0,3} = 1,905,$$

$$\int_{S_{\varphi_4}} B^+(\varphi_4, p) dp = 0.$$

Як показують результати обчислень, оптимальним за критерієм максимізації інтегрального байєсового значення буде рішення φ_1 .

Тепер розрахуємо значення інтегрального потенціалу для кожного з рішень за формулою (6.25), враховуючи, що $\mu(P_{n-1}) = 1$.

Отже, $\pi_{\varphi_1} = 6,197$, $\pi_{\varphi_2} = 1,626$, $\pi_{\varphi_3} = 2,721$, $\pi_{\varphi_4} = 0$. Стосовно цього критерію оптимальним також буде рішення φ_1 .

➔ **Критерій Бернуллі -- Лапласа**

Застосування названого критерію в умовах повної невизначеності базується на принципі недостатньої підстави.

Принцип недостатньої підстави полягає в тому, що коли немає причини вважати який-небудь стан середовища ймовірнішим за інші, то апріорні ймовірності необхідно вважати рівними.

Згідно з цим принципом, якщо маємо n станів середовища, то апріорний розподіл ймовірності визначають за таким правилом: $\hat{p} = (\hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_n)$, $\hat{p}_j = \frac{1}{n}$, $j = 1, 2, \dots, n$.

Після того, як ймовірності будуть визначені, рішення можна приймати за критеріями інформаційної ситуації I_1 (прийняття рішень в умовах ризику).

Критерій Бернуллі – Лапласа передбачає використання принципу недостатньої підстави та критерію Байєса, зокрема оптимальним за цим критерієм буде рішення φ_{k_0} , яке задовольняє таку умову:

$$B^+(\hat{p}, \varphi_{k_0}) = \max_{\varphi_k \in \Phi} B^+(\hat{p}, \varphi_k) = \max_{\varphi_k \in \Phi} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f_{jk} \cdot \quad (6.26)$$

Проаналізуємо отримане рішення на основі матриці оцінного функціонала. Очевидно, що рішення φ_k краще за рішення φ_i коли буде невід'ємною така різниця:

$$B^+(\hat{p}, \varphi_k) - B^+(\hat{p}, \varphi_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (f_{jk}^+ - f_{ji}^+).$$

Тоді можна визначити необхідну й достатню умову того, що рішення φ_k буде оптимальним, а саме:

$$\min_{\substack{\varphi_i \in \Phi \\ i \neq k}} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (f_{jk}^+ - f_{ji}^+) \right\} \geq 0.$$

Застосуємо на прикладі цей критерій.

Вставка 4.2

Критерій Бернуллі – Лапласа

➤ *Приклад 6.7.* Керівництво великого виробничого підприємства розглядає різні альтернативи виробництва енергії для забезпечення його потреб. Воно прагне вибрати оптимальну стратегію, яка б підтримувала сталий розвиток та мінімізувала негативний вплив на навколишнє середовище.

Альтернативи:

φ_1 – Використання традиційних джерел енергії (вугілля, газ): Застосування класичних методів генерації електроенергії.

φ_2 – Запровадження сонячних панелей та вітрових турбін: Використання відновлюваних джерел енергії для генерації електроенергії.

φ_3 – Енергоефективність та когенерація: Вдосконалення технологій та використання теплової енергії виробництва.

Можливі стани зовнішнього середовища визначені таким чином:

θ_1 – збільшення попиту на відновлювану енергію та підтримка державних стимулів;

θ_2 – ситуація не змінюється і залишається на існуючому рівні;

θ_3 – сталий попит на відновлювану енергію та зниження державних стимулів.

Припустимо, що експерти оцінили якість прийняття рішень таким чином:

	φ_1	φ_2	φ_3
θ_1	2	5	4
θ_2	5	3	4
θ_3	3	4	5

Необхідно знайти оптимальне за критерієм Бернуллі – Лапласа рішення.

Розв'язування

Визначимо спочатку апіорний розподіл імовірності. Оскільки умови задачі передбачають три стани середовища, то $p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{3}$. Обчислимо тепер байєсові значення для кожного з рішень, а саме:

$$B^+(\varphi_k) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 f_{ik}^+$$

У числовому вираженні $B^+(\varphi_1) = \frac{10}{3}$, $B^+(\varphi_2) = \frac{12}{3} = 4$, $B^+(\varphi_3) = \frac{13}{3}$.

Отже, оптимальним є рішення φ_3 .

6.5 Критерії прийняття рішень в умовах антагоністичної поведінки середовища

Тепер розглянемо критерії прийняття рішень в умовах антагоністичної поведінки середовища (інформаційна ситуація I_5). Іншими словами, середовище активно протидіє цілям прийняття рішень, тобто з усіх своїх станів воно обирає саме ті, у яких оцінний функціонал набуває своїх найгірших значень. Ось чому в цій ситуації раціональним буде вибір рішення, яке дозволяє отримати гарантовані значення оцінного функціонала. Цього можна досягти, використовуючи критерії Вальда й Севіджа. Обидва вони забезпечують вибір найкращого рішення у найгіршій ситуації і передбачають, що супротивник є досконалим майстром, який обов'язково створить цю найгіршу ситуацію.

➔ Критерій Вальда (принцип максимуму)

Застосовується, коли оцінний функціонал описує ефективність, вигоди, тобто він має додатний інгредієнт: $F = F^+$. При цьому раціональним вважається вибір рішення φ_{k_0} , яке задовольняє таку умову:

$$f_{k_0} = \max_{\varphi_k \in \Phi} \min_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^+ . \quad (6.27)$$

Інакше кажучи, обране рішення забезпечує максимальний виграш у найгіршій ситуації.

➤ *Приклад 6.8.* Розглянемо ситуацію прийняття рішень, задану такою матрицею:

	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	2	1	7	8
θ_2	8	6	11	3
θ_3	2	10	4	0
θ_4	2	3	8	4
θ_5	16	4	7	10

Необхідно знайти раціональне рішення, враховуючи антагоністичну поведінку середовища та необхідність набуття оцінним функціоналом максимального значення.

Розв'язування

Застосуємо критерій Вальда. Для цього визначимо найменший елемент у кожному стовпці (найгірша ситуація для даного рішення), а потім серед них оберемо найбільший.

$$f_1 = \min_{\theta_j \in \Theta} f_{j1}^+ = \min \{2, 8, 2, 2, 16\} = 2 ,$$

$$f_2 = \min_{\theta_j \in \Theta} f_{j2}^+ = \min \{1, 6, 10, 3, 4\} = 1 ,$$

$$f_3 = \min_{\theta_j \in \Theta} f_{j3}^+ = \min \{7, 3, 4, 11, 7\} = 3 ,$$

$$f_4 = \min_{\theta_j \in \Theta} f_{j4}^+ = \min \{8, 3, 0, 4, 10\} = 0,$$

$$\max_{\varphi_k \in \Phi} \min_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^+ = \max \{2, 1, 3, 0\} = 3.$$

Максимальне значення функціонала відповідає рішенням φ_3 , тому його вибір можна вважати оптимальним.

До переваг критерію Вальда можна віднести той факт, що він «надзвичайно консервативний у ситуаціях, де консерватизм може мати місце» [59], а недоліком є те, що він виходить із такого припущення: противник – досконалий майстер, який завжди знайде найкраще (для себе) рішення, а це не завжди відповідає дійсності.

Разом з тим, проти цього критерію можна висунути кілька заперечень.

Вставка 4.2

Критерій Вальда

Раціональним вважається вибір рішення φ_{k_0} , яке задовольняє таку умову: $f_{k_0} = \max_{\varphi_k \in \Phi} \min_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^+$.

Приклад 6.9

Візьмемо ситуацію прийняття рішень, яка описується поданою нижче матрицею.

$$F^+ = \begin{pmatrix} & \varphi_1 & \varphi_2 \\ \theta_1 & 0 & 1 \\ \theta_2 & 100 & 1 \end{pmatrix}.$$

Легко переконатися, що за критерієм Вальда оптимальним буде рішення φ_2 , однак, середнє значення функціонала для рішення φ_1 : $B^+(\varphi_1) = 100(1-p)$, буде більшим за середнє значення на рішенні φ_2 : $B^+(\varphi_2) = 1-p$, для всіх апіорних розподілів імовірності: $p_1 = p$, $p_2 = 1-p$, коли $0 \leq p \leq 1-10^{-2}$. Але незважаючи на це, вибір рішення φ_2 буде виправданим, якщо середовище виступає свідомим супротивником органу управління.

Зауважимо також, що за певних умов для розв'язування задачі може бути доцільним введення додаткових обмежень, які, наприклад, базуються на критерії Бернуллі – Лапласа, тобто

$$f_{k_0} = \max_{\varphi_k \in \Phi} \min_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^+,$$

$$B^+\left(\frac{1}{n}, \varphi_k\right) \geq B_0.$$

➔ **Критерій Савіджа (мінімаксного ризику)**

Був запропонований у 1951 році і є одним із основних за частотою використання в теорії статистичних рішень. Він застосовується тоді, коли оцінний функціонал показує втрати або ризик, тобто $F = F^-$. При цьому оптимальним буде рішення φ_{k_0} , яке забезпечує виконання такої умови:

$$f_{k_0}^+ = \min_{\varphi_k \in \Phi} \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^- \quad (6.28)$$

При використанні цього критерію, як і в критерії Вальда, доцільним буде обмеження стосовно байєсового значення оцінного функціонала, а саме:

$$B^-\left(\frac{1}{n}, \varphi_k\right) \leq B_0.$$

Зауважимо, що хоча критерії є схожими, критерій Савіджа дозволяє «пом'якшити» консерватизм мінімаксного критерію шляхом заміни матриці виграшів на матрицю втрат, яку визначають таким чином:

$$a^-(\theta_j, \varphi_k) = \max_{\varphi_k} \{a^+(\theta_j, \varphi_k)\} - a^+(\theta_j, \varphi_k), \quad \theta_j \in \Theta, \varphi_k \in \Phi.$$

Візьмемо, приміром, матрицю виграшів з прикладу 6.9, а саме:

$$F^+ = \begin{pmatrix} & \varphi_1 & \varphi_2 \\ \theta_1 & 0 & 1 \\ \theta_2 & 100 & 1 \end{pmatrix}.$$

Оптимальним за мінімаксним критерієм буде рішення φ_2 із гарантованим виграшем в одиницю. Подивимось, яким буде результат, коли замінити цю матрицю матрицею втрат. Згідно з поданим вище перетворенням, матриця набуває такого вигляду:

$$F^- = \begin{pmatrix} & \varphi_1 & \varphi_2 \\ \theta_1 & 1 & 0 \\ \theta_2 & 0 & 99 \end{pmatrix},$$

і, відповідно до критерію Савіджа, раціональним буде вибір рішення φ_1 .

Головне заперечення проти цього критерію полягає в тому, що коли рішення $\varphi_{k_0} \in \Phi$ оптимальне за критерієм Савіджа, і ми видалимо з множини рішень Φ неоптимальне рішення $\varphi_k \neq \varphi_{k_0}$, то на новій множині $\Phi \setminus \varphi_k$ рішення φ_{k_0} може вже й не бути оптимальним.

6.6 Критерії прийняття рішень в умовах часткової невизначеності

Інформаційна ситуація I_6 характеризується тим, що орган управління має певну інформацію стосовно ймовірності станів середовища, але її недостатньо, або ОПР не впевнена в цій інформації настільки, щоб прийняти рішення. Тому хоче підстрахуватися найвипадок, якщо інформація хибна. Отже, це зумовлює два типи поведінки середовища.

Перший передбачає наявність в органі управління деякої інформації про справжній розподіл імовірності на множині станів середовища, і хоча її недостатньо для точного визначення інформаційної ситуації, існує можливість встановити певний ступінь оптимізму-песимізму щодо поведінки середовища.

Другий тип припускає, що орган управління володіє інформацією про стани середовища, яка є проміжною між інформаційними ситуаціями I_1 та I_5 , іншими словами, має місце повне або часткове знання про розподіл імовірності на множині станів середовища і про його антагоністичну поведінку.

Розглянемо критерії, які можуть бути корисними в таких ситуаціях. Найбільш розповсюдженим серед них є критерії Гурвіца та Ходжа – Лемана.

➤ Критерій Гурвіца

Побудований на основі бажання органу управління врахувати не тільки найгіршу щодо нього ситуацію (як критерії Вальда і Савіджа), а й найкращу також, тому він являє собою зважену комбінацію максимаксного і максимінного критеріїв (для оцінного функціонала із додатним інгредієнтом)

Сутність критерію Гурвіца полягає у відшукуванні оптимального рішення φ_{k_0} , яке задовольняє таку умову:

$$\lambda \min_{\theta_j \in \Theta} f_{jk_0}^+ + (1 - \lambda) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk_0}^+ = \max_{\varphi_k \in \Phi} \{ \lambda \min_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^+ + (1 - \lambda) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^+ \}, 0 \leq \lambda \leq 1. \quad (6.29)$$

Коли $\lambda = 1$, то критерій Гурвіца збігається із критерієм Вальда, а коли $\lambda = 0$ – із максимаксним критерієм, який відповідає умовам найбільш сприятливого стану середовища. Реальний стан середовища перебуває десь між цими крайніми випадками і характеризується величиною $\lambda \in [0; 1]$. Отже, коефіцієнт λ є ступенем песимізму-оптимізму.

Разом із описаним критерієм можливе також застосування модифікованого критерію Гурвіца, коли кожному рішенню $\varphi_k \in \Phi$ відповідає своє значення коефіцієнта $\lambda_k \in [0;1]$, зокрема, оптимальним вважається рішення φ_{k_0} , яке задовольняє таку умову:

$$\lambda_{k_0} \min_{\theta_j \in \Theta} f_{jk_0}^+ + (1 - \lambda_{k_0}) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk_0}^+ = \max_{\varphi_k \in \Phi} \{ \lambda_k \min_{\theta_j \in \Theta} f_{ik} + (1 - \lambda_k) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk} \},$$

$$0 \leq \lambda_k \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

Розглянемо практичне застосування критерію Гурвіца.

➤ *Приклад 6.10.* Нехай ситуацію прийняття рішень описано такою матрицею:

F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5
θ_2	1	3	0	2	7
θ_3	3	1	10	8	1
θ_4	5	5	4	5	6
θ_5	3	7	3	6	2
θ_6	8	2	5	4	8

При цьому рівень оптимізму-песимізму ОПР $\lambda = 0,7$.

Оберемо оптимальне за критерієм Гурвіца рішення. Для цього спочатку обчислимо значення показника Гурвіца стосовно кожного з рішень за такою формулою:

$$f_{\lambda k} = \lambda \min_{\theta_j \in \Theta} f_{ik} + (1 - \lambda) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}.$$

Для зручності запишемо результати обчислення у вигляді такої таблиці:

F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	
θ_1	1	3	0	2	7	
θ_2	3	1	10	8	1	
θ_3	5	5	4	5	6	
θ_4	3	7	3	6	2	
θ_5	8	2	5	4	8	
$\lambda = 0,7$	$\min_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}$	1	1	0	2	1
$1 - \lambda = 0,3$	$\max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}$	8	7	10	8	8
	$f_{\lambda k}$	3,1	2,8	3	3,8	3,1

Як бачимо, максимальне значення показника Гурвіца відповідає рішенням φ_4 , тому його вибір за даних умов можна вважати оптимальним.

Розглянемо на прикладі можливе заперечення щодо критерію Гурвіца. Припустимо, що ситуація прийняття рішень описана такою матрицею:

$$F^+ = \begin{pmatrix} & \varphi_1 & \varphi_2 \\ \theta_1 & 0 & 1 \\ \theta_2 & 1 & 0 \\ \theta_3 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{100} & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

За критерієм Гурвіца обидва рішення мають однакові оцінки, отже, вони обидва є оптимальними. В той же час, з огляду на матрицю оцінного функціонала, рішення φ_1 є значно кращим за φ_2 . Врахувати цей факт можна, увівши для кожного досліджуваного на оптимальність за критерієм Гурвіца рішення $\varphi_k \in \Phi$, обмеження такого вигляду:

$$B^+ \left(\frac{1}{n}, \varphi_k \right) \geq B_0^+,$$

де B_0^+ – задане значення.

Це обмеження задає нижню границю байєсова значення оцінного функціонала для оптимального рішення $\varphi_k \in \Phi$.

Розглянемо тепер питання про вибір значення коефіцієнта $\lambda \in [0;1]$. Очевидно, що воно відповідає певному ступеню оптимізму-песимізму ОПР, тобто є досить суб'єктивною оцінкою. Чим більшу впевненість відчуває ОПР стосовно одного з граничних випадків поведінки середовища, тим ближче до 0 або 1 буде значення λ . Значення $\lambda = \frac{1}{2}$, будучи рівноважною точкою проміжку $[0;1]$, свідчить про те, що ОПР вважає середовище однаковою мірою і антагоністичним, і таким, що буде максимально сприяти цілям прийняття рішень.

У загальному випадку оптимальне рішення за критерієм Гурвіца являє собою функцію від параметра λ , який визначає ступінь оптимізму-песимізму ОПР, тобто є величиною суб'єктивною. Отже, виникає питання, яким чином визначення цього параметра впливає на результат рішення, коли незначні зміни у параметрі будуть вивизвати зміни у ньому?

Дослідити це питання можна за допомогою *множин Гурвіца*. Розглянемо їх побудову на прикладі.

Вставка 6.2

Побудова множин Гурвіца [59]

Приклад 6.11. Припустимо, що ситуація прийняття рішень описується такою матрицею:

	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
Θ_1	1	5	3	0
Θ_2	2	2	2	4
Θ_3	4	2	3	6
Θ_4	0	4	3	1

Обчислимо значення критерію Гурвіца $f_{\lambda k}$ для кожного рішення $\varphi_k \in \Phi$ за формулою $f_{\lambda k} = \lambda \min_{\theta_j \in \Theta} f_{jk} + (1-\lambda) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}$ і побудуємо графіки отриманих залежностей (див. рис. 6.5).

$$f_{\lambda 1} = \lambda \min_{\theta_j \in \Theta} f_{j1} + (1-\lambda) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{j1} = \lambda \cdot 0 + 4(1-\lambda) = 4 - 4\lambda ;$$

$$f_{\lambda 2} = \lambda \min_{\theta_j \in \Theta} f_{j2} + (1-\lambda) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{j2} = 2\lambda + 5(1-\lambda) = 5 - 3\lambda ;$$

$$f_{\lambda 3} = \lambda \min_{\theta_j \in \Theta} f_{j3} + (1-\lambda) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{j3} = 2\lambda + 3(1-\lambda) = 3 - \lambda ;$$

$$f_{\lambda 4} = \lambda \min_{\theta_j \in \Theta} f_{j4} + (1-\lambda) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{j4} = 0 \cdot \lambda + 6(1-\lambda) = 6 - 6\lambda .$$

Очевидно, що оптимальними з огляду на різні значення показника λ будуть рішення φ_2 та φ_4 , а φ_1 та φ_3 – неоптимальні за жодних значень. Таким чином, множину $[0;1]$ розбито на дві підмножини: Δ_{φ_2} та Δ_{φ_4} , причому $\Delta_{\varphi_2} = [0; \lambda_0]$, $\Delta_{\varphi_4} = [\lambda_0; 1]$.

Знайдемо ці множини. Для цього обчислимо значення параметра λ_0 як точки перетину прямих $f_{\lambda 2}$ і $f_{\lambda 4}$. Отримуємо, що $\lambda_0 = \frac{1}{3}$.

Таким чином, $\Delta_{\varphi_2} = [0; 1/3]$, $\Delta_{\varphi_4} = [1/3; 1]$. Коли $\lambda \in \Delta_{\varphi_2} = [0; 1/3]$, то оптимальним за критерієм Гурвіца буде рішення φ_2 , а коли $\lambda \in \Delta_{\varphi_4} = [1/3; 1]$, оптимальним буде рішення φ_4 .

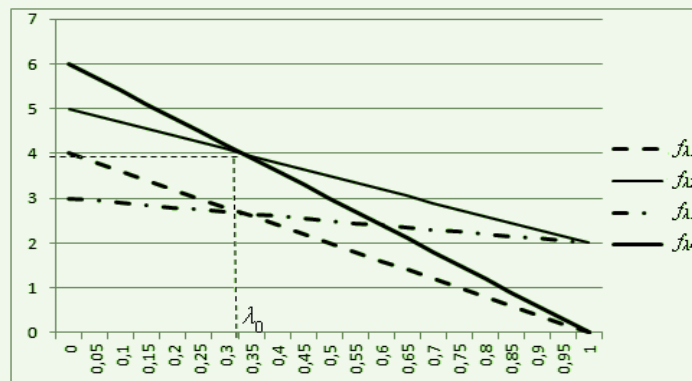


Рисунок 6.5 – Крива й множини Гурвіца до прикладу 6.11

Тепер дамо необхідні визначення

Множиною Гурвіца назвемо множину Δ_{φ_k} , яка задовольняє таку умову:

$$\Delta_{\varphi_k} = \left\{ \lambda \in [0;1] \mid f_{\lambda k} = \max_{\varphi_i \in \Phi} f_{\lambda i} \right\}, \quad \varphi_k \in \Phi,$$

причому

$$\bigcup_{\varphi_k \in \Phi} \Delta_{\varphi_k} = [0;1], \quad \Delta_{\varphi_k} \cap \Delta_{\varphi_i} = \emptyset, \text{ коли } \varphi_i \neq \varphi_k.$$

Кривою Гурвіца будемо називати ламану $\Gamma^+(\lambda)$, визначену в такий спосіб:

$$\Gamma^+(\lambda) = \left\{ f_{\lambda k}, \text{ коли } \lambda \in \Delta_{\varphi_k}, k = 1, 2, \dots, m \right\}.$$

Як бачимо, крива й множини Гурвіца аналогічні кривій і множинам Байєса, тому, базуючись на них, ми можемо провести аналіз залежності рішення від значення параметра λ , а також сформулювати критерії максимальної міри множин Гурвіца, максимального інтегрального значення показника Гурвіца, а також максимуму інтегрального потенціалу.

➔ Критерій Ходжеса – Лемана

У цьому критерії враховано припущення, за яким у реальних задачах прийняття рішень дійсні відомості про ситуацію часто перебувають між повним незнанням і наявністю точних даних стосовно апріорного розподілу ймовірності. Наприклад, апріорний розподіл може здаватися досить достовірним, але все ж таки недостатньо надійним для того, щоб базувати на ньому свої рішення.

Застосування критерію Ходжеса – Лемана дозволяє врахувати інформацію, якою володіє ОПР, і при цьому забезпечити деякий рівень гарантії на випадок, коли вона не точна. У певному сенсі цей критерій являє собою «суміш» критеріїв Байєса і Вальда (Савіджа, коли функціонал описано у вигляді ризиків).

Розглянемо ситуацію прийняття рішень $\{\Phi, \Theta, F\}$, коли оцінний функціонал задано у вигляді ризиків.

Рішення φ_{k_0} назвемо *обмеженим байєсовим рішенням* відносно даного апріорного розподілу $p \in \Delta_n$, якщо $B^-(\varphi_{k_0}, p) = \min_{\varphi_k \in \Phi} B^-(\varphi_k, p)$ і, крім того, має місце така нерівність: $f_{jk_0}^- \leq f_0$, де f_0 – задане порогове значення функціонала.

Обмежене байєсове рішення можна також визначити наступною умовою:

$$\min_{\varphi_k \in \Phi} \left\{ \lambda B^-(\varphi_k, p) + (1 - \lambda) \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^- \right\}, \quad (6.30)$$

де стала $\lambda \in [0;1]$ відображає ступінь довіри до інформації, яку має ОПР.

Обирати оптимальне рішення за критерієм Ходжеса – Лемана можна двома шляхами: безпосередньо скориставшись формулою (6.30) – тобто необхідно задати значення λ і обчислити значення критерію, або за допомогою описаного нижче алгоритму.

Алгоритм пошуку оптимального за критерієм Ходжеса – Лемана рішення

1. Визначаємо мінімаксний ризик, тобто $f = \min_{\varphi_k \in \Phi} \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^-$.
2. Враховуючи обчислене значення ризику f і умови прийняття рішення, обираємо величину *максимально допустимого ризику* f_0 , причому $f_0 \geq f$;
3. Вибираємо рішення φ_{k_0} , яке є найкращим за критерієм Байєса для допустимого значення апріорного розподілу $p_0 \in \Delta_n$, коли виконується умова: $f_0 \geq \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}$.

Тепер застосуємо розглянутий критерій на прикладі.

Приклад 6.11. Нехай ситуація прийняття рішень задана такою матрицею:

F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5
θ_1	4	3	0	2	7
θ_2	3	5	10	8	3
θ_3	5	5	4	5	6
θ_4	3	7	3	6	4
θ_5	8	6	5	4	8

Апріорний розподіл імовірності оцінено таким чином: $p_0 = (0,1; 0,3; 0,2; 0,1; 0,3)$.

Визначимо, яке рішення буде оптимальним за критерієм Ходжеса – Лемана.

Із цією метою перепишемо матрицю оцінного функціонала у вигляді ризиків або втрат, для чого спочатку знайдемо для кожної ситуації θ_j максимальне значення оцінного функціонала, а саме:

$$\theta_1: f_{1\max} = \max_{\varphi_k \in \Phi} f_{1k}^+ = 7,$$

$$\theta_2: f_{2\max} = \max_{\varphi_k \in \Phi} f_{2k}^+ = 10,$$

$$\theta_3: f_{3\max} = \max_{\varphi_k \in \Phi} f_{3k}^+ = 6,$$

$$\theta_4: f_{4\max} = \max_{\varphi_k \in \Phi} f_{4k}^+ = 7,$$

$$\theta_5: f_{5\max} = \max_{\varphi_k \in \Phi} f_{5k}^+ = 8.$$

Тепер втрати можна оцінити таким чином: $f_{jk}^- = f_{j\max} - f_{jk}^+$.

В результаті матриця оцінного функціонала набуває такого вигляду:

F^-	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5
θ_1	3	4	7	5	0
θ_2	7	5	0	2	7
θ_3	1	1	2	1	0
θ_4	4	0	4	1	3
θ_5	0	2	3	4	0

Далі виконаємо розрахунки за поданим вище алгоритмом, а саме:

1. Обчислимо мінімаксий ризик, тобто $f = \min_{\varphi_k \in \Phi} \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^-$.

F^-	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5
θ_1	3	4	7	5	0
θ_2	7	5	0	2	7
θ_3	1	1	2	1	0
θ_4	4	0	4	1	3
θ_5	0	2	3	4	0
$\max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^-$	7	5	7	5	7

$$f = \min_{\varphi_k \in \Phi} \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}^- = 5$$

2. Оберемо мінімально допустимий ризик, а саме: $f_0 = 6 \geq f = 5$.

3. Обчислимо байєсові значення $B^-(\varphi_k, p_0)$ для тих рішень φ_k , котрі задовольняють таку умову: $f_0 \geq \max_{\theta_j \in \Theta} f_{jk}$. У цій задачі це рішення φ_2, φ_4 . Таким чином, $B^-(\varphi_2, p_0) = 2,6$, $B^-(\varphi_4, p_0) = 2,7$. Найменше значення критерію Байєса відповідає рішенню φ_2 , тому його вибір можна вважати оптимальним.

Висновки

- ① Прийняття рішень в задачах управління сталим розвитком пов'язано із великим ступенем невизначеності. Залежно від причин її виникнення, виділяють різні її типи, які потребують різних методів формалізації та моделювання, таких як теорія ймовірності, теорія нечітких множин, статистичних рішень, експертні методи системного аналізу.
- ② Ситуацію прийняття рішень можна описати трійкою: $\{\Phi, \Theta, F\}$, де $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ – множина можливих рішень органу управління; $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ – множина можливих станів середовища; $F = \{f_{j,k}\}$ – оцінний функціонал, тут $f_{j,k} = f(\theta_j, \phi_k)$.
- ③ Залежно від рівня градації ступеня невизначеності середовища розрізняють інформаційні ситуації прийняття рішень. Кожна з них потребує своїх методів і критеріїв прийняття рішень.
- ④ Прийняття рішень в умовах ризику є однією з найбільш досліджуваних ситуацій. Для вибору рішення тут можна застосовувати критерії Байеса, мінімуму дисперсії, максимізації значення оцінного функціонала, модальний та ін.
- ⑤ У ситуації антагоністичної поведінки середовища найбільш застосованими є критерії Вальда і Савіджа. Особливості цих критеріїв в тому, що вони забезпечують найкраще рішення у найгіршій ситуації і виходять із припущення, що супротивник є досконалим майстром. При цьому критерій мінімаксного ризику Савіджа є більш «м'яким» ніж максимінний критерій Вальда.
- ⑥ Більшість методів прийняття рішень пов'язано із високим ступенем суб'єктивізму і тому доцільним є дослідження отриманих рішень. При прийнятті рішень в умовах ризику для цього використовують множини Байеса.
- ⑦ Ситуація часткової невизначеності (I_6) включає випадки, коли ОПР має певну інформацію стосовно можливих станів середовища, але вона не є достовірною, або є недостатньою для обґрунтованого прийняття рішень. Тому тут застосовують в певній мірі комбіновані критерії: Гурвіца та Ходжеса – Лемана, які дозволяють врахувати наявну інформацію і підстрахуватися на випадок її недостовірності.

Додаткову інформацію за питаннями, викладеними в цьому розділі, зацікавлений читач може знайти в літературі [13, 49, 58, 59, 78].

Питання для самоконтролю і завдання

Дайте відповіді на питання та поясните їх на прикладах:

- Що є причиною невизначеності в задачах прийняття рішень стосовно управління сталим розвитком?
- Назвіть типи невизначеності і охарактеризуйте математичний апарат, який використовується для її формалізації.
- Що являє собою інформаційна ситуація як основа прийняття рішень?
- Дайте визначення критерію прийняття рішень.
- Які елементи описують ситуацію прийняття рішень?
- Наведіть приклади задач прийняття рішень, пов'язаних із сталим розвитком.
- У чому полягає відмінність оцінних функціоналів із додатним та від'ємним інгредієнтом? Наведіть приклади.
- Наведіть приклади функціоналів для оцінювання сталості підприємства, території. Які показники маємо включити у оцінний функціонал.
- Назвіть етапи процесу прийняття рішень.
- Які характерні риси властиві ситуації прийняття рішень в умовах ризику?
- Як визначають апріорний розподіл імовірності у ситуації прийняття рішень в умовах ризику? Чому тут є невизначеність?
- Охарактеризуйте критерії, які застосовують в умовах ризику.
- Коли доцільно застосовувати критерій Байеса?
- За яких умов належить приймати рішення на основі критерію мінімуму дисперсії? Які особливості його застосування?
- У яких ситуаціях використовують модальний критерій?
- Дайте визначення байєсової множини. Які властивості вони мають?
- Із якою метою використовують байєсові множини?
- У чому полягає геометричний метод побудови байєсових множин? Коли його можна застосовувати?
- Які критерії можна застосовувати в умовах повного незнання про ситуацію прийняття рішень?
- У чому полягає сенс критерію Бернуллі – Лапласа?
- Опишіть інтегральні критерії прийняття рішень (максимальної міри байєсових множин, інтегрального байєсового значення оцінного функціонала, інтегрального потенціалу).
- Які критерії доцільно використовувати в умовах антагоністичної поведінки середовища?
- Які недоліки й переваги мають критерії Савіджа й Вальда?

- У якій ситуації доцільно застосовувати критерії Гурвіца й Ходжеса – Лемана? Розкрийте зміст кожного з них.
- Сформулюйте схему застосування критерію Ходжеса – Лемана.
- Сформулюйте задачу прийняття рішення на прикладі підприємства з вашого регіону. Яка інформаційна ситуація буде характерна для цієї задачі? Чим вона визначається?

2 Розв'яжіть описані нижче задачі

1. Знайти оптимальні рішення в умовах ризику за допомогою критеріїв першої інформаційної ситуації, коли ситуація прийняття рішень описується таким чином:

a)

p	F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
0,1	θ_1	1	5	4	0
0,4	θ_2	2	3	2	4
0,3	θ_3	4	2	3	6
0,2	θ_4	-1	4	3	1

б)

p	F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
0,2	θ_1	1	1	2	5
0,3	θ_2	3	6	0	4
0,4	θ_3	4	4	3	0
0,1	θ_4	1	4	5	1

в)

p	F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
0,2	θ_1	5	4	0	0
0,2	θ_2	1	3	7	4
0,4	θ_3	0	5	2	6
0,2	θ_4	0	2	3	4

г)

p	F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
0,1	θ_1	2	3	0	1
0,3	θ_2	3	2	2	4
0,3	θ_3	2	2	4	6
0,3	θ_4	2	4	3	1

2. Побудувати множини Байеса геометричним методом, якщо ситуація прийняття рішень задана однією з таких матриць:

a)

F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	1	5	4	5
θ_2	4	0	3	2

б)

F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	1	5	2	5
θ_2	4	0	3	2

в)

F^-	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	2	5	2	4
θ_2	2	3	7	2

г)

F^-	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	0	5	2	6
θ_2	4	3	3	2

3. Побудувати множини Байєса геометричним методом, якщо ситуація прийняття рішень задана однією з таких матриць (оцінний функціонал задано у вигляді F^+):

a)

p_0		φ_1	φ_2	φ_3
0,1	θ_1	1	5	7
0,4	θ_2	7	2	1
0,5	θ_3	4	1	3

б)

p_0		φ_1	φ_2	φ_3
0,4	θ_1	12	4	5
0,3	θ_2	10	6	12
0,3	θ_3	7	10	7

в)

p_0		φ_1	φ_2	φ_3
0,2	θ_1	1	0	3
0,5	θ_2	1	4	1
0,3	θ_3	5	1	1

г)

p_0		φ_1	φ_2	φ_3
0,2	θ_1	11	15	20
0,5	θ_2	17	3	14
0,3	θ_3	11	5	7

д)

p_0		φ_1	φ_2	φ_3
0,4	θ_1	3	1	3
0,2	θ_2	2	2	2
0,4	θ_3	1	4	5

е)

p_0		φ_1	φ_2	φ_3
0,1	θ_1	2	0	1
0,1	θ_2	1	2	3
0,8	θ_3	1	4	0

4. Обрати оптимальне рішення, використовуючи критерії максимальної міри байєсових множин, максимального інтегрального байєсового значення і максимуму інтегрального потенціалу для ситуації прийняття рішень із завдання 2.

5. Знайти оптимальне рішення за допомогою критерію Бернуллі – Лапласа, коли ситуація прийняття рішень задана таким чином:

a)

F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	2	5	0	0
θ_2	2	2	2	4
θ_3	2	0	3	6
θ_4	2	4	3	1

б)

F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	1	7	3	0
θ_2	2	2	5	4
θ_3	4	0	3	6
θ_4	1	4	3	1

6. Прийняти оптимальне рішення за допомогою критерію Гурвіца в таких умовах:

a)

F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	1	2	3	0
θ_2	5	2	2	4
θ_3	4	4	3	6
θ_4	0	4	3	1

$\lambda = 0,7$

б)

F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
θ_1	1	5	3	2
θ_2	1	3	2	4
θ_3	4	2	4	6
θ_4	7	4	3	1

$\lambda = 0,5$

7. Побудувати множини Гурвіца для ситуації прийняття рішень із завдання 6.

8. Знайти оптимальне рішення за допомогою критерію Ходжеса – Лемана в умовах такої ситуації прийняття рішень:

а)	p_0	F^+	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4						
	0,1	θ_1	1	5	3	2						
	0,3	θ_2	2	6	2	4						
	0,5	θ_3	4	2	2	6						
	0,1	θ_4	1	4	3	1						

б)	p_0	F^-	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
	0,35	θ_1	1	5	3	0
	0,15	θ_2	3	2	3	4
	0,4	θ_3	4	2	3	6
	0,1	θ_4	0	4	3	1

3 Подати описані нижче задачі у вигляді математичної моделі ситуації прийняття рішень та розв’язати їх.

1. Туристична агенція зосереджена на плануванні своєї діяльності з погляду сталого розвитку. З цією метою вона хоче оптимізувати використання свого транспортного парку, який складається з 10 автомобілів для перевезення клієнтів. Керівництвом розглядаються такі варіанти:

- Залишити кількість автівок незмінною;
- Взяти додаткову кількість автомобілів в оренду;
- Здати деякі автомобілі в оренду.

Вартість утримання кожної машини, прибуток який вона приносить, працюючи із повним завантаженням, витрати на оренду додаткових автомобілів і прибуток від здачі в оренду (в умовних одиницях) наведено в табл. 6.3. Фактична потреба в автомобілях є величиною випадковою і залежить від багатьох невідомих чинників. Можливі стани середовища описуються таким чином:

- очікується незначне збільшення кількості туристів;
- кількість туристів значно збільшиться;
- кількість клієнтів буде сталою;
- кількість клієнтів зменшиться несуттєво;
- клієнтів майже не буде.

Таблиця 6.3 – Вихідні дані задачі 1

Вартість утримання одного автомобіля	5
Прибуток від роботи одного автомобіля	15
Витрати на оренду одного автомобіля	5
Прибуток від здачі автомобіля в оренду	5

Визначте оптимальну стратегію агенції за таких умов:

- a) експерти прогнозують такі ймовірності станів середовища:
(0,3; 0,4; 0,1; 0,1; 0,1)
- б) спрогнозувати попит на туристичні послуги неможливо;
- в) директор вважає, що скоріш за все кількість туристів збільшиться;
- г) директор вважає прогноз досить точним, але хотів би забезпечити собі певні гарантії успішної діяльності фірми.

2. Зелена ферма, спеціалізована на вирощуванні органічних овочів та фруктів, прагне вдосконалити свою діяльність з урахуванням сталого розвитку і прийняти рішення про оптимальне використання водних ресурсів на фермі. До розгляду взято такі альтернативи:

- застосування крапельного поливу;
- збір та зберігання дощової води;
- використання місцевих водойм для зрошення.

За даними статистичних спостережень отримано дані про залежність відносної врожайності сільгоспкультур від початкової вологості ґрунту та обраної програми зрошення, які зведено в табл. 6.4. Сільськогосподарському підприємству необхідно зробити вибір програми зрошення, якщо ймовірності значень показника вологості відомі. Можливі стани середовища:

- Очікується незначне збільшення кількості опадів, відповідно, вологості ґрунту.
- S1 – кількість опадів і вологості збільшиться значно;
- S2 – вологості ґрунту буде достатньо для сталої врожайності;
- S3 – прогнозується невелике зменшення вологості ґрунту;
- S4 – вологості ґрунту буде недостатньо для врожайності.

Таблиця 6.4 – Вихідні дані задачі 2

Можливі ситуації	Програма зрошення				Ймовірність настання ситуації
	П1	П2	П3	П4	
S1	0,13	0,40	1,00	1,00	0,2
S2	0,28	0,40	1,00	0,98	0,3
S3	0,37	0,53	1,00	0,96	0,4
S4	0,60	0,61	0,96	0,90	0,1

Завдання для виконання у класі

① Фірма має намір створити та виготовляти косметичну продукцію з натуральних та екологічно безпечних інгредієнтів, яка сприятиме зменшенню використання шкідливих хімічних речовин та пластикової упаковки, буде безпечною для здоров'я людини і навколишнього середовища. Однак у керівництві виникла суперечка між фахівцями дослідницького відділу і відділу маркетингу стосовно стратегії введення цієї нової продукції на ринок. Фахівці дослідницького відділу переконані, що новий продукт буде дуже популярним та матиме великий попит серед споживачів. Вони радять негайно впровадити його в виробництво без проведення рекламної кампанії на ринках збуту. З іншого боку, відділ маркетингу вважає, що необхідно провести інтенсивну рекламну кампанію, яка, відповідно до їхніх прогнозів, коштуватиме фірмі 150 тис. грн. В разі успіху ця рекламна кампанія принесе прибуток у розмірі 900 тис. грн. Проте, якщо кампанія не вдасться, фірма зможе отримати лише 200 тис. грн прибутку. Проте якщо рекламна кампанія зовсім не буде проводитися, очікуваний прибуток оцінюється в 400 тис. грн, коли нова продукція сподобається споживачам і в 200 тис. грн, якщо вони залишаться байдужими до неї. Директору фірми потрібно обрати оптимальну стратегію введення нової продукції на ринок, при цьому враховуючи погляди та рекомендації обох відділів, а також прагнення забезпечити стійкий успіх фірми.

Дайте рекомендації директорові фірми у виборі рішення з огляду на такі умови:

- a) очікується, що рекламна кампанія з імовірністю 0,8 буде успішною;
- б) реакцію покупців на нову продукцію неможливо спрогнозувати, оскільки подібних товарів на ринку ще не було;
- в) директор вважає більш слушною думку відділу маркетингу;
- г) директор вважає прогноз досить точним, але хотів би забезпечити собі певні гарантії успішної діяльності фірми.

② В очікуванні посівного сезону фермер повинен обрати один з наступних варіантів діяльності зважаючи на вплив кожної з них на довкілля та витрати, які залежать від кліматичних умов, а саме:

Вирощування кукурудзи. Кукурудза може бути корисною для фермера, проте важливо враховувати відповідальне споживання водних ресурсів та вплив на стан ґрунту, оскільки ця культура може вимагати багато води, особливо в умовах посушливої погоди.

Вирощування пшениці. Пшениця менш вимоглива до води порівняно з кукурудзою, отже, вона забезпечує збереження водних ресурсів. Крім того, вирощування пшениці може сприяти меншому забрудненню ґрунту.

Вирощування бобів. Боби, такі як соя або горох, можуть бути важливими для сталого розвитку через їх високий білковий вміст та здатність фіксувати азот у ґрунті, що зменшує потребу в хімічних добривах.

Випас худоби. Використання землі під випас худоби важливе для сталого розвитку, оскільки це допомагає зберегти біорізноманіття, уникнути ерозії ґрунту та підтримувати екосистему.

Для кожного з цих варіантів фермер мусить враховувати такі чинники: вплив на довкілля, витрати на виробництво та можливий дохід. Всі вони залежать від погодних умов, які умовно можна поділити на чотири категорії, а саме:

- сильні опади,
- помірні опади,
- незначні опади,
- посушлива погода.

Дайте пораду фермеру у виборі рішення за таких умов:

- а) відомі ймовірності кількості опадів, а саме: $p = (0,3; 0,4; 0,2; 0,1)$.
- б) фермер вважає, що йому весь час не щастить;
- в) фермер не довіряє прогнозу погоди;
- г) фермер вважає прогноз погоди досить точним, але хоче забезпечити собі певні гарантії успішної діяльності на випадок, коли прогноз не справдиться.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Ареш'єва О.В. Діалектична сутність управління./ О. В. Ареш'єва, Н.В. Васюткіна Бізнес-навігатор №1 (33) 2014. С. 202-210 http://business-navigator.ks.ua/journals/2014/33_2014/40.pdf
- 2 Бардась А.В. Менеджмент: навч. посіб. / А.В. Бардась, М.В. Бойченко, А.В. Дудник. – Дніпропетровськ: Державний ВНЗ «НГУ», 2014. – 334 с.
- 3 Бідюк П. І. Аналіз часових рядів: навч. посібник // П. І. Бідюк, В. Д. Романенко, О. Л. Тимошук. – Київ: Політехніка, 2010. – 317 с.
- 4 Вугільні реформи по-німецьки. Повільно, проте без соціальних вибухів [Електронний ресурс]: Європейська правда – Текст. дані. – Режим доступу: <https://www.euointegration.com.ua/articles/2015/01/21/7029861/> (дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрану
- 5 Галушко О. С. Вибір ефективних напрямків розвитку промислового підприємства в умовах глобалізації на основі економіко-математичного моделювання / О. С. Галушко, Ю. В. Никифорова, Л. С. Коряшкіна // *Економічний вісник НГУ*. – 2012. – № 3. – С. 103 – 115.
- 6 Грабовецкий Б.Є. Основи економічного прогнозування [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Б.Є. Грабовецкий. – Вінниця : ВФ ТАНГ, 2000. – 209 с. – Режим доступу : <https://buklib.net/books/21986/> (дата звернення: 29.08.2023).
- 7 Грабовецкий Б.Є. Планування та економічне прогнозування [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Б.Є. Грабовецкий. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 66 с. – Режим доступу : <https://docplayer.net/72494972-B-je-graboveckiy-planuvannya-ta-ekonomichne-prognozuvannya.html> (дата звернення: 29.08.2023).
- 8 Грінченко Ю.Л. Методичний посібник з дисципліни «Методи прийняття управлінських рішень» освітньо-професійної програми спеціальності 7.050201 «Менеджмент організацій» // Ю.Л. Грінченко. – Одеса: ОНУ, – 2010. – 42 с.
- 9 Диха М.В. Економетрія [Електронний ресурс] : навч. посіб. / М.В. Диха, В.С. Мороз. – Київ : «Центр учбової літератури», 2016. – 206 с. – Режим доступу: <https://cutt.ly/dwkXYViF> (дата звернення: 29.08.2023).
- 10 Добровільний національний огляд [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cutt.ly/hwj2kK9U> (дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрану
- 11 Досвід країн Європейського Союзу з управління персоналом підприємства в умовах фінансово-економічної кризи [Електронний ресурс]: Національна служба посередництва і примирення – Текст. дані. – Режим доступу: <https://nspp.gov.ua/20-zagalnij-rozdil/zagalna-kategoriya-5/30-dosvid-krajin-evropejskogo-soyuzu-z-upravlinnya-personalom-pidpriemstva-v-umovakh-finansovo-ekonomichnoji-krizi> (дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрану
- 12 Єріна А.М. Статистичне моделювання та прогнозування [Електронний ресурс] : навч. посіб. / А.М. Єріна. – Київ : КНЕУ, 2001. – 170 с. – Режим доступу : <https://www.gmdh.net/articles/theory/StatModeling.pdf> (дата звернення: 29.08.2023).

- 13 Желдак Т. А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: навч. посіб. / Т. А. Желдак, Л. С. Коряшкіна, С. А. Ус; за редакцією С. А. Ус. Дніпро : «Дніпровська політехніка», 2020. 387 с.
- 14 Загорський В. С. Концептуальні основи формування системи управління сталим розвитком еколого-економічних систем: монографія. Львів : ЛРІДУ НАДУ, 2018. 336 с.
- 15 Зайченко Ю. П. Дослідження операцій: підручник. 7-е вид., перероб. і доп. / Зайченко Ю. П. – Київ: Видавничий дім «Слово», 2006. – 816 с.
- 16 Згуровський М.З. Основи системного аналізу // М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – Київ: Видавнича група ВНУ, 2007. – 544 с.
- 17 «Зелені» інвестиції у сталому розвитку: світовий досвід та український контекст [Електронний ресурс] – Режим доступу https://razumkov.org.ua/uploads/article/2019_ZELEN_INVEST.pdf (дата звернення: 29.08.2023).
- 18 Інноваційні інструменти забезпечення сталого суспільного розвитку в умовах економіки знань : навч. посіб. у слайдах / Т. В. Маматова, В. М. Молоканова, І. А. Чикаренко. – Дніпро : ГРАНІ, 2018. – 220 с.
- 19 Катренко А. В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації: навч. посіб. для студ. вищ. закл. освіти / А. В. Катренко. – Львів : Новий світ-2000, 2003. – 424 с.
- 20 Керівництво «Посилення ролі бізнесу в досягненні ЦСР в Україні», [Електронний ресурс] : UNDP / Україна / Публікації – Текст. дані. 2018 – Режим доступу: <https://cutt.ly/iwkXxJ2n> (дата звернення: 29.08.2023).
- 21 «Копанки» — це знак протесту проти реструктуризації вугільної галузі [Електронний ресурс]: Голос України. – Текст. дані. – Режим доступу: <http://www.golos.com.ua/article/225391>(дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрану
- 22 Коряшкіна Л. С. Методи оптимізації та дослідження операцій : практикум. У 2-х ч. Ч. 1. Дослідження операцій / Л. С. Коряшкіна, С. А. Ус. – Дніпро, НТУ «ДП», 2020. – 182 с.
- 23 Козак Ю.Г. Математичні методи та моделі для магістрів з економіки. Практичні застосування [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Ю.Г. Козак, В.М. Мацкул. – Київ: «Центр учбової літератури», 2017. – 254 с. – Режим доступу : https://shron1.chtyvo.org.ua/Kozak_Yurii/Matematychni_metody_ta_modeli_dlia_mahistriv_z_ekonomiky_Praktychni_zastosuvannia.pdf (дата звернення: 29.08.2023)
- 24 «Легені планети» — під загрозою. Як президент Бразилії хоче знищити амазонські ліси [Електронний ресурс]: hromadske. – Текст. дані. – Режим доступу: <https://hromadske.ua/posts/legeni-planeti-pid-zagrozoju-yak-prezident-braziliyi-hoche-znishiti-amazonski-lisi> (дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрана.
- 25 [Лібанова Е. М. Бідність населення України: методологія, методика та практика аналізу / Е.М. Лібанова; Нац. академія наук України, Ін-т демографії та соц. досліджень ім. М. В. Птухи. – Умань : Видавець «Сочінський М.М.», 2020. – 456 с.](#)
- 26 Лук'яненко І.Г. Економетрика : підручник / І.Г. Лук'яненко, Л.І. Краснікова. – Київ : Товариство «Знання», КОО, 1998. – 494 с.

- 27 Моделі та методи розв'язання задач оптимального розміщення двоетапного виробництва з неперервно розподіленим ресурсом: моногр. / О. Д. Станіна, С. А. Ус, Л. С. Коряшкіна. – Дніпро, 2021. – 200 с.
- 28 Моделювання та реінжиніринг бізнес-процесів: навч. посібник / С. В. Козир, В. В. Слесарєв, С. А. Ус, Т. В. Хом'як. М-во освіти і науки України. – Дніпро, 2022. – 163 с.
- 29 Молоканова В.М. Моніторинг практичної реалізації стратегії сталого розвитку в Україні. / В.М. Молоканова //Аспекти публічного управління: зб. наук. пр. – Дніпро: ГРАНІ, 2018. – Вип. 11–12, т.6.– С.85 – 92. Doi: 10.15421/151877.
- 30 Наконечний С.І. Економетрія : підручник / С.І. Наконечний, Т.О. Терещенко, Т.П. Романюк ; вид. 3-тє, доп. та перероб. – Київ : КНЕУ, 2004. – 520 с.
- 31 Національна доповідь «Цілі сталого розвитку: Україна» [Електронний ресурс] – Режим доступу https://ukraine.un.org/sites/default/files/2020-06/SDGs_NationalReportUA_Web_1.pdf (дата звернення: 29.08.2023)
- 32 «Ні хмарочосам»: в Одесі пройшла акція проти забудови рекреаційних зон [Електронний ресурс]: Суспільне Новини. – Текст. дані. – Режим доступу: <https://suspile.media/10857-ni-hmarocosam-v-odesi-projsla-akcia-proti-zabudovi-rekreacijnih-zon/> (дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрану
- 33 Новицький І. В. Теорія ймовірності й математична статистика: навч. посібник. І. В. Новицький, С. А. Ус. М-во освіти і науки України.– Дніпро, 2010. – 179 с.
- 34 Омаров Шахін Анвер огли Концепція сталого розвитку в законодавстві України та країн світу і практика її впровадження // Бізнес Інформ. – 2014. – № 12. – С. 85 – 95. Режим доступу https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2014-12_0-pages-85_95.pdf (дата звернення: 29.08.2023).
- 35 Палехова Л. Л. Управління сталим розвитком: довідник базових понять [навч. посібник]. – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. – 330 с.
- 36 Прийняття управлінських рішень : навчальний посібник / Ю.Є. Петруня, Б. В. Літовченко, Т. О. Пасічник та ін. ; за ред. Ю. Є. Петруні. – 4-те вид., переробл. і доп. – Дніпро : Університет митної справи та фінансів, 2020. – 276 с
- 37 Постанова КМУ від 5 серпня 2020 р. № 695 «Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021 – 2027 роки» Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-%D0%BF#Text> (дата звернення: 29.08.2023).
- 38 Про стратегію регіонального розвитку Дніпропетровської області на період до 2027 року [Електронний ресурс]: офіційний веб-сайт Дніпропетровської обласної ради – Текст. дані. – Режим доступу: <https://cutt.ly/FwkXgKis> (дата звернення: 29.08.2023).
- 39 Протести проти забудови Саржиного яру в Харкові [Електронний ресурс]: ГВАРА МЕДІА. – Текст. дані. – Режим доступу: <https://gwaramedia.com/policziya-rozignala-piknik-proti-zabudovi-sarzhinogo-yaru-v-harkovi/> (дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрану
- 40 Статистичне моделювання та прогнозування : навч. посіб. / під ред. д-ра екон. наук, проф. О.В. Раєвської. – Харків : ВД «ІНЖЕК», 2013. – 537 с.
- 41 Стратегічне планування. Навчальний посібник / О. Берданова, В. Вакуленко, В. Тертичка. – Львів : ЗУКЦ, 2008. – 138 с.

- 42 Стратегічне планування розвитку об'єднаної територіальної громади: навч. посіб. / О. В. Берданова, В.М. Вакуленко, І.В. Валентюк, А.Ф. Ткачук – Київ, 2017. –121 с.
- 43 Стратегія розвитку міста Дніпра «Стратегія Дніпра 2030» – Текст. дані. – Режим доступу: <https://dda.dp.ua/wp-content/uploads/2021/12/dokument-Strategiya-Dnipra-2030.pdf> (дата звернення: 29.08.2023).
- 44 Стратегія сталого розвитку: Європейські горизонти [Електронний ресурс]: Підручник / І.Л. Якименко, Л.П. Петрашко, Т.М. Димань, О.М. Салавор, Є.Б. Шаповалов, М.А. Галабурда, О.В. Ничик, О.В. Мартинюк. – Київ: НУХТ, 2022. – 337 с. – Режим доступу: https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/7990/1/strategiia_staloho.pdf (дата звернення: 29.08.2023).
- 45 Стратегія сталого розвитку Петриківської Об'єднаної територіальної громади на 2019 – 2027 роки [Електронний ресурс]: – Текст. дані. – Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/17Ot0pyubn4uFshr1YSanv0YpxHdY9W3H/view?pli=1> (дата звернення: 29.08.2023).
- 46 Тимошенко Л. В. Еколого-економічні аспекти оцінювання та прогнозування забруднення атмосферного повітря у промисловому місті / Л. В. Тимошенко, О.М. Ус. // Економічний вісник НГУ. – 2016. – № 1. – С. 156 – 168.
- 47 Тимошенко Л. В. Визначення пріоритетності фінансування природоохоронних проєктів / Л. В. Тимошенко, С. А. Ус, Д. В. Куліченко. // Економічний вісник НГУ. – 2017. – № 1. – С. 168 –175.
- 48 Тимошенко Л. В. Когнітивне моделювання в управлінні підприємницькою структурою як еколого-економічною системою / Л. В. Тимошенко, С. А. Ус, // Економічний вісник НГУ. – 2020.– № 4 (72). С. 89 –100.
- 49 Тимошенко Л. В. Обґрунтування методичних підходів до прогнозування обсягів продажу продукції з сезонними коливаннями її реалізації / Л. В. Тимошенко, С. А. Ус, М. О. Бальнов // Ефективна економіка. – 2015 – № 3. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3886>
- 50 Тимошенко Л.В. Еколого-економічне обґрунтування використання відновлювальних джерел енергії на муніципальних об'єктах / Л.В. Тимошенко, Н.В. Дементьєва // Економічний вісник НГУ. – 2016. – № 3. – С. 171 –180
- 51 Трифонова О. В. До питання про циклічність ділової активності промислових підприємств / О. В. Трифонова, Г. В. Баранець // Економічний вісник Дніпровської політехніки. – 2020. – № 4 (72). – С. 33 – 145.
- 52 Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text (дата звернення: 29.08.2023)
- 53 Ужгородці протестували проти забудови паркової зони довкола озера в центрі міста [Електронний ресурс]: Закарпаття онлайн. – Текст. дані. – Режим доступу: <https://zakarpattia.net.ua/News/144767-Uzhhorodtsi-protestuvaly-proty-zabudovy->

- parkovoi-zony-dovkola-ozera-v-tsentri-mista-FOTO (дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрана
- 54 Указ Президента України від 30 вересня 2019 р. № 722 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року». – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> (дата звернення: 29.08.2023).
- 55 Управлінські інструменти забезпечення сталого розвитку [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здоб. ступ. магістр спеціальності 281 «Публічне управління та адміністрування» та 081 «Право» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Іщенко А.М., Акімова О.А. Електронні текстові дані (1 файл: 1,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 102 с. – Режим доступу https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/47948/1/Upravlinski_instrumenty.pdf
- 56 Управління сталим розвитком в умовах глобальних викликів: методологія та практика : монографія / за заг. ред. проф. І. М. Писеревського ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : «Друкарня Мадрид», 2017. – 334 с.
- 57 Управління сталим розвитком : підручник для магістрів з управління та адміністрування [В. П. Бех, Ю. В. Бех, М. В. Туленков, А. А. Кравченко, Л. М. Макаренко, О. Г. Рябека, Н. В. Крохмаль, В. В. Чепак, Я. О. Чепуренко] ; за заг. ред. В. П. Беґа, М. В. Туленкова ; Мін-во освіти і науки України, Нац. пед. ун-т імені М. П. Драгоманова, Центр наукових досліджень проблем управління сталим розвитком. – Київ : Каравела, 2018. – 538 с
- 58 Ус С.А., Застосування методу оптимального розбиття множин в задачах дослідження критеріїв прийняття рішень / С.А. Ус, С.О. Легостаєва // Вісник Запорізького національного університету: Збірник наукових праць. Фізико-математичні науки. – Запоріжжя: Запорізький національний університет. – 2011. – С.128 – 133.
- 59 Ус С. А. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. / С. А. Ус, Л. С. Коряшкіна. 2-ге вид., випр; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т. «Дніпровська – Дніпро: НТУ «ДП», 2018. – 302 с.
- 60 Ус С. А. Моделювання сталого розвитку: навч. посіб. / С. А. Ус, Л. Л. Палехова; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», – 2022. – 144 с.
- 61 Хом'як Т. В. Застосування методів згладжування для прогнозування обсягу виробництва / Т. В. Хом'як, А. В. Малієнко, Г. В. Симонець. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць, Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 8 – 12.
- 62 Цілі сталого розвитку [Електронний ресурс]: UNDP / Україна / – Режим доступу: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku> (дата звернення: 29.08.2023)
- 63 «Щоб було, де відпочивати»: у Полтаві протестували проти ймовірної забудови берега Ворскли [Електронний ресурс]: Суспільне Новини. – Текст. дані. – Режим доступу: <https://suspilne.media/119303-sob-bulo-de-vidpocivati-u-poltavi-protestuvali-proti-jmovirnoi-zabudovi-berega-vorskli/> (дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрану
- 64 Circular Economy Action Plan – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN> (дата звернення: 29.08.2023).

- 65 Cities Leading The Way On Climate Action – Режим доступу: <https://cutt.ly/BwkCSwMg> (дата звернення: 29.08.2023).
- 66 Delivering the European Green Deal [Електронний ресурс] : An official website of the European Union – Режим доступу: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en (дата звернення: 29.08.2023).
- 67 EUROPE 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth /* COM/2010/2020 final */ [Електронний ресурс] : An official website of the European Union – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52010DC2020> (дата звернення: 29.08.2023).
- 68 European Green Deal [Електронний ресурс] : An official website of the European Union – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (дата звернення: 29.08.2023).
- 69 European Green Deal: more sustainable use of plant and soil natural resources [Електронний ресурс] : An official website of the European Union – Режим доступу: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_3565 (дата звернення: 29.08.2023).
- 70 Ferrexpo plc. Звіт про відповідальне ведення бізнесу, 2021 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ferrexpo.com/media/xncpwyq4/20221114-2021-rbr-ua-final.pdf> (дата звернення: 29.08.2023).
- 71 Ferrexpo хоче вдвічі зменшити викиди вуглецю [Електронний ресурс] : Екополітика / Новини екології України і світу. – Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/ferrexpo-hoche-vdvichi-zmenschiti-vikidi-vuglecju/> (дата звернення: 29.08.2023). – Назва з екрану
- 72 Green economy. [Електронний ресурс] : UN Environment program. – Режим доступу: <https://www.unep.org/explore-topics/green-economy> (дата звернення: 29.08.2023).
- 73 Ishchenko A.K. Mathematical justification on the choice of explosive material to rupture strong rocks of complex structure // A.K., Us S.A., Solovev A.V., Ishchenko K.S. / Metallurgical and Mining Industry, No.5 – 2017, с 42-45
- 74 Kosova T. Financial and credit support of market-oriented management of transport engineering enterprises / T. Kosova, S. Smerichevskyi, O. Tryfonova, O. Mykhalchenko, L. Raicheva // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2023. – № (3). – Р. 164 – 170. – Режим доступу: http://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2023/3/03_2023_Kosova.pdf (дата звернення: 29.08.2023).
- 75 Lego відмовляється від нафти у виробництві своїх конструкторів (01.05.2023) [Електронний ресурс] : Responsible future Інформаційний простір сталого розвитку. – Режим доступу: <https://responsiblefuture.com.ua/8556-2/> (дата звернення: 29.08.2023).
- 76 Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future [Електронний ресурс] . – Режим доступу: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf> (дата звернення: 29.08.2023).

- 77 Rio 2012 is an opportunity to move towards a green economy [Електронний ресурс] : An official website of the European Union – Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/highlights/rio-2012-is-an-opportunity> (дата звернення: 29.08.2023).
- 78 Roberts Fred S. Discrete Mathematical models with application to social, biological and environmental problems / Fred S. Roberts. – Rutgers University Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1976. – 560 p.
- 79 Saaty Thomas L. The Analytic Hierarchy Process / Thomas L. Saaty/ – McGraw-Hill International Book Company, 1980. – 287 p.
- 80 Shvets V. Theoretical and Methodological foundations for the evaluation of management efficiency of joint investment institutions/ V. Shvets, O. Tryfonova, H. Solomina, Ya. Petrova // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2020. – № 5. – P. 178 – 183. Режим доступу: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-5/178> (дата звернення: 29.08.2023).
- 81 SMART-інфраструктура у сталому розвитку міст: світовий досвід та перспективи України [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/uploads/other/2021-SMART-%D0%A1YTI-SITE.pdf> (дата звернення: 29.08.2023).
- 82 Smerichevskiy S. Financial and accounting support of marketing strategies for energy efficiency of coal mines / S. Smerichevskiy, T. Kosova, O. Tryfonova, O. Bezgina, G. Solomina // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2022. – № 1. – P. 163 – 169. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/163>
- 83 Solution of the problem to optimize two-stage allocation of the material flows / Bulat A., Dziuba S., Minieiev S., Koriashkina L., Us S. // *Mining of Mineral Deposits*, 2020. – 14(1). – pp. 27 – 35
- 84 Tymoshenko L. Ecological and economic aspects of recycling: European and Ukrainian experience // *Економічний вісник НГУ*. – 2013.– № 2 (42).– С. 85–92.
- 85 Tymoshenko L. Scientific and Practical Procedures of Ensuring the Effectiveness of Environmental Measures during Exploitation of Iron Ore Deposits Sustainable Development of Industrial Regions // *Advanced Engineering Forum* – Vol. 22 – 2017 (194 p.) – pp.160 – 165.
- 86 United Nations Conference on Environment & Development Rio de Janerio, Brazil, 3 to 14 June 1992 – Режим доступу: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf> (дата звернення: 29.08.2023).
- 87 Us S., Tymoshenko L. The management modeling of ecological and economic system // Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles. Ed.: Shvets V., Paliekhova L. Dnipro-Cottbus: Accent, 2022 (184 p.). – P. 179 – 182.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

Автокореляційна функція 113
Автокореляція 112
Авторегресійна функція 115
Адекватність 93
Альтернатива 74
Аспект 84

Б

Багатокритеріальний вибір 148
Байесове значення оцінкового функціонала 198
Бернуллі– Лапласа критерій 209

В

Варіант 74
Варіаційний ряд 100
Верифікація прогнозів 98
Взаємозв'язок 67
Виробнича функція 139
– – Кобба –Дугласа 139
Власний вектор матриці 160

Г

Глибина прогнозу 97
Гранична продуктивність, 136
Громада 32

Е

Еколого-економічна система 35
Економетрична модель 122
Екстраполяція 97
– тренда 116
Емерджентність 15, 66

З

Задача
– вибору 73, 82
– прийняття рішень в нечітких умовах 82
– багатокритеріальної оптимізації 82, 148
Залежність функціональна 120
«Зелена» економіка 25
– – інклюзивна 25

І

Ієрархічність 15

Ієрархія 152
– домінантна 153
Інгредієнт
– від'ємний 187
– додатний 187
Індикатор сталості 21
Інформаційна ситуація прийняття рішень 187
Інформаційне середовище завдання 82

К

Комунікація 19
Критеріальний простір 85
Критерій 83, 84, 85
– кількісний, 83
– частковий, 85
– якісний 84
Коефіцієнт
– автокореляції 112
– – циклічний першого порядку 114
– детермінації 107, 125
– еластичності 134
– кореляції 108
– – множинний 137
– – Пірсона 124
– множинної детермінації 137
Корелограма 113
Кореляційне поле 123
Крива
– Гурвіца 218
– зростання 130
Критерій 83,84, 85
– Байеса 190
– Бернуллі – Лапласа 209
– Вальда, см. Принцип максиміну
– Гурвіца 214
– значущості 109
– комбінований 193
– максимального інтегрального байєсова значення оцінкового функціонала 207
– – – потенціала 207
– – міри байєсових множин 206
– максимізації розподілу оцінкового функціоналу 191
– мінімуму оцінкового функціонала 190
– прийняття рішень 188

- Савіджа 213
- Стьюдента 132
- Фішера 110
- Ходжеса – Лемана 218

М

- Метод 19
- аналізу ієрархій, 150
 - найменших квадратів 104, 127
- Механізм управління 16
- Множина
- байєсова 198
- Модель 92
- детермінована 82
 - динамічна 82
 - економетрична 122
 - класичної множинної регресії 136
 - статична 82
 - стохастична 82
- Моделювання 92

О

- Обмеження 84
- Об'єкт управління 13
- Особа, що приймає рішення 74
- Оцінний функціонал 186

П

- Період упередження 97
- План 74
- Поверхня байєсова 198
- Показник Гурвіца 216
- Поле кореляційне 123
- Пріоритет
- глобальний, 161
 - локальний, 160
- Прийняття рішень 18, 42, 74
- в умовах ризику, 188
- Принципи управління 14
- Прогноз 96
- інтервальний 97
 - точковий 97
- Процес управління сталим розвитком 22
- Принцип
- максиміну 211
 - недостатньої підстави 209

Р

- Регресія парна вибіркова лінійна 122
- Ретроспекція 98
- Рішення байєсове 198
- – обмежене 218

- – умовне 193
- Ряд
- нестационарний 101
 - стаціонарний 101

С

- Сезонність 118, 145
- Сінергія 66
- Система управління 14
- Системний підхід 20, 66
- Система 66
- соціально-технічна 34
 - еколого-економічна 35
- Ситуація прийняття рішень 186
- Сталий розвиток 10, 12
- Стійкий розвиток 20
- Стратегічні управлінські рішення 50
- Стратегія 74
- Стратегія сталого розвитку 49
- Структуризація 15
- Суб'єкт управління 13
- Сукупність статистична 100

Т

- Тренд 102, 104, 110, 114, 116, 117, 118, 143

У

- Узгодженість 162
- Управління 13
- Управлінське рішення 42

Ф

- Функція управління 18
- попиту 138

Х

- Холархії 153

Ц

- Циркулярна економіка 29
- Цілеспрямованість 67
- Цілі
- сталого розвитку 26
 - управління 17
- Цілісність 15, 66

Ч

- Число випадкової узгодженості 163



Олена Василівна Трифонова – доктор економічних наук, професор, професор кафедри менеджменту Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро, Україна). Автор понад 150 наукових та методичних праць, серед яких 8 монографій, 3 навчальні посібники та близько 80 наукових статей.

Наукові інтереси: економічне обґрунтування управлінських рішень, моделювання та прогнозування в менеджменті, сталий розвиток підприємств.

Olena V. Tryfonova – Dr. Sc. (Econ.), Professor, Professor of Department of Management of the Dnipro University of Technology, (Dnipro, Ukraine). Author of more than 150 scientific and methodical works, including 8 monographs, 3 textbooks and about 80 research articles.

Research interests: economic justification of management decisions, modeling and forecasting in management, sustainable development of enterprises.



Любов Вікторівна Тимошенко – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної економіки, підприємництва та публічного управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро, Україна). Автор більше 120 наукових та методичних праць, серед яких більше ніж 20 наукових статей, співавтор 7 монографій.

Наукові інтереси: сталий розвиток територій, соціальна відповідальність бізнес-структур, економічне обґрунтування екологізації виробничих процесів.

Liubov Tymoshenko – Associate Professor of the Applied Economics, Entrepreneurship and Public Administration Department, Dnipro University of Technology, (Dnipro, Ukraine), Cand. Sc. (Economic), Associate Professor. Author of more than 120 scientific works, including more than 20 scientific articles, is a co-author of 7 monographs

Research interests: sustainable development of territories, social responsibility of business structures, economic justification of production processes ecologization



Світлана Альбертівна Ус – кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Автор більше 170 наукових та методичних праць, серед яких дві монографії, 16 навчальних посібників, понад 70 наукових статей.

Наукові інтереси: прийняття рішень в умовах невизначеності, моделювання складних систем, оптимізація розподілу матеріальних потоків у транспортно-логістичних системах з неперервно-розподіленим ресурсом.

Svitlana A. Us – Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of Systems Analysis and Control department of the Dnipro University of Technology. Author of more than 150 scientific and methodical works, including two monographs, 15 textbooks, and about 70 research articles.

Research interests: decision-making under conditions of uncertainty, modeling of complex systems, optimization of the distribution of material flows in a transport-logistic systems with continuously distributed resource.

ПРО ПРОЕКТ

Навчальний посібник підготовлений в рамках міжнародного проєкту «Створення німецько-української мережі вищої освіти для забезпечення академічної успішності у галузях інженерії та природничих наук в університетах України в умовах війни та кризи», що виконується на чолі з Бранденбурзьким технічним університетом Коттбус – Зенфтенберг (Німеччина) за підтримки програми Німецької служби академічних обмінів (DAAD) «Україна цифрова: Забезпечення академічної успішності під час кризи, 2023».

Співпраця між Бранденбурзьким технічним університетом Коттбус - Зенфтенберг (БТУ), Німеччина, та Національним технічним університетом «Дніпровська політехніка» почалася ще в далекому 1998 році. Протягом 25 років виконано велику кількість сумісних проєктів, зокрема, навчальні та дослідницькі програми, семінари та програми стажування, міжнародні багатосторонні конференції, а також різноманітні навчальні тренінги і цільові програми, такі як літні та зимові школи. Щороку студенти Дніпровської політехніки за програмами навчальної мобільності приїжджають до БТУ та активно засвоюють європейські методи управління сталим розвитком у різних галузях діяльності.

З 2014 року університети-партнері реалізують низку проєктів у рамках Меморандуму «Про реалізацію спільного дослідницького проєкту сталості та цифрового навчання у вищій освіті» за підтримки Німецького товариства міжнародного співробітництва (GIZ). Багаторічний досвід співпраці доводить високу корисність довгострокового сумісного проєкту «Озеленення навчальних програм».

З початком російської загарбницької війни в лютому 2022 року співпраця університетів не зупинилася, а навпаки посилилася та перейшла на інший рівень. За проєктом DAAD «Україна цифрова: забезпечення успішності студентів під час кризи, 2022» була започаткована «Німецько-українська мережа технічних університетів для забезпечення академічної успішності з предметів інженерії та природничих наук в університетах України в умовах війни та кризи». З німецької сторони до консорціуму увійшли Дрезденський технічний університет, Університет прикладних наук в Еслінгені, Технічний університет Фрайберзька гірничої академії та Університет прикладних наук Ройтлінгена. Проєкт виконав цілу низку різних завдань, у тому числі фінансова підтримка українських студентів і викладачів, науково-дослідні програми та широкий спектр навчальних онлайн-тренінгів. Успіхи виконання проєкту з цифровізації навчання заклали підґрунтя для його продовження у 2023 році.

Навчальне видання

Трифорова Олена Василівна
Тимошенко Любов Вікторівна
Ус Світлана Альбертівна

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ
І МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ СТАЛОГО
РОЗВИТКУ**

Навчальний посібник

Редактор Є.М. Ільченко

Підписано до видання 30.11.2023 . Формат 30x42/4.

Електронний ресурс

Підготовлено до видання
в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК № 1842 від 11.06.2004 р.
49005, м Дніпро, просп. Д.Яворницького, 19