

Університети в підтримку сталого розвитку

С. А. Ус, Л. Л. Палєхова

МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ



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

С. А. Ус, Л. Л. Палєхова

**МОДЕЛЮВАННЯ
СТАЛОГО РОЗВИТКУ**

Навчальний посібник

Дніпро – 2024

УДК 658.8:005 (075.32)

У 74

Затверджено Вченою Радою

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

як навчальний посібник для здобувачів закладів вищої освіти.

Протокол № 13 від 26 грудня 2023 року.

Рецензенти:

Корніч Г. В. – д.ф.-м.н., професор, завідувач кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Національний університет «Запорізька політехніка»;

Зеленцов Д. Г. – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних систем, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»;

Швець В. Я. – д.е.н., професор, завідувач кафедри менеджменту, НТУ «Дніпровська політехніка», заслужений економіст України, академік Академії економічних наук України.

Консультанти від Бранденбурзького технічного університету Коттбус-Зенфтенберг (Німеччина):

Шмідт М. – д.т.н, професор, декан факультету «Навколишнє середовище і природничі науки»;

Альбрехт А. – д.ю.н., професор, декан факультету «Економіка, право та суспільство».

У 74

Ус С. А., Палехова Л. Л. Моделювання сталого розвитку: навч. посіб. / С. А Ус., Л. Л. Палехова, за заг. ред. Л. Л. Палехової. – М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро : вид-во «Свідлер А.Л». – 2024. 160 с.

ISBN 978-617-627-175-8

У навчальному посібнику представлено широкий спектр механізмів та інструментів сприяння сталому розвитку. Основний акцент зроблено на формуванні необхідних теоретичних знань та набутті практичних навичок щодо інтеграції міркувань сталого розвитку в процесі розробки стратегічних рішень з використанням методів економіко-математичного моделювання. Навчальний посібник призначений для здобувачів закладів вищої освіти, викладачів, науковців, професійних менеджерів і маркетологів, а також для всіх, хто цікавиться практикою управління сталим розвитком.

Навчальний посібник підготовлений в рамках міжнародного проекту «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 НТУ «Дніпровська політехніка» (Україна) і Бранденбурзьким технічним університетом Коттбус – Зенфтенберг (Німеччина) за підтримки програми Німецької служби академічних обмінів (DAAD) «Україна цифрова: Забезпечення академічної успішності під час кризи, 2023».

© Ус С. А., розділи 3-5, 2024

ISBN 978-617-627-175-8

© Палехова Л. Л., розділи 1-2, 2024

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**

S. Us, L. Paliekhova

**MODELLING OF
SUSTAINABLE DEVELOPMENT**

Textbook

Dnipro – 2024

УДК 658.8:005 (075.32)
У 74

Approved for publication

by the Academic Council of the Dnipro University of Technology.
Protocol № 13, December 26, 2024.

Reviewers:

Kornich G. V. – Prof. Dr. (Phys.-Math.), Head of the Department of System Analysis and Computational Mathematics at the Zaporizhzhia Polytechnic National University;

Zelentsov D. G. – Prof. Dr.-Ing, Head of the Department of Information Systems at the Ukrainian State University of Chemical;

Shvetz V.Ya. – Prof. Dr. Econ. Sc., Academician of Academy of Economic Sciences of Ukraine, Head of the Management Department at the Dnipro University of Technology.

Consultants:

Schmidt M. – Prof. Dr. Dr. h. c. (NMU Dnepropetrovsk), Head of Department of Environmental Planning Brandenburg University of Technology (BTU) Cottbus-Senftenberg (Germany);

Albrecht E. – Prof. Dr. Jur., Dean of the Faculty of Economics, Law and Society, Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg (Germany).

У 74

Us S., Paliekhova L. Modelling of sustainable development: Textbook / Ed. by L. Paliekhova. Dnipro University of Technology, Dnipro – Svidler publ., 2024. – 160 c.

ISBN 978-617-627-175-8

The textbook presents a broad spectrum of mechanisms and instruments for the promotion of sustainable development. Main emphasis is laid on the formation of necessary theoretical knowledge and the acquisition of practical skills relating to the integration of sustainability considerations into strategic decision-making using the methods of economic-mathematical modeling. The textbook is intended for students of higher education institutions, lecturers, researchers, professional managers and marketing specialists, as well as for everyone interested in the practice of sustainable development management.

The textbook was prepared within the International joint project “Aufbau eines deutsch-ukrainischen Hochschulnetzwerkes zur Sicherung des Studienerfolges in ingenieur- und umweltwissenschaftlichen Fächern an ukrainischen Universitäten in Kriegs- und Krisenzeiten” by the Dnipro University of Technology (Ukraine) and Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg (Germany) under the DAAD Programme “Ukraine digital: Ensuring academic success in times of crisis, 2023”.

© S. Us , Sections 3-6, 2024

ISBN 978-617-627-175-8

© L. Paliekhova, Sections 1-2, 2024

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

Вступне слово	7
Передмова	8
Частина I Концепція сталого розвитку	9
Розділ 1 Парадигма сталого розвитку	11
1.1 Ідея сталого розвитку	12
1.2 Принципи і цілі сталого розвитку	18
1.3 Програми і інструменти сталого розвитку	23
<i>Висновки</i>	33
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	34
Розділ 2 Вимірювання сталості розвитку	35
2.1 Індикатори сталого розвитку	36
2.2 Індикатори економічної сталості	39
2.3 Індикатори екологічної сталості	43
2.4 Індикатори соціального розвитку	46
<i>Висновки</i>	48
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	49
Частина II Математичні методи моделювання сталого розвитку	50
Розділ 3 Принципи моделювання сталого розвитку	52
3.1 Поняття моделі та моделювання	53
3.2 Системний підхід у моделюванні	59
3.3 Класифікація видів моделювання	64
3.4 Математичне моделювання	66
3.5 Імітаційне моделювання	71
<i>Висновки</i>	74
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	75

Розділ 4 Статистичні методи у моделюванні сталого розвитку	78
4.1 Основні поняття кореляційно-регресійного аналізу	79
4.2 Моделі парної регресії	85
4.3 Моделі множинної регресії	92
4.4 Побудова точкових та інтервальних прогнозів	100
<i>Висновки</i>	103
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	104
Частина III Практикум з моделювання сталого розвитку	106
Розділ 5 Побудова простих моделей систем	108
5.1 Моделювання відповідального виробництва	109
5.2 Індивідуальні завдання	113
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	121
Розділ 6 Моделювання управління екологічною сталістю	122
6.1 Проблема забруднення атмосферного повітря	123
6.2 Теоретичні пояснення до виконання завдання	125
6.3 Приклад розробка лінійної регресійної моделі залежності між забруднюванням атмосферного повітря і захворюваністю населення	131
6.4 Індивідуальні завдання	139
<i>Питання для самоконтролю і завдання</i>	144
Список використаних джерел	145
Додатки: Ключові міжнародні документи зі сталого розвитку	152
Відомості про авторів	158
Відомості про проєкт	159

ВСТУПНЕ СЛОВО

Україна активно приєдналася до глобальних Цілей сталого розвитку до 2030 року і тривалий час здійснювала інклюзивний процес їх впровадження, враховуючи амбітні завдання щодо так званого подвійного переходу нашої країни до нового технологічного укладу – одночасної зеленої та цифрової трансформації суспільства і реалізації інноваційних можливостей в реаліях сучасного ресурсно-обмеженого світу.

28 лютого 2022 року, невдовзі після початку повномасштабного російського вторгнення, Україна подала заявку на членство в Європейському Союзі, що демонструє незламну відданість українського народу європейському шляху та готовність разом рухатися у напрямку сталого розвитку. Вже 14 грудня 2023 року Європейська рада вирішила розпочати переговори щодо вступу України до Європейського Союзу – це стало стимулом для влади, бізнесу і громадян країни, позитивним сигналом для європейських і світових інвесторів.

В умовах широкомасштабної російської інтервенції багато великих проектів зі сталого розвитку довелося переорієнтувати на забезпечення потреб воєнного часу. Але вже зараз ми плануємо повоєнне відновлення України за європейськими нормами і стандартами, відбудову більш зеленої, інклюзивної та справедливої країни, де «ніхто не залишиться без уваги». Для цього нашій країні вкрай потрібні менеджери, маркетологи та інші фахівці, які здатні використовувати у своїй професійній діяльності сучасні методи, зокрема економіко-математичного моделювання, для вирішення конкретних практичних задач, забезпечуючи трилему сталого розвитку – збереження довкілля, економічну ефективність та соціальну справедливість.

Розуміючи свою високу місію у цьому процесі, НТУ «Дніпровська політехніка» підготував серію навчальних посібників в рамках міжнародного проекту «Створення німецько-української мережі вищої освіти для забезпечення академічної успішності у галузях інженерії та природничих наук в університетах України в умовах війни та кризи», координатором якого виступив Бранденбурзький технічний університет Коттбус – Зенфтенберг (Німеччина) за підтримки програми Німецької служби академічних обмінів (DAAD) «Україна цифрова: Забезпечення академічної успішності під час кризи, 2023».

Навчальний посібник «Моделювання сталого розвитку» покликаний надати допомогу у вивченні сучасних економіко-математичних методів, що є корисними при вирішенні актуальних практичних задач у галузі управління сталим виробництвом та споживанням в промисловій сфері.

*проф. Артем Павличенко,
Перший проректор НТУ «Дніпровська політехніка»*

ПЕРЕДМОВА

Національна програма сталого розвитку України на період до 2030 року передбачає планомірний перехід до моделей відповідального виробництва та споживання, що включає впровадження широкого кола програм із зеленої економіки, циркулярного використання матеріальних ресурсів, нарощування виробництва енергії з відновлюваних джерел, інноваційної трансформації в усіх галузях економічної діяльності, т. д.

В методологічному аспекті проблема управління сталим розвитком виключає будь-які інтуїтивні підходи, базується на системі збалансованих показників і вимагає використання сучасних методів системного аналізу та математичного моделювання для розуміння підходів до їх реалізації в умовах взаємодії різних факторів впливу. Економіко-математичне моделювання спрямовано зазвичай на здійснення кількісного та якісного оцінювання процесів в еколого-економічній системі, а також отримання можливих найкращих альтернатив з планування управлінських дій, враховуючи встановлені загрози та можливості для досягнення запланованих цілей розвитку.

Моделювання може бути використано для вирішення самих різних управлінських проблем, зокрема у розрахунках індексів та індикаторів «зеленого» розвитку, для цілей прогнозування та моніторингу кінцевих і проміжних результатів у процесі управлінської діяльності, врахування завдань розвитку для різних ланок ланцюгів створення вартості і т. д.

На даний час вітчизняна та світова наука пропонує велику кількість розробок з питань економіко-математичного моделювання динамічних характеристик розвитку. Навчальний посібник «Моделювання сталого розвитку» розглядає основні підходи до вибору типу та визначення параметрів економіко-математичних моделей, які б найбільш відповідали конкретним завданням сталого розвитку у різних галузях економічної діяльності.

Навчальний посібник призначений насамперед для здобувачів закладів вищої освіти, які вивчають питання сталого розвитку у міждисциплінарному контексті, а також самостійно поглиблюють знання та прагнуть професійного розвитку на основі опанування сучасних підходів до розробки управлінських рішень зі сталого розвитку. Оскільки посібник має відкритий і універсальний характер, він може бути корисним для широкого кола читачів, зокрема зацікавити наукових робітників, урядових посадовців, менеджерів і керівників підприємств, які прагнуть оволодіти методами моделювання для вирішення задач сталого розвитку.

*З повагою,
Світлана Ус, Людмила Палєхова*

ЧАСТИНА I

КОНЦЕПЦІЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

«Ми не мали наміру наповнити наші дії такими руйнівними, небезпечними, шкідливими і неестетичного наслідками, але це те, що ми маємо. Людина приймає соціальні рішення на занадто вузькій підставі і на дуже коротку часову перспективу».

*Моріс Стронг,
Генеральний секретар Конференції ООН
з навколишнього середовища і розвитку в Стокгольмі, 1972*

«Нам потрібні дії з боку всіх та всюди. Наш орієнтир – сімнадцять Цілей сталого розвитку. Вони є переліком обов'язкових справ для людей та планети, планом досягнення успіху, що стане справжнім тестом відданості країн ідеям сталого розвитку».

*Пан Гі Мун,
Генеральний секретар ООН,
Виступ на Саміт ООН, 2015*

«Нашим обов'язком є введення додаткових ініціатив, і я розраховую на те, що всі ви задумаєтеся і поставите більш масштабні цілі для загального протистояння зміні клімату».

*Генеральний секретар ООН Антоніу Гутерріш,
24-ї сесія конференції сторін Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, 2017*

У ХХІ столітті концепція сталого розвитку є основним викликом, що стоїть перед менеджментом в усіх сферах діяльності. Складність полягає у тому, що сьогодні прийняття управлінських рішень має ґрунтуватися не тільки на узгодженості всіх трьох напрямків сталого розвитку – економічного, соціального та екологічного, а також враховувати разом проблеми розвитку держави і окремих регіонів, територіальних громад і різних шарів зацікавленої аудиторії, включаючи права на розвиток майбутніх поколінь.

Місцеві державні адміністрації і компанії повинні вибудовувати власну стратегію розвитку через призму глобальних цінностей, підтримуючи плани, програми і контрольні індикатори зі сталого розвитку, що були прийняті на рівні програм ООН. При цьому для відстеження прогресу в досягненні цільових планових завдань використовується методологія глобальних показників, яка дозволяє зіставляти результати у просторовому та часовому вимірі.

Частина I посібника має два розділи, які роз'яснюють зміст парадигми сталого розвитку, вивчають специфічні завдання менеджменту для відповідального виробництва та споживання з позицій сталого розвитку, а також вивчають сучасні підходи для планування та оцінки досягнень результатів з прийнятих зобов'язань у галузі сталого розвитку.



Розділ 1 Парадигма сталого розвитку

Розділ 2 Вимірювання сталості розвитку

РОЗДІЛ 1

Парадигма сталого розвитку

Питання для дискусії:

Ідея сталого розвитку. Етапи еволюції концепції сталого розвитку. Глобальні проблеми для сталого розвитку. Принципи сталого розвитку. Цілі сталого розвитку. Цілі розвитку тисячоліття (ЦРТ). Цілі сталого розвитку (ЦСР) та їх завдання. Складові сталого розвитку. Економічна складова сталого розвитку. Перехід до моделі сталого виробництва та споживання. Зелена економіка. Циркулярна економіка. Справедлива торгівля. Екологічна складова сталого розвитку. Системи екологічного менеджменту. Процедури екологічної оцінки. Екологічна інформація. Екологічна сертифікація. Соціальна компонента моделі сталого розвитку. Людський розвиток. Гідна праця.

Ключові терміни та поняття:

- Ідея сталого розвитку
- Сталий розвиток
- Потреби та обмеження розвитку
- Принципи сталого розвитку
- Цілі сталого розвитку
- Екологічна сталість
- Соціальна відповідальність
- Людський розвиток
- Стала економіка
- Зелена економіка
- Циркулярна економіка
- Відповідальний бізнес
- Стале виробництво
- Стале споживання

1.1 Ідея сталого розвитку

У другій половині ХХ століття людство зіткнулося з усвідомленням того, що потужність економіки, що зросла, демонструє свій руйнівний вплив на навколишнє середовище. Стало очевидно, що більшість запасів природних ресурсів, що використовуються у виробництві та споживанні, можуть бути вичерпані вже в найближчому майбутньому. Особливо це стосується невідновлюваних природних ресурсів – мінеральної сировини і палива. Бурхливе зростання виробничої діяльності призвело до критичного забруднення довкілля. Крім того, чинні пріоритети економічного зростання не забезпечують загальне покращення якості життя людей.

Усвідомлення всепланетних загроз і глобальної системної кризи спонукали світове співтовариство до пошуку інших шляхів розвитку людської цивілізації. В результаті цілеспрямованих зусиль численних високих форумів під егідою ООН за участю наукових кіл, урядів та громадських організацій світу було запропоновано стратегію, яка отримала назву «сталий розвиток» (англ. *sustainable development*) [5].

➤ **Поняття сталого розвитку**

Нова концепція розвитку суспільства базується на трьох вихідних вимогах:

- економічний розвиток не повинен руйнувати природний капітал та навколишнє середовище;
- задоволення потреб сьогодення не повинно обмежувати інтереси майбутніх поколінь;
- економічний розвиток має спиратися на рівність можливостей для всіх, дотримання соціальної справедливості, відповідальності та підзвітності бізнесу та влади перед суспільством.

Ідея сталого розвитку полягає у глобальному 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 прийдешніми поколіннями.

Сталий розвиток – це розвиток, що задовольняє потреби цього покоління і не ставить під загрозу можливості майбутніх поколінь задовольнити власні потреби.

➔ Етапи еволюції концепції сталого розвитку

Процес еволюції концепції сталого розвитку можна умовно поділити на чотири періоди: (1) утвердження ідей екологізації економічного розвитку; (2) формування концепції сталого розвитку; (3) прийняття стратегії сталого розвитку як нової моделі розвитку суспільства; (4) розробка цілей та інструментів управління сталим розвитком. Кожен із цих історичних періодів включає ключові міжнародні події, які суттєво вплинули на розуміння основних принципів, цілей, методів та моделей управління сталим розвитком в усіх сферах діяльності та територій.

Утвердження ідей екологізації розвитку – поч. 1960-х – 1980 рік

Період 1960-х років ознаменувався великою кількістю техногенних аварій. Однак суспільство поки що не було готове до превентивного вирішення проблем довкілля – питання природокористування розглядалися здебільшого у контексті нарощування темпів виробництва та продажів. Ключовими подіями у просуванні ідеї екологізації розвитку стали книга Рейчел Карсон «Безмовна весна» (1962)¹ та стаття Гаретта Хардіна «Трагедія спільного» (1968)², що викликали по всьому світу хвилю вимог до посилення екологічної відповідальності бізнесу та влади. Значний вплив на зміну поглядів щодо дійсної сутності економічного прогресу надали дослідження, ініційовані Римським клубом³. Перші публікації – «Межі зростання» (1972) та «Людство біля поворотного пункту» (1974) довели, що сировинні та енергетичні ресурси планети обмежені і дуже швидко можуть закінчитися, є необхідність якнайшвидшого переходу від практики стихійного саморозвитку економіки до спільних політичних дій на користь свідомого глобального регулювання [56-57].

Всесвітнє визнання екологічних аспектів як основи економічного розвитку було задекларовано Першою конференцією ООН з навколишнього середовища у 1972 році у Стокгольмі. Стокгольмська декларація принципів стала першою великою угодою, яка визнала право людини жити у сприятливому довкіллі і обов'язок його охороняти (Принцип 1), а також відповідальність держав за свою екологічну діяльність (Принцип 21) і транскордонне забруднення (Принцип 22) [6]. Після Стокгольмської конференції увійшли в обіг поняття «екорозвиток» (англ. *ecodevelopment*) та «розвиток без руйнування» (англ. *development without destruction*) [68].

¹Рейчел Карсон (англ. *Rachel Carson*) показала наслідки безладного застосування пестицидів у сільському господарстві та звинуватила хімічну промисловість у згубних впливах на навколишнє середовище, а представників влади – у відсутності контролю діяльності великих корпорацій [44].

²Американський біолог Гаррет Хардін (англ. *Garrett James Hardin*) аналізує практику споживання ресурсів, використання яких не контролюється на світовому рівні – океанів, атмосферного повітря, лісових ресурсів, корисних копалин тощо. Хардін показав, що всі ці ресурси будуть скоро вичерпані, якщо загальний доступ до них не буде регулюватися [51].

³Римський клуб (англ. *Club of Rome*) – провідний аналітичний центр світового рівня, що був заснований у 1968 році італійським вченим і громадським діячем Ауреліо Печчеї. Кожного року організація публікує результати дослідження глобальних проблем, які стоять перед людством, щоб запропонувати рішення, ініціювати дискусії та здійснювати пропаганду сталого розвитку.

Формування концепції сталого розвитку – з 1980 по 1992 рік

Поняття «сталий розвиток» вперше отримало офіційне визначення у доповіді «Всесвітня стратегія охорони природи», підготовленої Міжнародним союзом охорони природи та природних ресурсів у березні 1980 року [58]. Проте найбільш відомим є визначення, що було надано у доповіді «Наше спільне майбутнє» 1987 року, опублікованої Всесвітньою комісією ООН з навколишнього середовища та розвитку, (Комісії Брундтланд). У цілому висновки Комісії Брундтланд зводяться до того, що проблеми екології є наслідком неправильної моделі соціально-економічного розвитку, яка веде до руйнівних екологічних впливів економічної діяльності, поглиблює економічну нерівність та незадоволеність потреб населення. Стратегічною установкою сталого розвитку є задоволення потреб цього покоління, не наражаючи на загрозу можливості майбутніх поколінь задовольняти свої власні потреби [5].

Філософія нового підходу до соціально-економічного розвитку суспільства базується на таких ключових установках :

(1) **потреби**, які задовольняються, повинні в першу чергу враховувати пріоритет загальнолюдських цінностей (наприклад, боротьба з бідністю та голодом);

(2) **обмеження у споживанні** повинні забезпечувати збереження здатності природного середовища задовольняти потреби нинішнього покоління без шкоди для майбутніх поколінь; обмеження будуть зменшуватися і змінюватися у процесі нарощування потенціалу сталого розвитку (у першу чергу техніко-технологічного, інноваційного, економічного та соціально-культурного).

Таким чином, економічне зростання, яке не сприяє або, що ще гірше, підриває можливості відновлення природних ресурсів, веде до деградації довкілля, поверненню до вже віджілих форм господарювання і втрати перспектив для розвитку в майбутньому. Сьогодні в офіційних актах та літературі, практиці державного планування та стратегіях бізнесу використовується більше ста різних дефініцій, які акцентують увагу на найважливіших аспектах сталого розвитку.

Потреби у контексті сталого розвитку – потреби, які планується задовольняти при розробці планів програм та проєктів, повинні в першу чергу враховувати пріоритети загальнолюдських цінностей, а також глобальні та національні програмні цілі і завдання зі сталого розвитку, які встановлені на запланований період.

Обмеження у споживанні – за концепцією сталого розвитку при розробці планів програм та проєктів на різних рівнях управління розвитком потрібно встановлювати обмежування споживання природних і енергетичних ресурсів, що є вичерпні та непоновлювані, забезпечуючи збереження здатності природного середовища задовольняти потреби нинішнього покоління без шкоди для майбутніх поколінь.

Визнання стратегії сталого розвитку як глобальної моделі розвитку суспільства – з 1992 по 2000 рік

Особливе місце у визнанні концепції сталого розвитку зайняла Всесвітня конференція ООН «Планета Земля», що відбулася у Ріо-де-Жанейро 1992 року. За результатами обговорень комплексу глобальних проблем сучасності була прийнята Декларація із захисту навколишнього середовища та сталого розвитку, що закріплює 27 принципів сталого розвитку [7], а також «Порядок денний на 21 століття» [28], який є безпрецедентною програмою політичних зобов'язань у понад 100 областях спільних дій для досягнення соціально-економічного розвитку та скорочення марнотратного споживання природних ресурсів.

Основні висновки конференції у Ріо-де-Жанейро можна звести до таких тезисів:

- проблеми довкілля та соціально-економічного розвитку взаємопов'язані і не можуть вирішуватися окремо;
- необмежене економічне зростання без урахування екологічних цінностей загрожує майбутньому розвитку цивілізації;
- еколого-економічна нестійкість посилюється у зв'язку з переважаючими темпами зростання населення в країнах, що розвиваються, і бурхливим економічним зростанням в промислово розвинених країнах;
- екологічні питання не можуть бути забезпечені без промислового розвитку та покращення соціальної організації суспільства;
- оплата екологічних витрат за рахунок майбутніх поколінь не повинна залишатися основою промислового розвитку;
- промисловий розвиток у всьому світі йде без урахування меж здатності живої природи до її відновлення;
- характер виробництва та споживання у промислово розвинених країнах підриває системи життєзабезпечення світу;
- країни, що розвиваються, не можуть йти шляхом розвитку, який пройшли до свого благополуччя розвинені країни;
- бідність і нерівність є головною причиною екологічних проблем у країнах, що розвиваються;
- скорочення гонки озброєнь дозволить збільшити фінансування заходів у досягненні екологічної безпеки.

Під час Ріо-де-Жанейрського форуму було відкрито для підписання стратегічних глобальних угод – Конвенції про біологічну різноманітність [14] та Рамкової конвенції про зміну клімату [30]. У 1998 році, підтримуючи 10-й принцип Ріо-де-Жанейрської декларації, приймається ще Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості у процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля [Орхуська конвенція] [15] та Кіотський протокол для протидії глобальному потеплінню [16]. Фактично на цьому історичному етапі були остаточно сформульовані принципи, основні механізми та програмні напрямки дій щодо реалізації стратегії сталості розвитку.

Вставка 1.1

Порядок денний на 21 століття: сфери дій

Порядок денний на 21 століття (англ. *Agenda 21*) це: глобальний програмний документ щодо організації партнерства та співробітництва між усіма країнами у сфері найважливіших всесвітніх екологічних та соціальних проблем.

Місцевий Порядок 21 (МП21) є засобом здійснення глобального Порядку денного на 21 століття. Передбачається, що регіон, місто, район або інша муніципальна організація, спираючись на глобальні цілі сталого розвитку та рекомендації Порядку денного на 21 століття, розробляє власну програму дій для досягнення цілей сталого розвитку на своїй території.

Порядок денний на 21 століття, прийнятий Конференцією в Ріо-де-Жанейро, конкретизує дії з управління сталим розвитком:

- **Економічні та соціальні аспекти** – спрямованість переходу на відповідальні моделі виробництва та споживання, що підтримують збереження природних ресурсів, інноваційний розвиток та гідну працю, сталі врегулювання у процесах прийняття соціальних рішень та досягнення сталої поведінки споживачів та усього населення.

- **Збереження та раціональне використання ресурсів** – застосування комплексного підходу до планування та раціонального використання природних ресурсів, а також охорони навколишнього середовища, захисту клімату, біологічної різноманітності та інших аспектів збереження біосфери.

- **Зміцнення ролі основних груп населення** – забезпечення справедливості та рівності у вирішенні проблем окремих груп населення, у тому числі: дітей та молоді, жінок, корінних народів та місцевих громад, трудящих та їх профспілок, сільського та міського населення, наукових та технічних працівників.

- **Засоби здійснення** – формування фінансових ресурсів та механізмів, розвиток екологічно чистих технологій, сприяння освіті та інформуванню населення, освіта та професійна підготовка кадрів, правові документи та механізми.

Джерело: *Порядок денний на 21 століття, глава 28 [28].*

Прикладом регіональної програми сталого розвитку (МП21) є Балтійський порядок денний 21 (англ. *Baltic Agenda 21*) – стратегічний документ, що закріплює пріоритети та принципи сталого розвитку регіону Балтійського моря, прийнятий у 1998 році на VII Конференції міністрів закордонних справ Ради Балтійського моря в Ніборді (Данія) [65].

Розробка цілей та інструментів управління сталим розвитком – з 2000 року

У 2000 році на Саміті тисячоліття, що зібрав 193 держави-члени ООН, було узгоджено та затверджено «Декларацію тисячоліття» [8]. Документ визначив Цілі тисячоліття в галузі розвитку – ЦРТ (англ. *Millenium Development Goals – MDG*), що спрямовані на вирішення головних проблем сучасності, у тому числі подолання бідності та голоду, дискримінації жінок, неграмотності населення та досягнення екологічної стійкості. Цілі тисячоліття охопили період до 2015 року.

Наступний саміт ООН із сталого розвитку, що отримав назву «Ріо+10», відбувся 26 серпня – 4 вересня 2002 року в Йоганнесбурзі (ПАР). Цей саміт прийняв Йоганнесбурзьку декларацію зі сталого розвитку [11] та «План виконання рішень всесвітньої зустрічі на найвищому рівні зі сталого розвитку», який конкретизував завдання, оголошені у «Порядку денному на 21 століття», у практичні дії за напрямками: вода, енергія, охорона здоров'я, сільське господарство та екологія [12].

Рішення Йоганнесбурзького саміту були підтримані низкою міжнародних угод. Зокрема, у 2003 році було прийнято Протокол про стратегічну екологічну оцінку до Конвенції про оцінку впливу на довкілля у транскордонному контексті [29], який став особливо актуальним для України та інших нових держав, що не входять до ЄС.

Ще через 10 років, у червні 2012 року, країни знову зустрілися в Ріо-де-Жанейро на Конференції ООН «Ріо+20», щоб обговорити актуальні проблеми сталого розвитку, зокрема методи досягнення «зеленої» економіки та викорінення багатомірного бідності. Результатом цієї зустрічі було підписання документу під назвою «Майбутнє, якого ми прагнемо» [20]. Документ наголошує, що «зелена» економіка спирається на використання інноваційних технологій та відновлюваних джерел енергії, це дозволить суттєво скоротити викиди вуглецю та масштаби забруднення навколишнього середовища, одночасно сприяючи стійкому економічному зростанню.

Саміт ООН зі сталого розвитку 2015 року приймається новий план дій на період до 2030 року – «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку на період до 2030 року» [27]. Документ викладає 17 Цілей у галузі сталого розвитку та 169 завдань, які носять комплексний характер та забезпечують збалансованість усіх трьох компонентів сталого розвитку: економічного, соціального та екологічного.

Історичні етапи еволюції концепції сталого розвитку:

- ❶ Затвердження ідей екологізації економічного розвитку – поч. 1960-х - 1980 рік.
- ❷ Формування концепції сталого розвитку – 1980-1992 роки.
- ❸ Визнання стратегії сталого розвитку як нової моделі розвитку суспільства – 1992-2000 роки.
- ❹ Розробка цілей та інструментів управління сталим розвитком – 2000 рік - сучасний період.

1.2 Принципи і цілі сталого розвитку

Концепція сталого розвитку є найсміливішим проєктом сучасності, який може вивести світову цивілізацію на новий виток розвитку. У зв'язку з цим важливим завданням є розробка єдиних методологічних підходів та стандартів, які переведуть концепцію сталого розвитку з площини всесвітньої ідеології до конкретних технологій та інструментів управління, які неможливо не виконувати. Загальні принципи та цілі сталого розвитку мають бути вигідними та стати добровільним зобов'язанням для всіх видів діяльності та планування розвитку.

➤ Принципи сталого розвитку

Глобальна сутність сталого розвитку диктує посилення інтеграційних тенденцій у світовому співтоваристві. Незважаючи на відмінності в рівнях соціально-економічного розвитку, культурно-етнічні та інші особливості, концепція сталого розвитку потребує об'єднання зусиль усіх країн та народів на єдиних принципах, що забезпечують економічне зростання за збереження цілісності системи довкілля.

Принципи сталого розвитку не мають чинності закону, але пропонують усім зацікавленим особам гнучкий формат добровільного співробітництва, орієнтований на єдність прав та відповідальності для вирішення сьогоденних глобальних проблем та зміцнення можливостей для розвитку в майбутньому. Оскільки всі явища та взаємодії, що є для суб'єктів діяльності зовнішнім та внутрішнім середовищем, постійно змінюються, принципи сталого розвитку також можуть уточнюватися.

Принципи сталого розвитку спрямовані на встановлення глобального партнерства з метою формування умов та можливостей, які необхідні для посилення відповідальності влади, бізнесу та усіх людей щодо питань природокористування та охорони навколишнього середовища, забезпечення ефективного та сталого виробництва та споживання, реалізації та захисту основних прав людини, у тому числі економічних, екологічних та соціальних.

Декларація Рио-де-Жанейро з навколишнього середовища та розвитку від 1992 року проголосила 27 принципів сталого розвитку, що вимагають прояву політичної волі та партнерства країн, урядів та бізнесу [7].

Принципи сталого розвитку – це сукупність вихідних положень та вимог до розробки та здійснення регулюючих впливів – рішень стратегічного рівня щодо організації економічних процесів та їх окремих фаз, враховуючи цілі з забезпечення якості довкілля та збереження природних ресурсів, прагнучі до соціальної справедливості для всіх людей, включаючи майбутні покоління.

Головні тези Декларації принципів є такими:

- Люди мають право на здорове та плідне життя у гармонії з природою (принцип 1); це право також поширюється на майбутні покоління (принцип 3).
- Держави не тільки мають суверенне право розробляти власні ресурси, але й несуть відповідальність за те, щоб діяльність в рамках їхньої юрисдикції чи контролю не завдала шкоди навколишньому середовищу інших держав (принцип 2).
- Держави приймають ефективні законодавчі акти в галузі навколишнього середовища (принцип 11), у тому числі стосовно відповідальності та компенсації за забруднення та інші екологічні збитки (принцип 13), а також процедур оцінки екологічних наслідків діяльності (принцип 17).
- Усі зацікавлені сторони мають право брати участь у вирішенні екологічних питань; кожна людина має право на доступ до інформації та судовий захист з питань навколишнього середовища (принцип 10).
- Нежиттєздатні моделі виробництва та споживання мають бути ліквідовані (принцип 8).
- Запобіжні заходи повинні вживатися навіть тоді, коли відсутня повна наукова впевненість у загрозі серйозної або незворотної шкоди (принцип 15).
- Забруднювач повинен покривати витрати, пов'язані із забрудненням (принцип 16).
- Проблеми миру, розвитку та охорони навколишнього середовища взаємозалежні та нероздільні (принцип 25).
- Усі держави співпрацюють у вирішенні завдань сталого розвитку, включаючи: викорінення бідності (принцип 5), збереження та відновлення екосистеми (принципи 4 та 7), нарощування наукового потенціалу (принцип 9), створення сталої глобальної економіки (принцип 12) та інших.

Цілі сталого розвитку

Ідеологія та стратегія сталого розвитку конкретизується в глобальних цілях, що приймаються країнами світу під егідою ООН на певний період. Цілі у сфері сталого розвитку встановлюють ключові питання сталого розвитку, містять програмні ініціативи і показники, що мають кількісну оцінку та конкретні терміни виконання.

Цілі розвитку тисячоліття (ЦРТ) – на період до 2015 року

На Саміті тисячоліття 2000 року, в якому прийняли участь 193 країни-члени ООН, підписали Декларацію тисячоліття. Угода визначила вісім Цілей розвитку тисячоліття – ЦРТ (англ. *Millenium Development Goals – MDG*), які включили 21 завдання та 60 конкретних показників у галузі покращення якості життя, стану довкілля та соціально-економічного розвитку [39].

Цілі розвитку тисячоліття включили такі завдання:

- (1) Ліквідувати крайню бідність і голод – скоротити вдвічі частку населення, яке страждає від голоду та має дохід менше 1 долара на день; забезпечити всім повну та продуктивну зайнятість та гідну роботу.

(2) Забезпечити загальну початкову освіту – забезпечити всім можливість отримувати початкову шкільну освіту.

(3) Сприяти рівноправності статей та розширенню прав жінок – ліквідувати нерівність між статями у сфері початкової, середньої та інших рівнів освіти.

(4) Скоротити дитячу смертність – скоротити на дві третини смертність серед дітей віком до п'яти років.

(5) Поліпшити охорону материнського здоров'я – скоротити на три чверті коефіцієнт материнської смертності.

(6) Боротися з ВІЛ/СНІДом, малярією та іншими захворюваннями – зупинити поширення тяжких захворювань та запобігти тенденцію до скорочення їх поширеності.

(7) Забезпечити екологічну стійкість – включити принципи сталого розвитку до національних стратегій та програм; запобігти виснаженню природних ресурсів; скоротити втрату біологічної різноманітності; удвічі покращити доступ до чистої питної води; до 2020 року забезпечити поліпшення життя щонайменше 100 мільйонів мешканців нетрів.

(8) Сформувати всесвітнє партнерство з метою розвитку – розвивати відкриту, регульовану, передбачувану та недискримінаційну торгівлю та фінансову систему; задовольняти особливі потреби найменш розвинених країн; полегшення боргового тягаря бідних країн; розробляти та здійснювати стратегії щодо покращення зайнятості молоді; вживати заходів щодо доступу до нових технологій.

Усі п'ятнадцять років здійснювався моніторинг виконання ЦРТ, що включав щорічні звіти країн і доповіді Генерального секретаря ООН, періодичні аналітичні оцінки індикаторів сталого розвитку спеціальними комісіями ООН.

Мета полягала не стільки в тому, щоб надати вичерпний обсяг інформації по кожному пункту завдань, а в тому, щоб з'ясувати орієнтири і контрольні точки для країн і усіх зацікавлених сторін [26].

У доповіді ООН щодо реалізації ЦРТ за 2015 рік [39] показано суттєвий прогрес у виконанні всіх прийнятих зобов'язань. І хоча нерівність ще зберіглася, а досягнутий прогрес був нерівномірним, досвід глобального програмування дій, охоплюючи усі країни, змінило ставлення до завдань управління розвитком на національному рівні, територій і регіонів, великих корпорацій і малого бізнесу. ЦРТ стали одночасно і орієнтиром, і системою пріоритетів для реалізації стратегії реформ в Україні.

Цілі розвитку тисячоліття на період з 2000 до 2015 року конкретизували вісім напрямків завдань, що в основному стосуються вирішення основних соціальних і екологічних проблем у країнах, що розвиваються.

Цілі сталого розвитку (ЦСР) – на період до 2030 року

Резолюція Генеральної Асамблеї ООН від 25 вересня 2015 року затвердила новий світовий проєкт «Перетворення нашого світу: Порядок денний в області сталого розвитку на період до 2030 року», оголосив нові 17 Цілей сталого розвитку (ЦСР) [27]:

- (1) Повсюдна ліквідація бідності у всіх її формах;
- (2) Ліквідація голоду, забезпечення продовольчої безпеки, покращення харчування та сприяння сталому розвитку сільського господарства;
- (3) Забезпечення здорового способу життя та сприяння благополуччю для всіх у будь-якому віці;
- (4) Забезпечення всеосяжної та справедливої якісної освіти та заохочення можливості навчання протягом усього життя для всіх;
- (5) Забезпечення гендерної рівності, розширення прав та можливостей усіх жінок та дівчат;
- (6) Забезпечення наявності та раціональне використання водних ресурсів та санітарії для всіх;
- (7) Забезпечення доступу до недорогих, надійних, стійких та сучасних джерел енергії для всіх;
- (8) Сприяння неухильному, всеосяжному та сталому економічному зростанню, повній та продуктивній зайнятості, гідній роботі для всіх;
- (9) Створення міцної інфраструктури, сприяння забезпеченню всеосяжної та сталої індустріалізації та впровадження інновацій;
- (10) Зниження рівня нерівності всередині країн і між ними;
- (11) Забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості та стійкості міст та населених пунктів;
- (12) Забезпечення відповідальних моделей споживання та виробництва;
- (13) Вжиття заходів щодо боротьби зі зміною клімату та його наслідками;
- (14) Збереження та раціональне використання океанів, морів та морських ресурсів;
- (15) Захист, відновлення екосистем суші та сприяння їх раціональному використанню, раціональне управління лісами, боротьба з опустелюванням, припинення та обіг назад процесу деградації земель, припинення процесу втрати біологічної різноманітності;
- (16) Сприяння побудові миролюбних та відкритих суспільств на користь сталого розвитку, забезпечення доступу до правосуддя для всіх та створення ефективних, підзвітних та заснованих на широкій участі установ на всіх рівнях;
- (17) Зміцнення коштів та активізація роботи механізмів глобального партнерства на користь сталого розвитку.

Цілі сталого розвитку на період з 2016 по 2030 рік включають сімнадцять цілей, які мають всеосяжний характер і спрямовані на перетворення всього суспільства, а їх бачення спирається на партнерство уздовж усіх завдань розвитку.

Як бачимо Цілі сталого розвитку до 2030 року закладають значну трансформацію завдань бізнесу відносин та споживачів, потребує формування нової моделі управління бізнесом. Комплексний підхід передбачає тісний взаємозв'язок наскрізних елементів завдань, які об'єднують і роблять неподільними економічний, соціальний і екологічний компоненти сталого розвитку.

Консультативний комітет з бізнесу та підприємництва при ОЕСР (ВІАС) опублікував документ, який уточнює завдання та відповідальність бізнесу у світлі нової програми сталого розвитку на період до 2030 року.

По-перше, прогнозується поява нових ніш для розвитку бізнесу, які будуть підтримуватись комплексом організаційних, економічних та фінансових механізмів. До пріоритетних напрямів бізнесу належать, перш за все, енергоефективність та відновлювана енергетика (Ціль 7), водний менеджмент та санітарія (Ціль 6), продовольча безпека та сталий розвиток сільського господарства (Ціль 2).

По-друге, бізнес повинен прийняти на себе сумісні зобов'язання щодо сприяння сталому розвитку. Бізнес закликається до «неухильного, всеосяжного та сталого економічного зростання», «повної та продуктивної зайнятості» (Ціль 8), сприяння забезпечення «всеохоплюючої та сталої індустріалізації та впровадження інновацій» (Ціль 9), збільшення продуктивності сільського господарства (Ціль 2), глобального скорочення відходів виробництва (Ціль 12) тощо.

По-третє, передбачається зміна якості бізнесу. Бізнес буде змушений працювати в умовах скорочення споживання викопного палива та тенденціях значного підвищення частки відновлюваної енергетики у структурі енергоспоживання (Ціль 7). Посилені вимоги до впливу на довкілля та використання природних ресурсів (Цілі 13-15).

Відповідно до бізнесу висувається вимога щодо активізації участі у глобальному та регіональному партнерстві та добровільних ініціативах, націлених на просування ідей корпоративної соціальної відповідальності на користь сталого розвитку (Ціль 17).

По-четверте, передбачена підтримка та розширення «чистого», відкритого та чесного бізнесу. Цілі розвитку включають завдання щодо створення «підзвітних установ на всіх рівнях» та «забезпечення доступу до правосуддя для всіх» (Ціль 16), «чистий» і чесний бізнес стане пріоритетним в інвестуванні (Ціль 7), полегшення доступу до екологічно чистих технологій (Цілі 7, 9).

У грудні 2020 року Кабінет Міністрів України вніс зміни до Регламенту, яким відтепер встановлена необхідність врахування Цілей сталого розвитку у якості орієнтирів при розробленні програмних та прогнозних документів державного рівня. У липні 2020 року Україна під егідою Економічної і соціальної ради ООН представила світовій спільноті перший Добровільний національний огляд стану досягнення Цілей сталого розвитку. У 2021 році запроваджено постійний моніторинг індикаторів досягнення Цілей сталого розвитку.

1.3 Програми і інструменти сталого розвитку

Концепція сталого розвитку відповідає інтегральному вектору еволюції: кожен напрямок діяльності має більш вузькі цілі та завдання, відповідні механізми та інструменти їх реалізації, які, однак, узгоджені між собою та зміцнюють потенціал інших сфер розвитку. Діяльність компанії може вважатися прогресивною лише в тому випадку, якщо вона враховує трилему загальних стратегічних цілей, бере на себе відповідальність за бережне використання обмежених ресурсів, здійснює свою ринкову політику, враховуючи справедливі інтереси зацікавлених сторін та майбутніх поколінь.

➔ Економічна складова сталого розвитку

Економічна складова є стрижнем сталого розвитку, економічним базисом для покращення якості життя та збереження навколишнього середовища. Процес сталого розвитку не зможе набирати сили, якщо економіці бракуватиме динамізму та стабільності, якщо вона страждатиме від стратегічних невизначеностей, макроекономічних диспропорцій, зайвих технічних бар'єрів у сфері підприємництва та торгівлі. Крім того, висувається вимога соціальної справедливості та екологічної сумісності всіх видів економічної діяльності та відносин.

У концептуальному плані перед суспільством поставлено завдання щодо формування сталої економіки (англ. *sustainable economy*). Філософія сталої економіки що викладена у доповіді Комісії Брундтланд «Наше спільне майбутнє» (1987) [5], базується на трьох ключових принципах: (1) економічний розвиток не повинен руйнувати природний капітал та навколишнє середовище; (2) задоволення економічних потреб сьогодення не повинно суперечити інтересам майбутніх поколінь; (3) економічний розвиток має спиратися на рівність можливостей для всіх, дотримання соціальної справедливості, відповідальності та прозорості дій бізнесу та влади перед суспільством.

Характеризуючи сутність сталої економіки, американський економіст Херман Дейлі підкреслює, що класична теорія економічного зростання ґрунтується на фізичному розширенні виробництва та споживання, що веде до збільшення видобутку природних ресурсів для обслуговування цих процесів, до виснаження та забруднення середовища. Сталий розвиток передбачає якісне поліпшення економіки – створення сталого виробництва та споживання у межах існуючого потоку ресурсів, що потребує розуміння цілей розвитку та технологічних новацій [26].

Економічна сталість (англ. *economic sustainability*) – це досягнення стабільно високих економічних результатів для задоволення економічних потреб людей і суспільства в цілому, прагнучі одночасно до попередження диспропорцій з іншими основними цілями розвитку – забезпечення соціальної справедливості та збереження природного середовища на довгострокову перспективу.

Програма сталого розвитку на період до 2030 року визначає Ціль 12, яка включає комплекс завдань із переходу на раціональні моделі виробництва та споживання: «робити більше, краще та з меншими витратами». Стала економіка реалізується за допомогою конкретних механізмів, спрямованих на досягнення соціально та екологічно відповідальної поведінки як виробників, так і споживачів. Головними є принципи зеленої економіки, циркулярної економіки та сталої торгівлі.



Рисунок 1.1 – Складові моделі сталого економічного розвитку [26]

Зелена економіка

Концепція зеленої економіки виходить із завдань екологізації економіки, проте має більш ширшу політичну спрямованість – реалізує відповідальне ставлення до використання ресурсів задля забезпечення справедливих можливостей розвитку для усіх, зокрема майбутніх поколінь. Перехід до зеленої економіки проявляється у появі «проривних» інноваційних галузей діяльності, кардинальному «озелененні» процесів виробництва та продуктів, формуванні «зелених» споживчих переваг та ринків [70]. У 2017 році ЮНЕП визначив 10 основних видів діяльності, які є фокусом уваги «зеленої» економіки: будівництво, аграрний сектор, енергозбереження, рибальство, лісовиробництво, водозабезпечення, виробництво, відходи, транспорт, туризм [71].

Зелена економіка – це конкурентоспроможні бізнес-моделі, ресурси, способи виробництва та споживання, які одночасно вирішують глобальні екологічні проблеми.

Циркулярна економіка

Ключова ідея циркулярної економіки полягає у переосмисленні лінійної моделі «взяти-використати-спожити-викинути» і переході до нової економічної моделі, за якою продукти виробляються та просуваються таким чином, щоб їх можна було використовувати багаторазово, зводячи до мінімуму відходи індустріальної сфери [45]. В умовах обмеження невідновлюваних ресурсів стала економіка дотягатиметься за допомогою природо-, матеріало-, енергозберігаючих технологій, рециклінгу, максимально повторного використання матеріалів та глибокої переробки відходів.

Циркулярна економіка заснована на таких принципах [47]: (1) прагнення до повернення та повторного використання сировинних компонентів та матеріалів у виробничих циклах; (2) запобігання або мінімізація утворення відходів у споживанні та виробництві, розширення їх використання у господарській діяльності; (3) підвищення енергоефективності і перехід до відновлюваних джерел енергії; (4) перехід до технологій, що зменшують споживання природних ресурсів та викопного палива; (5) розширення функціонального обслуговування, що сприяє збереженню високої корисності продукту та продовженню терміну його життя; (6) залучення до процесу циркулярності усіх зацікавлених осіб уздовж ланцюгу створення вартості та кінцевих споживачів.

В 2012 році Європейська комісія прийняла «Маніфест для ресурсоефективної Європи» [48], а 2 грудня 2015 року публікує Повідомлення «Замкнений цикл – План дій ЄС з циркулярної економіки» [49]. У документі зазначено, що цей план буде сприяти досягненню Цілей сталого розвитку (ЦСР) до 2030 року, зокрема Цілі 12 щодо забезпечення переходу до моделей сталого споживання та виробництва. В документі Єврокомісії «На шляху до циркулярної економіки: Програма нульових відходів для Європи» від 25 вересня 2014 року підкреслюється, що циркулярна економіка є основою управління ресурсами в рамках Стратегії для розумного, сталого та всеохоплюючого зростання (англ. *Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth*) [50].

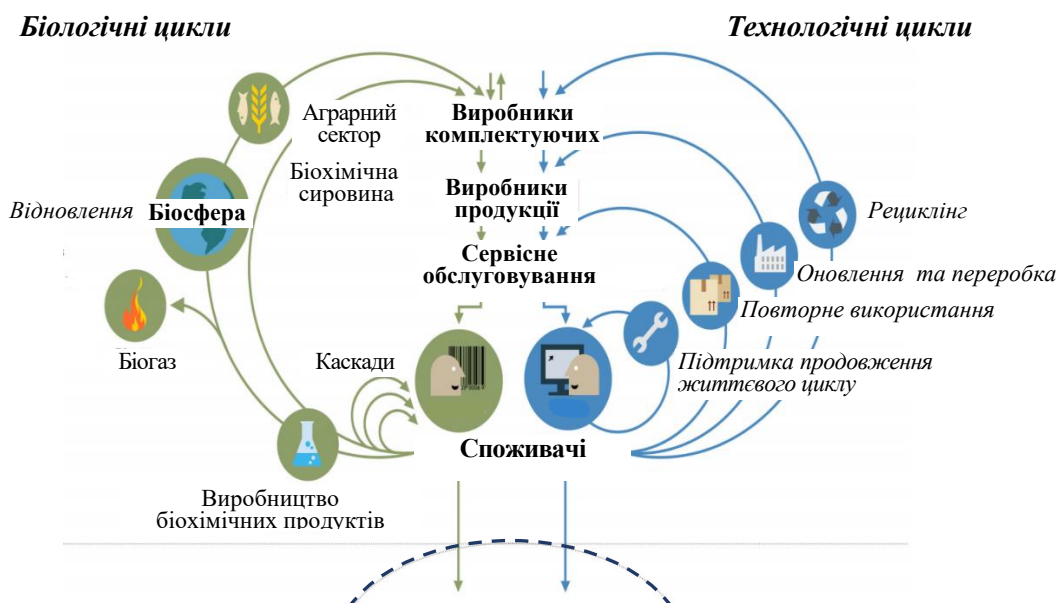
На рис. 1.2 показано, що циркулярна економіка розрізняє процеси споживання і використання, посилює акценти на функціональному обслуговуванні, при якому продавці все більше переходять на надання функціональних послуг – продають використання продуктів, а не їхнє кінцеве споживання. Повторне використання продукту може відбуватися в первісному вигляді, з посиленням або змінами властивостей. Це може мати також вигляд, який Walter R. Stahel називає «каталітичними продуктами»; наприклад, відпрацьована вода може використовуватися у якості охолоджуючого або підігрівного середовища в іншому технологічному процесі [76].

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.

Принцип 1 Збереження і покращення природного капіталу



Принцип 2 Оптимізація використання ресурсів і матеріалів



Принцип 3: Мінімізація впливу і підвищення ефективності споживання

Мінімізація систематичних втрат і негативних впливів

Рисунок 1.2 – Принципи циркулярної економіки [45]

Справедлива торгівля

У 2016 році ЮНКТАД опублікувала Доповідь «Торгівля в інтересах сталого розвитку: торгівля, доступ на ринки і забезпечення сталого розвитку», в якій визначила, що торгівля повинна грати роль економічної і соціальної рушійної сили, сприяти скороченню масштабів бідності, забезпеченню доступними і якісними продуктами харчування, а також включенню інтересів соціально відчужених груп людей до завдань стабільного, інклюзивного та сталого зростання [69].

Торгівля в інтересах сталого розвитку (англ. *sustainable trade*) – організація торгових процесів і операцій таким чином, що сприяє справедливому розподілу та відповідальному споживанню матеріальних благ, просуванню «зелених» технологій, екологічних товарів та послуг, у тому числі демонстрація підтримки міжнародних стандартів у галузі екологічного, соціального та трудового, регулювання.

➔ Екологічна складова сталого розвитку

Людська діяльність повинна вестися таким чином, щоб мінімізувати її вплив на навколишні біологічні та фізичні системи, зберігаючи їх цілісність та здатність до самовідновлення, тобто необхідно забезпечити кількісну та якісну екологічну стійкість навколишнього середовища, включаючи також створене людиною середовище. У доповіді ЮНЕП «Глобальна екологічна перспектива – GEO, 2012» виділяються загальносвітові екологічні теми, які потребують особливої уваги для досягнення цілей сталого розвитку, зокрема водні ресурси, біорізноманіття, зміна клімату, земельні ресурси, хімічні речовини/відходи тощо [72].

Договір про функціонування Європейського Союзу (ст. 191) закріплює принципи екологічної політики ЄС (англ. *Environmental Policy of the European Union*) – субсидіарність, превентивність дій, обережність, екологічна орієнтованість будь-якої діяльності, «забруднювач платить». Відповідно на рівні підприємства екологічна сталість вимірюється з використанням таких груп показників: ресурсозбереження, запобігання забрудненню та управління відходами, екологічний контроль ризиків і відновлення природного середовища, вплив на ланцюги створення вартості, співпраця з місцевими громадами і зацікавленими сторонами. Разом з тим екологічна складова сталого розвитку має й специфічні інструменти управління розвитком. До таких відносяться системи екологічного менеджменту, процедури екологічної оцінки, система екологічної інформації, екологічна сертифікація та маркування, ін.

Системи екологічного менеджменту

Принципи і процедури систем екологічного менеджменту викладено у серії міжнародних стандартів ISO 14000, більшість із яких адаптовані в Україні як національні стандарти [60]. Впровадження системи екологічного менеджменту дає змогу послабити потенційно несприятливий вплив діяльності на довкілля протягом усього життєвого циклу створення продукту, а також планувати діяльність з урахуванням екологічних інтересів усіх заінтересованих сторін. ISO 14001 пропонує такі складові екологічної політики підприємства: зобов'язання щодо мінімізації впливів на навколишнє середовище діяльності, продукції чи послуг; поліпшення виробничих процесів для зменшення забруднення навколишнього середовища; дотримання вимог законодавства і впровадження добровільних екологічних стандартів; формування ресурсів і можливостей для виконання екологічних показників; документальне оформлення, впровадження і підтримка своїх екологічних зобов'язань; формування системи екологічної інформації, що повинна бути відкритою всім зацікавленим особам і широкій громадськості [53].

Екологічний менеджмент – вид менеджменту, який спрямований на дотримання обов'язкових вимог природоохоронного законодавства та добровільних екологічних ініціатив, а також на розробку й реалізацію відповідних цілей, стратегій і показників.

Процедури екологічної оцінки

Екологічна оцінка – процедура оцінки впливу на довкілля діяльності, що здійснюється або планується. Розрізняється два види повноцінних процедур: екологічна оцінка рішень проєктного рівня (англ. *Environmental Impact Assessment, EIA*) та екологічна оцінка стратегічних планів і програм розвитку (англ. *Strategic Environmental Assessment, SEA*). Обидві процедури являють собою комплекс взаємопов'язаних і відносно самостійних процедур, які включають аналіз і оцінку можливих екологічних наслідків запланованої діяльності для прийняття превентивних рішень, а також передбачають участь громадськості і моніторинг дій з виконання рекомендацій оцінки [59].

Інститути екологічної оцінки розвивалися на основі ряду фундаментальних міжнародних угод, що визначили методологічні підходи до інтеграції цілей сталого розвитку в офіційні рішення та проєкти, що стосуються планування розвитку. Головними з них є Конвенція ООН з оцінки впливу на навколишнє середовище в транскордонному контексті (Конвенція Еспоо, 1991), Декларація з навколишнього середовища і розвитку (Декларація Ріо-де-Жанейро, 1992), Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень і доступ до правосуддя з питань, що стосуються навколишнього середовища (Орхуська конвенція, 1998), Декларація зі сталого розвитку (Йоганнесбурзька декларація, 2002), Протокол про стратегічну екологічну оцінку до Конвенції Еспоо (Протокол про СЕО, 2003).

У 2015 році Україна розпочала реформування сфери екологічної оцінки у контексті євроінтеграційного процесу. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (2017) впроваджує належну процедуру оцінки нових проєктів чи суттєвих змін до них на рівні окремих організацій та дій. Закон умовно поділяє проєкти з планованої діяльності, що підлягають оцінці, на дві категорії. Висновки до першої групи об'єктів (нафто- та газо-переробні заводи, теплові електростанції, чорна та кольорова металургія, деякі види хімічного виробництва тощо) готує уповноважений центральний орган. Висновки до другої категорії проєктів (видобувна промисловість, енергетичну промисловість тощо) готує уповноважений територіальний орган.

Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» поширюється на документи загальнодержавного і місцевого рівня з планування розвитку (плани, програми, цільові програми, включаючи будь-які зміни до них), що можуть впливати на стан екологічної рівноваги та здоров'я населення на території України та її регіонів.

Екологічна оцінка (англ. *Environmental Assessment, EA*) – процедура оцінки впливу на довкілля діяльності, що здійснюється або планується. Метою процедури є підготовка інформації про можливі негативні екологічні наслідки діяльності, яка надається компетентному органу для прийняття рішень щодо можливості здійснення або необхідності обмеження дій з цієї діяльності.

Екологічна інформація

Відповідно до Орхуської конвенції екологічна інформація (англ. *environmental information*) означає будь-яку інформацію в письмовій, аудіовізуальній, електронній чи іншій матеріальній формі, що характеризує: (а) стан складових навколишнього середовища (повітря і атмосфера, вода, ґрунт, земля, ландшафт і природні об'єкти, біологічне різноманіття та його компоненти, ін.); (б) фактори (речовини, енергія, шум і випромінювання, а також діяльність або заходи, політику, законодавство, плани і програми тощо), що стосуються впливу на навколишнє середовище відповідно пункту (а); (в) стан здоров'я та безпеки людей, умови життя людей, стан об'єктів культури і споруд тією мірою, якою на них впливає або може вплинути стан складових навколишнього середовища або через ці складові, фактори і т.д. відповідно (б) [15].

Екологічна інформація є невід'ємною основою системи екологічного менеджменту, що впроваджуються на підприємствах для підвищення екологічної безпеки і реалізації принципів сталого розвитку. Інформаційна система екологічного менеджменту збирає та обробляє дані про екологічні впливи, що викликаються кожним операційним процесом або діями, зокрема на стадії закупівлі, проектування, виробництва, транспортування, продажів і маркетингу, використання, сервісних послуг, здійснення рециркуляції та обслуговуючих операцій.



Рисунок 1.3 – Екологічна інформація в системах екологічного менеджменту [26]

Екологічна сертифікація

Екологічна сертифікація (англ. *environmental certification*) – це процедура, яка здійснюється третьою незалежною стороною з метою доведення того, що об'єкт сертифікації відповідає об'єкту вимогам, встановленим певним стандартом.

Згідно із Законом України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» об'єктом оцінки відповідності може бути продукція (речовина, препарат або товар, виготовлений у ході виробничого процесу) чи послуга, виробнича установка чи процес, система, персонал тощо, до яких застосовується оцінка відповідності. За ст. 24 Закону добровільна оцінка відповідності певним екологічним стандартам здійснюється на добровільних засадах, що сприяє гармонізації ділових інтересів з цілями сталого розвитку. Органом з оцінки відповідності повинен мати відповідну акредитацію на здійснення діяльності з оцінки відповідності, включаючи калібрування, випробування, сертифікацію та інспектування.

Акредитація в Національному агенстві з акредитації України (НААУ) на відповідність ДСТУ EN ISO/IEC 17065:2014 (ISO/IEC 17065:2012, IDT) Оцінка відповідності. Вимоги до органів з сертифікації продукції, процесів та послуг, – підтверджує компетентність як органу з оцінки відповідності, за схемою сертифікації згідно ISO 14024. Сертифікат відповідності або будь-який інший документ, що підтверджує виконання заданих вимог, які стосуються об'єкта оцінки відповідності, надає особі чи органу право використання екологічних маркувань для своїх виробів чи послуг згідно з правилами програми екологічного маркування.

Добровільна екологічна сертифікація сприяє гармонізації ділових інтересів з цілями сталого розвитку. Мотивами, що спонукають компанії до запровадження добровільної екологічної сертифікації, є: (1) реляційна мотивація – екологічно свідомий менеджмент допомагає досягти достатньої соціальної легітимності та захистити бізнес-інтереси через покращення взаємовідносин із зацікавленими сторонами; (2) операційна мотивація – сертифікація передбачає цілеспрямовані дії щодо підвищення ресурсозбереження, енергоефективності, зменшення відходів виробництва тощо; (3) комерційна мотивація – екосертифікація допомагає збільшити продажі товарів та покращити позиції на ринку [26].

Добровільна екологічна сертифікація (англ. *voluntary environmental certification*) – процедура підтвердження відповідності об'єкту сертифікації (продукції, процесів, систем, персоналу тощо) встановленим екологічним критеріям, що ініціюється суб'єктами господарювання добровільно на підставах вільної конкуренції. Метою добровільної екологічної сертифікації є надання впевненості всім зацікавленим сторонам, що об'єкт сертифікації відповідає екологічним критеріям за певним добровільним стандартом, передбачаючим вимогу чи можливість здійснення екологічної сертифікації та маркування.

➔ Соціальна компонента сталого розвитку

В Порядку денному зі сталого розвитку на період до 2030 року наголошується, що сталий розвиток базується перш за все на соціальних новаціях – досягненні рівності доступу до економічних можливостей, визнання прав людини на якісне довкілля та прагнення соціальної справедливості [27]. Передбачається, що всі економічні цілі та завдання розвитку включають соціальний контекст та гуманістичну спрямованість, тобто захист загальнолюдських цінностей, включаючи свободу, рівність, толерантність, повагу до природи у її різноманітті та відповідальність за свої дії.

Стратегія сталого розвитку змінила так звані класичні пріоритети економічного розвитку, за якими люди розглядалися переважно як об'єкти управління та трудові ресурси в системі виробництва. Сьогодні успіх розвитку регіону, країни, бізнес структури не може вимірюватися лише рівнем досягнутих економічних показників, ще необхідна демонстрація зусиль щодо подолання всіх видів нерівності та дискримінації, особливо у сфері праці та інших прав людини, включаючи захист її екологічних, соціальних та культурних прав. Можна виділити три взаємозалежні напрями зусиль щодо формування соціально сталого суспільства: (1) гідна праця; (2) людський розвиток; (3) соціальна справедливість та відповідальність [26].

Гідна праця

Міжнародна організація праці (МОП) визначає поняття «гідна праця» за 6 вимірами: (1) інклюзивність (доступність) праці; (2) свобода праці (виключення примусової та дитячої праці, т. д.); (3) продуктивність та справедливість оплати праці; (4) рівність та відсутність дискримінації у сфері праці; (5) безпека праці; (6) гідність, представництво та діалог у сфері організації праці.

Міжнародна організація праці (МОП) прийняла «Рекомендації щодо справедливого переходу до екологічно сталої економіки та суспільства для всіх», у яких соціальний діалог і трипартизм пропонуються невід'ємними інструментами гідної праці. Справедливий перехід до «зеленої» економіки має супроводжуватися створенням простору для ведення переговорів представниками працівників, роботодавців та урядів щодо ефективної політики забезпечення справедливих можливостей і створення «зелених» робочих місць [52].

Гідна праця (англ. *decent work*) – повна та продуктивна зайнятість, свобода вибору та справедливий рівень оплати, безпека, гідність та діалог.

Справедливий перехід (англ. *just transition*) – системи політичних заходів на різних рівнях управління, що дає змогу вчасно використовувати нові можливості та подолати ймовірні проблеми, пов'язані із процесом інтеграції елементів екологізації, соціального розвитку і досягнення показників гідної праці.

Людський розвиток

Сталий розвиток – це насамперед питання соціальної справедливості, які розглядаються усередині поколінь та між ними. Загалом майже половина цілей сталого розвитку на період до 2030 року прямо спрямована на аспекти підвищення якості життя та розширення можливостей для *людського розвитку*, охоплюючи показники тривалості життя, грамотності та доступу до ресурсів розвитку.

Вимірювання людського розвитку підтримує свободу благополуччя і свободу суб'єктності, що в цілому взаємодоповнюються, але не перебувають у прямій кореляції. З метою аналізу стану та динаміки людського розвитку умовно виділяють три його характеристики: функції, потенціальні можливості та суб'єктність.

Функції – це різні дії і стан, що є цінними з точки зору очікувань особистості, такі як щастя, повноцінне харчування і добре здоров'я, а також самоповага і участь в житті суспільства. Потенційні можливості – різні набори функцій (дій і стану), які особистість може досягти за певних умов. Суб'єктність – це те, що особистість вільна робити і досягати, праг вважає для себе важливими.

В щорічних звітах ПРООН «Доповідь про людський розвиток», що публікуються з 1990 року, аналізується індекс людського розвитку (англ. *Human Development Index, HDI*) – композитний показник, що зосереджується на трьох основних вимірах людського розвитку: здатність людини вести довгий і здоровий спосіб життя, здатність здобувати знання і здатність досягати гідного рівня життя [26].

Індекс HDI вимірювання багатьох характеристик, які дуже часто аналізуються у різних звітах окремо: (1) показник очікуваної тривалості життя при народженні (англ. *Life Expectancy at Birth, LEB*); (2) показник доступності освіти: а) показник очікуваної тривалості початкової освіти (англ. *Expected Years of Schooling, EYS*); б) показник середньої тривалості навчання (англ. *Mean Years of Schooling, MYS*); (3) індекс матеріального благополуччя (англ. *Material Wellbeing Index*); індекс корегування людського розвитку з урахуванням нерівності (англ. *Inequality-adjusted Human Development Index, IHDI*); індекс корегування з урахуванням гендерної нерівності (англ. *Gender Inequality Index, GII*); індекс багатовимірної бідності (англ. *Multidimensional Poverty Index, MPI*) – розраховується лише для групи країн, що розвиваються. У 2014 році було введено ще один індекс: індекс гендерного розвитку (англ. *Gender Development Index, GDI*).

За результатами розрахунку індексу HDI за 2020 рік Україна перебуває на 74 позиції за піднявшись з 2019 року на 14 позицій. Загалом у рейтингу є 189 позицій. До першої трійки потрапили Норвегія, Ірландія і Швейцарія.

Людський розвиток (англ. *decent work*) – це процес і результат розширення діапазону вибору людей, який обумовлений тим, що вони набувають все більший потенціал і можливості для свого розвитку

Висновки

- ① Сьогодні, коли техніко-економічна могутність людства значно перевершила досягнутий ним рівень організації своєї діяльності та політичного мислення, світова спільнота дійшла висновку про необхідність об'єднати зусилля країн для загального переходу на модель сталого розвитку.
- ② Ідея сталого розвитку полягає в тому, щоб забезпечити безперервний та збалансований прогрес усіх аспектів діяльності людства у просторово-часовій єдності, не руйнуючи природно-ресурсну основу розвитку, дотримуючись соціальної справедливості та відповідальності перед сьогоденням та майбутніми поколіннями.
- ③ Процес еволюції концепції сталого розвитку можна умовно поділити на чотири етапи: (1) утвердження ідей екологізації економічного розвитку; (2) формування сучасної концепції сталого розвитку; (3) ухвалення стратегії сталого розвитку як нової моделі дій з розвитку суспільства; (4) розробка механізмів та інструментів управління сталим розвитком.
- ④ Ідеологія і стратегія сталого розвитку конкретизується у програмних цілях, які охоплюють усі аспекти розвитку, кількісно оцінюються та мають терміни виконання. 17 Цілей сталого розвитку на період 2015-2030 років мають всеосяжний та інтегрований характер, спрямовані на побудову економіки сталого типу, вирішуючи у комплексі соціальні та екологічні завдання.
- ⑤ Економіка сталого розвитку реалізується за допомогою низки механізмів та інструментів, серед яких вирішальну роль відіграють «зелена» економіка, принципи циркулярної економіки та торгівля для сталого розвитку, що заохочує справедливість розподілу матеріальних благ.
- ⑥ Соціальна складова сталого розвитку охоплює цілі підвищення якості життя та розширення можливостей для людського розвитку, у тому числі – підвищення добробуту людей, розширення прав та можливостей для розвитку, побудова справедливих відносин у суспільстві та забезпечення гарантій щодо дотримання рівності щодо доступу до можливостей.
- ⑦ Екологічна складова стратегії сталого розвитку передбачає вжиття заходів щодо зниження антропогенного навантаження на навколишнє середовище, розширення доступу до екологічної інформації, забезпечення участі громадськості у процесах прийняття рішень та доступу до правосуддя з питань, пов'язаних з аспектами екології.
- ⑧ Глобальне партнерство формує механізми допомоги і сприяння нарощуванню потенціалу сталого розвитку у галузях знань, досвіду, технологій та фінансових ресурсів та обміну ними, особливо у країнах, що розвиваються.
- ⑨ Враховуючи глобальні тренди зі сталого розвитку, компанії все більше схильні долучатись до різних форм партнерства з іншими гравцями у ринку, а також з урядовими та громадськими організаціями.

Питання для самоконтролю і завдання

Продовжити наступні визначення:

- Ідея сталого розвитку полягає у.....
- Принципи сталого розвитку спрямовані на
- ЦСР 12 охоплює такі основні завдання:
- Фокусами уваги «зеленої» економіки є
- Ключова ідея циркулярної економіки полягає у
- Ознаками сталої торгівлі є
- Справедливий перехід до сталого розвитку полягає у
- Інструментами управління екологічно сталим розвитком є
- Вигоди партнерства у глобальних виробничо-збутових ланцюгах полягає у.....

Завдання для виконання у класі:

- 1 Поясніть, які глобальні цілі сталого розвитку (див. вставку 1.1) є найбільш актуальними на рівні управління:
 - розвитком економіки України / вашого регіону;
 - розвитком профільних галузей;
 - управління виробничим підприємством.Оцініть силу впливу завдань сталого розвитку за 5 бальною шкалою на кожному рівні управління розвитком. Складіть карту-схему, що порівнює сили їх впливу на кожному рівні управління розвитком.
- 2 Виділіть 10 основних питань зі сталого розвитку, які ви б запропонували внести до стратегії розвитку вашого регіону / міста / села.
- 3 На прикладі певного виробничого підприємства з вашого регіону поясніть цілі та завдання Цілі 7 (див. вставку 1.2), які потрібно вирішити у найближче майбутнє.
- 4 Поясніть, які проблеми сталої економіки (див. рис. 1.1) є найбільш актуальними для України / вашого регіону / певної галузі / виробничого підприємства. Аргументуйте можливі шляхи «озеленення» виробництва та споживання на промисловому підприємстві, а також споживання на рівні кінцевого споживача.
- 5 Конкретизуйте можливі варіанти заходів з циркулярної економіки (див. рис. 1.2) у вашому регіоні та на прикладі певної корпорації для вирішення проблем:
 - збереження і покращення природного капіталу;
 - оптимізації використання ресурсів і матеріалів;
 - мінімізації впливу і підвищення ефективності кінцевого споживання.
- 6 Виділіть основні соціальні проблеми, які є критичними для політики сталого розвитку України / вашого регіону / енергетичної галузі / управління виробничим підприємством.

РОЗДІЛ 2

Вимірювання сталості розвитку

Питання для дискусії:

Індикатори сталого розвитку. Системи показників зі сталого розвитку. ОЕСР система індикаторів сталого розвитку. ОЕСР індикатори для вимірювання сталості виробничих підприємств. Індикатори сталого розвитку Комісії ООН зі сталого розвитку. Інтегральні індекси сталого розвитку. Індикатори економічної сталості. Макроекономічні показники сталого розвитку. Система індикаторів економічної сталості за КСР. Методики оцінки циркулярності бізнесу. Індикатори екологічної сталості. Система індикаторів екологічної сталості за ОЕСР. Індикатори соціального розвитку. Глобальні індикатори сталого соціального розвитку. Показники сталості соціального розвитку на рівні підприємства.

Ключові терміни та поняття:

- Індикатори сталого розвитку
- Системи показників зі сталого розвитку
- Інтегральні індекси сталого розвитку
- Макроекономічні показники сталого розвитку
- Індикатори економічної сталості
- Аналітична схема «Рушійні сили-Тиск-Стан-Впливи-Реагування»
- Індикатори екологічної сталості
- Індикатори соціального розвитку

2.1 Індикатори сталого розвитку

Існує два основних підходи до вимірювання сталості розвитку. Перший підхід полягає у побудові розгорнутої програми показників, кожен з яких оцінює вирішення окремих завдань у комплексі цілей сталого розвитку. Другий підхід передбачає використання єдиного інтегрального індексу, що за певною методикою об'єднує стандартизовані показники з оцінки стану різних сфер розвитку [26].

➤ Програми показників зі сталого розвитку

Прикладом програмного підходу є широко визнані індикатори сталого розвитку Організації економічного співробітництва та розвитку – ОЕСР (англ. *OECD Sustainable Development Indicators*) і індикатори сталого розвитку Комісії ООН зі сталого розвитку – КСР (англ. *SD Indicators of Sustainable Development*) [61].

ОЕСР система індикаторів сталого розвитку

Система індикаторів ОЕСР 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. Система індикаторів ОЕСР є основою аналізу сталості розвитку країн-членів ЄС, що виконується Євростатом, в оглядах природоохоронної діяльності та інших аналітичних роботах для моніторингу процесів інтеграції економічних та природоохоронних аспектів управління.

Вставка 1.2 демонструє модель індикаторів сталого розвитку виробничих підприємств, що була розроблена ОЕСР (англ. *Sustainable Manufacturing Indicators*). Модель застосовує 18 найважливіших кількісних показників, що простежують принципи зеленого виробництва і промислового споживання у трьох фазах виробництва – на вході, здійснення операцій та на виході системи. Розширена модель ОЕСР також широко використовується для того, щоб точніше вимірювати впливи виробничої діяльності основних гравців у ланцюгах створення вартості.

Індикатори сталого розвитку (англ. *Sustainable Development Indicators, SDIs*) – показники, які розраховуються за комплексом даних про стан економічних, соціальних та екологічних змін, що дозволяють у сукупності оцінювати прогрес щодо виконання цілей та завдань сталого розвитку.

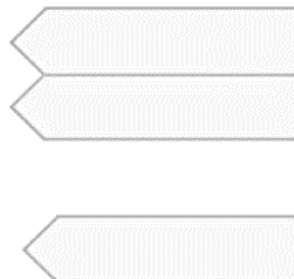
Вставка 2.1

ОЕСР індикатори для вимірювання сталості виробничих підприємств

Модель ОЕСР індикаторів сталого розвитку (англ. *Sustainable Manufacturing Indicators*) була розроблена, щоб допомогти вимірювати, оцінювати та контролювати впливи на навколишнє середовище певного підприємства як відправної точки сталого виробництва і споживання [62].



Впливи на вході



- I1 Інтенсивність непоновлюваних ресурсів
- I2 Інтенсивність обмежених речовин
- I3 Перероблений або повторний вміст складових



Операції

- O1 Інтенсивність споживання води
- O2 Енергоємність
- O3 Відновлювана частка енергії
- O4 Інтенсивність парникових газів
- O5 Інтенсивність відходів
- O6 Інтенсивність викидів в повітря
- O7 Інтенсивність скидання оборотних вод
- O8 Використання природних земель



Продукти

- P1 Перероблений / повторно використаний вміст
- P2 Утилізація продуктів
- P3 Вміст поновлюваних матеріалів
- P4 Вміст непоновлюваних матеріалів
- P5 Обмежений вміст шкідливих речовин
- P6 Інтенсивність споживання енергії
- P7 Інтенсивність викидів парникових газів

Модель ОЕСР містить три групи показників сталості виробничої діяльності. Індикатори групи I оцінюють рівень відповідальності на етапі використання ресурсів, далі індикатори групи O відстежують впливи на навколишнє середовище застосованих технологічних процесів. Третя група індикаторів покликана оцінювати сталість результатів діяльності.

Джерело: OECD Sustainable Manufacturing Indicators (2020). Better Policies for better lives. Overview of the OECD Sustainable Manufacturing Indicators.

Індикатори сталого розвитку Комісії ООН зі сталого розвитку

Система індикаторів КСР вважається однією з найповніших за охопленням, включає набір з 50 основних показників, які можна розгортати ще у 96 показників сталого розвитку. Індикатори КСР служать в якості основи для всеоб'ємної та диференційованої оцінки сталого розвитку на рівні країн [46].

Вся система показників розбита на чотири основні групи: (1) індикатори економічної сталості розвитку; (2) індикатори екологічної сталості розвитку; (3) індикатори соціального розвитку; (4) індикатори інституційних аспектів сталості.

➤ Інтегральні індекси сталого розвитку

Інтегральні індекси широко використовуються для комплексного вимірювання та моніторингу сталості окремих аспектів діяльності або усій системи на глобальному чи регіональному рівнях або на рівні корпорацій.

Загальний методичний підхід до розробки індексів інтегрального вимірювання сталого розвитку має три етапи:

- агрегування соціальних, економічних та екологічних даних до проміжних індикаторів;
- агрегування проміжних індикаторів до індикаторів стану соціальної, економічної та екологічної підсистем;
- агрегування індикаторів до індексів сталого розвитку систем.

На глобальному рівні розраховують та оцінюють, наприклад, такі індекси у сфері сталого розвитку: індекс інновацій (англ. *Innovation Index*), індекс людського розвитку (англ. *Human Development Index*), індекс сталості й економічного добробуту (англ. *Index of Sustainable and Economic Welfare*), зведений індекс ефективності сталості (англ. *Composite Sustainability Performance Index*), індекс сталості міст (англ. *Urban Sustainability Index*) та ін.

Найбільш відомим прикладом інтегрального індексу сталого розвитку є індекс Цілей сталого розвитку (Індекс ЦСР), що запропонований ООН для вимірювання сталості розвитку на рівні країн. Індекс ЦСР — це теоретичне значення, яке можна використовувати для кількісної оцінки досягнення 17 цілей в області сталого розвитку. У Звітах ООН про сталий розвиток за 2022 рік надаються індекси ЦСР та інформаційні панелі для всіх держав-членів ООН¹.

¹Методика розрахунку глобального індексу ЦСР була розроблена приватним фондом Bertelsmann та Мережею рішень для сталого розвитку (SDSN) і запропонована Генеральним секретарем ООН Пан Гі Мунем у Нью-Йорку на політичному форумі високого рівня у якості загального підходу для моніторингу сталого розвитку усіх країн. Метою глобального індексу ЦСР є використання єдиного методичного підходу для моніторингу та порівняння результатів зусиль країн за глобальною програмою 17 Цілей сталого розвитку.

2.2 Індикатори економічної сталості

Перехід на модель сталої економіки передбачає обмеження обсягу споживаних природних ресурсів, особливо невідновних, і зменшення тиску на навколишнє середовище вздовж усього ланцюга створення вартості, що приносить чистий прибуток всім учасникам економічної діяльності та сприяє підвищенню якості життя населення. Економічне зростання, яке не сприяє або, що ще гірше, підриває можливості відновлення природних ресурсів, є серйозною загрозою для суспільства, веде до втрати перспектив розвитку в майбутньому [26].

➔ Макроекономічні показники сталого розвитку

Починаючи з 1960-х років все більше визнається необхідність коригування традиційних макроекономічних показників, в першу чергу ВВП і ВНП, щоб віддзеркалити справжній рівень добробуту країни, враховуючи стан її соціального і екологічного розвитку. Прикладами макропоказників економічної сталості є:

- Показник економічного добробуту (англ. *Measure of Economic Welfare, MEW*), який корегує ВНП, враховуючи впливи економічної діяльності, у тому на довкілля².
- Індекс сталої економічного добробуту (англ. *Index of Sustainable Economic Welfare, ISEW*) – розвиває ідеї попереднього показника, коригуючи ВВП з урахуванням ширшого спектру шкідливих наслідків економічного зростання та вартості державних витрат на оборону³.
- Індикатор справжнього прогресу (англ. *Genuine Progress Indicator, GPI*) – є продовженням ідеї ISEW. За логікою методу сума благ, яку людина або економіка споживають протягом одного життєвого періоду, не може зменшувати рівень добробуту в майбутньому⁴.
- Справжні заощадження (англ. *Genuine (Domestic) Savings, GS*) – коригує ВВП і показує величину реальних національних заощаджень після належного обліку виснаження природних ресурсів і збитків від забруднення навколишнього середовища⁵.

Індикатори економічної сталості (англ. *economic sustainability indicators*) – в широкому використанні це показники, що оцінюють рівень відповідності економічної політики принципам сталого розвитку.

²Показник був розроблений у 1972 році Б. Нордхаузом і Дж. Тобіном (США). Пізніше вчені запропонували показник MEW-S для більш складних оцінок сталості економічного добробуту.

³Індекс ISEW був запропонований Германом Далі та Джоном Коббом в 1989 році.

⁴Індекс GPI вперше був застосований організацією Redefining Progress (США) в 1995 році.

⁵Методика запропонована Світовим банком у 1997 році.

- Екологічно скоригований чистий внутрішній продукт (англ. *Environmentally Adjusted Net Domestic Product, EDP*) – з чистого внутрішнього продукту вираховується вартісна оцінка виснаження природних ресурсів (DPNA), потім з отриманого показника вираховується вартісна оцінка екологічного збитку (DGNA)⁶.

- Система еколого-економічного обліку (англ. *System of Environmental-Economic Accounting, SEEA*) – передбачає узгодження у національних статистиках показників економічного обліку з системою показників стану навколишнього середовища і природних ресурсів⁷.

➔ Система індикаторів економічної сталості за КСР

У таблиці 2.1 наведено набір економічних індикаторів, що входять до складу сукупності індикаторів зі сталого розвитку, розроблених Комісією зі сталого розвитку ООН – КСР (англ. *United Nations Commission on Sustainable Development, CSD*). Методологія розрахунку економічних індикаторів сталого розвитку застосовуються багатьма країнами світу [46] (див. табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Набір ключових економічних індикаторів за КСР [26]

Тема - підтема	Ключові показники	Додаткові показники
Економічний розвиток		
<i>Макроекономічні показники</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> • ВВП на душу населення • Частка інвестицій у ВВП 	<ul style="list-style-type: none"> • Валові заощадження • Скориговані чисті заощадження (відсоток від валового національного доходу) • Рівень інфляції
<i>Стабільність державних фінансів</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Співвідношення боргу та ВНД 	
<i>Зайнятість</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Зайнятість населення • Продуктивність праці та вартість одиниці робочої сили • Частка жінок, зайнятих у несільськогосподарському секторі 	<ul style="list-style-type: none"> • Вразливість у зайнятості за статтю
<i>Інформаційні та комунікаційні технології</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Кількість користувачів Інтернету на 100 тис. осіб населення 	<ul style="list-style-type: none"> • Фіксовані телефони на 100 осіб населення • Мобільні телефони на 100 осіб населення

⁶EDP був розроблений в ході семінарів, організованих ЮНЕП та Світовим банком у 1997 році.

⁷В 2012 році Статистичний комітет ООН прийняв систему SEEA як міжнародний стандарт.

Продовження таблиці 2.1

Тема - підтема	Ключові показники	Додаткові показники
<i>Дослідження та розвиток</i>		
<i>Туризм</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Внесок туризму у ВВП 	<ul style="list-style-type: none"> • Валові внутрішні витрати на НДДКР у відсотках від ВВП
Глобальне економічне партнерство		
<i>Торгівля</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> • Дефіцит поточного рахунку платіжного балансу у відсотках до ВВП 	<ul style="list-style-type: none"> • Частка імпорту з країн, що розвиваються, та найменш розвинених країн • Середній тариф, накладений на експорт з країн, що розвиваються, та найменш розвинених країн
<i>Зовнішнє фінансування</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> • Обсяг офіційної допомоги з метою розвитку – наданий або отриманий у відсотках від ВНД 	<ul style="list-style-type: none"> • Чистий приплив та відтік прямих іноземних інвестицій як частка ВВП • Грошові перекази як частка ВНД
Споживчі та виробничі моделі		
<i>Матеріальне споживання</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> • Матеріальна інтенсивність економіки 	<ul style="list-style-type: none"> • Споживання внутрішніх продуктів
<i>Споживання енергії</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> • Річне споживання енергії, всього і по основній категорії користувачів • Інтенсивність використання енергії, загальна та за видами економічної діяльності 	<ul style="list-style-type: none"> • Частка відновлюваних джерел енергії у загальному обсязі споживання енергії
<i>Генерація і управління відходами</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> • Генерація небезпечних відходів • Обробка та видалення відходів 	<ul style="list-style-type: none"> • Генерація відходів • Управління радіоактивними відходами • Модальний розподіл вантажного транспорту • Енергетична інтенсивність транспорту

➔ **Методики оцінки циркулярності бізнесу**

На практиці пропонуються різні індикатори та метрики оцінки циркулярності бізнесу, які спираються на рекомендації агенств ООН щодо вимірювання прогресу за Цілями сталого розвитку, директиви ЄС, методики Євростату, профільних міністерств та відомств в країнах, відомими університетами та інститутами [26] (див. табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Приклади індикаторі циркулярності компаній та їх товарів [76; 79]

Індикатор	Зміст	Розробники
Circular material use rate (CMU) / <i>Частка циркулярно використовуваних матеріалів</i>	Розраховується як відношення обсягу циркулярно використаних матеріалів до загальному використаних матеріалів (%)	• Євростат
Circular inflow / <i>Циркулярна притока</i>	Розраховує частку циркулярних матеріалів у загальному обсязі матеріалів, що купуються компанією (%)	• WBCSD
Circular inflow / <i>Циркулярний вихід</i>	Розраховує частку циркулярної продукції у загальному обсязі продукції, що випускається компанією (%)	• WBCSD
Material circularity indicator / • Індикатор циркулярності матеріалів	Розраховується як різниця між одиницею та добутком індексу лінійного потоку та функції корисності продукту	• Ellen Macarthur Fondation
Circularity Metric for Products / <i>Метрики циркулярності продуктів</i>	Ґрунтуються на використанні методу оцінці життєвого циклу (англ. <i>Life Cycle Assessment, LCA</i>), покликані оцінювати вплив складових матеріалів або цілком продуктів на довкілля за усіма його стадіями життєвий циклу – від видобуття цього матеріалу до використання продукту та його остаточної утилізації	• AliIlgina M., Guptab S.

2.3 Індикатори екологічної сталості

Європейська агенція класифікує показники екологічної сталості за аналітичною схемою «Рушійні сили – Тиск – Стан – Вплив – Реагування» (англ. *Drivers-Pressure-State-Impact-Response, DPSIR*): Рушійні сили – це соціально-економічні фактори та види діяльності, що впливають на довкілля та природні ресурси; Тиск – пряме антропогенне навантаження на довкілля; Стан – характеристики навколишнього середовища та природних ресурсів; Вплив – наслідки зміни довкілля для природи та біорізноманіття, здоров'я та діяльності людей; Реагування – заходи, спрямовані на вирішення екологічних проблем в контексті сталого розвитку [54] (див. рис. 2.1)



Рисунок 2.1 – Показники екологічної сталості за аналітичною схемою «Рушійні сили-Тиск-Стан-Впливи-Реагування» [26]

Індикатори екологічної сталості (англ. *Environmental Sustainability Indicators, ESIs*) – показники або система показників, які характеризують стан окремих елементів навколишнього середовища (води, суші, атмосфери) та природних ресурсів, а також їх впливи на соціально-економічні параметри у контексті цілей сталого розвитку.

➔ Система індикаторів екологічної сталості за ОЕСР

ОЕСР розробила та опублікувала системи індикаторів екологічної сталості (англ. *OECD Environmental Indicators*), що регулярно вдосконалюються і доповнюються для оцінки виконання завдань сталого розвитку та іншої аналітичної роботи, яка орієнтована на інтеграцію екологічних аспектів у секторальну політику.

Індикатори екологічної сталості за ОЕСР поділяються на 8 груп: повітря та клімат, вода, відходи, ресурси, ліс, біорізноманіття, політичні інструменти, зелене зростання [61] (див. табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Система індикаторів екологічної сталості за ОЕСР [26; 61]

Група	Індикатори екологічної сталості
1 Повітря та клімат	<p data-bbox="244 869 512 900"><i>Забруднення повітря</i></p> <ul data-bbox="512 920 1364 1048" style="list-style-type: none"> • Викиди парникових газів за видами та джерелами • Викиди забруднювачів повітря за видами та джерелами • Розрахунок викидів в атмосферу по країнам • Викиди двоокису вуглецю, що враховуються в міжнародній торгівлі <p data-bbox="244 1068 600 1099"><i>Якість повітря та здоров'я</i></p> <ul data-bbox="512 1120 1364 1279" style="list-style-type: none"> • Концентрація дрібних твердих частинок (PM2.5) у повітрі по країнам, макрорегіонам та регіонам • Концентрація дрібних твердих частинок (PM2.5) у повітрі великих міст • Залежність смертності та добробуту від впливу забруднення повітря
2 Вода	<p data-bbox="244 1350 421 1382"><i>Водні ресурси</i></p> <ul data-bbox="512 1402 1364 1630" style="list-style-type: none"> • Генерування та скидання стічних вод • Якість озер та рік • Ресурси прісної води • Забір води з прісноводних джерел (млн м³) • Очищення стічних вод (%) • Потужність очисних споруд • Видалення осаду стічних вод (в сухій речовині)
3 Відходи	<p data-bbox="244 1700 560 1731"><i>Поводження з відходами</i></p> <ul data-bbox="512 1751 1364 1843" style="list-style-type: none"> • Утворення відходів за секторами • Муніципальні відходи – генерація та утилізація • Харчові відходи по видам і секторам

Продовження табл. 2.3

Група	Індикатори екологічної сталості
4 Ресурси	<ul style="list-style-type: none"> • Матеріальні ресурси, що походять з природних джерел • Стан та зміни за цілями землекористування
5 Ліс	<ul style="list-style-type: none"> • Показники виснаження і зростання лісових ресурсів в натуральному вираженні (тис. м³)
6 Біорізноманіття	<ul style="list-style-type: none"> • Заповідні території • Загроза видів
7 Політичні інструменти	
	<i>Інновації в технологіях</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Технологічний розвиток • Міжнародне співробітництво • Дифузія технологій • Зведені показники • Інша патентна статистика
	<i>Вклад природного капіталу</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Екологічно скоригована багатofункціональна продуктивність
	<i>Екологічна політика</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Екологічно пов'язані податкові надходження • Індекс напруженості екологічної політики • Інвентаризація заходів щодо підтримки викопного палива по видам ресурсів і заходам у різних країнах
	<i>Екологічні видатки та доходи</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Витрати та доходи від захисту навколишнього середовища – по видам впливу, галузям, принципам фінансування у різних країнах
	<i>Екологічні показники сільського господарства</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Низка агробіологічних показників, що розроблені сумісно з Євростатом та ФАО
8 Зелений розвиток	
	<i>Зелене зростання</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Зведені показники зеленого зростання • Екологічна та ресурсна продуктивність • База природних активів • Екологічні аспекти якості життя • Економічні можливості та політичні відповіді

2.4 Індикатори соціального розвитку

У методиках оцінки сталості використовуються різні підходи та індикатори соціального розвитку, кожний з яких має певні переваги. У цілому їх можна поділити на такі, що використовуються для оцінок глобального рівня, в практиках управління розвитком підприємства чи у ланцюгах створення вартості [26].

Глобальні індикатори сталого соціального розвитку

Індикатори соціального розвитку у звітах ООН (англ. *Social Indicators UN*) – розраховуються Статистичним відділом Департаменту з економічних та соціальних питань Секретаріату ООН на основі багатьох національних та міжнародних джерел. Для спостереження та моніторингу виконання рішень ООН аналізується обмежений список показників в таких основних сферах: населення, здоров'я, житло, освіта, робота [67].

Соціальні індикатори розвитку у звітах Світового банку (англ. *Social Indicators WB*) – щорічні публікації Світового банку для оцінки добробуту людей, щоб отримати уявлення про соціальні наслідки економічного розвитку. Аналіз включає вісім груп з 94 показників: 1. Чисельність та структура населення; 2. Детермінанти зростання населення (включаючи дані про народжуваність та дитячу смертність); 3. Робоча сила; 4. Освіта та неграмотність; 5. Природні ресурси; 6. Дохід і бідність; 7. Витрати на харчування, житло, паливо та енергетику, транспорт та зв'язок; 8. Інвестиції в медичну допомогу та освіту [77].

Індекс соціального прогресу (англ. *Social Progress Index, SPI*) – був розроблений в 2013 році за проектом «Імператив соціального прогресу» (англ. *Social Progress Imperative*) під керівництвом Майкла Портера. Комбінований показник складається з 50 соціальних індикаторів, що поділяються на 3 групи з 12 підіндексів: 1) Основні людські потреби – харчування та основна медична допомога, вода та санітарія, притулок, особиста безпека; 2) Основи благополуччя – доступ до базових знань, доступ до інформації та комунікацій, здоров'я і добре самопочуття, якість довкілля; 3) Можливості – особисті права, особиста свобода та вибір, толерантність і включення, доступ до вищої освіти. Індекс SPI висвітлює відносно сильні та слабкі сторони соціального прогресу країни в порівнянні з іншими 15 країнами, що мають найбільш близький рівень ВВП на душу населення. У 2019 році в рейтингу за SPI Україна опинилася на 80 сходинці серед 149 країн світу [26].

Індикатори соціального розвитку (англ. *Social Indicators of Development*) – в широкому розумінні це сумарні показники, що оцінюють середнє досягнення в основних вимірах соціального розвитку, включаючи забезпечення гідного рівня життя і праці, прав на здорове екологічне середовище, можливості розвитку людини.

Таблиця 2.4 – Оцінка сталості соціального розвитку України, 2019 (за методикою Майкла Портера) [26].

Показники	Оцінка	Рейтинг
Загальний рівень		
• Індекс соціального прогресу	67.0	80
• Рівень соціального прогресу	Вище середнього	
Загальні індекси		
• Основні людські потреби	82.21	76
• Основи благополуччя	64.22	94
• Можливості	54.47	63
Найвищі показники компонентів		
• Особиста свобода та вибір	67.78	61
· Стабільність зайнятості	14.82	46
• Доступ до базової освіти	89.25	60
· Рівень грамотності дорослих	99.97	1
· Гендерна рівність	0.98	1
• Доступ до вищої освіти	48.15	40
· Роки вищої освіти	3.94	17
· Університети, що займають глобальний рейтинг	7.00	46
Найнижчі бали компонентів		
• Якість навколишнього середовища	40.46	145
· Забруднення атмосферного повітря	57.85	139
· Викиди парникових газів	1.04	132
• Толерантність та включення	34.97	111
· Рівність політичної влади за соціально-економічним становищем	0.36	146
· Рівність політичної влади за соціальною групою	1.88	106
• Особисті права	66.98	95
· Свобода самовираження	0.54	111
· Доступ до правосуддя	0.45	113

Показники сталості соціального розвитку на рівні підприємства

Показники сталості соціального розвитку підприємства можна умовно поділити на п'ять груп: (1) Повага до працівників (безпечні та комфортні умови праці, участь у прийнятті управлінських рішень, т. д.); (2) Чесна практика найму (практика найму є справедливою, відповідальною, недискримінаційною, т. д.); (3) Відповідальне управління (бізнес є етичним та правовим, т. д.); (4) Повага до зацікавлених сторін (прозорість та справедливість для місцевого населення та інших зацікавлених сторін поза організацією). (5) Чесність з клієнтами (етичність, виконання домовленостей, конфіденційність, справедливість, т. д.) [26].

Висновки

- 1 Сьогодні склалося два основних підходи до вимірювання сталості розвитку. За першим підходом побується розгорнута програма показників, кожен з яких оцінює вирішення окремих завдань у комплексі цілей сталого розвитку. Другий підхід використовує інтегральні індекси, що за певною методикою об'єднує стандартизовані показники з оцінки стану різних сфер розвитку.
- 2 Система індикаторів ОЕСР використовує модель «вплив→стан→реакція»: (1) індикатори впливу характеризують вплив різних чинників діяльності на навколишнє середовище; (2) індикатори стану оцінюють якісні і кількісні зміни стану природних ресурсів і елементів навколишнього середовища; (3) індикатори реакції вимірюють ефекти і ефективність заходів зі збереження довкілля та підвищення екологічної відповідальності.
- 3 Система індикаторів КСР включає чотири групи індикаторів: (1) індикатори економічної сталості розвитку; (2) індикатори екологічної сталості розвитку; (3) індикатори соціального розвитку; (4) індикатори інституційної сталості.
- 4 Загальний методичний підхід до розробки інтегральних індексів має три етапи: агрегування соціальних, економічних та екологічних даних до проміжних індикаторів; агрегування проміжних індикаторів до індикаторів стану соціальної, економічної та екологічної підсистем; агрегування індикаторів до індексів сталого розвитку систем.
- 5 Індикатори економічної сталості в широкому використанні оцінюють рівень відповідності економічної політики принципам сталого розвитку, обмеження обсягу споживаних природних ресурсів, зменшення тиску на навколишнє середовище вздовж усього ланцюга створення вартості, що приносить чистий прибуток бізнесу та сприяє підвищенню якості життя населення.
- 6 Система показників Комісії ООН зі сталого розвитку охоплює 32 показники, що згруповані за трьома темами: економічний розвиток, глобальне економічне партнерство, споживчі та виробничі моделі. Тематика з моделей виробництва та споживання включає показники за трьома аспектами: матеріальне споживання, споживання енергії та управління відходами.
- 7 Індикатори екологічної сталості характеризують стан окремих елементів навколишнього середовища та природних ресурсів, а також їх впливи на соціально-економічні параметри у контексті цілей сталого розвитку.
- 8 Європейська агенція класифікує показники екологічної сталості за аналітичною схемою «Рушійні сили – Тиск – Стан – Вплив – Реагування», за кожною стадією вимірювання пропонується свій набір показників, які спрямовані на вирішення екологічних проблем в контексті сталого розвитку.
- 9 Індикатори соціального розвитку в широкому розумінні це сумарні показники, що оцінюють середнє досягнення в основних вимірах соціального розвитку, включаючи забезпечення гідного рівня життя і праці, прав на здорове екологічне середовище, можливості розвитку людини.

Питання для самоконтролю і завдання

Вставити пояснення щодо використання систем індикаторів з вимірювання сталості розвитку

- Модель ОЕСР індикаторів сталого розвитку виробничих підприємств застосовують такі показники впливу на довкілля
 - а) на вході:
 - б) при здійсненні операцій:
 - в) на виході системи:
- Система індикаторів економічної сталості за КСР оцінює сталість споживання та виробництва за допомогою таких індикаторів:
 - а) у галузі матеріального споживання –
 - б) у галузі споживання енергії –
 - в) у галузі управління відходами –
- Індекс соціального прогресу SPI (модель Портера) використовує три групи індикаторів за такими трьома напрямками:

Завдання для виконання у класі:

- 1 Розрахуйте економічну сталість України за системою індикаторів економічної сталості за КСР, використовуючи дані Державної служби статистики України.
- 2 Розробить схему побудови інтегрального індексу для комплексного вимірювання та моніторингу сталості виробничих підприємств, використовуючи ОЕСР модель індикаторів сталого розвитку, що була розроблена для оцінки сталості виробничих підприємств (див. вставку 2.1).
- 3 На прикладі певного виробничого підприємства обгрунтуйте завдання та вибір показників для розробки аналітичної моделі екологічного сталого розвитку, що використовує аналітичну схему «Рушійні сили – Тиск – Стан – Вплив – Реагування» (див. рис. 2.1)
- 4 Розрахуйте індекс соціального прогресу SPI (за моделлю Майкла Портера) для України / регіону / міста, використовуючи за системою індикаторів економічної сталості за КСР, використовуючи дані Звіту України з досягнення ЦСР державної служби статистики України та вашого регіону (див. табл. 2.4).

ЧАСТИНА II

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

«Коли керівник приходить до дійсного розуміння проблеми і починає вільно керувати своєю моделлю, він отримує здатність бачити зміст своєї роботи з інших точок зору. Він захоче перевірити на моделі безліч альтернативних варіантів, для того щоб оцінити нові можливості, які відкрилися йому. По суті він використовує модель для підвищення своєї майстерності управління, яка дозволяє йому на новому рівні чітко встановити всі суттєві наслідки змін, які внесені в систему. Можливо, він міг би зробити все це і на реальній системі, але внаслідок її складності це було дуже важко і пов'язано із помилками. Ось чому він і звертається до моделі».

*Маккіні Дж. Л. А.
Клінічне дослідження використання імітаційної моделі, 1967*

«Майже всі без винятку автори, які пишуть про науку, стверджують, що одним з головних елементів, необхідних для ефективного розв'язування складних завдань, є побудова і відповідне використання моделі. Ця модель може набувати різних форм, але одна з найбільш корисних і безперечно найбільш використовуваних форм – це математична модель, що описує за допомогою системи рівнянь істотні риси реальних систем і явищ, які вивчаються».

*Роберт Ю Шеннон.
Імітаційне моделювання систем – мистецтво і наука, 1978*

Моделювання визнано одним із найбільш ефективних засобів прийняття рішень. Виходячи із своїх знань з питань сталого розвитку і використовуючи сучасний апарат математичного моделювання, менеджер може формувати альтернативні моделі сталого розвитку за різними цільовими функціями та параметрами обмеження. Чим точніше розроблена модель, тим краще можливо встановити загрози та можливості для розвитку, знайти рішення, які відповідають найкращій стратегії досягнення цілей розвитку за конкретними умовами

Частина II посібника має два розділи. В першому роз'яснюється сутність моделювання, основні його етапи та вивчається класифікація моделей і основні способи моделювання. Другий розділ розглядає статистичні методи та моделі, які найбільш корисні для цілей управління сталістю розвитку, способи їх побудови та критерії вибору способів моделювання.



Розділ 3 Принципи моделювання сталого розвитку

Розділ 4 Статистичні методи у моделюванні сталого розвитку

РОЗДІЛ 3

Принципи моделювання сталого розвитку

Питання для дискусії:

Поняття моделі та види моделей. Моделювання відносин на промисловому ринку. Принципи системного підходу у моделюванні. Класичний та системний підходи до побудови моделей систем. Системний підхід до моделювання. Класифікація видів моделювання. Класифікація видів моделювання. Математичне моделювання і математична модель. Математичні моделі для дослідження питань сталого розвитку. Теоретико-множинна модель. Ігрова математична модель. Етапи побудови математичної моделі. Математичний інструментарій моделювання. Поняття імітаційного моделювання.

Ключові терміни та поняття:

- Модель
- Системний підхід
- Система
- Стан системи
- Емерджентність
- Математичне моделювання
- Класифікація моделей
- Імітаційне моделювання
- Етапи побудови математичної моделі
- Концептуальна модель
- Перевірка адекватності моделі
- Обчислювальний експеримент

3.1 Поняття моделі та моделювання

Слово «модель» означає «міра», «спосіб», «схожість із якимсь об'єктом» (лат. *modulus* – образ, *modelium* – міра). Модель – це об'єкт-замішувач об'єкта-оригіналу, який забезпечує вивчення його певних властивостей і характеристик. Всіляку модель будують і досліджують при певних припущеннях. Ці припущення стосуються тих властивостей, які важливі для вирішення проблеми, задля якої будується модель, а також тих, якими можна знехтувати за даних обставин. Тобто вид моделі, яку потрібно будувати, і її властивості залежать від задачі, яка поставлена дослідником.

➔ Види моделей

У загальному випадку всі моделі, незалежно від сфер їх застосування, можна розділити на три типи: пізнавальні, прагматичні і інструментальні.

- *Пізнавальна модель* – це форма організації і представлення знань, засіб з'єднання нових і старих знань. Пізнавальна модель, як правило, підганяється під реальність і є теоретичною моделлю.
- *Прагматична модель* – засіб організації практичних дій, робочого уявлення цілей системи для її управління. Реальність в цьому разі підганяється під певну прагматичну модель. Це, як правило, прикладні моделі.
- *Інструментальна модель* – засіб побудови, дослідження та (або) використання прагматичних і (або) пізнавальних моделей.

Пізнавальні моделі відображають існуючі, а прагматичні – хоча і не існуючі, але бажані і, можливо, виконані відношення і зв'язки. Різницю між пізнавальними та прагматичними моделями показано на рис. 3.1.



а – пізнавальна модель



б – прагматична модель

Рисунок 3.1 – Різниця між пізнавальними та прагматичними моделями

Модель – це об'єкт або опис об'єкта (системи) для заміни (при певних припущеннях, умовах, гіпотезах) однієї системи (тобто оригіналу) іншою системою для кращого вивчення оригіналу або відновлення певних його властивостей.

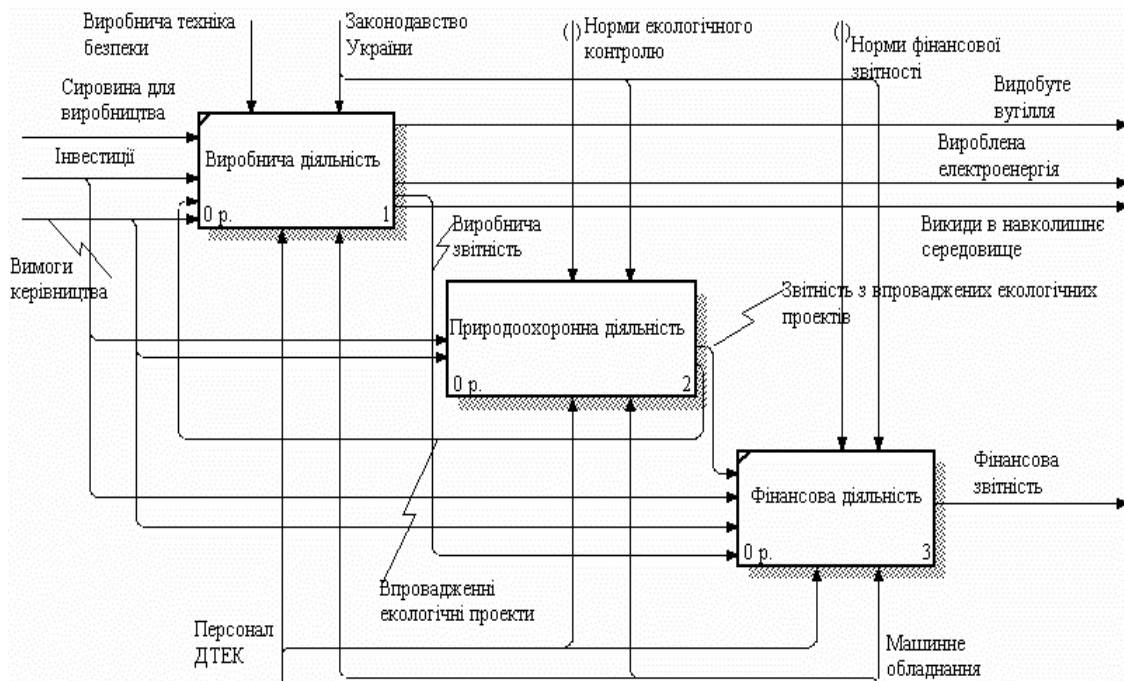
Вставка 3.1

Моделювання відносин на промисловому ринку

Якщо описати правила взаємодії ключових гравців на промисловому ринку за допомогою математичних співвідношень, наприклад, системи алгебраїчних рівнянь, де невідомими будуть величини прибутку, одержувані від взаємодії підприємств, а коефіцієнтами рівняння будуть значення інтенсивності такої взаємодії, то отримаємо математичну модель функціонування певного ринку.

Приклад: модель функціональної декомпозиції діяльності енергетичного підприємства

Діяльність енергетичного підприємства описано за допомогою діаграми IDF0. Така модель дозволяє візуалізувати процеси, виділити суттєві фактори, і внаслідок цього визначити можливості оптимізації діяльності.



Джерело: [23].

За певних умов та ж сама модель може бути і прагматичною і пізнавальною. Наприклад, якщо ми маємо креслення (план) будинку, який існує – це пізнавальна модель, що описує реальність. Проте, якщо маємо план будинку, за яким буде здійснено нове будівництво, то це прагматична модель – реальне втілення буде «підганятися» відповідно до розробленої моделі.

За способом моделювання моделі поділяються на: теоретичні, емпіричні та змішані.

- *теоретичні моделі* – будуються на основі математичних описів;
- *емпіричні моделі* – на основі емпіричних фактів, залежностей;
- *змішані, напівемпіричні моделі* – на основі емпіричних залежностей і математичних описів.

Теоретичні моделі

Теоретичні моделі будуються на основі теоретичних законів і залежностей, є найбільш загальними. До їх переваг можна віднести те, що такі моделі можна застосовувати до всіх об'єктів даного типу.

Наприклад теоретична одновимірна модель розповсюдження забруднення у річці має такий вигляд (одновимірна модель трансформації і перенесення):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \lambda(t, x)U - V \frac{\partial U}{\partial x} + f(t, x) + \eta(t, x);$$

із крайовими умовами:

$$U(t, x_0) = \xi x_0(t),$$

$$U(t, x_N) = \xi x_N(t),$$

де $U = U(t, x)$ – концентрація забруднювальної речовини;

$f(t, x)$ – функція потужності джерела викидів, що знаходиться у початку координат:

$$f(t, x) = \begin{cases} g(t), & \text{коли } x = 0, \\ 0, & \text{коли } x > 0; \end{cases}$$

$V = V(t, x)$ – швидкість потоку;

$\lambda(t, x)$ – величина, яка характеризує швидкість розпаду речовини (самоочищення потоку);

a – коефіцієнт турбулентної дифузії;

$\eta(t, x)$ – випадкова величина, для якої

$$E\eta(t, x)\eta(\tau, s) = Q(t, x, s)\delta(t - \tau);$$

$$E\eta(t, x) = 0.$$

Емпіричні моделі

Теоретичн модель, що була показана, може бути застосована до аби-якої річки. Але коефіцієнти, які входять до цієї моделі, залежать від параметрів, які істотно відрізняються для кожної річки, наприклад хімічний склад води, температура, рельєф дна, вид забруднення тощо. За результатами спостережень за водоймою можна визначити, як змінюється забруднення у контрольному створі залежно від об'єму викидів джерела забруднення і отримати аналітичний вигляд залежності, наприклад такий, що показано на рис. 3.2 за даними таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані вимірювань (мг/дм³) вмісту речовини в стічній воді $C_{cm i}$ та контрольному створі $C_{kc, i}$

i	$C_{cm i}$	$C_{kc, i}$	i	$C_{cm i}$	$C_{kc, i}$	i	$C_{cm i}$	$C_{kc, i}$
1	320	37,2	11	313	37,1	21	295	35,1
2	312	36,4	12	327	38,1	22	315	36,5
3	304	36	13	335	39,5	23	313	37,3
4	313	36,5	14	311	36,7	24	314	36,6
5	322	38	15	300	35,8	25	302	35,2
6	313	36,5	16	302	35,4	26	344	40,4
7	327	37,7	17	313	36,7	27	332	39
8	324	37,4	18	308	36,6	28	345	40,3
9	317	37,5	19	308	35,8	29	301	35,5
10	297	35,5	20	309	36,7	30	342	39,2

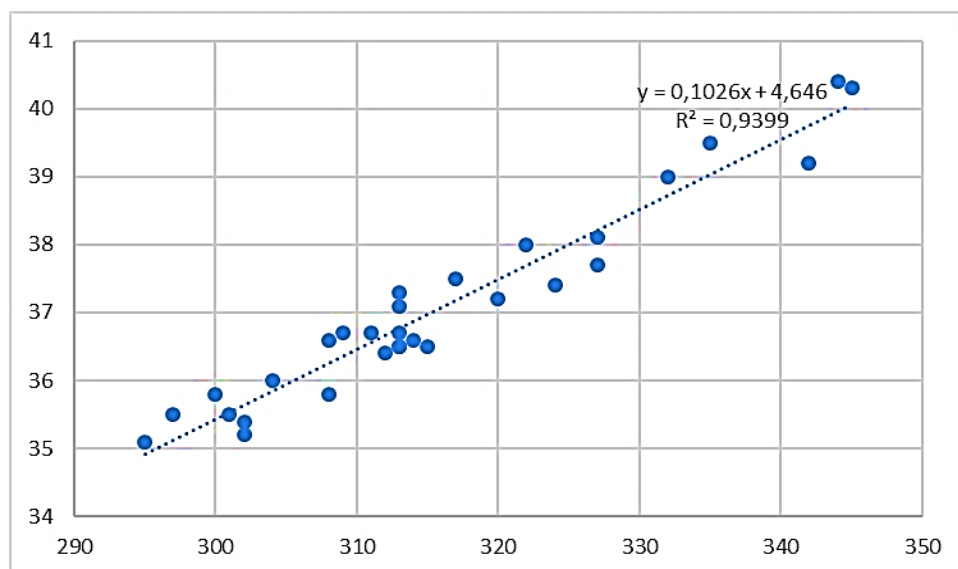


Рисунок 3.2 – Приклад регресійної моделі залежності забруднення у контрольному створі від викидів із джерела забруднення

На основі побудованої моделі ми можемо досить точно передбачити величину забруднення у певному контрольному створі, якщо розмір викидів знаходиться у межах, визначених моделлю ($300 - 340 \text{ мг/дм}^3$). Перевагою цієї моделі є її простота, але такі моделі не є універсальними. Побудовані на основі даних спостережень за певним об'єктом, вони можуть давати хибні результати для інших.

Змішані моделі

Змішані моделі являють собою комбінацію двох описаних. Наприклад, ми можемо взяти за основу теоретичну модель, а її коефіцієнти обчислити на основі даних польових спостережень.

➔ Моделювання

Моделювання базується на теорії подібності, згідно з якою абсолютна подібність може мати місце лише при заміні одного об'єкта іншим точно таким самим. При моделюванні більшості систем (за винятком, можливо, моделювання одних математичних структур іншими) абсолютна подібність неможлива, і тому основною метою моделювання є те, що модель повинна досить точно відображати функціонування модельованої системи.

У загальному випадку модель M , що описує систему $S(x_1, x_2, \dots, x_n; R)$, має такий вигляд: $M = (z_1, z_2, \dots, z_m; Q)$, X – множина вхідних і вихідних станів системи, Z – множина описів елементів і підмножин X, Q, R – множини відношень над X .

Схему побудови моделі M системи S із вхідними сигналами X й вихідними сигналами Y зображено на рис. 3.3.

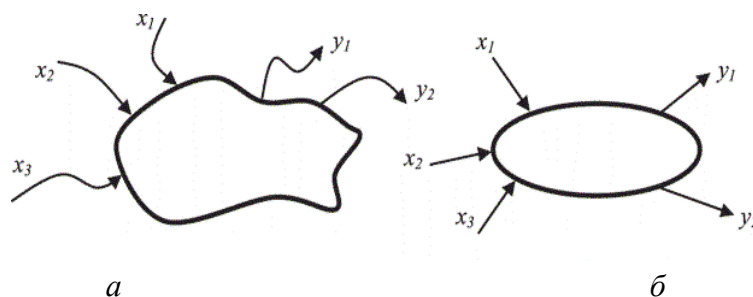


Рисунок 3.3 – Схема побудови моделі: *а* – досліджувана система, *б* – модель

Якщо на вхід системи поступають сигнали з X й на виході з'являються сигнали Y , то задано закон, тобто правило f функціонування моделі (системи). Отже, моделювання – це універсальний метод отримання, опису та використання знань. Він застосовується у вській професійній діяльності.

Таким чином, проблема моделювання включає три задачі:

- побудова моделі (ця задача найменше формалізована і конструктивна, в тому сенсі, що немає алгоритму для побудови моделей, і тому вона складна);

- дослідження моделі (ця задача є більш формалізованою, оскільки існують методи дослідження різних класів моделей);
- використання моделі (конструктивна і конкретна задача).

Моделювання починається з формування цілей та предмета дослідження. Залежно від цілей дослідження ми можемо отримати різні моделі для одного і того самого об'єкта.

Моделювання являє собою один із методів системного аналізу. У загальному значенні моделювання – це процес дослідження реальної системи, який включає побудову моделі, вивчення її властивостей і перенесення отриманих відомостей на систему, яка моделюється. Моделювання реальних і нелінійних систем живої і неживої природи дозволяє пов'язувати в єдине ціле теоретичні знання із реальними процесами і відносинами з метою знаходження множини альтернативних рішень, у тому числі для вирішення конкретних задач з досягнення сталого розвитку.

Оскільки модель створюється для вирішення конкретних завдань, розробник моделі має бути впевнений, що модель відобразить усі необхідні для дослідника характеристики і властивості модельованої системи. Тому процедура моделювання полягає в розділенні процесу моделювання системи на етапи моделювання підсистем, детальному вивченні елементів та зв'язків між елементами системи, потім ефективного опису їх із максимально можливим ступенем формалізації і адекватності.

Але треба розуміти, що побудова коректних і адекватних моделей діючих систем не обмежується тільки розробкою її підмоделей, які відповідають певним підсистемам, та їхньою логічною ув'язкою між собою. Потрібно також коректне врахування усіх значимих факторів, що діють поза реальної системи.

Тобто модель не може бути побудована без урахування характеру зв'язків системи із зовнішнім середовищем та особливостей взаємного впливу системи і цього середовища. При тому компоненти складної ізольованої системи (ресурси, сили, потенціал тощо), що діють і коректні в цій системі, можуть бути некоректні поза нею або можуть не мати суттєвого значення для розвитку системи в існуючому середовищі в певний період часу.

Моделі і моделювання застосовуються за такими основними напрямками:

- 1 навчання (як моделям, моделюванню, так і самих моделей);
- 2 пізнання і розробка теорії досліджуваних систем (за допомогою будь-яких моделей, моделювання, результатів моделювання);
- 3 прогнозування (вихідних даних, ситуацій, станів системи);
- 4 управління (системою в цілому, окремими підсистемами системи), вироблення управлінських рішень і стратегій);
- 5 автоматизація (системи або окремих підсистем системи).

3.2 Системний підхід у моделюванні

Сталий розвиток – це керований розвиток, основою якого є системний підхід. У цілому еколого-соціально збалансований економічний розвиток об'єкту управління (країни, регіону, підприємства тощо) треба розглядати не ізольовано, а як складну систему у взаємодії із зовнішнім середовищем, а також у сукупності з іншими системами деякої метасистеми. Математичне моделювання дозволяє розробляти альтернативні рішення, прогнозувати їх наслідки та обирати найбільш оптимальні варіанти на різних етапах планування розвитку.

Однак, оскільки завдання розвитку є дуже різноманітними за змістом і параметрами вимірювання, великою проблемою для математичної формалізації процесу обґрунтування рішень є вибір підходу до визначення загальносистемних параметрів щодо зв'язків та обмежень. У літературі науковці пропонують безліч математичних моделей, що стосуються проблем сталого розвитку.

Наприклад, американський вчений Ніколас Джорджеску-Роєн в своїх дослідженнях пов'язує економічні індикатори розвитку з характеристиками обмеження природних матеріалів та енергетичних ресурсів¹, а при моделюванні робить спроби поєднати закони термодинаміки з економікою довкілля. Маріон Херш вивчає застосування математичних методів для формального обґрунтування складних рішень зі сталого розвитку, що враховують гендерні та правозахисні аспекти².

Системний підхід до моделювання полягає в визначенні реальної ситуації як цілісної системи взаємопов'язаних елементів та зв'язків між ними, у тому числі коли система складається із окремих роз'єднаних підсистем.

¹Ніколас Джорджеску-Роєн (англ. *Nicholas Georgescu-Roegen*) працював над питаннями моделювання економічного зростання, відомий сміливими спробами перенесення принципів «біоекономіки» в теорію управління розвитком. Сутність «біоекономіки» Джорджеску-Роєна полягає в тому, що виробництво як трансформація постійного запасу матеріалів та енергії має підкорятися тому ж закону ентропії, який діє у всіх закритих системах: ентропія або кількість недоступної матерії та енергії має тенденцію постійно зростати, тоді як кількість доступної матерії та енергії має тенденцію постійно зменшуватися. Вчений доводив, що існуюча теорія «стаціонарного стану економіки», яка спиралася на можливість безперервного самовідтворювання економічної системи у певних межах економічного зростання за певний період часу, є просто неможливою (див. N. Georgescu-Roegen. *Energy Analysis and Economic Evaluation*, Southern Economic Journal, April 1979 – <https://www.jstor.org/stable/1056148>).

²Маріон Херш (англ. *Hersh Marion*) пояснює необхідність застосування методів моделювання для пошуку збалансованих рішень, враховуючи глобальні проблеми сталого розвитку, а саме зміна клімату, виснаження ресурсів, потоншення озонового шару, космічне сміття, зменшення біорізноманіття, недоїдання, вмирання екосистем, глобальна нерівність і ризик безпрецедентних ядерних війн. Але вчена визнає труднощі, які виникають при формалізації таких різних і складних соціально-екологічних конфліктів, оскільки часто вони сповнені суб'єктивності та неточності, а також невизначеності необхідних даних (див. Hersh M. *Mathematical modelling for sustainable development*. Berlin: Springer, 2005. 557 p.).

Системний підхід дозволяє вивчати управлінську проблему на всіх етапах дослідження як складну інтегровану систему, з урахуванням суттєвих факторів, що враховуються пропорційно їхній значущості та сили впливу.

Складним системам притаманна *емерджентність* як прояв у неї властивостей, яких не мають її складові. Наприклад, системи управління сталим розвитком надають збалансований синергетичний ефект, які не можуть забезпечити відокремлено її складові – програми економічного зростання та енергоменеджменту, підсистеми екологічного менеджменту, стандарти соціальної відповідальності тощо.

Найважливішими характеристиками всякої системи є її *межа, структура, стан, мета, функціонування, розвиток*.

Коли ми визначаємо *межу* системи, то мова взагалі йде про поділ усіх компонентів (у формі енергії, матерії чи інформації) на два класи – такі, що належать системі, вони вважаються елементами системи, та такі, що не належать системі та утворюють зовнішнє середовище. Підкреслимо, що розподіл компонентів на елементи системи і фактори зовнішнього середовища у моделюванні є припущенням.

Під *структурою системи* розуміють сталу впорядкованість у просторі і часі сукупності необхідних і достатніх відношень (зв'язків) між її елементами. Зв'язки при цьому можуть відрізнятися за характером, силою та напрямком.

Стан системи – це фіксація сукупності параметрів системи (матеріальних, енергетичних, інформаційних, просторових, людських, організаційних тощо), що визначають її положення відносно очікуваного результату або його образу. Отже, стан системи – це «фотографія» механізму перетворення вхідних даних системи у вихідні у конкретний момент часу. При зміні значення хоча б одного параметра системи в наступний момент часу свідчить, що стан системи змінився.

Метою системи у моделюванні розуміється опис її бажаного стану, враховуючи існуючі доступні ресурси системи та зовнішні обмеження.

Розрізняються два типи динаміки систем: функціонування та розвиток.

➤ Процес *функціонування системи* розуміється як процеси послідовної зміни її параметрів у часі, тобто процес функціонування системи може бути описаний як зміна її станів. Функціонування системи стабільно реалізує фіксовану мету (наприклад, реалізація запланованої виробничої програми).

Системою називають сукупність взаємопов'язаних елементів, що утворюють єдине ціле, взаємодіють із середовищем та між собою для досягнення певної мети.

Мета системи являє собою образ бажаного стану системи, який дозволяє вивиконувати її функції, використовуючи наявні ресурси.

Розвитком системи називають те, що відбувається із системою при зміні її цілей. Характерною рисою розвитку є той факт, що існуюча структура перестає відповідати новій меті, і для забезпечення нової функції (місії, цілі) необхідно змінювати структуру або і склад системи, тобто перебудовувати всю систему.

Будь-яка система має внутрішній механізм перетворення вхідних даних у вихідні – внутрішній опис, а також має зовнішні прояви – зовнішній опис. Опис внутрішнього стану системи дає уявлення про поведінку системи, про відповідність або невідповідність її структури цілям, підсистемам (елементам) і ресурсам всередині системи. Зовнішній опис – відображає відношення з іншими системами, їхніми цілями і ресурсами (див. рис. 3.4). На кожному етапі системи можливе виникнення невизначеності, у тому числі такими можуть бути межі, які відділяють систему від середовища, мета функціонування, зв'язки між елементами й підсистемами.

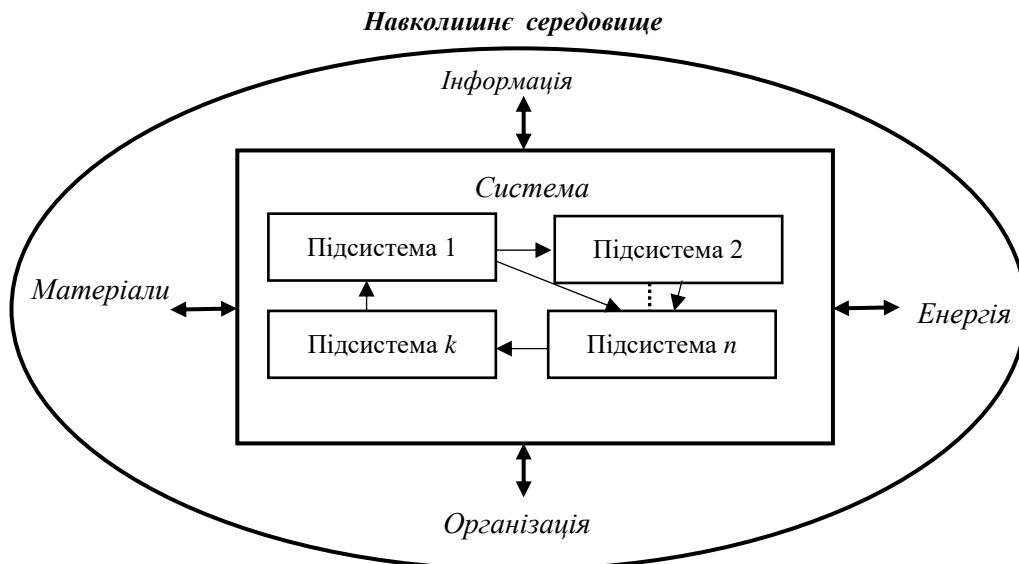


Рисунок 3.4 – Схема взаємодії системи із зовнішнім середовищем

Побудова моделі системи може здійснюватись на основі двох підходів: класичного і системного. Розглянемо різницю між ними.

➔ Синтез моделі на основі класичного підходу

Процес синтезу моделі M на основі класичного (індуктивного) підходу показано на рис. 3.5. Він полягає в тому, що реальний об'єкт, який моделюється, розбивається на окремі підсистеми, тобто вибираються вихідні дані D для моделювання і формулюються цілі G , які відображають окремі характеристики процесу моделювання. По окремій сукупності вихідних даних D формулюються мета моделювання окремої властивості функціонування системи. На основі цієї мети формується деяка компонента K створюваної моделі.

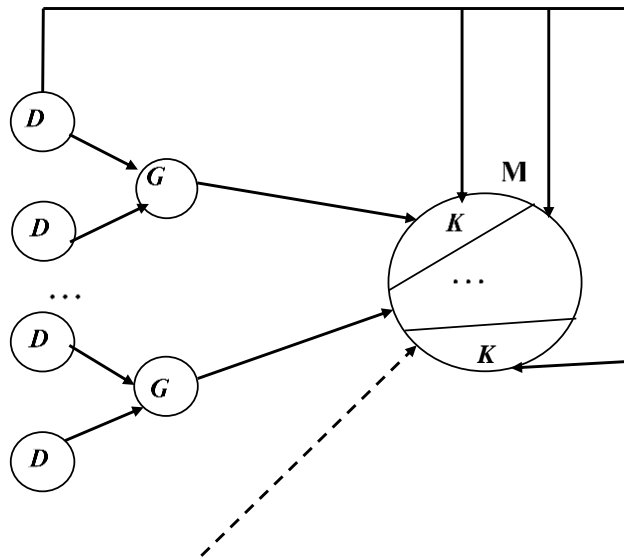


Рисунок 3.5 – Процес синтезу моделі на основі класичного підходу [23]

Сукупність компонент об'єднується (сумується) в модель M . Таким чином, розробка моделі M на основі класичного підходу означає *об'єднання окремих компонент в єдину модель*, причому кожна з компонент вирішує свою окрему задачу і ізольована від інших частин моделі. Тому класичний підхід може бути використаний для реалізації порівняно простих моделей, в яких можливо розділення і взаємний незалежний розгляд окремих сторін функціонування реального об'єкта.

Для моделі складного об'єкта така роз'єднаність вирішуваних завдань неприпустима, оскільки призводить до значних витрат ресурсів при реалізації моделі на базі конкретних програмно-технічних засобів. Наприклад, розглянемо діяльність деякого виробництва, що складається із кількох підрозділів. Мета функціонування кожного з них різна і цілі їх можуть бути протилежні, якщо розглядати їх окремо від загальної мети функціонування системи. Крім того, моделювання діяльності підприємства як ізольованої системи може дати хибні результати, якщо ми не будемо враховувати вплив на неї зовнішніх систем: ринку, споживачів, конкурентів, фінансової та економічної системи і т.і. Отже ми бачимо, що з ускладненням об'єктів моделювання виникає необхідність спостереження їх з більш високого рівня.

Класичний підхід до моделювання має дві відмінні риси:

- притаманний рух від часткового до загального;
- створювана модель утворюється шляхом підсумовування окремих її компонент і не враховує виникнення нового системного ефекту (сінергетична властивість).

➔ Системний підхід до синтезу моделі

Застосування системного підходу при моделюванні дозволяє вирішити проблему побудови складної системи із врахуванням усіх факторів і можливостей, пропорційно їх значущості, на всіх етапах дослідження системи і побудови моделі. Системний підхід означає, що кожна система S є інтегрованим цілим навіть тоді, коли вона складається із окремих підсистем. Таким чином, в основі системного підходу лежить вивчення системи як інтегрованого цілого, причому це вивчення під час розробки починається із головного – формулювання мети функціонування.

Процес синтезу моделі на основі системного підходу умовно показано на рис. 3.6. На основі вихідних даних D , що відомі із аналізу зовнішньої системи, тих обмежень, які діють на систему зверху або знизу, враховуючи можливості її реалізації, і на основі мети функціонування формулюють вихідні вимоги R до моделі M системи S . На базі цих вимог розробляються орієнтовно деякі підсистеми SS й елементи E , а потім здійснюється найбільш складний етап синтезу – вибір V складових системи S , для чого використовуються спеціальні критерії вибору (KV).

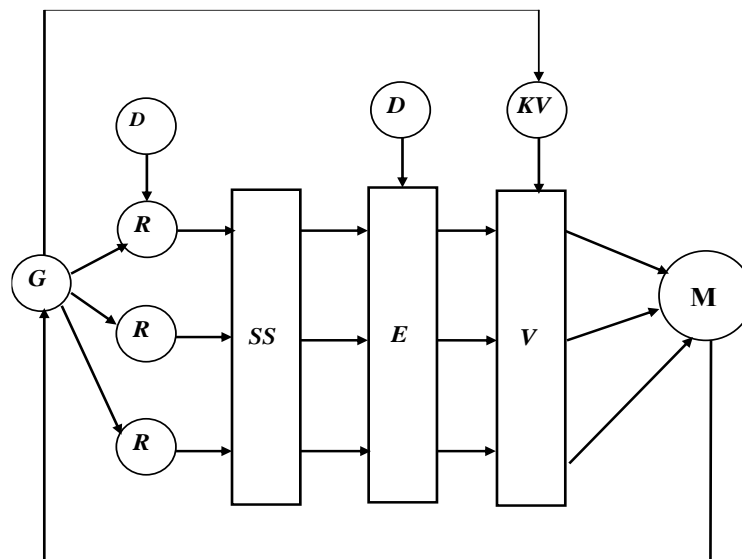


Рисунок 3.6 – Процес синтезу моделі на основі системного підходу [23]

Системний підхід до моделювання має такі особливості:

- макropідхід, в якому головна увага приділяється зовнішнім зв'язкам, а не внутрішній структурі, хоча її вивчення не виключається;
- підхід функціональний, тобто при вивченні об'єкта пріоритет віддається його цілям і функціям, з яких потім виводиться структура.

3.3 Класифікація видів моделювання

Основні властивостями будь-якої моделі є наступні:

- *цілеспрямованість* – модель завжди відображає якусь систему, тобто має мету;
- *скінченність* – модель відображає оригінал лише в кінцевому числі його властивостей та відношень і, крім того, ресурси моделювання скінченні;
- *спрошеність* – модель відображає тільки суттєві сторони об'єкта, повинна бути простою для дослідження і відтворення;
- *приблизність* – реальність відображається моделлю грубо або приблизно;
- *адекватність* – модель повинна успішно описувати систему, що моделюється;
- *наочність* – видимість її основних властивостей і відношень;
- *доступність* – технологічність для дослідження або відтворення;
- *інформативність* – модель повинна містити необхідну і достатню інформацію про систему відповідно до гіпотез, прийнятих при побудові моделі, а також бути відкритою до отримання нової інформації;
- *повнота* – в моделі повинні бути враховані всі основні зв'язки і відношень, необхідні для забезпечення мети моделювання;
- *цілісність* – модель реалізує деяку систему (тобто ціле);
- *адаптивність* – модель може бути пристосована до різних вхідних параметрів і впливів факторів зовнішнього середовища;
- *керованість (імітаційність)* – модель повинна мати хоча б один параметр, змінами якого можна імітувати поведінку модельованої системи в різних умовах.

У цілому моделі і моделювання ми можна класифікувати за різними критеріями. Ми будемо використовувати класифікацію за такими ознаками, що є найбільш важливими для дослідження проблем сталого розвитку, а саме: за аспектами моделювання, відповідністю оригіналу, формами реалізації, наявністю змінних, змінами в часі, ступенем визначеності, способами реалізації (див. табл. 3.2). Треба зауважити, що межі віднесення моделі до того чи іншого типу можуть бути досить умовними.

Наприклад, за змінами в часі моделі поділяються на статистичні та динамічні. Модель називається *статичною*, якщо вона не залежить від часу. Статична модель в кожен момент часу дає лише «фотографію» системи, її зріз. Модель *динамічна*, якщо серед її параметрів є часовий параметр, тобто вона відображає функціонування системи (процеси в системі) в часі.

Математична модель – процес установлення відповідності математичних об'єктів і відношень між ними (математичної моделі) до реальних властивостей об'єкта дослідження цієї моделі, що дозволяє аналізувати поведінку об'єкта під впливом внутрішніх і зовнішніх факторів.

Таблиця 3.2 – Класифікація видів моделювання

Ознака класифікації	Види моделювання	Зміст моделі
Аспект моделювання	Функціональне	Описує сукупність функцій, функціональних підсистем, та їх взаємозв'язок
	Інформаційне	Відображає склад взаємозв'язок між елементами системи
	Поведінкове	Описує динаміку функціонування за допомогою понять: стан системи, подія, перехід з одного стану в інший, умови переходу, послідовність подій
Відповідність оригіналу	Повна	Отримують ізоморфні моделі, що знаходяться в суворій відповідності з оригіналом і дають про нього вичерпну інформацію
	Приблизна	Отримують гомоморфні моделі шляхом відбору найбільш істотних факторів
Форма реалізації	Реальне	Використовується можливість дослідження характеристик або на реальному об'єкті, або на його частини
	Уявне	Застосовується, коли моделі не можуть бути реалізовані в заданому інтервалі часу, або відсутні умови для їх фізичного створення
Наявність змінних, якими можна керувати	Конструктивне	Включення в модель керованих змінних, що дозволяє знаходити ефективний керуючий вплив
	Дескриптивні (описові, концептуальні)	Попередній змістовний опис досліджуваного об'єкта, який не містить керованих змінних, відіграє допоміжну роль, передуючи побудові конструктивної моделі (наприклад, математичної)
Зміни в часі	Статичне	Слугує для опису стану об'єкта в фіксований момент часу
	Динамічне	Слугує для дослідження зміни об'єкта в часі
Ступінь визначеності	Детерміноване	Відображення процесів, в яких всі параметри і впливи вважають не випадковими, а причинно обумовленими
	Стохастичне	Враховуються імовірнісні процеси і події
	Нечітке	Враховується якісна невизначеність
Спосіб реалізації	Наглядне (візуальне)	Будуються моделі геометричної подоби (образотворчі моделі)
	Символьне	Процес встановлення відповідності реальному об'єкту деякого набору символів і виразів
	Імітаційне	Імітуються елементарні явища, що складають процес, зі збереженням їх логічної структури і послідовності протікання
	Натурне	Проведення досліджень на реальному досліджуваному об'єкті
	Фізичне	Дослідження проводяться на установках, які зберігають фізичну природу досліджуваного об'єкта, але відрізняються від нього розмірами, формою та іншими характеристиками
	Аналогове	Набір одних властивостей використовується для відображення властивостей іншої фізичної природи

3.4 Математичне моделювання

Математичне моделювання процесів сталого розвитку спрямоване на отримання такої інформації, яка б дозволила приймати збалансовані рішення щодо сумісного досягнення економічних, екологічних та соціальних цілей розвитку окремих об'єктів управління – підприємства, території, країни тощо, а також надавала орієнтири державним чи регіональним органам регулювання розвитку економіки. Виходячи з цього, важливе значення має вибір видів математичних моделей, які б найбільш відповідали теоретико-економічним засадам сталого розвитку.

➔ Математичні моделі для дослідження питань сталого розвитку

Вид математичної моделі, що обирається для дослідження, залежить як від природи об'єкта та інформаційної суті, завдань із його дослідження, необхідної ймовірності і точності вирішення цього завдань. Існують різні види математичних моделей. Для дослідження питань сталого розвитку серед особливо цікавими є імітаційна, мережева, теоретико-множинна та ігрова моделі (див. вставку 3.2).

Імітаційна модель призначена для вивчення можливих шляхів розвитку і поведінки об'єкта шляхом варіювання деяких або всіх параметрів моделі. Всі імітаційні моделі забезпечують видачу вихідного сигналу системи в тому разі, коли на її підсистеми поступає вхідний сигнал. Тобто імітаційні моделі не здатні формувати своє рішення у тому вигляді, в якому це має місце в аналітичних моделях. Але такі моделі можуть добре працювати як інструмент аналізу поведінки системи в умовах, які задаються експериментом. Наприклад, за допомогою імітаційної моделі можна вивчати економічні вигоди виробничого підприємства при плануванні переходу на добровільні стандарти сталого розвитку за окремими видами продуктів.

Мережева модель є розширенням ієрархічного (деревоподібного підходу), описує аспекти структурованості та цілісності в мережевих об'єктах. Наприклад, можна досліджувати окремі показники сталості в мережах створення вартості.

Імітаційна модель дозволяє легко враховувати такі властивості, що притаманні процесам сталого розвитку, як наявність дискретних і безперервних елементів, нелінійні характеристики елементів системи, численні випадкові впливи та інші фактори, що часто створюють труднощі під час аналітичних досліджень.

Мережева модель – логічна модель даних, що є розширенням ієрархічного підходу, описує структурний аспект сукупності об'єктів різного рівня, де кожен об'єкт може бути зв'язаний з іншими.

Вставка 3.2

Математична модель для планування сталості

Математичні моделі мають широке коло застосувань в різних сферах діяльності. В сучасній практиці менеджменту багато з них можуть бути використані для вирішення проблем за завданнями Глобальних цілей сталого розвитку 2030.

Приклади видів математичних моделей

Імітаційна модель

Нехай модель економічної системи виробництва двох видів товарів (1 і 2) описана у вигляді такого співвідношення: $a_1x_1 + a_2x_2 = S$, де x_1 і x_2 – кількості одиниць кожного виду товарів; a_1 і a_2 – вартість одиниці товару кожного виду товарів; S – загальна вартість виробленої підприємством всієї продукції.

За допомогою цієї імітаційної моделі можна, наприклад, вивчати можливі економічні вигоди S при переході на маркування продукції на відповідність різним видам добровільних стандартів сталого розвитку.

Теоретико-множинна модель

Нехай задані множина $X = \{\text{підприємства } A, B, C, D, E, K, M\}$ і відношення: підприємство A – є постачальником для підприємств B і M , B – покупець у підприємства E і постачальник підприємства C , C – постачальник підприємств D і K , M – постачальник підприємств C і K . Підприємство D виробляє кінцевий продукт F для виробника, для якого важливі усі складові, що виробляються підприємствами. Тоді множина X і множина відношень Y можуть слугувати теоретико-множинною моделлю для аналізу сталості існуючого ланцюгу створення вартості продукту F .

Ігрова модель

Нехай гравець 1 – екологічний інспектор, а гравець 2 – виробниче підприємство, що перевищує норми викиду парникових газів. Йде процес (гра) з ухилення виконання законодавства про викиди в атмосферне повітря (з одного боку) і по виявленню порушення екологічних норм (з іншого боку). Гравці вибирають натуральні числа i і j (i, j), які можна ототожнити, відповідно, i – з екологічним штрафом, що отримує гравець 2 при виявленні факту порушення екологічних норм, j – тимчасовою вигодою гравця 1, отриманою від економії грошей на екологічні засоби. Розглянемо матричну гру з матрицею виграшів порядку n . Кожен елемент цієї матриці A визначається за правилом $a_{ij} = |i - j|$. Модель гри описується цією матрицею і стратегією ухилення і затримання. Така модель – антагоністична, безкоаліційна.

Теоретико-множинна модель будується за допомогою деяких множин і відношень властивих ним і між ними. При дослідженні питань сталого розвитку можливе використання теорії множин для моделювання ситуацій зі змінною структурою для уточнення кількісної оцінки значень показників, що важливі для досягнення цілей, з врахуванням вкладу окремих елементів або підсистем.

Наприклад, за допомогою теоретико-множинної моделі можна досліджувати які саме бізнес структури впливають на показники сталості у ланцюгах створення вартості. Як відомо, досягнення сталості кінцевої продукції та сталої поведінки її виробника залежить від сили дії багатьох інших учасників системи створення вартості, участь яких у процесах постачання та обслуговування виробничого підприємства відрізняється багатофункціональністю та багаторежимністю. Тобто окремі учасники під час виконання своїх функцій за призначенням можуть суттєво змінювати структуру та якісні характеристики системи створення вартості.

Ігрова математична модель – це формалізований опис колективної поведінки, що відображає взаємодію гравців в прагненні вибрати найкращу для себе стратегію поведінки, причому їх інтереси можуть бути різні. Розбіжність інтересів породжують конфліктну ситуацію, тоді гра є антагоністичною. Якщо є збіг інтересів, гравці можуть вступати в постійні або тимчасові кооперації, тоді гра називається «коаліційною». Стратегією гравця називають план, за яким він здійснює вибір у будь-якій можливій ситуації, володіючи фактично можливою інформацією

Конфлікти в даний час є ключовою проблемою виконання завдань сталого розвитку. У реаліях часто виникають ситуації, в яких різні учасники мають труднощі або протилежні інтереси щодо дотримання вимог за конкретними цілями, стандартами або інтересами спільноти. Характерною особливістю будь-якого конфлікту, у тому числі і з питань сталого розвитку, є те, що жодна сторона-учасник не знає заздалегідь точно і повністю всіх своїх можливих рішень та реакції інших сторін, тому кожен змушений діяти в умовах невизначеності. Ігрова математична модель дозволяє виробити оптимальну стратегію поведінки учасників конфліктів.

Теоретико-множинна модель дозволяє описувати множину усіх елементів, які входять до неї, та які мають певні властивості та знаходяться у певних взаємовідносинах, і використовується у теорії організації та управління системами.

Ігрова математична модель має наступні риси:

- по-перше, модель описує дії кількох учасників, яких називають гравцями;
- по-друге, комплекс дій кожної із сторін, що мають прагнення досягти найкращого для себе результату, називаються стратегіями;
- по-третє, результати дій для кожного гравця повинні відповідати функціям виграшу.

➔ **Етапи побудови математичних моделей**

Процес формування математичної моделі і використання її для аналізу і синтезу називається *математичним моделюванням*. Математичні об'єкти – це числа, змінні, множини, вектори, функції, матриці і т.ін. Сутність побудови математичної моделі полягає в тому, що реальна система спрощується, схематизується і описується за допомогою того чи іншого математичного апарату.

Виділяють наступні основні етапи побудови моделі.

1 *Змістовий опис об'єкта, що моделюється*. Словесно описується об'єкт моделювання, цілі його функціонування, середовище, в якому він функціонує, виявляються окремі елементи, характеристики об'єкта і його елементів, визначаються взаємозв'язки між елементами, станами, характеристиками. Таке попереднє уявлення об'єкта дослідження називається концептуальною моделлю. Цей етап є основою для подальшого формального опису об'єкта.

2 *Формалізація операцій*. На основі змістового опису визначається і аналізується вихідна множина характеристик об'єкта, виділяються найбільш істотні з них. Потім виділяють керовані і некеровані параметри, вводять символні позначення. Визначається система обмежень, будується цільова функція моделі. Таким чином, відбувається заміна змістовного опису формальним (символьним, упорядкованим).

3 *Перевірка адекватності моделі*. Початковий варіант моделі необхідно перевірити за такими аспектами:

- чи всі суттєві параметри включені в модель?
- чи немає в моделі несуттєвих параметрів?
- чи правильно відображено зв'язки між параметрами?
- чи правильно визначено обмеження на значення параметрів?

Головним методом перевірки адекватності моделі досліджуваного об'єкта виступає практика. Отримані результати моделювання піддаються аналізу на відповідність відомим властивостям досліджуваного об'єкта. За результатами перевірки моделі на адекватність приймається рішення про можливість її практичного використання або про проведення коригування.

4 *Коригування моделі*. На цьому етапі уточнюються наявні відомості про об'єкт і всі параметри побудованої моделі. Вносяться зміни в модель, і знову виконується оцінка адекватності.

5 *Оптимізація моделі*. Сутність оптимізації (покращення) моделі полягає в її спрощенні при заданому рівні адекватності. В основі оптимізації лежить можливість перетворення моделей із однієї форми в іншу. Основними показниками, за якими можлива оптимізація моделі, є час і витрати коштів для проведення досліджень і прийняття рішень за її допомогою.

➔ Математичний інструментарій моделювання

Перелічимо деякі математичні дисципліни, які найбільш часто використовуються при розв'язанні задач математичного моделювання.

- *Математичне програмування* (планування) – це розділ математики, що займається розробкою методів відшукування екстремальних значень функції, на аргументи якої накладені обмеження. Методи математичного програмування широко використовуються для вирішення розподільних завдань [10; 17; 33].

- *Лінійне програмування* (ЛП) – є найбільш простим і найкраще вивченим розділом математичного програмування. У ньому розглядаються завдання, у яких показник оптимальності являє собою лінійну функцію від змінних задачі, а обмежувальні умови, що накладаються на можливі рішення, мають вигляд лінійних рівностей або нерівностей. Відповідно, нелінійне програмування розглядає завдання з нелінійними цільовими функціями і обмеженнями [17; 33].

- *Теорія графів* – завдання, які вирішуються за допомогою *мережевого* моделювання можуть бути сформульовані і вирішені методами лінійного програмування, але графова модель дозволяє розв'язувати їх більш ефективно [17,33].

- *Цільове програмування* являє собою методи розв'язування задач лінійного програмування з декількома цільовими функціями, які можуть конфліктувати один з одним. За допомогою цього інструменту можливо здійснювати багатоцільову оцінку і вибір у різних сферах бізнесу [10, 17; 33].

- *Динамічне програмування* передбачає розбиття задачі на кілька етапів, кожен з яких представляє собою підзадачу щодо однієї змінної і вирішується окремо від інших підзадач [10; 17; 31; 33; 37].

- *Теорія ймовірностей* використовується в багатьох задачах дослідження операцій, наприклад, для прогнозування, імовірнісного управління запасами, моделювання систем масового обслуговування, імітаційного моделювання та інших елементів системи. Матеріали за даною темою можна знайти у підручнику [25, 33]

- *Методи моделювання та прогнозування* часових рядів дозволяють виявити тенденції зміни фактичних значень параметра Y в часі і прогнозувати майбутні значення Y . Матеріали за даною темою можна знайти у підручнику [1, 2, 25, 38]

- *Теорія ігор і прийняття рішень* розглядає процеси вибору найкращої з декількох альтернатив системи в ситуаціях визначеності (дані відомі точно), ризику (дані можна описати за допомогою імовірнісних розподілів), невизначеності (розподіл або невідоме, або не може бути визначено) [33; 43].

- *Теорії нечітких множин* дозволяють в математичній формі представити і використовувати для прийняття рішень суб'єктивну словесну експертну інформацію про систему (її переваги, правила, кількісні і якісні показники) [9; 37].

3.5 Імітаційне моделювання

Імітаційне моделювання це процес конструювання моделі реальної системи для проведення експериментів із метою зрозуміти поведінку системи або оцінити (у рамках обмежень, що описуються певним критерієм або критеріями) різних можливих стратегій, які забезпечують функціонування даної системи [42].

Тобто імітаційне моделювання є експериментальною і прикладною методологією, що має на меті:

- описати поведінку системи;
- побудувати теорії та гіпотези, які можуть пояснити явища, які спостерігаються;
- використовувати ці теорії для передбачення змін майбутньої поведінки, що можуть бути викликані змінами в системі або в зміні способів її існування.

За звичай імітаційне моделювання відносять до одного з видів математичного моделювання, але воно не обмежується тільки математичними моделями. Імітаційне моделювання часто використовують там, де не можна відшукати рішення аналітичними методами. Більш того, на етапі проектування складних систем імітаційна модель може стати самим ефективним варіантом дослідження: «Коли керівник приходить до повного розуміння проблеми і починає вільно управляти своєю моделлю, він отримує здатність бачити зміст своєї роботи із інших точок зору. Він захоче перевірити на моделі безліч альтернативних варіантів, щоб оцінити нові можливості, які він отримав. По суті він використовує модель для підвищення своєї майстерності керівника, що дозволяє йому на новому рівні встановити всі істотні наслідки внесених у систему змін» [42].

До недоліків імітаційного моделювання можна віднести те, що розробка хорошої імітаційної моделі часто коштує дорого і потребує багато часу, крім того імітаційна модель в принципі неточна, і підвищити її точність можна лише частково шляхом аналізу чутливості моделі до визначених параметрів. Результати, які дає імітаційна модель зазвичай є кількісними, у зв'язку з чим існує загроза приписувати числам більшого значення, чим вони мають насправді.

Переваги імітаційного моделювання:

- може бути застосовано в тих випадках, коли аналітичних моделей не існує, або вони занадто складні для реалізації;
- можна здійснити велику кількість експериментів за короткий час, тоді як експеримент на реальному об'єкті може потребувати надмірних витрат часу та коштів;
- можна перевірити безліч реалізацій різних сценаріїв розвитку системи;
- забезпечують підтримку заданих параметрів моделі, що неможливо при експерименті на реальному об'єкті.

Процес імітаційного моделювання складається з наступних етапів [42]:

1 *Постановка завдання.* На цьому етапі важливо правильно сформулювати мету завдання, визначити границі системи, критерії, які описують ефективність її роботи та обмеження які існують у системі. Зазвичай тут вирішують такі завдання:

- формулювання завдання;
- визначення мети і пріоритетів моделювання;
- збір інформації про систему, об'єкті моделювання;
- опис даних (їх структури, діапазон, джерела і т.д.).

2 *Передмодельний аналіз*, що має такі етапи:

- аналіз існуючих аналогів і підсистем;
- аналіз технічних засобів моделювання;
- аналіз програмного забезпечення;
- аналіз математичного забезпечення.

3 *Формулювання моделі* (абстрагування) передбачає:

- вибір моделі та перехід від реальної моделі до абстрактної.

4 *Підготовка даних* (моделі) включає:

- відбір даних, необхідних для побудови моделі;
- розробка структур даних;
- розробка вхідних і вихідних специфікацій, форм представлення даних;
- проектування структури і складу моделі (підмоделей).

5 *Дослідження моделі*, що включає:

- вибір методів дослідження підмоделей;
- вибір, адаптація або розробка алгоритмів;
- складання моделі в цілому з підмоделей;
- ідентифікація моделі, якщо в цьому є необхідність;
- перевірка адекватності, стійкості і чутливості моделі.

6 *Програмування* (проектування програми), що передбачає:

- вибір методу тестування і тестів (контрольних прикладів);
- кодування на мові програмування (написання команд);
- коментування програми.

7 *Тестування та налагодження* включає:

- синтаксичне налагодження;
- семантичне налагодження (налагодження логічної структури);
- тестові розрахунки, аналіз результатів тестування;
- оптимізацію програми.

8 *Планування експерименту*, що включає:

- планування експеримента, який має дати необхідну інформацію (стратегічне планування);
- визначення способу проведення кожної серії експериментів, передбачених планом (тактичне планування).

9 *Експериментування* – імітація із метою отримання даних і моделі, а саме:

- оцінка адекватності моделі;
- оцінка чутливості моделі;
- оцінка стійкості моделі.

10 *Реалізація* – практичне використання моделі та/або результатів моделювання.

11 *Документування* – реєстрація процесу проведення експерименту та його результатів, а також документування процесу створення, налаштування та використання моделі, а саме:

- опис завдання, цілей моделювання;
- опис моделі, методу, алгоритму;
- опис середовища реалізації;
- опис можливостей і обмежень;
- опис вхідних та вихідних форматів, специфікацій;
- опис тестування;
- створення інструкцій для користувача.

12 *Супровід*, тобто:

- аналіз застосування, періодичності використання, кількості користувачів, типу використання (діалоговий, автономний і ін.);
- аналіз відмов під час використання моделі.

14 *Обслуговування моделі*, алгоритму, програми та їх експлуатація:

- розширення можливостей (включення нових функцій або зміна режимів моделювання, в тому числі і під модифіковану середовище);
- за необхідністю – знаходження, виправлення прихованих помилок в програмі;
- використання моделі.

Зауважимо, що імітаційна модель не є еквівалентною комп'ютерній програмі, а моделювання не зводиться до програмування. Але прогрес моделювання сьогодні пов'язаний з розробкою систем комп'ютерного моделювання, які підтримують весь життєвий цикл моделі, а прогрес в інформаційних технологіях – з актуалізацією досвіду моделювання на комп'ютері, зі створенням банків моделей, методів і програмних систем, що дозволяють збирати нові моделі з банку моделей.

Висновки

- 1 Модель є інструментом, який застосовується для вивчення системи і оптимізації її роботи. Вона відображає суттєві властивості системи відповідно до задачі дослідження.
- 2 Теоретичні моделі будуються на основі теоретичних законів і залежностей. До їх переваг відноситься те, що моделі можна застосовувати до багатьох об'єктів певного типу. Емпіричні моделі будуються для відповіді на емпіричні питання, які повинні бути точно визначені згідно з даними.
- 3 Системний підхід до моделювання полягає в визначенні реальної ситуації як цілісної системи взаємопов'язаних елементів та зв'язків між ними, у тому числі коли система складається із окремих роз'єднаних підсистем. Застосування системного підходу при моделюванні дозволяє вирішити проблему побудови складної системи із врахуванням усіх факторів і можливостей, пропорційно їх значущості, на всіх етапах дослідження системи і побудови моделі.
- 4 Сталий розвиток – це керований розвиток, основою якого є системний підхід. Тобто моделювання еколого-соціально збалансованого економічного розвитку об'єкту управління розглядає питання (ситуацію) як складну систему у взаємодії із зовнішнім середовищем, а також у сукупності з іншими системами деякої метасистеми.
- 5 У цілому моделі і моделювання ми можна класифікувати за різними критеріями. Для дослідження проблем сталого розвитку корисно використовувати класифікацію за такими ознаками: за аспектами моделювання, відповідністю оригіналу, формами реалізації, наявністю змінних, змінами в часі, ступенем визначеності та способами реалізації.
- 6 Математичне моделювання процесів сталого розвитку спрямоване на отримання такої інформації, яка б дозволила розробляти збалансовані рішення щодо сумісного досягнення економічних, екологічних та соціальних цілей розвитку окремих об'єктів управління. Серед розглянутих особливо цікавими є імітаційна, мережева, теоретико-множинна та ігрова моделі
- 7 Імітаційна модель призначена для вивчення можливих шляхів розвитку і поведінки об'єкта шляхом варіювання деяких або всіх параметрів моделі. Такі моделі можуть добре працювати як інструмент аналізу поведінки системи в умовах переходу на добровільні стандарти сталого розвитку.
- 8 Мережева модель описує аспекти структурованості та цілісності в мережевих об'єктах. Особливо корисні такі моделі для дослідження показників сталості в складних мережах створення вартості.
- 9 Ігрова математична модель – це формалізований опис колективної поведінки, що може застосовуватися для ситуацій, коли різні учасники мають труднощі або протилежні інтереси щодо дотримання вимог за конкретними цілями, стандартами або інтересами спільноти.

Питання для самоконтролю і завдання

Надайте відповіді на такі питання:

- Дайте визначення поняття модель. Наведіть приклади моделей.
- Назвіть сфери використання моделей для цілей сталого розвитку.
- Аргументуйте різницю між класичним та системним підходом до моделювання.
- За якими ознаками корисно проводити класифікацію моделей для дослідження проблем сталого розвитку.
- В чому полягає різниця між пізнавальною та прагматичною моделями?
- Яка модель називається статичною /динамічною /дискретною /неперервною?
- Які основні властивості характерні для математичних моделей?
- Яка модель називається мережевою? Які основні проблеми вивчаються за допомогою мережевих моделей?
- Дайте визначення ігрової математичної моделі. Які основні проблеми вивчаються за допомогою ігрових математичних моделей?
- Дайте визначення імітаційної математичної моделі. Які основні проблеми вивчаються за допомогою імітаційних математичних моделей?
- Назвіть та охарактеризуйте основні етапи моделювання.
- Що таке життєвий цикл моделювання?
- Що таке лінеаризація, ідентифікація, оцінка адекватності та чутливості моделі?
- У якому співвідношенні перебувають поняття «експеримент» і «комп'ютерне моделювання»?
- Які основні характерні риси комп'ютерної моделі?
- Які існують класифікаційні ознаки видів моделювання систем?
- Що собою являє математичне моделювання систем?
- Які особливості характеризують імітаційне моделювання систем?
- У чому суть методу статистичного моделювання на ЕОМ?
- Чим визначається ефективність моделювання систем на ЕОМ?

Побудуйте графічні або мережеві моделі таких процесів:

- Продаж продукту, що позиціонує як екологічно сталий.
- Продаж послуги, що позиціонує як соціально орієнтована.
- Закупівля сировини підприємством, що працює у ланцюгах створення вартості.
- Дослідження ринку органічної продукції.
- Формування унікальної торгової пропозиції для глобальних виробничо-збутових ланцюгів.
- Підготовка матеріалу для сайту компанії, що сертифікована на відповідність стандарту соціальної відповідальності.
- Підготовка пропозиції для участі у виставці циркулярної економіки.
- Підготовка презентації продукту, що маркований на відповідність стандарту справедливої торгівлі
- Закупівельна діяльність логістичного підприємства, що підтримує «зелене» виробництво.

Завдання для виконання у класі

1 Побудуйте концептуальну та математичну моделі наступних задач. Визначте, як буде змінюватися побудована модель, якщо змінити вихідні припущення.

1.1 Для вивезення вантажу з районів А та В формуються автоколони. На кожну автоколонну з 10 машин для вивезення вантажу з району А, необхідно 4 пересувні майстерні, 3 машини технічної допомоги та 2 мотоцикли. На таку ж автоколонну для вивезення вантажу з району В потрібно 3 пересувні майстерні та 1 машина технічної допомоги. При цьому одна колона з району А вивозить 2 тис. тонн вантажу, а з району В – 1 тис. тонн. Скільки автоколон слід направити в кожен район, щоб забезпечити максимальне вивезення вантажу, якщо у навності є 200 машин, 20 авто-ремонтних майстерень, 10 машин технічної допомоги та 16 мотоциклів?

1.2 Підприємство виробляє два види продукції П1 та П2, використовуючи 4 групи верстатів (А, Б, В, Г), фонди робочого часу яких (у годинах) становлять 10; 30; 20; 12. На виробництво одного виробу П1 кожна група верстатів витрачає (відповідно): 4; 0; 1; 3 години, для П2 – 2; 3; 2; 2 год. Прибуток від кожного виробу П1 дорівнює 20 грн; П2 – 30 грн. Необхідно скласти план виробництва, який забезпечує максимальний прибуток.

1.3 На шахті «Добропільська» функціонує три видобувних дільниці. Вугілля, що видобувається на кожній з них, має різний вміст сірки, різні показники вологості й зольності, стосовно кожної дільниці відомі значення максимально можливого й мінімально необхідного обсягу видобутку, а також витрати на видобуток однієї тонни сировини (див. табл. 3.3). Необхідно, з огляду на характеристики вугілля, що видобувається на кожній дільниці, скласти план робіт, щоб витрати на видобуток були мінімальними, його обсяг максимальним і виконувалися б усі вимоги споживачів до якості сировини (див. табл. 3.4).

Таблиця 3.3 – Характеристики вугілля, % та показники роботи дільниці

Характеристики вугілля, % та показники роботи дільниці	Номер дільниці		
	1	2	3
Зольність	49	37	23
Вологість	7	8	10
Вміст сірки	1,8	2,1	3
Витрати, грн	1184,210	1381,777	1083,515
Максимальний обсяг видобутку, тис. т	1650	1090	1270
Мінімальний обсяг видобутку сировини, тис. т	1200	600	530

Таблиця 3.4 – Вимоги споживачів до якості сировини

Якість вугілля	Зольність %	Вологість %	Вміст сірки %
Експлуатаційна	39,5	-	-
Середня	-	8,2	2,16
Не більше	47,4	9,8	2,6

1.4 На Запорізькому залізорудному комбінаті в процесі добування залізної руди застосовують закладку, що твердіє, вона складається з в'язких та інертних матеріалів. Інертним заповнювачем для приготування закладної суміші слугують відходи енергетичного, металургійного й гірничого виробництва, зокрема доменні шлаки (x_1), хвости ЦГЗК (x_2), вапняно-доломітний матеріал (x_3), пісок (x_4) та суглинки (x_5). Завдання полягає у визначенні такого складу суміші, щоб її вартість була мінімальною, а міцність максимальною. При цьому повинні виконуватись такі технологічні умови: вміст води в суміші дорівнює 20 % від в'язких складових; вміст цементу, вапняно-доломітного матеріалу й піску має становити відповідно 65, 9, 35, і 18 % від інертних компонентів суміші. Залежність міцності суміші від її складових описується функцією: $f(x) = 467x_1 + 380x_2 - 54x_3 + 87x_4 - 120x_5 - 23,25$.

2 Сформулюйте кілька варіантів змістових постановок задач моделювання:

- роботи громадського транспорту з мінімальною шкодою для довкілля;
- процесу розвитку соціального підприємництва в місті;
- поведінки з промисловими відходами в гірничодобувному регіоні;
- впровадження стандартів гідної праці на підприємстві.

3 На прикладі певного виробничого підприємства з вашого регіону сформулюйте можливі задачі, які потребують для свого рішення математичного або імітаційного моделювання. Опишіть їх можливі змістові постановки. Які моделі можуть бути використані?

РОЗДІЛ 4

Статистичні методи у моделюванні сталого розвитку

Питання для дискусії:

Статистична залежність між величинами. Завдання кореляції і регресії. Оцінювання сили зв'язку між змінними. Додатна та від'ємна кореляція. Специфікація моделі парної регресії. Основні методи вибору функціональної залежності. Парна та множинна регресія. Визначення значущості коефіцієнтів регресії. Перевірка якості рівняння регресії. Переваги і недоліки регресійних прогнозних моделей.

Ключові терміни та поняття:

- Кореляційний аналіз
- Регресійний аналіз
- Коефіцієнт лінійної кореляції
- Коефіцієнт детермінації
- Метод «чорного ящика»
- Додатна кореляція
- Від'ємна кореляція
- Коефіцієнт часткової кореляції
- Коефіцієнт множинної кореляції
- Коефіцієнт еластичності
- Мультиколінеарність
- Модель парної регресії
- Модель множинної регресії
- Метод найменших квадратів
- Адекватність моделі регресії
- Точність моделі регресії
- Число ступенів свободи
- Рівень значущості
- Критерій Стюдента
- Критерій Фішера

4.1 Основні поняття кореляційно-регресійного аналізу

Поняття «кореляція» з'явилося в середині XIX століття в роботах англійських статистиків Ф. Гальтона і К. Пірсона¹. Цей термін походить від латинського «*correlatio*» – співвідношення, взаємозв'язок. Поняття «регресія» (з латинської «*regressio*» – рух назад) було введено Ф. Гальтоном, який, вивчаючи зв'язок між зростом батьків та їх дітей, виявив явище «регресії до середнього» – зріст дітей дуже високих батьків мав тенденцію бути ближче до середньої величини².

Теорія і методи кореляційного аналізу використовуються для виявлення зв'язку між випадковими змінними та оцінки її тісноти. Припустимо, що є випадкові величини X та Y . В загальному випадку вони можуть бути залежними або незалежними (див. рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Види залежності між випадковими величинами

¹Френсіс Гальтон (англ. *Francis Galton*; 16.02.1822 – 17.01.1911) – англійський антрополог, географ, статистик, соціолог і психолог. Серед інших наук займався біологічною статистикою, першим запропонував те, як обчислити коефіцієнт кореляції. Запропонував закон регресії спадкових ознак.

Карл Пірсон (англ. *Karl Pearson*; 27.03.1857 – 27.06.1936) – англійський математик, статистик, біолог та філософ; один із засновників математичної статистики. Оpubлікував ряд фундаментальних праць по математичній статистиці (більш 400 робіт). Розробив теорію кореляції, критерії узгодженості, алгоритм прийняття рішень з оцінки параметрів.

²Після визнання важливості сталості розвитку було розроблено велика кількість глобальних індикаторів та показників, які використовуються для виміру сталості в дуже різних соціальних, екологічних, економічних, політичних, культурних та інших сферах оцінки, що ускладнює завдання моделювання. Для з'ясування стану багатовимірного розвитку досить часто застосовується апарат кореляційно-регресійного аналізу. У тому числі є корисним метод *канонічної кореляції*, що призначений для аналізу залежностей між двома наборами змінних загалом. За допомогою цього методу можна, наприклад, виявити залежності між основними індикаторами світових рейтингів соціального прогресу (Індексу людського розвитку, Індексу соціального прогресу та Індексу глобальної конкурентоспроможності тощо) та найпоширенішими одномірними показниками сталого розвитку – такими регресорами, як екологічний слід, нерівність можливостей, очікувана тривалість життя, ВВП на душу населення, очікувана тривалість навчання дітей шкільного віку і т. д. (див. https://www.researchgate.net/publication/326017500_Bagatovariantnij_analiz_globalnogo_stalogo_rozvitku).

Випадкові величини будуть *незалежними*, якщо розподіл однієї з них не залежить від того, якого значення набуде інша. Коли ця умова не виконується – випадкові величини є *залежними*. При цьому вони можуть бути пов'язані функціональною або статистичною залежністю.

Якщо кожному можливому значенню випадкової величини X відповідає єдине випадкове значення випадкової величини Y , то існує функціональна залежність між величинами Y та X . Це вважається найсильнішою залежністю. Тоді Y являє собою функцію випадкового аргументу X , тобто $Y = \varphi(x)$.

➤ Статистична залежність між величинами

Статистична залежність або називають залежність між двома змінними, при якій кожному можливому значенню однієї змінної відповідає закон розподілу іншої змінної.

- Статистична залежність виявляється у тому, що при змінюванні однієї випадкової величини змінюється середнє значення іншої. Така залежність називається кореляційною.
- Для статистичної залежності розрізняють *кореляцію*, коли виявляють існування зв'язку між двома або багатьма випадковими величинами та оцінюють силу (тісноту) цього зв'язку, та *регресію*, коли встановлюють характер (форму) залежності між величинами X та Y і можливість оцінки Y за X (або X за Y).

До визнаних прикладів залежних показників належить кореляція між зростанням викидів парникових газів у промисловій сфері та показниками зміни клімату. Кореляційні залежності займають проміжне положення між функціональною залежністю і повною незалежністю змінних.

Між величинами, які характеризують природні або економічні явища, у більшості існують залежності, що відмінні від функціональних. Це пояснюється тим, що на вихідні змінні впливає безліч різних факторів, які не можна точно виміряти і врахувати, отже закономірності також не будуть описані точно і незмінно, як, наприклад, у фізиці, хімії або астрономії. Як правило, значення залежної змінної Y визначається не тільки значенням змінної X , а й іншими (неконтрольованими або неврахованими) факторами, а також тим, що вимірювання значень змінних неминуче супроводжується деякими випадковими помилками.

Статистичною залежністю між двома величинами називають таку залежність, за якої зміна розподілу ймовірностей однієї з них викликає зміну розподілу ймовірностей другої.

Кореляція – це така статистична залежність двох величин, за якою зміна зміни однієї з них змінюється середнє значення іншої

Кореляційний аналіз – це статистичне дослідження існуючої залежності між випадковими величинами. Завданням кореляційного аналізу є з'ясування того, чи існує істотний зв'язок між досліджуваними параметрами і, якщо він існує, визначення сили цього зв'язку (сильної або слабкої).

Умовним середнім \bar{y}_x називають середнє арифметичне спостережуваних значень Y , що відповідають даному значенню величини X . Наприклад, за умови, що $x_1 = 4$, величина Y набула значень: $y_1 = 5$ та $y_2 = 8$, отже, умовне середнє $\bar{y}_{x_1} = \frac{5+8}{2}$.

Умовним середнім \bar{x}_y називають середнє арифметичне спостережуваних значень X , що відповідають даному значенню величини Y .

Вираз: $\bar{y}_x = f(x)$, називають *вибірковим рівнянням регресії* Y на X , функцію $f(x)$ – вибірковою функцією регресії Y на X , а її графік – вибірковою лінією регресії Y на X . Аналогічно можна записати вибіркоче рівняння регресії X на Y : $\bar{x}_y = g(y)$.

Зв'язок між залежною змінною і однією або декількома незалежними змінними описується за допомогою рівняння регресії:

$$\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_m). \quad (4.1)$$

Рівняння 4.1 показує, яким буде в середньому значення Y , якщо змінні X набудуть конкретні значення.

Для оцінки параметрів регресії необхідно задати конкретний вид функцій $f(x)$ або $g(y)$ і за результатами експерименту встановити значення параметрів цих функцій, тобто конкретний вигляд рівняння регресії. Як статистичний метод дослідження, регресійний аналіз на практиці залежить від форми процесу генерації даних і від того, як він ставиться до регресійному підходу.

Завданням регресійного аналізу є оцінка параметрів рівняння регресії. Для цього необхідно задати конкретний вид функцій $f(x)$ або $g(y)$ і за результатами експерименту встановити значення параметрів цих функцій, тобто конкретний вигляд рівняння регресії. Побудова рівняння регресії включає такі етапи: (1) визначення виду залежності (етап специфікації); (2) визначення коефіцієнтів регресії (етап ідентифікації); (3) перевірка якості рівняння регресії (етап верифікації). Якщо незалежна змінна одна, то регресія називається парною.

Кореляційний аналіз – метод статистичного дослідження залежності і виміру її тісноти між величинами у генеральній сукупності, які можна вважати випадковими з нормальним характером розподілу.

Регресійний аналіз – метод визначення відокремленого і спільного впливу факторів на результативну ознаку та кількісної оцінки цього впливу шляхом використання відповідних критеріїв.

➔ Коефіцієнт лінійної кореляції

Завдання кореляції має на меті оцінити силу зв'язку між величинами X та Y . Воно вирішується шляхом обчислення *вибіркового коефіцієнта кореляції*, що характеризує тісноту (силу) лінійного зв'язку між двома змінними. Коефіцієнтом кореляції r_{xy} випадкових величин X та Y називають відношення кореляційного моменту μ_{xy} до добутку середніх квадратичних відхилень цих величин, а саме:

$$r_{xy} = \mu_{xy} / (\sigma_x \sigma_y). \quad (4.2)$$

Коефіцієнт кореляції також можна визначити за формулою:

$$r = \frac{\sum n_{xy}xy - n\bar{x}\bar{y}}{n\sigma_x\sigma_y}, \quad (4.3)$$

де \bar{x} та \bar{y} – вибіркові середні значень вхідної змінної x та вихідної змінної y відповідно, σ_x та σ_y – їхні середні квадратичні відхилення, n_{xy} – частота появи пари (x, y) , n – обсяг вибірки.

Зауважимо, що коефіцієнт кореляції r_{xy} – безрозмірна величина і не залежить від одиниць виміру, отже, можна порівнювати величини різних порядків. Із визначення коефіцієнта кореляції випливає, що для незалежних випадкових величин він дорівнює нулю, а якщо $r_{xy} \neq 0$, то між випадковими величинами X та Y існує лінійний зв'язок. Залежність вважається сильною, якщо значення коефіцієнта кореляції більше за 0,7 і слабкою, якщо коефіцієнт кореляції менший 0,3.

Отже, коефіцієнт кореляції має такі властивості:

- За абсолютним значенням не перевищує одиниці: $|r_{xy}| \leq 1$.
- Якщо $r_{xy} > 0$, то величини X та Y додатно корельовані, тобто зі збільшенням значення X збільшується Y .
- Якщо $r_{xy} < 0$, то величини X та Y від'ємно корельовані, тобто зі збільшенням значення X зменшується Y . Коли $|r_{xy}| = 1$, то це означає, що між величинами X та Y існує *лінійна функціональна залежність*.
- Для незалежних випадкових величин коефіцієнт кореляції дорівнює нулю, тобто $r_{xy} = 0$.
- Коли $|r_{xy}|$ близький до нуля, це означає що між величинами X та Y відсутня лінійна залежність (при цьому нелінійна залежність може існувати).

Коефіцієнт кореляції – показник, який використовують для вимірювання щільності зв'язку між результативними і факторними ознаками у кореляційно-регресійній моделі за лінійної залежності. За абсолютною величиною коефіцієнту кореляції коливається в межах від -1 до +1. Чим ближчий цей показник до 0, тим менший зв'язок, чим ближчий він до ± 1 – тим зв'язок тісніший. Знак «плюс» при коефіцієнті кореляції означає прямий зв'язок між ознаками x і y , знак «мінус» – обернений.

Отже, якщо зі збільшенням X значення залежної змінної Y в середньому збільшується, то така залежність називається прямою. Якщо середнє значення Y при збільшенні X зменшується, має місце від'ємна або зворотна кореляція. Якщо зі зміною X значення Y в середньому не змінюються, то кажуть, що кореляція – нульова

Величина R^2 називається *коефіцієнтом детермінації*. Він визначає частку варіації однієї з змінних, яка пояснюється варіацією іншої змінної і обчислюється як квадрат коефіцієнта кореляції.

Часто при дослідженні взаємозв'язку між будь-якими показниками, досліджуваній об'єкт описують у вигляді так званого «чорного ящика»³. Найпростіший випадок – вивчення зв'язку між однією змінною x , яку називають фактором (вхідною або незалежною змінною), і змінною Y , яку називають відгуком (реакцією, залежною змінною). Цій ситуації відповідає рис. 4.2. У більш загальному випадку підсумком функціонування системи є цілий набір результуючих величин Y_s ($s = \overline{1, k}$). При цьому значення відгуків Y_s визначаються, з одного боку, сукупністю факторів x_j ($j = \overline{1, n}$), а, з іншого боку, набором збурень (випадкових, неконтрольованих факторів) z_i ($i = \overline{1, m}$). Таку ситуацію ілюструє рис. 4.3.



Рисунок 4.2 – Подання досліджуваної системи у вигляді «чорного ящика» (один фактор, один відгук)

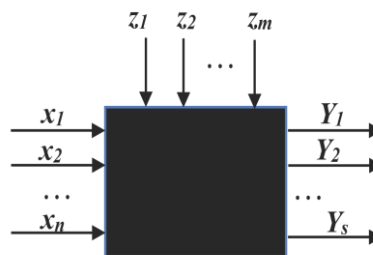


Рисунок 4.3 – Представлення досліджуваної системи у вигляді «чорного ящика» (загальний випадок)

У літературі достатньо описано прикладів, як вчені використовували такі прийоми, щоб спрогнозувати, що станеться з явищем чи процесом (відгуком Y), якщо змінювати значення суттєвих факторів впливу на їхній стан (змінні X).

³Метод так званого «чорного ящику» був запропонований відомим американським вченим Норбертом Вінером (англ. *Norbert Wiener*). Суть такої статистичної моделі полягає у тому, що будь-який об'єкт чи процес, що вивчається, представляється у вигляді квадрату (чорного ящику) з невідомим змістом і внутрішньою структурою, у якому визначаються лише діючі вхідні змінні, а також вихідні змінні, що цікавлять дослідника. Інші змінні, які не стосуються завдання дослідження, ігноруються. Тобто модель «чорного ящику» доцільно використовувати у випадках, коли знання про структуру системи не дуже важливі, а метою дослідження є саме реакція систем на вхідні параметри.

Цей метод є дуже цікавим при дослідженні поведінки складних екологічних і соціальних систем, зміни стану яких вивчаються у контексті задач сталого розвитку. Наприклад, при плануванні будівництва великого виробничого підприємства у певному регіоні цією моделлю можна досліджувати критичність впливів проекту на параметри навколишнього природного середовища та оцінювати загрози порушення рівноваги і незворотних змін в екосистемах.

Якщо досліджується вплив тільки одного фактора, тобто залежність описується у вигляді $Y = f(x)$, то існування залежності іноді можна побачити, якщо побудувати *кореляційне поле* – зобразити на площині результати спостережень.

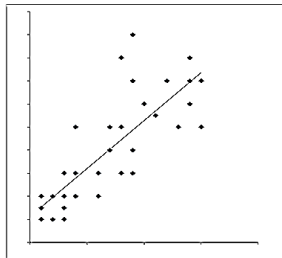


Рисунок 4.4 – Поле кореляції, якщо $r_{xy} = 0,787$

Кореляційним полем називається множина точок $\{x_i, y_i\}$ на площині XU . Якщо точки кореляційного поля утворюють еліпс, головна діагональ якого має кут нахилу до осі OX менший 90° , то має місце *додатна кореляція*, тобто зі збільшенням значення X збільшується Y .

Якщо точки кореляційного поля утворюють еліпс, головна діагональ якого має кут нахилу до осі OX більший 90° , то має місце *від’ємна кореляція*, тобто зі збільшенням значення X зменшується Y (див. рис. 4.6). Якщо ж в розташуванні точок немає будь-якої закономірності, то говорять, що в цьому випадку спостерігається нульова кореляція.

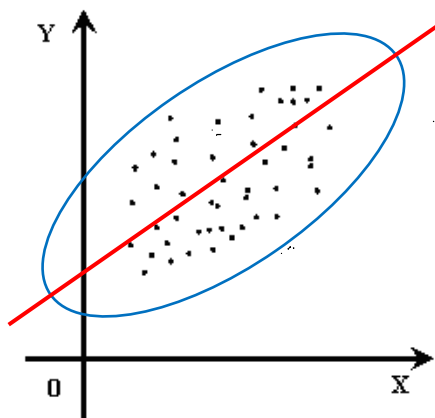


Рисунок 4.5 – Приклад додатної кореляції

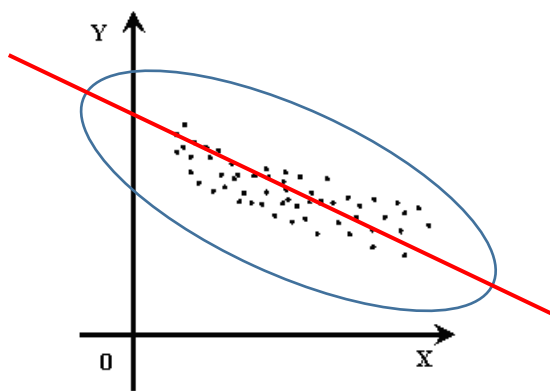


Рисунок 4.6 – Приклад від’ємної кореляції

Підкреслимо, що коефіцієнт кореляції дозволяє визначити існування і силу тільки лінійної залежності. Якщо параметри, що досліджуються, є незалежними – значення коефіцієнта кореляції буде дорівнювати нулю. Проте зворотне не є правильним. Близьке до нуля значення коефіцієнта кореляції означає, що немає лінійної залежності, але можливо, що існує нелінійна.

Зауважимо, що коли значення коефіцієнта кореляції задовольняє таку умову:

$$|r_{xy}| \geq \frac{2}{\sqrt{n-3}} \quad (4.4)$$

то вважають, що вибірки даних спостережень виявляють статистичну залежність. У протилежному випадку, вважається що вибірки даних не виявляють статистичну залежність величин і для коректного визначення необхідно збільшити обсяг вибірки.

4.2 Моделі парної регресії

➔ Специфікація моделі парної регресії

Основним завданням специфікації моделі парної регресії є вибір виду функціональної залежності. Тобто на цьому етапі необхідно визначити, який вид буде мати рівняння регресії. У загальному випадку його записують у такому вигляді:

$$y = f(x) + \varepsilon, \quad (4.5)$$

де $f(x)$ – невідома функціональна залежність, ε – випадкова складова, яка описує вплив факторів, які не включено у модель.

Отже, задача специфікації полягає у тому щоб визначити конкретний вигляд функції $f(x)$. Найбільш поширеними є такі функціональні залежності:

$$y(x) = ax + b \text{ – лінійна,}$$

$$y(x) = ax^2 + bx + c \text{ – параболічна,}$$

$$y(x) = a + \frac{b}{x} \text{ – гіперболічна,}$$

$$y(x) = ae^{bx} \text{ – показова (експоненційна),}$$

$$y(x) = ax^b \text{ – степенева,}$$

$$y(x) = a \ln x \text{ – логарифмічна.}$$

Параметри a , b , c ... рівняння регресії найчастіше оцінюються за допомогою методу найменших квадратів (МНК).

Основними методами вибору функціональної залежності $f(x)$ є такі: геометричний, емпіричний; аналітичний.

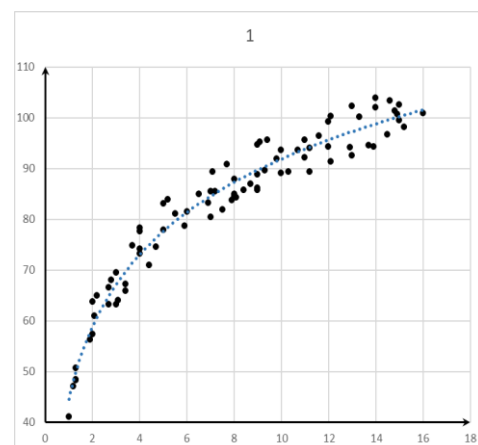
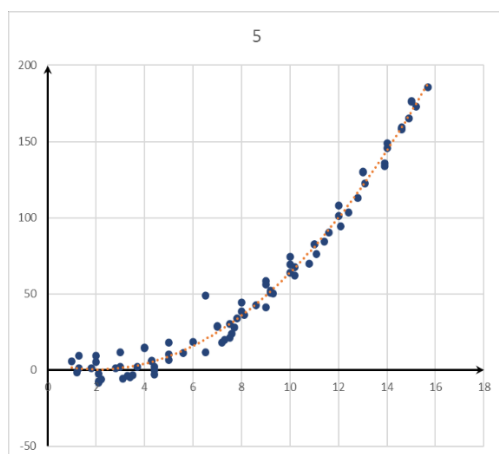


Рисунок 4.7 – Параболічна залежність **Рисунок 4.8** – Логарифмічна залежність

Геометричний метод полягає у побудові і вивченні поля кореляції. А саме: на основі отриманих спостережень будують поле кореляції і за виглядом розсіювання точок обирають найбільш відповідний вид функціональної залежності (див. рис. 4.9- 4.10).

Емпіричний метод може бути застосований також і для множинної регресії. Він полягає у тому, що обирають певний вид функціональної залежності, за результатами спостережень визначають параметри рівнянь, і потім обчислюють теоретичні значення $\hat{y} = f(x)$ та залишки регресії $\varepsilon_i = \hat{y} - y_i$, $i = \overline{1, n}$. Висновок про якість обраного рівняння можна зробити за величиною остаточної суми квадратів $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$. Кращим буде рівняння для якого ця сума буде найменшою.

Аналітичний метод враховує змістову складову задачі і базується на знаннях відносно законів зміни певних параметрів. Наприклад, якщо із теоретичних досліджень відомо, що залежність, яка досліджується у задачі, має бути показовою – то доцільно розглянути показову функцію для побудови рівняння.

➔ Лінійна парна регресія

Припустимо, що на етапі специфікації встановлено, що між величинами x і y існує лінійна залежність. Реальні значення змінної y будуть відрізнятися від цієї теоретичної залежності, оскільки вона піддається дії і не врахованих випадкових факторів. У загальному випадку лінійне рівняння зв'язку двох змінних, що враховує випадкові відхилення, можна записати у такому вигляді:

$$y = ax + b + \varepsilon, \quad (4.6)$$

де ε – відхилення від теоретично можливого значення; a, b – невідомі параметри (коефіцієнти регресії).

У рівнянні (4.6) можна виділити дві частини: систематичну, $y = ax + b$, яка характеризує середнє значення y для даного значення x і випадкову – ε , яка описує випадкові помилки (відхилення, збурення). Причинами існування випадкової помилки можуть бути: невключення до регресійної моделі значних пояснювальних змінних; агрегування змінних і неправильний опис структури моделі; неправильна функціональна специфікація; помилки вимірів.

Коефіцієнти a і b описують вид залежності для генеральної сукупності. Оскільки у подібних дослідженнях завжди мають справу із вибірковою сукупністю, то дійсні значення параметрів a і b є невідомими, і ми можемо говорити лише про їхні оцінки.

Позначимо їх, відповідно, ρ_{yx} і b . Тоді рівняння регресії з оціненими параметрами матиме такий вигляд:

$$\bar{y}_x = \rho_{yx} \cdot x + b, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.7)$$

де n – обсяг вибірки.

Коефіцієнт ρ_{yx} називають *вибірковим коефіцієнтом регресії Y на X* . Для обчислення коефіцієнтів ρ_{yx} та b будемо використовувати метод найменших квадратів.

➔ Метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів полягає в тому, що параметри ρ_{yx} та b вибираються таким чином, щоб сума квадратів відхилень $(Y_i - y_i)$ була мінімальною. Тут величина Y_i являє собою обчислену за рівнянням (4.7) ординату для значення x_i .

Отже, необхідно розв'язати таку задачу:

$$F(\rho_{yx}, b) = \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (4.8)$$

що в конкретизованому вигляді виглядає так:

$$F(\rho_{yx}, b) = \sum_{i=1}^n (\rho_{yx} \cdot x_i + b - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (4.9)$$

Це задача безумовної оптимізації, тому для відшукування мінімуму прирівняємо до нуля відповідні частинні похідні й отримаємо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \rho_{yx}} = 2 \sum_{i=1}^n (\rho_{yx} \cdot x_i + b - y_i) x_i = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (\rho_{yx} \cdot x_i + b - y_i) = 0. \end{cases} \quad (4.10)$$

Розв'язуючи її, отримуємо такі значення коефіцієнтів рівняння регресії:

$$\rho_{yx} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.11)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.12)$$

Зауважимо, що дані значення можуть бути легко отримані засобами пакета Microsoft Excel. Для обчислення коефіцієнта ρ_{yx} використовується функція SLOPE, коефіцієнта b – функція INTERCEPT. Також для обчислення характеристик і побудови рівняння регресії можна використовувати функцію LINEST.

Метод «найменших квадратів» – форма математичного регресійного аналізу, що використовується для визначення лінії, яка найкраще підходить для набору даних, забезпечуючи візуальну демонстрацію зв'язку між точками даних. Кожна точка даних представляє зв'язок між відомою незалежною змінною та невідомою залежною змінною.

Вставка 4.1

Розрахунок рівняння лінії регресії

Параметри рівняння регресії - це складові рівняння прямої регресії, якщо між випадковими величинами існує лінійний зв'язок.

Приклад. Знайти вибіркоче рівняння прямої лінії регресії Y на X за даними п'яти спостережень, результати яких записано надано нижче:

X	1,00	1,50	3,00	4,50	5,00
Y	1,25	1,40	1,50	1,75	2,25

Таблиця 4.1 – Розрахунок значень

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1,00	1,25	1,00	1,250
1,50	1,40	2,25	2,100
3,00	1,50	9,00	4,500
4,50	1,75	20,25	7,875
5,00	2,25	25,00	11,250
$\sum_{i=1}^5 x_i = 15$	$\sum_{i=1}^5 y_i = 8,15$	$\sum_{i=1}^5 x_i^2 = 57,50$	$\sum_{i=1}^5 x_i y_i = 26,975$

Знайдемо шукані параметри, для чого підставимо обчислені за таблицею суми у формули (4.11 – (4.12), отримуємо:

$$\rho_{yx} = \frac{5 \cdot 26,975 - 15 \cdot 8,15}{5 \cdot 57,50 - 15^2} = 0,202, \quad b = \frac{57,50 \cdot 8,15 - 15 \cdot 26,975}{5 \cdot 57,50 - 15^2} = 1,024$$

Запишемо шукане рівняння регресії:

$$Y = 0,202 x + 1,024. \tag{4.13}$$

Зобразимо графічно експериментальну й вибіркочеву лінії регресії. Для побудови експериментальної лінії регресії відкладемо на координатній площині точки (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, що відповідають результатам спостережень, і з'єднаємо їх відрізками прямих. Вибіркочеву лінію регресії будемо за рівнянням (4.13).

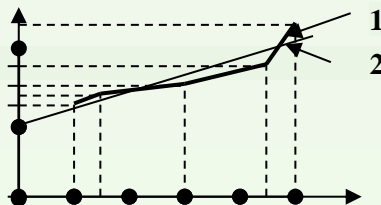


Рисунок 4.9 – Лінії регресії: 1 – експериментальна, 2 – вибіркочеву

➔ Перевірка адекватності моделі регресії

Далі розглянемо етап *верифікації* моделі регресії, тобто процес, в ході якого піддається аналізу якість отриманої моделі.

Припустимо, є рівняння регресії в лінійному або нелінійному вигляді. Тоді фактичні значення вихідної змінної можна записати таким чином:

$$y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i, \quad (4.14)$$

де ε_i – випадкова (залишкова) компонента.

Аналіз залишкової компоненти (залишкового ряду) дозволяє оцінити якість отриманого рівняння регресії. При цьому необхідно оцінити виконання певних статистичних властивостей і точність, тобто ступінь близькості до фактичних даних. Модель вважається гарною зі статистичної точки зору, якщо вона адекватна і досить точна. Сенс цих термінів показано на рис. 4.10-4.11.

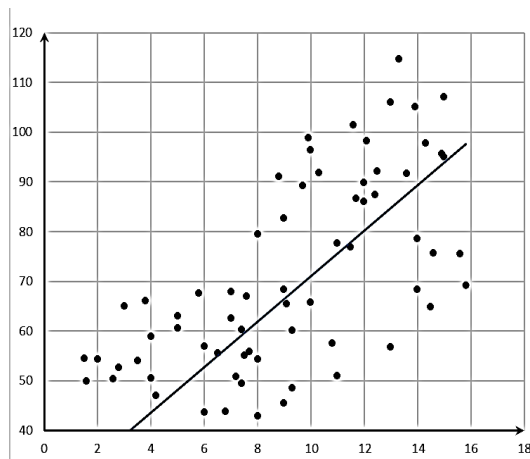


Рисунок 4.10 – Приклад моделі регресії (модель адекватна, але не точна)

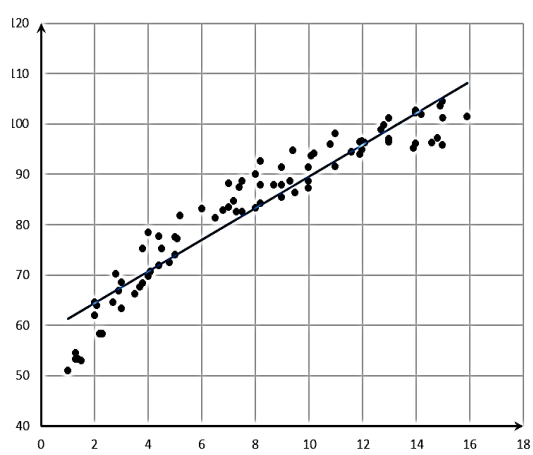


Рисунок 4.11 – Приклад моделі регресії (модель точна, але не адекватна)

Зрозуміло, що досягнення повної відповідності математичної моделі усім властивостями реального об'єкту бути не може, інакше це була б не модель, а сам об'єкт. Тобто при моделюванні адекватність розуміється не взагалі, а за тими характеристикам моделі, які для дослідження вважаються істотними.

Адекватність моделі – модель правильно відображає зміну або тенденцію до змін істотних функцій / параметрів / характеристик тощо описуваного процесу чи об'єкту.

Точність моделі – модель забезпечує не більше ніж задане відхилення від фактичних значень параметрів реального об'єкта; при цьому ступінь збіжності розраховують через відхилення цих параметрів.

Оцінити адекватність моделі дозволяє аналіз випадкової компоненти ε_i . Модель вважається адекватною досліджуваному процесу, якщо:

- (1) математичне сподівання значень залишкового ряду близько або дорівнює нулю;
- (2) значення залишкового ряду випадкові;
- (3) значення залишкового ряду незалежні;
- (4) значення залишкового ряду підпорядковані нормальному закону розподілу.

Таким чином, аналіз адекватності моделі розбивається на кілька етапів.

1 Рівність нулю математичного сподівання ряду залишків означає виконання наступного співвідношення:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \approx 0. \quad (4.15)$$

Зауважимо, що в разі застосування методу найменших квадратів така перевірка є зайвою, оскільки використання МНК передбачає виконання рівності $\sum_{i=1}^n e_i = 0$, а з неї випливає рівність нулю математичного сподівання значень залишкового ряду.

2 Перевірка випадковості послідовності ε_i проводиться за допомогою критерію піків (поворотних точок). Кожне значення ряду (ε_i) порівнюється з двома, які перебувають поруч. Точка вважається поворотною, якщо вона або більше і попереднього і наступного значення, або менше їх обох.

У випадковому ряду має виконуватися така строга нерівність:

$$p > \left[\frac{2(n-2)}{3} - 2 \sqrt{\frac{(16n-29)}{90}} \right], \quad (4.16)$$

де p – число поворотних точок; $[]$ – ціла частина результату обчислень.

3 При перевірці незалежності значень ε_i потрібно визначити відсутність в залишковому ряду автокореляції, тобто кореляції між елементами одного і того ж числового ряду. У нашому випадку автокореляція – це кореляція ряду $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots$ з рядом $\varepsilon_{l+1}, \varepsilon_{l+2}, \varepsilon_{l+3} \dots$. Число l характеризує запізнювання (лаг).

Кореляція між сусідніми членами ряду (тобто коли $l = 1$) називається автокореляцією першого порядку. Далі для залишкового ряду будемо розглядати залежність між сусідніми елементами ε_i . Значна автокорреляція означає, що специфікацію рівняння регресії виконано неправильно (тобто неправильно визначено тип залежності).

Наявність автокореляції може бути виявлена за допомогою d -критерію Дарбіна-Уотсона. Значення критерія обчислюється за такою формулою:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2}. \quad (4.17)$$

Цю величину необхідно порівняти із двома табличними рівнями: нижнім – d_1 та верхнім – d_2 , які визначаються за статистичними таблицями. Якщо отримане значення d більше ніж два, то перед порівнянням його потрібно перетворити у такий спосіб: $d' = 4 - d$. Якщо d (або d') перебуває в інтервалі від нуля до d_1 , то значення залишкового ряду сильно автокорельовані. Якщо значення d -критерію потрапляє в інтервал від d_2 до 2, то автокореляція відсутня.

Якщо $d_1 < d < d_2$ – однозначного висновку про відсутність або наявність автокореляції зробити не можна і необхідно додатково використати інший критерій, наприклад, коефіцієнт автокореляції першого порядку:

$$r(l) = \frac{\sum_{i=1}^n e_i \cdot e_{i-1}}{\sum_{i=1}^n e_i^2}. \quad (4.18)$$

Якщо значення $|r(l)|$ буде меншим за табличне значення (коли $n < 15$ табличне значення дорівнює 0,36), то гіпотеза про наявність автокореляції відкидається.

4 Відповідність залишкового ряду нормальному розподілу простіше за все перевірити за допомогою RS-критерію:

$$RS = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{s}. \quad (4.19)$$

де – ε_{max} – максимальне значення ряду залишків;

ε_{min} – мінімальне значення ряду залишків;

$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-1}}$ – виправлене середньоквадратичне відхилення значень залишкового ряду.

Якщо розраховане значення перебуває проміж табульованих значень для заданого рівня значущості, то гіпотеза про нормальний розподіл приймається.

➔ Оцінювання точності моделі регресії

Для характеристики *точності моделі* найбільш часто обчислюють середню відносну помилку:

$$\bar{E}_{\text{відн}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|e_i|}{y_i} \cdot 100\%. \quad (4.20)$$

Величина помилки менша за 5 % свідчить про добрий рівень точності, помилка до 15 % вважається прийнятною. Якщо помилка буде більше 15 % модель не точна.

4.3 Моделі множинної регресії

➔ Прогнозування багатовимірних і нелінійних залежностей

У тих випадках, коли необхідно оцінити вплив декількох факторів на досліджувану величину, будується рівняння *множинної регресії*.

Якщо зв'язок є лінійним, то рівняння лінійної множинної регресії записується у такому вигляді:

$$y_i = a_0 + a_1x_{i1} + a_2x_{i2} + \dots + a_mx_{im}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.21)$$

де m – число факторів (незалежних змінних), n – обсяг вибірки.

В матричному вигляді:

$$Y = XA, \quad (4.22)$$

де $A = (a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{m-1} \ a_m)^T$ – вектор оцінок параметрів регресії;

$Y = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n)^T$ – вектор значень залежної змінної;

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{(n-1)1} & x_{(n-1)2} & \dots & x_{(n-1)m} \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \text{ – матриця значень незалежних змінних;}$$

при цьому m – кількість незалежних змінних, n – обсяг вибірки.

Звертаємо увагу на те, що у матрицю X додатково введено стовпець, всі елементи якого дорівнюють 1, тобто умовно вважаємо, що в рівнянні (4.15) вільний член a_0 множиться на фіктивну змінну x_{i0} , яка приймає значення 1 для всіх $i = 1, 2, \dots, n$.

Методика визначення коефіцієнтів множинної регресії не відрізняється від методів, які застосовуються у випадку парної лінійної регресії. Наприклад, для цього також можна використовувати МНК. Також зручно використовувати для обчислення значень коефіцієнтів функцію LINEST MS Excel.

При побудові моделі множинної регресії також виникає таке важливе питання: які саме фактори потрібно включати в модель и скільки факторів має бути враховано? При тому важливо щоб між змінними були відсутні функціональні лінійні залежності. Процедури перевірки статистичної значущості отриманого рівняння регресії і його окремих коефіцієнтів, оцінка точності прогнозування залишається такою ж як і для випадку парної лінійної регресії, які були описані вище. У той же час застосування багатовимірної регресії замість парної зазвичай дозволяє при належному виборі змінних істотно підвищити точність опису поведінки залежної змінної, а значить і точність прогнозування.

Існують різні підходи щодо побудови таких моделей. Наприклад, будують модель, в яку включають всі фактори, що, як передбачається, впливають на результат. Після первісної оцінки адекватності і точності моделі, починають видаляти фактори по одному, перевіряючи отримані моделі. Якщо при цьому точність і адекватність моделі буде незмінною або змінюється незначно, то фактор можна видалити з неї.

За другим підходом фактори упорядковують за їх впливом на вихідну величину, наприклад, використовуючи частковий коефіцієнт кореляції. Модель будують за двома факторами і оцінюють її якість, потім у модель додають по одному з інших факторів. Якщо при цьому точність і адекватність моделі буде незмінною або змінюється незначно, то вважається, що цей фактор додавати не потрібно.

Обидва вказані підходи мають недоліки. У тому числі порядок видалення або додавання факторів у модель по одному може не впровадити їх суттєвості для адекватності моделі, але залишається вирогідність, що сукупний вплив деяких з них може бути дуже суттєвим для вихідних параметрів. Тобто ситуації важливих синергетичних ефектів у такому випадку може залишатися за межами дослідження. Тому для перевірки якості рівняння регресії, враховуючи впливи факторів на результат, більш доцільно застосовувати статистичні методи.

➔ Проблема мультиколінеарності

При виявленні структури рівняння регресії можна стикнутися із явищем *мультиколінеарності*, коли в багатофакторній регресійній моделі дві або більше незалежних змінних пов'язані між собою лінійною залежністю або, іншими словами, мають високий ступінь кореляції. Проте така залежність зовсім необов'язково дає незадовільні оцінки. Якщо всі інші умови задовільні, тобто якщо кількість спостережень і вибіркові дисперсії пояснювальних змінних великі, а дисперсія випадкового члену – мала, то в результаті можна отримати досить позитивні оцінки.

Припустимо, є рівняння регресії:

$$\hat{y} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2. \quad (4.23)$$

Змінні x_1 і x_2 можуть перебувати в деякій лінійній залежності між собою. Ця залежність може бути функціональною, тоді має місце *строга мультиколінеарність* змінних. Найчастіше взаємозв'язок між змінними не настільки жорсткий і проявляється лише наближено, в цьому випадку маємо *нестрогу мультиколінеарність*.

Під *мультиколінеарністю* розуміють взаємозв'язок незалежних змінних рівняння регресії. Мультиколінеарність виникає тоді, коли більше, ніж два фактори зв'язані між собою лінійною залежністю, тобто має місце вплив факторів один на одного.

Одне з основних припущень щодо застосування методу найменших квадратів полягає в тому, що між незалежними змінними немає лінійного зв'язку. Порушення цієї умови буде приводити до того, що отримане рівняння регресії буде ненадійним, і незначна зміна вихідних вибірових даних буде приводити до різкої зміни оцінок вихідних параметрів. Для того, щоб виявити мультиколінеарність, необхідно обчислити матрицю парних коефіцієнтів кореляції, яка охоплює всі можливі поєднання незалежних змінних:

$$K = \begin{matrix} & y & x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \\ y & 1 & r_{x_1y} & r_{x_2y} & r_{x_3y} & \dots & r_{x_ny} \\ x_1 & r_{yx_1} & 1 & r_{x_2x_1} & r_{x_3x_1} & \dots & r_{x_nx_1} \\ x_2 & r_{yx_2} & r_{x_1x_2} & 1 & r_{x_3x_2} & \dots & r_{x_nx_2} \\ x_3 & r_{yx_3} & r_{x_1x_3} & r_{x_2x_3} & 1 & \dots & r_{x_nx_3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n & r_{yx_n} & r_{x_1x_n} & r_{x_2x_n} & r_{x_3x_n} & \dots & 1 \end{matrix} \quad (4.24)$$

Коефіцієнти, близькі за значенням до ± 1 , свідчать про наявність мультиколінеарності між відповідними змінними.

Усунення проблеми досягається шляхом перегляду структури рівняння регресії. Найпростішим способом виправлення ситуації є виключення з моделі однієї з двох змінних, які знаходяться у взаємозв'язку.

➔ Порівняння коефіцієнтів регресії

Припустимо, в результаті аналізу отримано таке рівняння регресії:

$$y = 2 + x_1 + 4x_2. \quad (4.25)$$

Якщо величини x_1 і x_2 є порівнянними, то ми можемо зіставити вплив факторів x_1 і x_2 шляхом безпосереднього порівняння відповідних коефіцієнтів. У нашому прикладі можна сказати, що фактор x_2 впливає на y в чотири рази сильніше.

У тих випадках, коли x_1 і x_2 вимірюються в різних величинах для порівняння ступеня їх впливу вдаються до нормування коефіцієнтів регресії і визначають так званий бета-коефіцієнт:

$$\beta_j = a_j \frac{s(x)}{s(y)}, \quad (4.26)$$

де a_j - відповідний коефіцієнт рівняння регресії; $s(x_j)$ – середньоквадратичне відхилення значень змінної x_j , $i = 1, 2, \dots, m$, (m – кількість факторів); $s(y)$ – середньоквадратичне відхилення значень змінної y .

Бета-коефіцієнт показує, на яку частину величини свого середнього квадратичного відхилення змінюється середнє значення залежної змінної коли незалежний фактор змінюється на величину свого середнього квадратичного відхилення при фіксованому на сталому рівні значенні інших незалежних змінних. Деякі автори називають бета-коефіцієнт *стандартизованим коефіцієнтом регресії*.

Для цілей порівняння коефіцієнтів регресії (порівняння сили впливу кожного фактора на відгук) також може бути використаний *коефіцієнт еластичності* (E):

$$E_j = a_j \frac{\bar{x}_j}{\bar{y}}. \quad (4.27)$$

➤ Коефіцієнт множинної кореляції

Економічні явища найчастіше адекватно описуються саме багатofакторним моделями. Тому виникає необхідність узагальнити розглянутий вище коефіцієнт кореляції (4.2) на випадок декількох змінних.

Тіснота лінійного взаємозв'язку між змінною y та множиною змінних $x_j, j = \overline{1, n}$ що розглядаються в цілому, може бути визначена за допомогою коефіцієнта множинної кореляції.

Припустимо, що змінна y зазнає впливу двох змінних: x та z . У цьому випадку коефіцієнт множинної кореляції може бути визначений за такою формулою:

$$R_{yxz} = \sqrt{\frac{r_{yx}^2 + r_{yz}^2 - 2r_{yx} \cdot r_{yz} \cdot r_{xz}}{1 - r_{xz}^2}}, \quad (4.28)$$

де r_{yx}, r_{yz}, r_{xz} – коефіцієнти лінійної парної кореляції, визначені із співвідношення (4.2).

Множинний коефіцієнт кореляції (по мірі наближення R до 1) дозволяє зробити висновок про тісноту взаємозв'язку між змінними, але не про напрямок цього зв'язку (на відміну від коефіцієнта кореляції парної регресії).

Величина R^2 , звана множинним коефіцієнтом детермінації, показує, яку частку варіації досліджуваної змінної (y) пояснює варіація інших врахованих змінних (x, z).

Коефіцієнт еластичності показує, на скільки відсотків змінюється залежна змінна при зміні відповідного фактора на один відсоток

Коефіцієнт множинної кореляції перебуває у межах $0 \leq R \leq 1$. Він не менше, ніж абсолютна величина будь-якого парного або часткового коефіцієнта кореляції з таким же першим індексом.

➔ Коефіцієнт часткової кореляції

Іноді може бути корисним вимір часткових залежностей (між вихідною змінною y та певним фактором x_j) за умови, що вплив інших факторів, що беруться до уваги, усунуто. Це можна зробити використовуючи *коефіцієнти часткової кореляції*.

Розглянемо порядок розрахунку коефіцієнта часткової кореляції для випадку, коли у взаємозв'язку знаходяться три випадкові змінні – x , y , z . Для них можуть бути отримані прості коефіцієнти лінійної парної кореляції: r_{yx} , r_{yz} , r_{xz} . Однак величина цього коефіцієнта може бути обумовлена не тільки тим, що y та x дійсно пов'язані між собою, але й тим, що обидві змінні відчувають сильний вплив третього фактора – z .

Коефіцієнт часткової кореляції відрізняється від звичайного коефіцієнта лінійної парної кореляції тим, що він вимірює парну кореляцію відповідних ознак (y і x) за умови, що вплив на них третього фактора (z) усунуто.

Відповідна розрахункова формула:

$$r_{yx \cdot z} = \frac{r_{yx} - r_{yz} \cdot r_{xz}}{\sqrt{(1 - r_{yz}^2)(1 - r_{xz}^2)}} \quad (4.29)$$

Частковий коефіцієнт кореляції, так само як і парний коефіцієнт кореляції r (розрахований за формулою (4.2)), може набувати значень від (-1) до 1 .

➔ Перевірка значущості рівняння регресії

Після того як рівняння регресії побудовано і за допомогою коефіцієнта детермінації оцінена його точність, залишається відкритим питання за рахунок чого досягнута ця точність і, відповідно, чи можна цьому рівнянню довіряти.

Справа в тому, що рівняння регресії будується не за генеральною сукупністю, яка є невідомою, а за деякою вибіркою з неї. Тому точки з генеральної сукупності потрапляють до вибірки випадковим чином. Відповідно до теорії ймовірності це означає, що серед інших випадків можливо такий варіант, коли вибірка з «широкої» генеральної сукупності виявиться доволі «вузькою» – не репрезентативною (рис. 4.12).

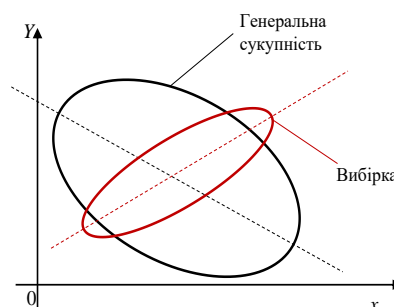


Рисунок 4.12 – Варіант потрапляння точки у вибірку із генеральної сукупності

В такому випадку можемо мати такі негативні наслідки:

по-перше рівняння регресії, побудоване за вибіркою, може значно відрізнятись від рівняння регресії для генеральної сукупності, що призведе до помилок прогнозу;
по-друге, коефіцієнт детермінації і інші характеристики, які описують точність рівняння, виявляться не виправдано високими і будуть вводити в оману щодо прогнозованої якості рівняння.

У граничному випадку навіть не виключений варіант, коли з генеральної сукупності, яка являє собою хмару з головною віссю паралельною горизонтальній осі – тобто зв'язок між змінними відсутній, за рахунок випадкового відбору буде отримано таку вибірку, головна вісь якої виявиться нахиленою до горизонтальної осі – наявний зв'язок. Отже, спроби прогнозувати наступні значення генеральної сукупності, спираючись на дані вибірки з неї, загрожують не тільки помилками в оцінці сили і напрямку зв'язку між залежною і незалежною змінними, а й небезпекою виявити зв'язок між змінними там, де насправді його немає.

В умовах відсутності інформації про всі точки генеральної сукупності єдиний спосіб зменшити помилки в першому випадку полягає в використанні при оцінці коефіцієнтів рівняння регресії методу, що забезпечує їх незміщеність і ефективність.

Ймовірність настання другого випадку можна оцінити шляхом перевірки *статистичної значущості отриманого рівняння регресії*. Найчастіше для цього використовують F-критерій Фішера. Перевірка полягає у тому, що для отриманого рівняння регресії визначається F-статистика. Вона є характеристикою точності рівняння регресії і обчислюється через відношення тієї частини дисперсії залежної змінної, яка пояснена рівнянням регресії, до неопоясненої (залишкової) частини дисперсії. Рівняння для визначення F-статистики у разі багатовимірної регресії має такий вигляд:

$$F = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})/m}{\sum(y_i - \hat{y}_i)/(n-m-1)}, \quad (4.30)$$

тут $\frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{m}$ – пояснена дисперсія, тобто частина дисперсії залежної змінної Y яка пояснена рівнянням регресії; $\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-m-1}$ – залишкова дисперсія, тобто частина дисперсії залежної змінної Y , яка не пояснена рівнянням регресії, її наявність є наслідком дії випадкової складової; n – число точок у вибірці; m – число змінних в рівнянні регресії. Як видно з наведеної формули, дисперсії дорівнюють частці від ділення відповідної суми квадратів на число ступенів свободи.

Число ступенів свободи – це мінімально необхідне число значень залежної змінної, яких достатньо для отримання шуканої характеристики вибірки і які можуть вільно варіюватися за умови, що для цієї вибірки відомі всі інші величини, потрібні для її розрахунку.

Для отримання залишкової дисперсії необхідно знати коефіцієнти рівняння регресії. У разі парної лінійної регресії коефіцієнтів два, з цього відповідно до формули (приймаючи, що $m = 1$) число ступенів свободи дорівнює $(n - 2)$. Мається на увазі, що для визначення залишкової дисперсії досить знати коефіцієнти рівняння регресії і тільки $(n - 2)$ значення залежної змінної з вибірки. Два значення можуть бути обчислені на підставі цих даних, а значить, не є вільно варійованими.

Для обчислення поясненої дисперсії значення залежної змінної взагалі не потрібні, так як її можна обчислити, знаючи коефіцієнти регресії при незалежних змінних і дисперсію незалежної змінної. Для того, щоб переконатися в цьому, досить згадати вираз $\hat{y}_i - \bar{y} = b(\hat{x}_i - \bar{x})$. Тому число ступенів свободи для залишкової дисперсії дорівнює числу незалежних змінних у рівнянні регресії (для парної лінійної регресії $m = 1$). Таким чином, F-критерій для рівняння парної лінійної регресії можна обчислити за такою формулою:

$$F = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - 2)}. \quad (4.31)$$

У теорії ймовірності доведено, що F-критерій рівняння регресії, отриманого для вибірки з генеральної сукупності у якій відсутній зв'язок між залежною і незалежною змінною має розподіл Фішера, який є досить добре вивченим. Завдяки цьому для будь-якого значення F-критерію можна розрахувати ймовірність його появи і навпаки, визначити те значення критерію яке він не зможе перевищити із заданою ймовірністю.

Для здійснення статистичної перевірки значущості рівняння регресії формулюється нульова гіпотеза про відсутність зв'язку між змінними (всі коефіцієнти при змінних дорівнюють нулю) і вибирається рівень значущості α . В даному випадку помилка першого роду означає визнання за вибіркою наявності зв'язку між змінними у генеральній сукупності, коли насправді її там немає. Зазвичай за значення рівня значущості беруть 0,05 або 0,01. Чим вище рівень значущості (чим менше значення α), тим вище рівень надійності тесту, який дорівнює $(1 - \alpha)$, тобто тим більше шанс уникнути помилки визнання за вибіркою наявності зв'язку у генеральній сукупності насправді незв'язаних між собою змінних.

Зменшення значення α приводить до зростання ймовірності здійснення помилки другого роду – прийняти неправильну нульову гіпотезу, тобто не помітити по вибірці наявний насправді зв'язок змінних в генеральній сукупності. Прийнято, що нульову гіпотезу обирають таким чином, щоб її ціна була більшою, тобто така помилка має більші негативні наслідки. Отже, залежно від цього і обирають рівень значущості α .

Для обраного рівня значущості із розподілу Фішера визначається таке табличне значення $F_{m,\alpha}$, ймовірність перевищення якого у вибірці обсягом n , отриманої з генеральної сукупності без зв'язку між змінними, не перевищує рівня значущості α . $F_{m,\alpha}$ порівнюють із фактичним значенням критерію F для регресійного рівняння. Якщо виконується умова $F > F_{m,\alpha}$, то помилкове виявлення зв'язку буде відбуватися з ймовірністю меншою ніж рівень значущості α . Відповідно до правила «дуже рідкісних подій не буває», робимо висновок, що встановлений за вибіркою зв'язок між змінними існує і в генеральній сукупності, з якої вона отримана.

Рівняння побудовано коректно. Якщо ж виявляється, що $F < F_{m,\alpha}$, то рівняння регресії статистично не значуще.

Іншими словами, існує реальна ймовірність того, що за вибіркою встановлено зв'язок між змінними, якого не існує у реальності. Рівняння, яке не витримало перевірку, краще не використовувати. Це дозволить уникнути найбільш грубих помилок. Другий варіант перевірки, більш зручний в разі використання електронних таблиць Excel, це зіставлення ймовірності появи отриманого значення F-критерію з рівнем значущості α . Якщо ця ймовірність виявляється нижче рівня значущості α , то рівняння вважають статистично значущим, в іншому випадку – ні.

Після того як було виконано перевірку статистичної значущості регресійного рівняння в цілому, корисно, особливо для багатовимірних залежностей, здійснити перевірку на статистичну значущість отриманих коефіцієнтів регресії. Ідеологія перевірки така ж сама як і при перевірці рівняння в цілому, але в якості критерію використовується *t-критерій Стьюдента*, який визначається за такими формулами:

$$t_a = \frac{a}{\sqrt{\frac{\sigma_{\text{зал}}^2 \sum x_i^2}{n \sum (x_i - \bar{x})^2}}}, \quad t_b = \frac{b}{\sqrt{\frac{\sigma_{\text{зал}}^2 \sum x_i^2}{n \sum (x_i - \bar{x})^2}}}, \quad (4.32)$$

тут t_a, t_b – значення критерію Стьюдента для коефіцієнтів a та b відповідно;

$$\sigma_{\text{зал}}^2 = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - m - 1}}$$

– залишкова дисперсія рівняння регресії; n – число точок у вибірці; m – число змінних у вибірці, для парної лінійної регресії $m = 1$.

Отримані фактичні значення критерія Стьюдента порівнюють із табличними значеннями $t_{m, \frac{\alpha}{2}, (n - m - 1)}$, отриманими з розподілу Стьюдента. Якщо виявляється, що, $t > t_{m,\alpha}$, то відповідний коефіцієнт статистично значущий, в іншому випадку ні.

Інший варіант перевірки статистичної значущості коефіцієнтів – визначення ймовірності появи *t-критерія Стьюдента* і порівняти її з рівнем значущості α . Якщо певні коефіцієнти рівняння виявилися статистично не значущими, це означає, що існує велика ймовірність того, що вплив відповідних змінних на вихідну змінну в генеральній сукупності взагалі відсутній. В цьому разі необхідно або збільшити число точок у вибірці, тоді, можливо коефіцієнт стане статистично значущим, і його значення буде більш точним, або видалити із рівняння змінні, коефіцієнти яких не є значущими, і знайти інші, більш тісно пов'язані з залежною змінною фактори, щоб взяти їх за незалежні змінні. При цьому, в обох випадках, точність прогнозування підвищиться. Як експресний метод оцінювання значущості коефіцієнтів рівняння регресії можна застосовувати такий простий спосіб: якщо значення критерія Стьюдента більше ніж 3, то такий коефіцієнт, як правило, виявляється статистично значущим. А взагалі вважають, що для отримання статистично значущих рівнянь регресії необхідно, щоб обсяг вибірки n був таким, що задовольняє умову $n > 6m$.

4.4 Побудова точкових та інтервальних прогнозів

За допомогою побудованої регресійної моделі можна не тільки аналізувати будь-який процес, але і прогнозувати значення залежної змінної при будь-яких заданих значеннях факторів. Модель регресії дозволяє проводити як екстраполяцію, так і інтерполяцію значень залежної змінної.

Точковий прогноз отримують шляхом простої підстановки відповідних значень x в рівняння регресії. Найчастіше значення факторів, для яких потрібно зробити прогноз значення залежної змінної, отримують на основі середнього приросту значень фактора всередині вибіркової сукупності:

$$\bar{r} = \frac{x_{max} - x_{min}}{n-1} \quad (4.32)$$

де x_{min} та x_{max} – відповідно, максимальне і мінімальне значення змінної x у вибірковій сукупності.

При виконанні екстраполяції для визначення конкретного значення x , використовуюваного для розрахунку прогнозного значення y , можна використовувати таку формулу:

$$x_k = x_{max} + \bar{r}k, \quad (4.33)$$

при прогнозі на один крок $k = 1$, на два кроки: $k = 2$ і т.д.

Підставляючи отримане значення x_k в рівняння регресії, отримаємо точковий прогноз величини y .

Однак ймовірність точного «попадання» значення y в цю точку досить мала. Тому цікавим є обчислення перспективних оцінок значень вихідної змінної y у вигляді довірчих інтервалів.

Довірчі межі прогнозу можуть бути визначені за такою формулою:

$$\text{межа прогнозу} = k \pm U_k, \quad (4.34)$$

де k – точковий прогноз величини y , U_k – величина відхилення від точкового значення, відповідна досліджуваній точці x_k і заданому рівню ймовірності.

Величина U_k для лінійної моделі розраховується за такою формулою:

$$U_k = s \cdot k_p \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_k - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (4.35)$$

де s – виправлене середньоквадратичне відхилення значень залишкового ряду з формули (4.13); k_p – табличне значення t -статистики для заданої ймовірності попадання прогнозованої величини всередину довірчого інтервалу.

Якщо побудована модель регресії адекватна, то з обраною ймовірністю можна стверджувати, що при збереженні сформованих закономірностей функціонування досліджуваної системи прогнозована величина потрапить в інтервал, утворений нижньою і верхньою межами.

➔ Оцінка параметрів нелінійної регресії

Нехай попередній аналіз вихідної інформації дає підставу припускати, що регресійна залежність носить нелінійний характер. При оцінці параметрів нелінійної регресії також можна застосовувати метод найменших квадратів і визначати коефіцієнти рівняння безпосередньо розв'язуючи систему рівнянь. Але, у випадку нелінійної регресії це вже буде система нелінійних рівнянь і її розв'язування може бути досить складним.

Інший підхід полягає у лінеаризації, перетворенні вихідного нелінійного рівняння на лінійне (див. вставку 4.2).

Для виявлення тісноти зв'язку між змінними в разі нелінійної залежності використовується *індекс кореляції*. Він показує тісноту зв'язку між фактором x і залежною змінною y :

$$I_{yx} = \sqrt{1 - \frac{\sum e_i^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4.36)$$

де $e_i = y_i - \hat{y}_i$ – величина помилки, тобто відхилення фактичних значень залежної змінної від розрахованих за рівнянням регресії.

Індекс кореляції являє собою невід'ємну величину, значення якої не перевищує 1, тобто $0 \leq I_{yx} \leq 1$. Чим сильнішим буде зв'язок, тим ближчим до одиниці буде значення I_{yx} .

У разі лінійної залежності $I_{yx} = |r_{yx}|$, для перевірки лінійності кореляційної залежності може бути використана розбіжність між I_{yx} (див. формулу 4.36) і r_{yx} (див. формулу 4.2).

➔ Перевірка обґрунтованості застосування методу найменших квадратів

Метод найменших квадратів часто використовується для визначення коефіцієнтів регресії, але для того, щоб він забезпечував ефективність і незміщеність їх оцінок необхідно виконання таких умов (умови Гауса-Маркова): (1) $\bar{\varepsilon}_i = 0$; (2) $\sigma_\varepsilon = const$; (3) значення остаточного ряду ε_i не залежать один від одного; (4) значення остаточного ряду ε_i не залежать від незалежних змінних.

Простіше за все перевірити дотримання цих умов можна шляхом побудови графіків залежності залишків регресії $\varepsilon_i = \hat{y}_i - y_i$ від вихідної змінної y_i , потім від незалежної (незалежних) змінних x_i . Якщо точки на цих графіках розташовані в області симетричній відносно осі абсцис і в розташуванні цих точок не спостерігається закономірності, то умови Гауса-Маркова виконано і можливості підвищити точність рівняння регресії відсутні. Якщо це не так, то існує можливість істотно підвищити точність рівняння.

Вставка 4.2

Процедура лінеаризації

Лінеаризація – процедура приведення нелінійного рівняння до лінійного вигляду.

Зокрема якщо залежність описується поліномом ступеня відмінного від 1, то, здійснивши заміну змінних зі ступенями відмінними від одиниці на нові змінні у першому ступені, отримуємо задачу багатовимірної лінійної регресії замість нелінійної. Так, якщо вплив незалежної змінної описується параболою $y = a + bx + cx^2$, то заміна $x^2 = x_2$ дозволяє перетворити нелінійну задачу на багатовимірну лінійну задачу такого виду: $y = a + b_1x_1 + b_2x_2$.

Так само легко можуть бути перетворені на лінійні задачі у яких нелінійність виникає внаслідок того, що прогнозована величина залежить від добутку незалежних змінних. Для врахування такого впливу необхідно ввести нову змінну, яка дорівнює цьому добутку. У тих випадках, коли нелінійність описується складнішими залежностями, лінеаризація можлива за рахунок перетворення координат. Для цього розраховують такі значення: $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \ln x, \ln y$ і будують графіки залежності вихідних точок в різних комбінаціях перетворених змінних. Та комбінація перетворених координат або перетворених і не перетворених координат, в якій залежність найближча до прямої лінії підказує заміну змінних, яка призведе до перетворення нелінійної залежності до лінійного вигляду. Наприклад, нелінійна залежність такого виду: $y = ax^b$, перетворюється в лінійну залежність такого виду:

$$y' = a' + bx', \text{ де } y' = \ln y, x' = \ln x, a' = \ln a.$$

Отримані коефіцієнти регресії для перетвореного рівняння залишаються незміщеними і ефективними, але перевірка статистичної значущості рівняння і коефіцієнтів у цьому випадку неможлива.

Приклад. Визначити коефіцієнти цього такого рівняння регресії:

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + a_3 x_2 + a_4 x_2^2 \quad (4.37)$$

Розв'язування.

У цьому випадку доцільно використати лінеаризацію, тобто застосувати перетворення змінних.

Введемо такі позначення: $z_1 = x_1, z_2 = x_1^2, z_3 = x_2, z_4 = x_2^2$.

Тоді вихідне рівняння (4.37) набуде такого вигляду:

$$\hat{y} = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 + a_4 z_4. \quad (4.38)$$

Рівняння (4.38) являє собою рівняння лінійної регресії з чотирма незалежними змінними. Коефіцієнти останнього рівняння знаходяться за формулами, описаними вище. Після їх визначення необхідно виконати зворотні перетворення для повернення до вихідних змінних.

Висновки

- 1 Випадкові величини можуть бути незалежними або залежними. Залежність між випадковими величинами може бути функціональною або статистичною. Між величинами, які характеризують природні або економічні явища у галузі сталого розвитку, у більшості існують залежності, що відмінні від функціональних.
- 2 Унаслідок дослідження статистичної залежності виникають два завдання: завдання дослідження кореляції, що полягає у виявленні існування зв'язку між величинами та сили цього зв'язку, і завдання регресії, що має на меті визначення форми цього зв'язку. Обидва методи є важливими для здійснення об'єктивної оцінки стану та розвитку природних явищ у процесі аналізу досягнення цілей сталого розвитку під впливом певних видів діяльності.
- 3 Задача кореляції вирішується обчисленням вибіркового коефіцієнта кореляції та кореляційного відношення. Вибірковий коефіцієнт кореляції дозволяє визначити існування та силу лінійної статистичної залежності. Кореляційне відношення використовується для виявлення існування нелінійної залежності між величинами. Наприклад, кореляційні матриці будуються для визначення ступеню взаємозв'язку між факторами (показниками, індикаторами) загроз енергетики в регіональному розрізі.
- 4 При дослідженні поведінки складних екологічних і соціальних систем, іноді використовують модель у вигляді так званого «чорного ящика». Модель «чорного ящика» відрізняється тим, що досліджується взаємозв'язок між вхідними даними (незалежними змінними) та вихідними показниками (результатами – залежними змінними) системи, коли знання про її структуру не є важливими, а метою дослідження є саме реакція систем на вхідні параметри.
- 5 Основним завданням специфікації моделі парної регресії є вибір виду функціональної залежності $f(x)$, для цього використовують геометричний, емпіричний та аналітичний методи. У тому числі у глобальних доповідях МГЕЗК часто використовують геометричний і аналітичний методи, наприклад – на основі отриманих спостережень будують поле кореляції між показниками зміни клімату і компонентами агроєкосистем.
- 6 За допомогою побудованої регресійної моделі можна не тільки аналізувати будь-який процес, але і прогнозувати значення залежної змінної при будь-яких заданих значеннях факторів. Модель регресії дозволяє проводити як екстраполяцію, так і інтерполяцію значень залежної змінної, що широко використовується при аналізі динаміки процесів сталого розвитку.

Питання для самоконтролю і завдання

Дайте відповіді на питання та поясніть їх на прикладах:

- Які випадкові величини називають незалежними та залежними?
- Що означає функціональна залежність між величинами? Навести приклад функціональної залежності між показниками енергетичної політики і показниками зміни клімату.
- Що означає статистична залежність? Навести приклад статистичної залежності між чисельністю населення на Землі і показниками використання природних ресурсів.
- Що означає кореляційна залежність? Навести приклад кореляційної залежності між показниками сталого розвитку.
- Які значення коефіцієнта кореляції відповідають сильній та слабкій лінійній залежності? Навести приклад сильної кореляційної залежності між деякими задачами сталого розвитку.
- У чому полягає суть методу найменших квадратів? Навести приклад використання методу у моделюванні між процесів сталого розвитку.
- Що характеризує вибірковий коефіцієнт кореляції? Навести приклад використання методу у моделюванні процесів сталого розвитку.
- Яким чином пов'язані між собою вибіркові коефіцієнти кореляції і регресії? Навести приклад – між якими показниками у галузі праці є прямий зв'язок, а також між якими існує зворотний зв'язок.
- Які є етапи регресійного аналізу? Навести приклади використання регресійного аналізу для цілей вивчення проблем циркулярної економіки.
- В чому полягає етап специфікації? Які методи ви знаєте? Навести приклад використання методів специфікації при моделюванні процесів сталого розвитку.
- В чому полягає проблема мультиколінеарності? Навести приклад мультиколінеарності у глобальних / національних / длокальних задачах сталого розвитку.
- Якими є етапи побудова рівняння регресії? Навести приклад для вирішення конкретної задачі дослідження у галузі сталого розвитку.

Завдання для виконання у класі

- 1 Напруга зарядженого конденсатора $U_0 = 100$ В. З часом конденсатор розряджається під дією деякого опору. Залежність напруги на конденсаторі U від часу t реєструється на інтервалі від 0 до 10 с через кожну секунду. Напруга вимірюється з точністю до 5 В. Результати вимірювань наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Залежність напруги на конденсаторі від часу

Номер виміру i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Час t_i , с	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напруга U_i , В	100	75	55	40	30	20	15	10	10	5	5

Згідно з теоретичними даними, залежність напруги від часу повинна мати такий вигляд: $U = U_0 e^{-\alpha t}$. Методом найменших квадратів потрібно обчислити значення параметра α .

Відповідь: $\alpha \approx 0,307$.

- 2 Висота h падіння деякого тіла за час t визначається за такою формулою:

$$h = a_0 + a_1 t + a_2 t^2,$$

де a_0 – шлях, пройдений тілом до моменту початку відліку часу; a_1 – швидкість тіла в момент початку відліку часу; a_2 – половина прискорення сили тяжіння g .

Обчислити коефіцієнти a_0 , a_1 , a_2 методом найменших квадратів й оцінити точність визначення прискорення сили тяжіння g на основі серії вимірів, результати яких наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати серії вимірів

t , с	$\frac{1}{30}$	$\frac{2}{30}$	$\frac{3}{30}$	$\frac{4}{30}$	$\frac{5}{30}$	$\frac{6}{30}$	$\frac{7}{30}$
h , см	11,86	15,67	20,6	26,69	33,71	41,93	51,13
t , с	$\frac{8}{30}$	$\frac{9}{30}$	$\frac{10}{30}$	$\frac{11}{30}$	$\frac{12}{30}$	$\frac{13}{30}$	$\frac{14}{30}$
h , см	61,49	72,9	85,44	99,08	113,77	129,54	146,48

Відповідь: $a_0 = 9,14$; $a_1 = 65,89$; $a_2 = 489,28$.

ЧАСТИНА III

ПРАКТИКУМ З МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

«Філософія написана в тій величній Книзі (я маю на увазі Всесвіт), яка завжди відкрита для нашого погляду, але читати її може лише той, хто спочатку опанував мову та навчився розуміти знаки, якими вона написана. Написана ж вона мовою математики, без знання якої не можливо зрозуміти жодного зі слів, що в неї є, і залишається лише блукати в темному лабіринті».

*Галілео Галілей.
Пробірних справ майстер, 1623*

«Час, який, озираючись назад, здається таким ідилічним, пішов назавжди, коли окремі люди або невеликі групи могли бути повністю самодостатніми. Буде лише невеликим перебільшенням сказати, що людство вже зараз є планетарною спільнотою виробництва та споживання. Планова економіка, яка регулює виробництво відповідно до потреб суспільства, розподіляла б необхідну працю між усіма його членами здатними працювати і гарантувала б право на життя кожному чоловікові, жінці й дитині».

*Альберт Ейнштейн.
Чому соціалізм?, 1949*

Частина III посібника містить завдання для самостійного розв'язування, які спрямовані на набуття базових навичок з практичного використання методів, що вивчаються.

У розділі 5 розглянуто приклади побудови математичних моделей і запропоновані задачі, які включають змістову постановку проблеми або опис проблемної ситуації, побудову концептуальної і математичної моделей. Завдання пропонуються так, щоб навчитися правильно формулювати управлінську проблему зі сталого розвитку, висувати гіпотези, виділяти складові математичної моделі.

У розділі 6 надається практикум із застосування регресійного аналізу до задачі прогнозування забруднення річкової води у наслідок скиду стічних вод підприємства. За завданням треба розробити лінійну регресійну модель впливу скиду стічних вод підприємства на якість річкової води в контрольному створі. Суттєвим є виконання всіх етапів розробки і візуалізація результатів моделювання.

Практикум з моделювання сталого розвитку	Побудова простих моделей систем	<ul style="list-style-type: none"> • Моделювання відповідального виробництва • Індивідуальні завдання
	Моделювання управління екологічною сталістю	<ul style="list-style-type: none"> • Проблема забруднення атмосферного повітря • Теоретичні пояснення до виконання завдання • Приклад розробка лінійної регресійної моделі залежності між забруднюванням атмосферного повітря і захворюваністю населення • Індивідуальні завдання

Розділ 5 Побудова простих моделей систем

Розділ 6 Моделювання управління екологічною сталістю

РОЗДІЛ 5

Побудова простих моделей систем

Питання для дискусії:

Моделювання відповідального виробництва. Прості оптимізаційні моделі. Описові та оптимізаційні моделі. Постановки управлінської задачі. Концептуальні гіпотези. Побудова математичної моделі. Перевірка розмірності. Обговорення гіпотези.

Ключові терміни та поняття:

- Змістова постановка задачі
- Концептуальна постановка задачі
- Вихідні гіпотези
- Математична постановка задачі

5.1 Моделювання відповідального виробництва

Програма сталого розвитку на період 2016-2030 роки підкреслює роль виробництва як створення матеріальної основи для досягнення сталого розвитку у всіх його вимірах [27]. Ціль 12 прописує «дорожню карту» впровадження моделі сталого споживання і сталого виробництва, що передбачає виконання зокрема таких задач, як: використання раціональних моделей споживання і виробництва з урахуванням досвіду розвинених країн (задача 12.1); забезпечення екологічно раціонального використання хімічних речовин і всіх відходів упродовж усього їх життєвого циклу продукту (задача 12.4); сприяння розповсюдженню інформації та відомостей про сталий розвиток і спосіб життя в гармонії з природою (задача 12.8); нарощування науково-технічного потенціалу для переходу до більш раціональні моделі споживання і виробництва (задача 12.a); впровадження інструментів прозорості та моніторингу впливу на сталий розвиток (задача 12.b).

➔ *Приклад моделювання задачі*

Розглянемо приклад моделювання задачі, що стосується проблеми забезпечення сталого використання хімічних речовин на основі інноваційних технологій та виробництв, використання хімічних матеріалів згідно з міжнародними стандартами.

Постановки управлінської задачі

Підприємство виготовляє і продає широкий асортимент фарб для внутрішніх та зовнішніх робіт. У цьому році підприємство оголосило своє рішення щодо впровадження міжнародного стандарту екологічної продукції ISO 14024, що значно зменшують шкідливі наслідки для здоров'я та навколишнього середовища протягом усього життєвого циклу продукту. Екологічні переваги продукції відносно впливів на довкілля та здоров'я людини оцінювались на відповідність оновлених у 2016 році екологічних критеріїв: СОУ ОЕМ 08.002.12.019:2014 Лакофарбові матеріали. Екологічні критерії оцінювання життєвого циклу¹. Дотримання вимог цього стандарту є невід'ємною частиною сертифікації товарної продукції.

¹Цей стандарт розроблений у відповідності з принципами та структурою оцінювання життєвого циклу продукції на основі результатів аналізування кращого виробничого досвіду, вимог законодавства ЄС, екологічних критеріїв для лакофарбових матеріалів європейських та інших програм екологічного маркування згідно ISO 14024, зокрема: Регламенту Європейського парламенту та Ради ЄС № 1907/2006 від 18 грудня 2006 року щодо реєстрації, оцінки, дозволу і обмеження хімічних речовин (REACH); Директиви 2004/42/ЄС Європейського парламенту і Ради від 21 квітня 2004 року про обмеження викидів летких органічних сполук у зв'язку з використанням органічних розчинників в деяких фарб і лаків та оздоблення автомобілів, продуктів; Рішення Комісії від 28 травня 2014 року про встановлення екологічних критеріїв для фарб та лаків (документ зареєстровано під номером C(2014) 3429) (текст має відношення до ЄЗ) (2014/312/ЄС) та інших (приклад див. <https://www.ecolabel.org.ua/ru/novini/lakofarbovi-materiali-tm-nie-ka-ukrajinskogo-virobnitstva-uspishno-projshli-povturnu-ekologichnu-sertifikatsiyu>).

Необхідно визначити можливу кількість виробництва кожного виду екофарби за новим стандартом, щоб отримати максимальний дохід.

Для розробки плану виробництва екофарби було здійснено маркетингові дослідження, за результатами яких встановлені вихідні дані: відпускна ціна фарби для внутрішніх робіт – c_1 грн./т, фарби для зовнішніх робіт – c_2 грн/т; також запас продукції на складі до встановленого попиту потрібно мати відповідно b_1 і b_2 . Відомо, що для виробництва фарб використовується два основних матеріали – A і B (див. табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для задачі планування виробництва

Види складових матеріалів	Витрати складових матеріалів, у т на 1 т готової продукції		Запаси матеріалів на складі, т
	фарба для внутрішніх робіт	фарба для зовнішніх робіт	
A	a_{11}	a_{12}	b_1
B	a_{21}	a_{22}	b_2

Концептуальні гіпотези

- Об'єкт моделювання: план виробництва фарби.
- Керовані змінні завдання: x_1 – кількість виробленої фарби для внутрішніх робіт; x_2 – відповідна кількість фарби для зовнішніх робіт.
- Некеровані змінні: витрати матеріалів на 1 т фарби є визначеною детермінованою величиною, яка не залежить від часу та умов зовнішнього середовища.
- Визначені величини: кількість запасу матеріалів на складі не може бути зміненою.
- Внутрішні умови виробництва: витрати матеріалів у процесах виробництва і величина доходу лінійно залежать від кількості виробленої продукції; у продажах фарби не використовується фасування.
- Ринкові умови: наявний попит відповідає можливості продати весь вироблений продукт; величина доходу від одиниці продукції не залежить від зовнішніх умов і не змінюється в часі.

Побудова математичної моделі

Позначимо через x_1 – кількість виробленої фарби для внутрішніх робіт; і через x_2 – кількість фарби для зовнішніх робіт.

Враховуючи лінійну залежність доходу від кількості виробленої фарби, формула для його обчислення матиме такий вигляд:

$$f(x_1, x_2) = c_1 x_1 + c_2 x_2. \quad (5.1)$$

Обмеження, які мають задовольняти змінні завдання, такі:

$$\text{витрати матеріалу } A : a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \leq b_1, \quad (5.2)$$

$$\text{витрати матеріалу } B : a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \leq b_2. \quad (5.3)$$

Ці обмеження означають, що підприємство не може використати більше матеріалів, чим підприємство має на складі.

Крім того, необхідно врахувати, що $x_1, x_2 \geq 0$.

Отже, отримуємо таку оптимізаційну математичну модель виробництва фарби, що отримує максимальне значення функції за встановленими обмеженнями:

$$f(x_1, x_2) = c_1x_1 + c_2x_2, \quad (5.4)$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \leq b_1,$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \leq b_2,$$

$$x_1, x_2 \geq 0.$$

Оскільки змінні задачі x_1, x_2 входять у цільову функцію і обмеження лінійно, то побудована задача оптимізації називається *задачею лінійного програмування* (ЛП).

Перевірка розмірності

Перевірими узгодженість розмірності змінних задачі. Оскільки за умовами план вироблення фарби [т], відпускна ціна фарби [грн/т], то цільова функція – дохід буде у: [грн] = [грн/т][т] = [грн].

Розмірність змінних в обмеженнях: витрата матеріалів [т]/ [т], отже : [т] = [т]/ [т][т] = [т].

Обговорення гіпотези

Гіпотези, які були висунуті при побудові концептуальної моделі є суттєвими, оскільки вони впливають на кінцевий вигляд математичної моделі. Так, вибір керованих змінних дозволяє скласти оптимальний план виробництва нових видів екофарби. Припущення про детермінованість основних параметрів задачі є слушним, але це можливо, коли витрати матеріалів на один виріб суттєво не змінюються залежно від зовнішніх умов, тобто процес виробництва жорстко відповідає визначеній технології.

Але у реальності, витрати можуть відхилитися від технологічно обґрунтованих, тобто за певними обставинами можуть бути збільшені або зменшені. Наприклад, у виробництві деяких видів продукції витрати можуть сильно залежати від якості вхідного продукту – особливо сировини природного походження, тоді вже необхідно застосовувати стохастичні моделі.

Припущення про детермінованість запасу на складі також є достатньо жорстким. У реальних умовах, підприємство з метою зменшення складських витрат може мати практику докупати потрібну кількість сировини чи матеріалів за необхідністю.

Припущення про лінійну залежність доходу від кількості виробленої продукції дозволяє записати модель у вигляді добре вивченої задачі лінійного програмування. (див. рис. 5.1 – а). Але в реальності за законами ринку такі процеси, як відомо, є нелінійними. Якщо товар новий для певного ринку, на першому етапі освоєння нової продукції є первісні витрати на нові технології і виробництво, збитки від втрати на переключення на нових покупців, також є необхідними витрати на сертифікацію продукції, стимулювання збуту, рекламу та інші маркетингові заходи. Тобто графік залежності доходу підприємства від кількості виробленої продукції може мати вже інший вигляд, що показаний на рис. 5.1 – б.

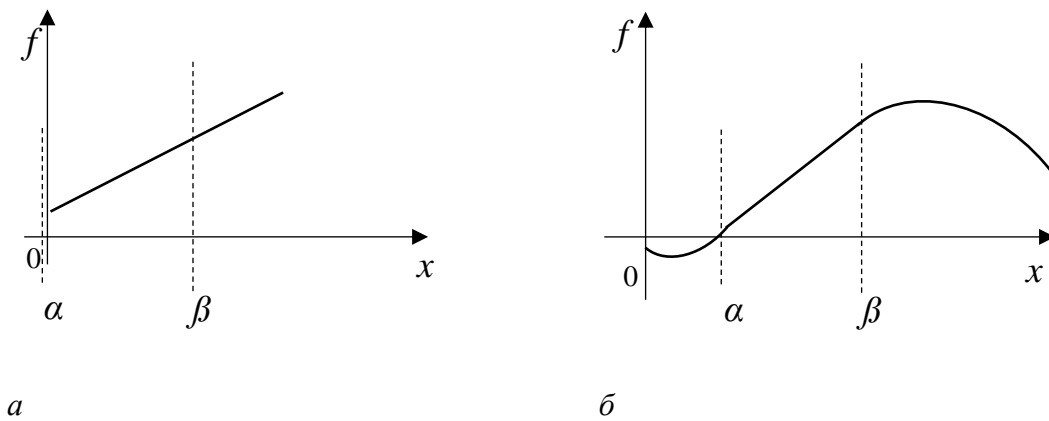


Рисунок 5.1 – Графік залежності доходу від обсягу виробництва

Але можна вважати, що виробництво вже налагоджено, а спад попиту ще не наступив, тоді можна взяти певний інтервал (α, β) прямо пропорційного доходу від виробничої програми, тобто вважати залежність лінійною, що значно спрощує задачу.

При побудові цільової функції також використовувалось припущення щодо гарантованої продажі, тобто продажі усієї виробленої продукції. Інакше в умовах задачі необхідно було б встановлювати обмеження щодо обсягів продажу відповідно до попиту (не більше ніж...), або вводити умови щодо змінної ціни в цільовій функції.

Припущення про те, що фарба продається без фасування теж дозволяє використовувати неперервну модель. Тобто величини змінних можуть бути незалежні від вимог щодо обсягів заповнення тари певної ємності або різних видів тари, що використовується. Інакше модель мала б бути дискретною (цілочисельною).

Інші приклади побудови і використання моделей можна знайти в літературі [1; 4; 19; 21 – 23; 31; 33 – 36; 55; 73 – 75].

5.2 Індивідуальні завдання

Метою індивідуальних завдань є навчитися вибирати вид моделі залежно від умов і цілей моделювання, визначати їхні параметри. Будувати концептуальні та математичні моделі систем [23; 37].

➤ Порядок виконання роботи

Нижче наведено основні етапи виконання індивідуальних завдань:

- Вивчити відповідний теоретичний матеріал.
- Розробити когнітивну, змістову й концептуальну (структурно-функціональну і причинно-наслідкову) моделі для задачі згідно із варіантом.
- Оцінити відмінність між когнітивною та змістовою моделями.
- З використанням доступних математичних методів розробити варіант математичної моделі, визначити її основні параметри (вхідні, вихідні дані, вплив середовища і т. ін.).
- Проаналізувати розроблену модель із позицій складності об'єкта, операторів, типу вхідних і вихідних параметрів, цілі моделювання.
- Провести аналіз і класифікацію декількох математичних моделей у цікавій для вас галузі знань. Встановити аналоги розглянутих математичних моделей в інших галузях.
- Оформити звіт, який повинен містити:
 - тему індивідуальної роботи;
 - постановку задачі;
 - опис параметрів системи;
 - сформульовану концептуальну модель;
 - побудовану математичну модель системи.

➤ Критерії оцінювання індивідуального завдання

При оцінюванні індивідуального завдання враховується правильність його виконання (50 %), пояснення щодо обраних моделей, гіпотез і припущень, знання визначень і термінології (40 %), своєчасне подання завдання на перевірку (10 %).

➤ Варіанти завдань

Індивідуальне завдання пропонується як два види завдань, що подані нижче. Кожен вид завдань має по 15 варіантів задач.

➔ Завдання 1

Сформулювати декілька варіантів змістових постановок задач моделювання відповідно до поданих нижче тем дослідження. Проведіть аналіз і класифікацію декількох математичних моделей в цікавій для вас області знань.

Теми дослідження:

- 1 Вплив бізнесу на біорізноманіття [14; 26, с. 36-38; 78].
- 2 Управління сталим розвитком автомобільної компанії [4; 22; 26, с. 46-47; 38].
- 3 Енергетичний баланс регіону з використання відновлюваних джерел енергії [21; 26, с. 48-51; 63].
- 4 Управління вразливістю населення в Україні [26, с. 56-58].
- 5 Екологічна оцінка проєктного рівня [26, с. 90-93; 29; 59].
- 6 Екологічний слід продукту за життєвим циклом [26, с. 113-115; 53-54].
- 7 Аналіз витрат і вигід за життєвим циклом продукту [26, с. 134-135].
- 8 Вигоди за «зеленими» тарифами для приватних домогосподарств, що виробляють електричну енергію [26, с. 156-159].
- 9 Зменшення відходів (продуктів) продовольчого магазину [26, с. 172].
- 10 Вимірювання сталості виробничих підприємств [26, с. 180-181; 46].
- 11 Оцінка розвитку інформаційного суспільства [26, с. 185-187].
- 12 Оцінка впливу культури на розвиток (CDIS) в Україні [26, с. 189-191].
- 13 Оцінка кліматичного сліду життєвого циклу харчових продуктів [16; 26, с. 213].
- 14 Бізнес-модель на принципах циркулярної економіки [26, с. 231-233; 41; 45; 47].
- 15 Вимірювання якості життя людини [26, с. 238-239; 67].

Встановіть аналоги таких задач (або математичних моделей) в інших областях.

➔ Завдання 2

Побудуйте концептуальну та математичну моделі поданих нижче задач. Визначте, яких змін зазнає побудована модель, коли змінюються вихідні припущення.

Задача 1. Продукція певного підприємства може вироблятися за допомогою технологічного способу T1, який підприємство хоче замінити на T2, за яким досягається менші викиди парникових газів. При цьому на виробництво продукції витрачаються ресурси трьох видів K1, K2 і K3, запаси яких дорівнюють: 15, 18 і 8 одиниць відповідно. Витрати ресурсів на виробництво всієї продукції за першим технологічним способом становлять 2, 4 і 0 одиниць на одну одиницю продукції, за другим – 3, 2 і 2 відповідно. Вихід продукції за способом T1 дорівнює 10 одиниць, за способом T2 – 8 одиниць.

Завдання: визначити, на скільки треба буде змінити ціну продукції при переході на технологію T2, щоб отримувати не менший дохід, чим за технологією T1.

Задача 2. Підприємство має продуктивність виробництва 3 тис. одиниць продукції на місяць. При тому виробництво потребує три види ресурсів, які були закуплені згідно річної виробничої програми у кількості 72, 54 і 27 тис. одиниць відповідно. Проте підприємство вирішило перейти на інноваційну технологію за екологічними стандартами, починаючи з другого кварталу. За новою технологією є потрібними такі ж ресурси, як й за старою, проте структура витрат ресурсів змінюється на 3, 1 і 1 одиниць відповідно на одиницю випускаємої продукції.

Завдання: скласти план закупівлі ресурсів, враховуючи існуючі складські запаси підприємства.

Задача 3. Підприємство виробляє два види продукції: П1 та П2. За складеними контрактами з покупцями збут продукції є необмеженим, а відпускні ціни за 1000 одиниць кожного з виробів визначено у розмірі 15 та 17 тис. грн. Планова собівартість виробництва 1000 одиниць становить 12 тис. грн (П1) та 15 тис. грн (П2). Для виготовлення продукції використовують три види сировини: С1, С2 і С3, яку закуплено під виробничу програму – 200, 110 і 120 одиниць відповідно. Витрати сировини на 1000 одиниць продукції така: С1 – 20 і 10; С2 – 20 і 5; С3 – 10 і 10. Але використання сировини С1 за новим законодавством стало заборонено як небезпечне для здоров'я людини, тому підприємство вимушено терміново закупити сировину С4, її витрати на 1000 одиниць продукції залишаються тими ж, але ціна на 3% більше. На утилізацію небезпечної сировини С1 треба витратити гроші, що складають 2% від ціни сировини.

Завдання: скласти план виробництва з забезпеченням максимального прибутку, враховуючи те, що підприємство вже закупило сировину С1 і вимушено її утилізувати, а сировину С4 ще треба закупувати у постачальників.

Задача 4. Участь в проєкті «Сімейні молочні ферми» дозволяє жителям сіл розпочати власний ефективний бізнес у галузі тваринницького господарства, щоб забезпечити високий рівень життя для себе і своїх родин. Маємо певну сімейну молочну ферму, для якої на представлений проєкт з бюджетом 1900000 грн, виділена державна допомога у сумі 200000 грн. За розрахунком проєкту на виробництво одного центнера молока витрачається 962 грн, а на виробництво 1 центнера м'яса – 3895 грн. Державні закупівельні ціни 1 центнера молока становлять 1170 грн, а 1 центнера м'яса – 4370 грн.

Завдання: скласти для ферми оптимальний план виробництва молока та м'яса.

Задача 5. З Чернігова до Тернополя необхідно перевезти обладнання трьох типів, зокрема 84 одиниці I типу, 80 одиниць II типу й 150 третього. Для перевезення використовують два види транспорту А і Б. За один рейс транспорт А може перевезти 3 одиниці обладнання типу I або 4 одиниці типу II, або 2 одиниці типу III. Транспорт Б може перевезти 2 одиниці обладнання будь-якого типу за один рейс. Витрати на перевезення транспортом А дорівнюють 5092 грн, транспортом Б – 4000 грн.

Завдання: скласти план перевезень, що забезпечує мінімальні транспортні витрати.

Задача 6. Трикотажна фабрика виробляє светри й блузи, використовуючи вовну, силон та нітрон, запаси яких дорівнюють 900, 400 і 300 кг відповідно. Витрати кожного виду пряжі на виготовлення 10 светрів становить 4, 2 і 1 кг, а для 10 блуз – 2, 1 і 1кг відповідно. Прибуток від реалізації 10 светрів дорівнює 600 грн, а 10 блуз – 500 грн. Технологічні відходи за кожним видом використаної сировини становить: вовни – 2%, силону – 1,5% та нітрону – 1%. Рівень браку становить приблизно 3% від загального виробництва светрів та 2% від виробництва блуз. Витрати на утилізацію технологічних відходів та бракованої продукції становлять 10% від вартості сировини.

Завдання: скласти план випуску продукції, який максимізує прибуток, враховуючи, що ємність ринку дозволяє реалізувати не більше 150 светрів.

Задача 7. З пункту А до пункту Б щодня відправляються пасажирські та швидкі поїзди, які комплектуються із різних типів вагонів. Кількість вагонів кожного типу для комплектування поїздів та число пасажирів, на які розраховано ці вагони, подано у табл. 5.3.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані до задачі 7

Вагон	Парк вагонів	Поїзд		Кількість пасажирів	Вартість квитка
		швидкий	пасажирський		
Вагон-буфет	12	1	1	–	–
Поштовий	18	≤ 1	1	–	–
Загальний	5	≤ 1	≤ 2	72	277
Плацкартний	89	≤ 5	8	54	559
Купейний	79	≤ 6	≤ 4	36	1036
Спальний	35	≤ 4	≤ 1	18	2129
Максимальна кількість вагонів	7	10	12		

Завдання: визначити максимальну суму загального доходу від перевезень, якщо: (1) число пасажирів, що перевозяться, буде максимальним; (2) пропускна спроможність дороги обмежує кількість пасажирських поїздів до шести на день.

Задача 8. Механічний цех може виготовити за зміну 600 одиниць деталей виду А, для чого за виробничою програмою надається В т металу. При тому у процесі виробництва отримується 20% відходів металу, які не можна повторно використати. За програмою зменшення промислових відходів, обладнання цеху частково замінили на інноваційні лазерні станки, які мають унікальні експлуатаційні характеристики. Тепер цех буде виготовляти деталі типу А тільки 20% від минулої програми, а паралельно переходить на виготовлення деталей типу С, які мають більш складну конфігурацію, проте їхня матеріалоемність на 10% менше, а кількість відходів за новим обладнанням зменшується у 5 разів. Після механічного цеху того ж самого дня деталі поступають на обробку в термічний цех. Виробнича потужність термічного цеху становить 1200 деталей типу А та 800 деталей типу С. Відпускна ціна деталі С після термічної обробки у 1,5 рази вище, чим деталі А.

Завдання: скласти щоденну виробничу програму, яка забезпечує максимізацію доходу підприємства в умовах одночасного випуску деталей А і С.

Задача 9. Земляні роботи є найбільш трудомістким і дорогим видом будівельних робіт. Фірма має три види землерийного обладнання I, II і III, що можуть на заказ виконувати три види робіт A, B і C. Залежно від конструкції робочого органу ці машини мають різні ресурси робочого часу, продуктивність при виконанні різних видів робіт і вартість витрат на одну годину роботи (див. табл. 5.3).

З точки зору екології пріоритет належить виробничій діяльності, що забезпечує найвищу потужність при найменших витратах (сировини, матеріалів, енергії тощо) та часу на виробництво одиниці потрібного суспільству продукту, а також з меншими можливими впливами шуму і вібрації.

Таблиця 5.3 – Вихідні дані до задачі 9

Механізм	Продуктивність, м ³ /год			Питома вартість витрат, грн/год			Рівень шуму, дБ	Рівень вібрації, дБ ²	Ресурс часу, год
	A	B	C	A	B	C			
I	30	20	40	20	40	20	89–98	108-111	400
II	20	30	50	30	20	50	98–93	105-98	300
III	60	40	20	50	30	60	62–65	99-97	280

Завдання: (а) визначити оптимальне завантаження механізмів за критерієм максимального сумарного обсягу виконаних робіт; (б) знайти оптимальне завантаження обладнання, яке мінімізує сумарні витрати та екологічні впливи, коли задано такі обсяги робіт: A = 6000 м³, B = 50000 м³, C = 8000 м³.

Задача 10. Щоб зменшити навантаження приватного автомобільного транспорту в регіоні, Укртрансбезпеки видало приватному транспортному підприємству ліцензії для організації пасажирських перевезень між регіональним центром Ц та чотирма містами регіону – M1, M2, M3, M4 на три групи мікроавтобусів – Mercedes-Benz Sprinter, Neoplan, МАН. Попит на перевезення за кожним маршрутом становить не менш ніж 1800, 1530, 1000, 2250 осіб на день відповідно. Кожен автомобіль може здійснити 2 рейси на день за маршрутами M1 та M4, або 1 рейс за маршрутами M2 та M3.

Таблиця 5.4 – Вихідні дані до задачі 10

Вид автобусу	Кількість автобусів	Кількість місць в автобусі	Вартість квитка, грн				Експлуатаційні витрати, грн/день			
			Ц - M1	Ц-M2	Ц-M3	Ц-M4	Ц - M1	Ц-M2	Ц-M3	Ц-M4
Mercedes	10	20	150	237	127	127	1800	2700	1440	1440
Neoplan	25	55	227	315	200	200	3200	4800	2560	2560
МАН	40	37	200	280	200	200	2500	3750	2000	2000

Завдання: Розподіліть автомобілі серед маршрутів, за такими критеріями: (1) досягнення максимального прибутку компанії; (2) максимізація числа перевезених пасажирів.

²На робочому місці машиніста, по осі Z.

Задача 11. Приватна мініпекарня «Булочник» позиціонує себе на ринку як виробник хліба для здорового харчування. У своєму виробництві використовує чотири види технологій: (1) технологія з цільнозмеленого зерна; середня вага однієї буханки складає 680 грам, середня ціна – 25 грн за буханку; (2) використання закваски зі спрямованим культивуванням мікроорганізмів; середня вага однієї буханки складає 420 грам, середня ціна – 14 грн за буханку; (4) технології з додаванням харчових інгредієнтів (зерно-продукти, горіхи, морква, цибуля та ін.); середня вага однієї буханки складає 280 грам, середня ціна – 10 грн за буханку.

Дослідження довело такий стан ринку мікрорайону. Хліб з цільнозмеленого зерна та з використанням закваски готові купувати 75% жінок і 28% чоловіків, але такі, що працюють і мають середній та вище рівні доходу. Серед студентів – тільки 10% люблять цей вид хлібу, школяри його у цілому не люблять, серед пенсіонерів готові купувати 5%. Хліб з додаванням мікронутрієнтів купують однаково жінки та чоловіки, але у більшості – 68%, що парцюють і мають середній та вище рівні доходу. Студенти – 12% люблять цей вид хлібу, школяри його не хочуть їсти, серед пенсіонерів готові купувати тільки 8%. Хліб з додаванням харчових інгредієнтів більше за усіх люблять студенти (45%) та школяри старших класів –15-17 років (35%), серед працюючих дорослих його люблять лише 10%, а пенсіонери у цілому не купують.

В мікрорайоні міста, де знаходиться мініпекарня, мешкає 9120 осіб. Доросле населення, що працює, складає десь 35%, серед працюючих – 52% мають постійну роботу з доходом вище середнього рівня, у тому числі жінки з них – 68%. Студенти, що мешкають у цьому районі, складають приблизно 10%, діти 15-17 років – 9%. Пенсіонери складають 15% населення мікрорайону. Рівень споживання хлібу на душу населення на рік складає 26 кг на одну особу, що старше 14 років. Пікарня має виробничі потужності для випікання хлібу 833 кг за день за будь якою технологією, обмежень у закупівлі сировини не має. Ринок хліба за асортиментом, що випікає пікарня, у мікрорайоні не є насиченим.

Завдання: (а) визначити місткість сегменту хлібу для здорового харчування у мікрорайоні, де знаходиться пекарня; (б) скласти оптимальний місячний план виробництва хлібу за різними технологіями, щоб мініпекарня отримала максимальний дохід.

Задача 12. Є замовлення виготовити з них комплекти для медичного обладнання, що включають 4 деталі А типу, 3 деталі В типу та 2 деталі С типу. Підприємство має 3 звичайних станки та 4 станки для лазерної різки; на складі є 650 листів заліза. Продуктивність станків різного типу подано у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Вихідні дані до задачі 12

Тип деталей	Кількість деталей, шт.						
	Звичайні станки			Лазерні станки			
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R4
А	0	6	9	6	5	4	0
В	5	3	4	5	3	2	6
С	12	14	0	7	4	5	7

Завдання: потрібно розкроїти матеріал в такий спосіб, щоб забезпечити виготовлення максимальної кількості комплектів для замовника.

Задача 13. У роботі підприємства передбачено п'ять типів технологічних процесів (Т1, Т2, Т3, Т4, Т5), причому кількість одиниць продукції, що випускається із застосуванням кожного з них за одну годину дорівнює 300, 260, 320, 400 та 450 відповідно. Під час виробництва враховуються витрати на сировину, електроенергію, зарплату та ін., що наведено у табл. 5.6.

Таблиця 5.6– Вихідні дані до задачі 13

Виробничі витрати	Витрати різних технологій					Наявні ресурси
	Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	
Сировина, кг	15	20	15	14	18	2000
Електроенергія, кВт/год	0,2	0,3	0,15	0,25	0,3	300
Інші витрати, грн	40	50	60	30	20	1000
Заробітна платня, грн	60	30	40	60	30	1600

Завдання: враховуючи, що за кожної технології має становити цілу кількість годин праці, скласти виробничу програму підприємства, яка забезпечує: максимальний випуск продукції, мінімізуючи витрати сировини та енергії.

Задача 14. Механічний завод виготовляє деталі типу А, В, С; їхня відпускна ціна становить відповідно 22, 18 та 30 грн. У процесі виробництва використовуються токарні, фрезерувальні та стругальні верстати. На заводі обробку кожної деталі можна вести різними технологічними методами – існують ще старі технології Т1 і Т2, а також впроваджується технологія Т3, що зменшує виробничі відходи та енергоємність обробки деталей А і В. У табл. 5.7 вихідні дані за кожним видом технологічного способу, а також ресурси (верстат-год) кожної групи верстатів.

Таблиця 5.7 – Вихідні дані до задачі 14

Тип верстата	Норми часу на обробку деталей, год									Ресурс часу, год
	А			В			С			
	Т1	Т2	Т3	Т1	Т2	Т3	Т1	Т2	Т3	
Токарний	1,1	0,9	1,0	1,2	1,3	–	0,9	–	–	200
Фрезерувальний	1,3	0,8	0,8	0,9	1,1	1,1	1,1	0,8	–	400
Стругальний	0,7	0,7	–	0,7	0,1	1,2	1,3	0,6	–	300

Завдання: (а) скласти оптимальний план завантаження виробничих потужностей, який забезпечує максимальний дохід від продажу комплектів деталей А, В і С у співвідношенні 1:2:1; (б) скласти оптимальний план завантаження виробничих потужностей з огляду на максимальне використання технології Т3; (с) визначити виробничу програму, яка забезпечує максимальний дохід при зменшенні використання енергоємної технології Т1.

Задача 15. Магазин «GeHause» позиціонує продаж фасованих цукерок європейського виробництва з маркуванням на відповідність світовим стандартам якості. Його покупцями за географічної ознакою є переважно мешканці, що живуть в Індустріального району, недалеко від Образцовського ринку. При дослідженні ринку встановлено, що цільова аудиторія є в основному покоління Y і X. Серед мешканців цього району це є особливо з середніми і вище доходами, переважно це жінки. Але більш ретельне дослідження частоти здійснення покупки цукерок свідчить про те, що 22% міленіалів та 15% покоління X здійснюють покупки дуже рідко, тому що взагалі не споживають солодке; а ось 25% від основної аудиторії купують цукерки не рідше 1 разу на місяць, 26% – 2-3 рази на місяць, а 10% – купують солодощі регулярно раз на тиждень.

За рік магазин мав 23 725 покупців (чеків), а виручка склала 2 913 091 грн. Продажі склали три групи цукерок з маркуванням на відповідність стандарту А (за відстеженням процесів виробництва у ланцюгах створення вартості) – 25%; стандарту В (за підтвердженням екологічності складових продукції) – 29%; стандарту С (за відповідності упаковки стандарту FSC) – 46%. Магазин складає план продажів на наступний рік на суму 3,5 млн грн, має пропозицію від постачальників на 1,5 млн грн цукерок, що марковані на відповідність стандарту А і С; 0,5 млн грн цукерок, що марковані на відповідність стандарту В і С; 2,5 млн грн цукерок, що марковані на відповідність тільки стандарту С.

Таблиця 5.8 – Вихідні дані до задачі 15

Характеристика населення міста, осіб		
За віком	Покоління Z (17-22 роки)	9%
	Покоління Y	
	Молоді міленіали (23-27 років)	13%
	Основні міленіали (28-32 років)	20%
	Зрілі міленіали (33-41 років)	29%
	Покоління X (42-58 років)	23%
	Старше покоління (59 років+)	6%
За доходом	до 5 000 грн.	18%
	від 5 001 грн. до 10 000 грн.	20%
	від 10 001 грн. до 15 000 грн.	28%
	від 15 001 грн. до 20 000 грн.	19%
	вище 30 000 грн.	15%
За статтю у поколінні Y	Жінки	58%
	Чоловіки	42%
За географічною ознакою	Мешканці Індустріального району, осіб	127923

Завдання: (а) визначити кількість потенційних споживачів у сегменті; (б) визначити індекс проникнення магазину «GeHause» у сегменті³; (в) скласти план закупівлі цукерок від постачальників, що найкращим чином відповідають очікуванням потенційних споживачів.

³Індекс проникнення (Market Penetration Index) розраховується в двох варіантах: МРІос. = кількість споживачів магазину (чеків) за рік / кількість потенційних споживачів у сегменті *100% ; МРІфін. = виручка магазину за рік / потенційна ємність сегменту у грошах) *100% .

Питання для самоконтролю і завдання

Дайте відповіді на питання та поясніть їх на прикладах:

- У чому особливості побудови простих оптимізаційних моделей відповідального виробництва? Навести приклади мети моделювання.
- У чому особливості побудови описових та оптимізаційних моделей для цілей управління сталим розвитком у виробничій сфері? Навести приклади сфери використання моделей.
- У чому особливості постановки управлінської задачі для цілей управління сталим розвитком у виробничій сфері? Навести приклади постановки управлінської задачі для цілей моделювання сталого розвитку у виробничій сфері.
- У чому особливості формулювання концептуальної гіпотези для цілей моделювання сталого розвитку у виробничій сфері? Навести приклади формулювання концептуальної гіпотези для цілей моделювання сталого розвитку виробничого чи комерційного підприємства.
- У чому особливості побудови математичної моделі для цілей управління сталим розвитком у виробничій сфері? Продемонструвати такі особливості на прикладах задач цього розділу.
- Що таке перевірка розмірностей, як вона відбувається при моделюванні управління сталим розвитком суб'єктів діяльності? Пояснити це на прикладах задач цього розділу.
- Що таке перевірка розмірностей, як вона відбувається при моделюванні управління сталим розвитком суб'єктів діяльності? Пояснити це на прикладах задач цього розділу.
- Що таке вихідна гіпотеза? Які особливості має вихідна гіпотеза при моделюванні управління сталим розвитком суб'єктів діяльності? Пояснити це на прикладах задач, які ви виконували за цим розділом.
- Що таке обговорення гіпотези, для чого воно здійснюється? Які особливості має обговорення гіпотези при моделюванні управління сталим розвитком суб'єктів діяльності? Пояснити це на прикладах задач, які ви виконували за цим розділом.
- Що включає поняття коректності математичної задачі і яким умовам повинна задовольняти коректна модель? Пояснити це на прикладах задач цього розділу.
- Які цілі переслідує перевірка адекватності моделі? Пояснити це на прикладах задач, які ви виконували за цим розділом.

РОЗДІЛ 6

Моделювання управління екологічною сталістю

Питання для дискусії:

Регресійні статистичні моделі. Візуалізація розподілу даних вимірювань. Допоміжні статистики. Оцінки параметрів регресії. Залишки регресії. Середнє квадратичне відхилення залишків регресії. Перевірка точності і адекватності моделі. Розрахунок параметрів довірчої області. Візуалізація регресії та довірчих інтервалів.

Ключові терміни та поняття:

- Візуалізація вихідних даних
- Довірчі інтервали
- Результатів моделювання
- Коректність застосування лінійної регресії
- Якість лінійної регресійної моделі

6.1 Проблема забруднення атмосферного повітря

У липні 2021 року Україна прийняла оновлений національно визначений внесок до Паризької угоди¹ – глобального договору з боротьби зі змінами клімату. До 2030 року викидів парникових газів в Україні має бути на 65% менше від рівня 1990 року.

В Україні до основних забруднювачів атмосферного повітря, які в значному обсязі викидаються, особливо в великих індустріальних містах в процесах промислової діяльності та за великої кількості транспорту, відносять діоксид сірки (SO₂), оксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO₂) і оксид азоту (NO).

Діоксид сірки – це безбарвний газ з характерним різким запахом, характеризується високою токсичністю, має третій клас небезпеки. В Україні перевищення допустимих норм концентрацій діоксиду сірки в деяких регіонах складає від 50 до 300 разів.

Оксид вуглецю – за токсичністю цей газ має четвертий клас небезпеки. Цей газ утворюється при спалюванні палива на ТЕС, ТЕЦ, в металургії, нафтопереробці тощо; автомобілі утворюють 95% цього газу у містах. За збільшенням концентрації оксид вуглецю заважає крові поглинати кисень і людина задихається.

Оксиди азоту – при короткочасній концентрації, що перевищує 200 мікрограмів на кубічний метр, діоксид азоту вважається токсичним газом і відноситься до третього класу небезпеки. Збільшення концентрації газу викликає значне запалення дихальних шляхів, падіння артеріального тиску, пошкодження зубів або кон'юнктивіт.

На промисловість припадає приблизно 23% викидів парникових газів. Особливу небезпеку становлять стаціонарні джерела великих виробництв, що працюють на твердому паливі, а саме теплових електростанцій, металургійних комбінатів, виробників керамічних, лінолеуму, пінопласту, текстилю, мінераловолокнистих плит, паперу тощо.

Наприклад, у 2020 році процеси спалювання в енергетичних галузях дали²:

- 522377 т діоксиду сірки або 87% від усіх викидів речовини по країні в цілому;
- 202993 т оксиду вуглецю або 29% від усіх викидів речовини по країні в цілому;
- 114651 т діоксиду азоту або 63% від усіх викидів речовини по країні в цілому.

¹ Паризька угода складена в межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC) щодо регулювання заходів зі зменшення викидів діоксиду вуглецю з 2020 р. Участь кожної окремої країни в досягненні світової мети визначається нею індивідуально та має назву «національно-визначений внесок» (НВВ). Виконання Угоди всіма підписантами загалом буде оцінюватись кожні 5 років, перша така оцінка — у 2023 році. Україна підписала Угоду 22 квітня 2016 року та була однією з перших держав, що її ратифікували (див. Закон України «Про ратифікацію Паризької угоди» від 1 серпня 2016 року – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1469-19#Text>)

² Держстат: Викиди в атмосферне повітря за 2020 рік (див. <https://ua-energy.org/uk/posts/vykydy-v-atmosferne-povitria-derzhstat-proanalizuvav-rehiony-ta-haluzi-za-2020-rik>)

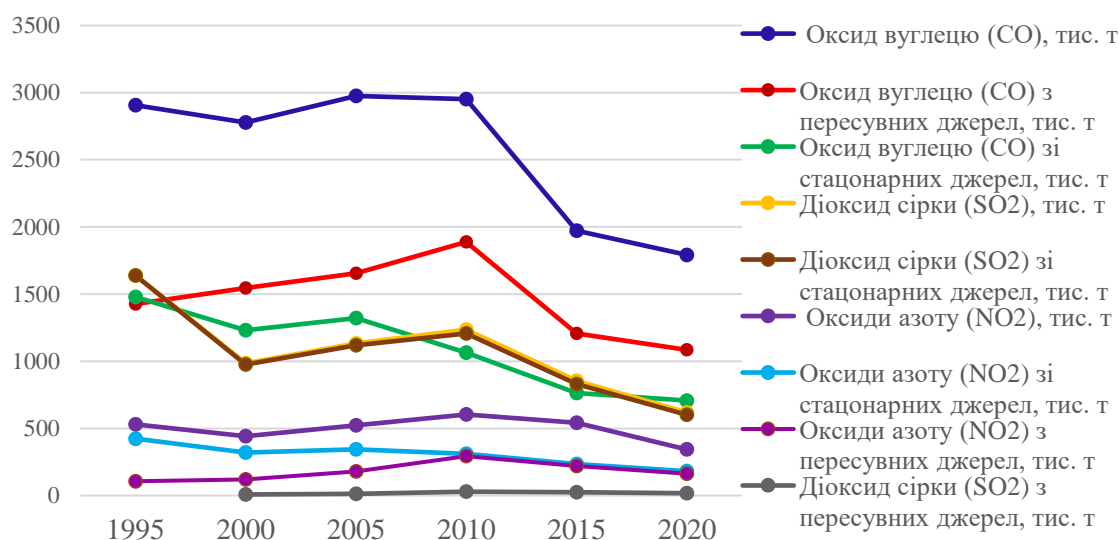


Рисунок 6.1 – Викиди забруднюючих речовин у атмосферне повітря в Україні³

Забруднення атмосфери є неоднаковим за регіонами – в індустріально розвинених регіонах, містах та районах воно може бути в тисячу разів більшим ніж середнє допустиме значення (див. табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів по регіонах (1990-2020), тис. т/рік³

Область України	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Донецька	2539,2	2136,5	1590,0	1638,1	1378,1	917,6	751,0
Дніпропетровська	2170,1	1031,2	783,6	993,7	933,1	723,9	534,7
Запорізька	587,5	268,8	231,2	262,0	217,5	193,7	155,5
Харківська	355,9	241,2	143,7	158,7	151,9	53,4	94,1
Полтавська	220,7	126,2	60,4	68,4	72,8	55,6	45,8

За дослідженнями Всесвітньої організації охорони здоров'я виявлено сильний прямий кореляційний зв'язок між ступенем забруднення повітря і загальним рівнем захворюваності дорослого населення. При підвищених концентраціях забруднювачів впливи на людину проявляються у змінах в ендокринних органах та кровотворних органах, новоутвореннях, пригніченні окиснювальних процесів у головному мозку, хворобах кістково-м'язових систем, хворобах шкіри та підшкірної клітковини тощо.

В Україні негативного впливу атмосферних забруднень зазнає близько 17 млн. осіб, або 34% всього населення. Тому впровадження «зелених» моделей виробництва та споживання є вкрай необхідним для зменшення захворювання населення і покращення якості життя.

³Використано дані Державної служби статистики України – <https://www.ukrstat.gov.ua/>.

6.2 Теоретичні пояснення до виконання завдання

Розглянемо таку задачу.

Треба довести існування впливу наявності визначених шкідливих речовин у повітрі на виникнення певного виду захворювання. Для вирішення цього завдання візьмемо дані про викиди основних шкідливих речовин у атмосферне повітря за період з 2000-2016 роки, зіставляючи їх з даними про кількість захворювань у той самий період (див. табл. 6.2-6.3).

Необхідно з'ясувати, чи існує зв'язок між кількістю викидів кожного із таких забруднювачів в атмосферне повітря та кількістю захворювань певного виду, а саме – новоутвореннями, хвороби системи кровообігу, хвороби кістково-м'язової системи, а також хворобами шкіри та підшкірної клітковини.

Таблиця 6.2 – Викиди забруднювальних речовин в атмосферне повітря України за 2016-2000 роки, тис. т/рік⁴

Рік	Діоксид сірки (SO ₂)		Оксид вуглецю (CO)			Оксиди азоту (NO ₂)	
	Загалом	стаціонарні джерела	Загалом	стаціонарні джерела	пересувні джерела	Загалом	стаціонарні джерела
2000	984,80	976,60	2776,80	1230,60	1546,20	440,60	320,00
2001	992,10	983,60	2852,50	1270,30	1582,20	452,00	328,10
2002	1032,60	1023,90	2865,10	1256,80	1608,30	435,70	309,40
2003	1046,30	1034,20	2889,60	1269,70	1619,90	477,90	306,00
2004	988,50	975,40	2991,00	1318,80	1672,20	471,90	291,70
2005	1132,80	1119,50	2975,20	1320,50	1654,70	523,90	343,70
2006	1347,20	1333,00	3050,50	1357,90	1692,60	515,10	325,80
2007	1342,60	1313,10	3301,50	1404,40	1897,10	641,90	336,60
2008	1320,60	1290,60	3176,70	1185,20	1991,50	642,00	330,90
2009	1262,70	1235,20	2787,50	915,50	1872,00	562,10	279,20
2010	1235,20	1206,30	2951,90	1063,80	1888,10	603,70	310,50
2011	1363,40	1333,10	2908,20	1066,10	1842,10	633,00	333,00
2012	1430,30	1399,20	2830,50	1004,60	1825,90	634,60	332,50
2013	1413,30	1381,80	2782,10	1007,20	1774,90	633,40	333,30
2014	1160,60	1133,30	2283,40	828,40	1455,00	541,40	288,10
2015	854,00	830,30	1971,90	764,10	1207,80	453,00	233,80
2016	1094,00	1076,40	2029,90	802,80	1227,10	404,50	240,20

⁴Побудовано з використанням даних Державної служби статистики України – <https://www.ukrstat.gov.ua/>

Таблиця 6.3 – Кількість уперше зареєстрованих випадків захворювань, тис/рік⁵

Рік	Новоутворення	Хвороби системи кровообігу	Хвороби кістково-м'язової системи і сполучної тканини	Хвороби шкіри та підшкірної клітковини
2000	382	2338	1571	1996
2001	394	2384	1593	2008
2002	382	2370	1598	1950
2003	395	2386	1572	1915
2004	406	2498	1609	1917
2005	408	2430	1600	1936
2006	414	2431	1597	1906
2007	407	2437	1569	1952
2008	406	2478	1567	1911
2009	407	2423	1544	1890
2010	418	2390	1532	1921
2011	423	2346	1490	1881
2012	433	2318	1445	1852
2013	440	2256	1444	1856
2014	363	1880	1247	1570
2015	366	1844	1246	1567
2016	369	1826	1241	1564

Для розв'язання цієї задачі використаємо кореляційно-регресійний аналіз.

Отже, виберемо лінійну регресійну статистичну модель такого вигляду:

$$y = a + bx + \varepsilon, \quad (6.1)$$

де y – кількість захворювань, x – обсяг викидів забруднювальної (шкідливої) речовини в атмосферне повітря.

Рівняння $y = f(x) = a + bx$ являє собою лінійну регресію величини y , що розглядається як випадкова, за величиною x , а a та b є параметрами регресії; ε – внесок випадкових факторів.

Необхідно виконати такі етапи регресійного аналізу:

- визначення виду залежності (етап специфікації). Тобто потрібно впевнитися, що має місце лінійна парна регресія:

$$f(x) = a + bx, \quad (6.2)$$

- визначення коефіцієнтів регресії (етап ідентифікації) і характеристик «шуму», тобто впливу ε випадкових факторів.
- перевірка якості рівняння регресії (етап верифікації).

⁵Побудовано з використанням даних Державної служби статистики України – <https://www.ukrstat.gov.ua/>

Вихідними даними для проведення повного регресійного аналізу, метою якого є вивчення впливу викидів забруднювачів у атмосферне повітря на кількість захворювань, є синхронні ряди спостережень величин x і y (див. табл. 6.4).

Таблиця 6.4 – Результати вимірювання величин x і y

Рік (номер вимірювання)	1	2	...	i	...	M
x_i	x_1	x_2	...	x_i	...	x_M
y_i	y_1	y_2	...	y_i	...	y_M

Число M відображає розмір вибірки спостережень, а індекс i показує номер даних вимірювання. Розрахунки і визначення параметрів необхідно проводити у описаній нижче послідовності.

➔ Етап 1. Ідентифікація

Оскільки за умовами задачі досліджується парна регресія, то простіше за все впевнитися в тому, що розподіл даних вимірювань має ознаки лінійної регресії, за допомогою *візуалізації розподілу даних вимірювань*. Для цього потрібно побудувати точковий графік розподілу результатів вимірів $(x_i; y_i)$ у декартовій системі координат. При цьому вздовж осі абсцис відкладають значення величини x_i – дані про об’єм викидів забруднювальної речовини, а вздовж осі ординат – величини y_i – відповідні їм дані про кількість захворювань.

Якщо розподіл точок утворює видовжену в певному напрямку «хмарку», то можна припустити наявність лінійної регресії (6.2). Якщо точки утворюють хаотичний клубок без певної тенденції розподілу, то припущення про існування лінійної регресії може виявитись хибним. Для побудови графіка можна використовувати, наприклад, засоби електронних таблиць Excel.

Для того, щоб підтвердити припущення про існування парної лінійної регресії необхідно обчислити коефіцієнт парної кореляції (4.3).

Для його визначення, потрібно розрахувати статистики, які описують результати вимірювань, а саме:

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i; \quad (6.3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i; \quad (6.4)$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i^2; \quad (6.5)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\overline{x^2} - \bar{x}^2}; \quad \sigma_y = \sqrt{\overline{y^2} - \bar{y}^2}; \quad (6.6)$$

$$cov = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}); \quad (6.7)$$

$$\text{тоді маємо коефіцієнт кореляції: } r_{xy} = \frac{cov}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (6.8)$$

Якщо значення коефіцієнта кореляції буде більшим за 0,7 – кореляція вважається сильною і припущення про лінійну залежність є слушним.

Крім того, необхідно перевірити також умови (4.4), а саме:

$$|r_{xy}| \geq \frac{2}{\sqrt{M-3}}.$$

Якщо умову виконано, то дані виявляють статистичну залежність і їх можна використовувати для побудови рівняння регресії.

➔ Етап 2. Специфікація

Якщо на попередньому етапі припущення про існування лінійної залежності підтвердилось, то необхідно обчислити оцінки параметрів регресії. Для парної лінійної регресії можна скористатися такими формулами:

Оцінки параметрів регресії:

$$\hat{b} = \frac{cov}{\sigma_x^2}; \quad (6.9)$$

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x}. \quad (6.10)$$

➔ Етап 3. Верифікація

Для перевірки якості отриманого рівняння регресії обчислимо такі характеристики.

Залишки регресії:

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, M. \quad (6.11)$$

Математичне сподівання залишків регресії:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \varepsilon_i. \quad (6.12)$$

Якщо рівняння побудовано правильно, то математичне сподівання залишків регресії має дорівнювати 0.

Середнє квадратичне відхилення залишків регресії:

$$S_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{M-1} \left[\sum_{i=1}^M \varepsilon_i^2 - \frac{1}{M} (\sum_{i=1}^M \varepsilon_i)^2 \right]}. \quad (6.13)$$

Розрахункові величини залишків регресії записуємо у табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Результати оцінки залишків регресії

Вимірювання, i	1	2	...	M
Залишок регресії, ε_i	ε_1	ε_2	...	ε_M

Щоб упевнитися, що внесок інших факторів, окрім вмісту забруднювальної речовини у атмосферному повітрі, може дійсно розглядатися як випадковий, також доцільно виконати візуалізацію залишків регресії. Для цього у декартовій системі координат позначаємо точки, у яких абсциса є порядковим номером вимірювання i , а ордината – величина відповідного залишку регресії ε_i .

Якщо точки на графіку хаотично розподіляються вздовж осі абсцис з обох її боків, то це означає що вплив ε інших факторів є випадковим. Коли ж за розподілом точок можна побачити певну закономірність, то це означає, що побудоване рівняння лінійної регресії (6.2) не охоплює повністю вплив факторів на вихідну величину, і необхідно розглянути інші види залежності, окрім лінійної. Крім того, дослідження залишкового ряду передбачає перевірку того, що його значення є випадковими, незалежними і підпорядковані нормальному закону розподілу. Перевірка якості рівняння включає також перевірку значущості рівняння регресії та його коефіцієнтів (див. розділ 4).

➔ Етап 4. Розрахунок параметрів довірчої області

Нагадаємо, що для обчислення коефіцієнтів регресії використовується деяка вибірка спостережуваних значень, отже в результаті ми маємо оцінки цих коефіцієнтів, а не їхні істинні значення. Оцінки, отримані за іншою вибіркою можуть відрізнятись, і, якщо об'єм вибірки не великий, то ця різниця може бути досить суттєвою. Отже, доцільно побудувати довірчу область, щоб впевнитись, що отримані оцінки задовольняють висунуті вимоги стосовно достовірності рівняння регресії.

Довірча область являє собою частину фазової площини, тобто площини в декартовій системі координат ab де з довірчою ймовірністю P_α перебувають дійсні величини параметрів регресії a і b , які, звісно, відрізняються від їх статистичних оцінок \hat{a} і \hat{b} . Розрахунок таких статистик це дуже важливий крок регресійного аналізу, оскільки саме на цьому етапі остаточно вирішується питання про можливість побудови моделі лінійної регресії.

Границя довірчої області параметрів моделі (6.2) являє собою еліпс, який описується такою формулою:

$$(a - \hat{a})^2 + 2\bar{x}(a - \hat{a})(b - \hat{b}) + \bar{x}^2(b - \hat{b})^2 = \frac{2}{M} S_\varepsilon^2 F_{2;M-2;\alpha}, \quad (6.14)$$

де $F_{2;M-2;\alpha}$ – величина зворотного F -розподілу ймовірностей зі ступенями вільності $\nu_1 = 2$ і $\nu_2 = M - 2$ і з рівнем значущості: $\alpha = 1 - P_\alpha$.

Цю величину визначають за статистичними таблицями або за функцією з бібліотеки Excel. В інженерній екології поширеним є прийняття рівня значущості $\alpha = 0,05$.

Розрахунок параметрів довірчої області починаємо з визначення її нижньої $\min b$ та верхньої $\max b$ меж уздовж осі абсцис b , а саме:

$$d = \frac{S_\varepsilon}{\sigma_y} \sqrt{\frac{2}{M} F_{2;M-2;\alpha}}; \quad (6.15)$$

$$\min b = \hat{b} - d; \quad (6.16)$$

$$\max b = \hat{b} + d. \quad (6.17)$$

Якщо обидві величини мають однаковий знак, тобто

$$\min b \cdot \max b > 0, \quad (6.18)$$

то довірча область не перетинає вісь Ob і гіпотеза щодо існування регресії у вигляді рівняння (6.2) приймається. У протилежному випадку гіпотеза про те, що $b = 0$ не може бути відкинута. Це означає, що ми не можемо виявити зв'язок (6.2) через брак даних вимірювань або тому, що його не існує.

Якщо умова (6.18) виконується, то регресійну модель записують у такому вигляді:

$$\bar{y} = \hat{a} + \hat{b}x, \quad (6.19)$$

де \bar{y} – середня величина кількості захворювань, що очікується з огляду на кількість x викидів забруднювальної речовини у атмосферне повітря.

Для того, щоб наочно побачити результати аналізу, доцільно також виконати візуалізацію лінії регресії та довірчих інтервалів.

➔ Етап 5. Візуалізація регресії та довірчих інтервалів

Графік лінії регресії являє собою пряму лінію, яка проходить з нахилом до осей координат Ox і Oy , її обчислюємо за формулою (6.19).

Графік нижньої $l(x)$ та верхньої $h(x)$ меж довірчого інтервалу для величини \bar{y} будують за такими рівняннями:

$$l(x) = \hat{a} + \hat{b}x - \frac{S_\varepsilon}{\sqrt{M}} t_{M-1; \alpha/2} \sqrt{1 + \frac{(x-\bar{x})^2}{\sigma_x^2}}; \quad (6.20)$$

$$h(x) = \hat{a} + \hat{b}x + \frac{S_\varepsilon}{\sqrt{M}} t_{M-1; \alpha/2} \sqrt{1 + \frac{(x-\bar{x})^2}{\sigma_x^2}}; \quad (6.21)$$

де $t_{M-1; \alpha/2}$ – це величина зворотного розподілу Стьюдента з $\nu = M - 1$ ступенями вільності і рівнем значущості $\alpha/2 = (1 - P_\alpha)/2$.

Графік нижньої $L(x)$ і верхньої $H(x)$ границь довірчого інтервалу, в якому можуть відбуватися майже усі коливання значень миттєвої величини y будують за такими рівняннями:

$$\lambda(x) = t_{M-1; \alpha/2} S_\varepsilon \sqrt{1 + \frac{1}{M} + \frac{(x-\bar{x})^2}{M\sigma_x^2}}; \quad (6.22)$$

$$L(x) = \hat{a} + \hat{b}x - \lambda(x); \quad (6.23)$$

$$H(x) = \hat{a} + \hat{b}x + \lambda(x). \quad (6.24)$$

Довірчі інтервали показують межі, в яких буде коливатися миттєве значення y , залежно від величини x .

6.3 Приклад. Розробка лінійної регресійної моделі залежності між забруднюванням атмосферного повітря і захворюваністю населення

Умови задачі. Припустимо, що є підстави вважати, що викиди діоксиду сірки (SO_2) впливають на кількість захворювань на новоутворення. Необхідно провести кореляційно-регресійний аналіз, щоб з'ясувати чи існує така залежність і, якщо існування залежності буде підтверджено, побудувати статистичну (регресійну) модель впливу викидів діоксиду сірки (SO_2) на кількість захворювань на новоутворення.

Скористаємось даними табл. 6.2 та 6.3. Враховуючи, що дані про захворюваність описують абсолютні величини, а чисельність населення не є величиною сталою, перетворимо їх у відносні дані – кількість виявлених захворювань на тисячу осіб, скориставшись даними про чисельність наявного населення (табл. 6.6).

Таблиця 6.6 – Кількість уперше зареєстрованих випадків захворювань на новоутворення

Рік	Чисельність наявного населення, тис. осіб	Кількість уперше виявлених захворювань на новоутворення	
		Загальна, тис. осіб	на одну тисячу осіб
2000	49 429,80	382	7,73
2001	48 923,20	394	8,05
2002	48 457,10	382	7,88
2003	48 003,50	395	8,23
2004	47 622,40	406	8,53
2005	47 280,80	408	8,63
2006	46 929,50	414	8,82
2007	46 646,00	407	8,73
2008	46 372,70	406	8,76
2009	46 143,70	407	8,82
2010	45 962,90	418	9,09
2011	45 778,50	423	9,24
2012	45 633,60	433	9,49
2013	45 553,00	440	9,66
2014	45 426,20	363	7,99
2015	42 929,30	366	8,53
2016	49 429,80	369	8,63

Занесемо вихідні дані для кореляційно-регресійного аналізу до табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – вихідні дані для кореляційно-регресійного аналізу

i	x_i кількість викидів діоксиду сірки (SO ₂), тис. т	y_i кількість випадків уперше виявлених захворювань на новоутворення	i	x_i кількість викидів діоксиду сірки (SO ₂), тис. т	y_i кількість випадків уперше виявлених захворювань на новоутворення на одну тисячу осіб
1	984,80	40,38	10	1262,70	40,96
2	992,10	41,04	11	1235,20	41,79
3	1032,60	40,24	12	1363,40	41,09
4	1046,30	39,89	13	1430,30	40,58
5	988,50	40,25	14	1413,30	40,74
6	1132,80	40,95	15	1160,60	34,56
7	1347,20	40,61	16	854,00	36,50
8	1342,60	41,85	17	1094,00	36,58
9	1320,60	41,21			

Виконаємо розрахунки відповідно до етапів, що були описані вище.

Етап 1. Ідентифікація

Виконаємо візуалізацію даних вимірювань. Для цього побудуємо точковий графік розподілу парних вимірів (x_i ; y_i) у декартовій системі координат (див. рис. 6.2.).

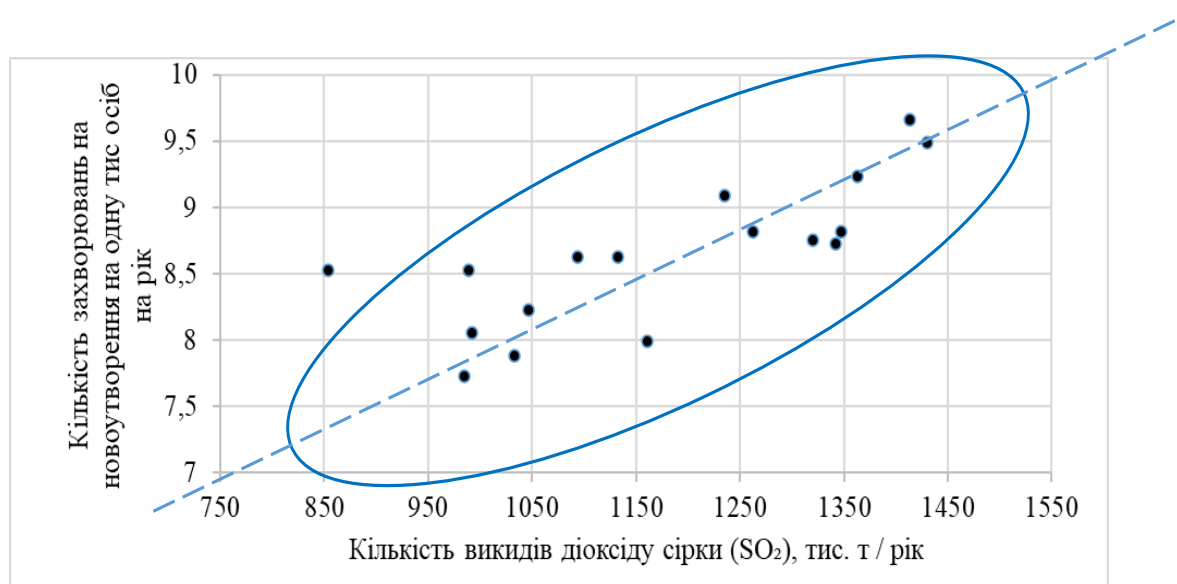


Рисунок 6.2 – Поле кореляції кількості викидів діоксиду сірки та випадків захворюваності на новоутворення

Як бачимо, точки створюють хмаринку, котра нагадує еліпс із віссю, що не паралельна осям координат. Отже, робимо висновок, що визначення впливу викидів діоксиду сірки на кількість захворювань на новоутворення можливе у вигляді лінійної регресії.

Тепер розрахуємо коефіцієнт парної лінійної кореляції. Для цього спочатку розрахуємо допоміжні статистики, використовуючи формули 6.3-6.7:

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i = 1176,529412, \text{ тис. т /рік};$$

$$\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i = 8,64, \text{ захворювань /тис. осіб};$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i^2 = 1413663,775, \text{ (тис. т /рік)}^2 ;$$

$$\sigma_x = \sqrt{\overline{x^2} - \bar{x}^2} = 171,588, \text{ тис. т /рік}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\overline{y^2} - \bar{y}^2} = 0,53, \text{ захворювань /тис. осіб}$$

$$\text{cov} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 69,885.$$

Коефіцієнт парної лінійної кореляції $r_{xy} = \frac{\text{cov}}{\sigma_x \sigma_y} = 0,77$. Оскільки отримане значення більше 0,7, робимо висновок, що між даними спостережень існує досить сильна лінійна залежність.

$$\text{Перевіримо умову (4.4): } |r_{xy}| \geq \frac{2}{\sqrt{M-3}}; 0,77 \geq 0,534.$$

Умова виконується, отже дані спостережень виявляють статистичну залежність і їх можна використовувати для побудови лінійного рівняння регресії у вигляді (6.2).

Переходимо до наступного етапу.

Етап 2. Специфікація

Рівняння регресії будемо шукати у такому вигляді:

$$y = a + bx$$

Обчислимо оцінки параметрів регресії:

$$\hat{b} = \frac{\text{cov}}{\sigma_x^2} = 0,0024;$$

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} = 5,84.$$

Отже, рівняння регресії має такий вигляд:

$$y = 5,84 + 0,0024x.$$

Етап 3. Верифікація

Для перевірки адекватності регресійної моделі спочатку дослідимо залишки регресії, а саме необхідно перевірити, що

- (1) математичне сподівання значень залишкового ряду близько або дорівнює нулю;
- (2) значення залишкового ряду випадкові;
- (3) значення залишкового ряду незалежні;
- (4) значення залишкового ряду підпорядковані нормальному закону розподілу.

Отже, обчислимо залишки регресії. Розрахуємо їх за такою формулою:

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i, i = 1, 2, \dots M.$$

Результат записуємо у табл. 6.8.

Таблиця 6.8 – Результати оцінки залишків регресії ε_i

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6
ε_i	-0,450	-0,147	-0,413	-0,096	0,341	0,097
<i>i</i>	7	8	9	10	11	12
ε_i	-0,220	-0,299	-0,217	-0,020	0,315	0,161
<i>i</i>	13	14	15	16	17	
ε_i	0,252	0,463	-0,607	0,661	0,191	

Математичне сподівання залишків регресії $\bar{\varepsilon} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \varepsilon_i = 0,00066$. Воно близьке до нуля, отже, можна припустити, що рівняння враховує всі суттєві фактори. Систематичної помилки немає.

Тепер розраховуємо середнє квадратичне відхилення залишків регресії:

$$S_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{M-1} \left[\sum_{i=1}^M \varepsilon_i^2 - \frac{1}{M} (\sum_{i=1}^M \varepsilon_i)^2 \right]} = 0,350.$$

За властивостями нормального розподілу, інтервал $(2S_\varepsilon; -2S_\varepsilon)$ має містити майже всі значення залишків регресії.

Для зручності проілюструємо це на графіку. У декартовій системі координат позначимо точки, де абсциса є порядковим номером вимірювання *i*, а ордината – величина відповідного залишку регресії ε_i (див. рис. 6.3.).

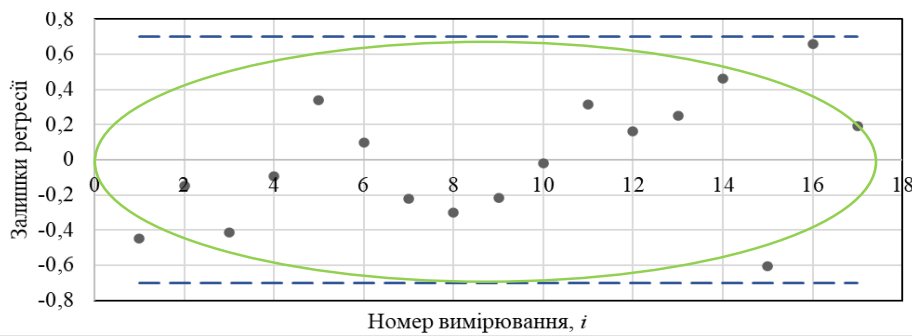


Рисунок 6.3 – Графік розподілу залишків регресії (пунктиром показано інтервал $(2S_\varepsilon; -2S_\varepsilon)$ нормального розподілу залишків регресії)

Як бачимо, точки розташовані і зверху і знизу осі OX , утворюючи еліпс, вісь якого близька до цієї осі. Отже, робимо висновок, що вплив інших факторів на результати вимірювань схожий на випадковий.

Перевіримо випадковість залишків регресії, використовуючи критерій піків. Для цього обчислимо кількість поворотних точок (точка вважається поворотною, якщо вона або більше і попереднього і наступного значення, або менше їх обох). За нашими даними поворотними будуть точки 2,3,5,8,11,12,15, отже $p = 7$. Тепер обчислимо величину

$\left[\frac{2(n-2)}{3} - 2 \sqrt{\frac{(16n-29)}{90}} \right]$, враховуючи, що $n = 17$, а саме:

$$\left[\frac{2(n-2)}{3} - 2 \sqrt{\frac{(16n-29)}{90}} \right] = [6,713664655] = 6.$$

Умову $p > \left[\frac{2(n-2)}{3} - 2 \sqrt{\frac{(16n-29)}{90}} \right]$ виконано. Отже залишки регресії є випадковими.

Перевіримо відсутність автокореляції. Для цього скористаємось d -критерієм Дарбіна – Уотсона. Обчислимо значення критерію за формулою (4.17), а саме:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} = 1,952.$$

Тепер порівняємо це значення із табличними значеннями⁶: d_1 і d_2 . Для рівня значущості 0,05, кількості змінних 1 і обсягу вибірки 17, вони будуть такими: $d_1 = 1,13$, $d_2 = 1,38$. Отримане значення критерію перебуває в інтервалі від d_2 до 2, отже можна зробити висновок, що автокореляція відсутня.

⁶Критичні значення знаходимо, використовуючи статистичні таблиці, наприклад, <https://buklib.net/books/33667/>

Оскільки досліджувані дані мають невеликий обсяг, для перевірки підпорядкованості значень залишкового ряду нормальному закону розподілу використаємо RS-критерій. Обчислимо його значення за формулою (4.19), а саме:

$$RS = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{s} = 3,621583376.$$

Порівняємо його із табличними значеннями для даного обсягу вибірки і рівня значущості 0,05. За статистичними таблицями нижня та верхня межа значень критерію дорівнює 3,18 та 4,49 відповідно. Отже, обчислене значення перебуває всередині інтервалу, і розподіл залишків регресії можна вважати нормальним.

Таким чином, можна стверджувати, що отримане рівняння регресії враховує всі суттєві фактори. Тепер оцінимо точність отриманого рівняння регресії.

Для цього обчислимо середню відносну помилку за формулою (4.20), а саме:

$$\bar{E}_{\text{відн}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|e_i|}{y_i} \cdot 100\% = 3,42\%.$$

Отже, модель є достатньо точною.

Значущість рівняння регресії можна перевірити використовуючи F-критерій Фішера. Для його обчислення в цій задачі можна використовувати формулу (4.31).

$$F = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-2)} = 21,65.$$

Отже, спостережуване значення критерію дорівнює 21,65. Воно перевищує табличне значення для рівня значущості $\alpha = 0,05$ і визначених ступенів вільності, а саме: $F_{2;15;0,05} = 4,54$. Отже, рівняння є адекватним і його можна використовувати при моделюванні.

Етап 4. Розрахунок параметрів довірчої області

Розрахунок параметрів довірчої області регресії виконуємо за формулами (6.15 – 6.17). Спочатку виберемо рівень значущості $\alpha = 0,05$ і визначимо табличне значення F-критерія, а саме: $F_{2;M-2;\alpha} = F_{2;15;0,05} = 4,54$. Тоді

$$d = \frac{s_{\varepsilon}}{\sigma_x} \sqrt{\frac{2}{M} F_{2;M-2;\alpha}} = \frac{0,35}{1176,53} \sqrt{\frac{2 \cdot 4,54}{17}} = 0,00149;$$

$$\min b = \hat{b} - d = 0,0024 - 0,00149 = 0,000883;$$

$$\max b = \hat{b} + d = 0,0024 + 0,00149 = 0,003866.$$

Нижня і верхня границі довірчої області мають однаковий знак, тобто

$$\min \theta_1 \cdot \max \theta_1 = 0,000003412 > 0.$$

Отже, довірна область не перетинає вісь Ob , і тому гіпотеза щодо існування лінійної регресії у вигляді: $\hat{y} = 5,84 + 0,0024 x$, має бути прийнятою.

Для миттєвих величин у кількості захворювань, які можуть спостерігатися за величиною x викидів забруднювальної речовини, маємо таку модель:

$$y = 5,84 + 0,0024 x + \varepsilon.$$

Етап 5. Візуалізація регресії та довірчих інтервалів

Розрахунок координат точок на графіку виконуємо за формулами (6.20) – (6.24). Виберемо рівень значущості $\alpha = 0,05$, тоді $t_{M-1;\alpha/2} = t_{16;0,025} = 2,12$. І формули набувають такого вигляду:

$$\hat{y} = 5,84 + 0,0024 x;$$

$$\beta(x) = \frac{S_\varepsilon}{\sqrt{M}} t_{M-1;\alpha/2} \sqrt{1 + \frac{(x-\bar{x})^2}{\sigma_x^2} = \frac{0,35}{\sqrt{17}}} \sqrt{1 + \frac{(x-1176,53)^2}{29442,32}}, \text{ мг/дм}^3;$$

$$l(x) = 5,84 + 0,0024 x - \beta(x), \text{ мг/дм}^3;$$

$$h(x) = 29,95,84 + 0,0024 x + \beta(x), \text{ мг/дм}^3;$$

$$\lambda(x) = t_{M-1;\alpha/2} S_\varepsilon \sqrt{1 + \frac{1}{M} + \frac{(x-\bar{x})^2}{M\sigma_x^2}} = 0,742 \sqrt{1,059 + \frac{(x-1176,53)^2}{500\,485,44}};$$

$$L(x) = 5,84 + 0,0024 x - \lambda(x), \text{ мг/дм}^3;$$

$$H(x) = 5,84 + 0,0024 x + \lambda(x), \text{ мг/дм}^3.$$

Для графічної візуалізації регресії і довірчих інтервалів разом з даними спостережень визначаємо інтервал зміни величини x таким чином, аби він охоплював усі дані вимірювань і був зручним для обрання кроку Δx її зміни.

Згідно з табл. 6.5 вихідних даних, $\min x_i = 854$, тис. т /рік; $\max x_i = 1430$, тис. т /рік. Тому обираємо інтервал зміни величини x вздовж осі абсцис в межах від 800 до 1500 тис. т /рік і $\Delta x = 50$ тис. т /рік. Таким чином, отримуємо 14 точок для проведення кожної лінії. Результати розрахунків координат точок ліній регресії та меж обох довірчих інтервалів записуємо у табл. 6.9.

Таблиця 6.9 – Розрахунок координат точок лінії регресії та границь довірчих інтервалів

x	\hat{y}	$\beta(x)$	$l(x)$	$h(x)$	$\lambda(x)$	$L(x)$	$H(x)$
800	7,741	0,436	7,305	8,178	0,865	6,877	8,606
850	7,860	0,389	7,471	8,249	0,842	7,018	8,702
900	7,979	0,343	7,635	8,322	0,821	7,157	8,800
950	8,097	0,300	7,798	8,397	0,804	7,293	8,902
1000	8,216	0,260	7,956	8,476	0,790	7,426	9,006
1050	8,335	0,225	8,110	8,560	0,779	7,555	9,114
1100	8,454	0,198	8,255	8,652	0,772	7,681	9,226
1150	8,572	0,183	8,389	8,755	0,768	7,804	9,341
1200	8,691	0,183	8,508	8,874	0,768	7,923	9,459
1250	8,810	0,197	8,613	9,007	0,772	8,038	9,581
1300	8,928	0,223	8,705	9,151	0,779	8,150	9,707
1350	9,047	0,257	8,790	9,304	0,789	8,258	9,836
1400	9,166	0,297	8,869	9,463	0,803	8,363	9,969
1450	9,285	0,341	8,944	9,625	0,820	8,464	10,105

Графіки лінії регресії та границь обох довірчих інтервалів розмістимо на одному рисунку (див. рис. 6.4.) разом із точками, що відображають розподіл даних вимірювань, за якими будували лінійну регресійну модель.

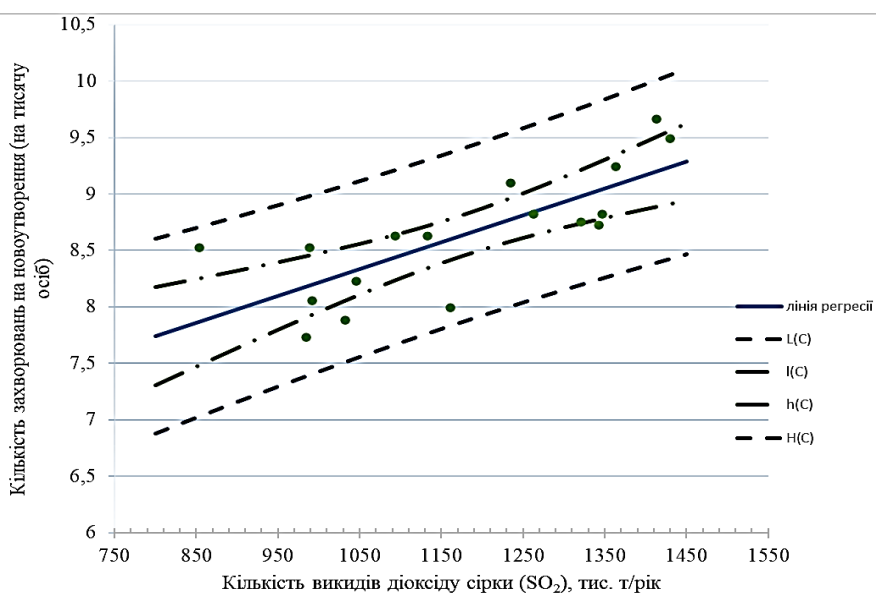


Рисунок 6.4 – Лінії (суцільна) регресії, границь її довірчого інтервалу (штриховані) та довірчого інтервалу (пунктирні) вимірюваних величин вмісту (точки)

6.3 Індивідуальні завдання

Метою індивідуального завдання є поглиблення, систематизація, та закріплення теоретичних знань, що передбачені матеріалами цього навчального посібника, і набуття практичних навичок на прикладах задач із розрахунку параметрів регресійних моделей, які будуються для цілей моніторингу та розробки заходів зі зменшення забруднення об'єктів навколишнього середовища і вивчення впливу забруднення на здоров'я людини.

Порядок виконання завдання передбачає здійснення таких етапів.

- Опрацювати навчальний матеріал посібника.
- Побудувати лінійну регресійну модель згідно з варіантом індивідуального завдання. За результатом роботи розрахувати:
 - оцінки параметрів парної лінійної регресійної моделі відповідно до варіанту завдання;
 - залишки регресії;
 - параметри довірчої області;
 - параметри довірчого інтервалу регресії;
 - параметри довірчого інтервалу прогнозів.
- На підставі розрахунків визначити умови існування регресії даних вимірювань.
- Оцінити точність і адекватність побудованої моделі;
- Візуалізувати дані спостережень та розрахунків, побудувати:
 - графік (точковий) розподілу даних спостережень;
 - графік (точковий) розподілу залишків регресії;
 - графік регресійної залежності;
 - графік довірчих інтервалів регресійної залежності;
 - графік довірчих інтервалів.
- Скласти звіт про виконання роботи, який повинен містити:
 - постановку індивідуального завдання;
 - регресійну модель із поясненнями щодо її побудови;
 - результати розрахунків та їх візуалізацію;
 - аналіз отриманих результатів.

➔ **Варіанти для виконання індивідуальних завдань**

Варіант 1

Використовуючи дані про викиди забруднювальних речовин у атмосферне повітря України (табл. 6.2) та про кількість уперше зареєстрованих випадків захворювань (табл. 6.3), дослідити, чи існує залежність між викидами оксиду вуглецю та кількістю захворювань системи кровообігу.

Варіант 2

На підставі даних, наведених у табл. 6.2-6.3 дослідити, чи існує залежність між викидами оксиду азоту та кількістю захворювань шкіри та підшкірної клітковини.

Варіант 3

На підставі даних, наведених у табл. 6.2-6.3 дослідити, чи існує залежність між викидами оксиду азоту та кількістю захворювань на новоутворення.

Варіант 4

На підставі даних, наведених у табл. 6.2-6.3 дослідити, чи існує залежність між викидами діоксиду сірки та кількістю захворювань на хвороби кістково-м'язової системи і сполучної тканини.

Варіант 5

Використовуючи дані про викиди забруднювальних речовин у атмосферне повітря України (табл. 6.2) та про витрати на охорону навколишнього природного середовища (табл. 6.13), дослідити, чи існує залежність між витратами на охорону атмосферного повітря та загальними викидами шкідливих речовин у атмосферне повітря.

Варіант 6

Використовуючи дані про викиди забруднювальних речовин у атмосферне повітря України (табл. 6.2) та про загальне постачання первинної енергії (табл. 6.11), дослідити, чи існує залежність між рівнем виробництва електроенергії та загальними викидами шкідливих речовин у атмосферне повітря.

Варіант 7

Використовуючи дані про викиди забруднювальних речовин у атмосферне повітря України (табл. 6.2) та про витрати на охорону навколишнього природного середовища (табл. 6.13), дослідити, чи існує залежність між витратами на науково-дослідні роботи та загальними викидами шкідливих речовин у атмосферне повітря

Варіант 8

На підставі даних про загальне постачання первинної енергії (табл. 6.11) та про , викиди забруднювальних речовин у атмосферне повітря України (табл. 6.2) дослідити, чи існує залежність між виробленням енергії за рахунок вугілля та торфу і викидами оксиду вуглецю в атмосферне повітря.

Варіант 9

На підставі даних про загальне постачання первинної енергії (табл. 6.11) та про , викиди забруднювальних речовин у атмосферне повітря України (табл. 6.2) дослідити, чи існує залежність між виробленням вітрової та сонячної енергії і викидами оксиду вуглецю в атмосферне повітря.

Варіант 10

Використовуючи дані про викиди забруднювальних речовин у атмосферне повітря України (табл. 6.2) та про вироблення первинної енергії (табл. 6.11), дослідити, чи існує залежність між вироблення первинної енергії та викидами оксиду вуглецю у атмосферне повітря.

➔ Вихідні дані для виконання індивідуальних завдань

Таблиця 6.11 – Загальне постачання первинної енергії за 2007 - 20211 роки, тис. т н.е.⁷

Роки	Виробництво енергії	Загальне постачання первинної енергії	Вугілля й торф	Атомна енергія	Гідро-енергія	Вітрова та сонячна енергія та інш.	Біопаливо та відходи
2007	84998	139330	42657	24273	872	4	1508
2008	84260	134562	41798	23566	990	4	1610
2009	79339	114420	35870	21764	1026	4	1433
2010	78712	132308	38251	23387	1131	4	1476
2011	85485	126438	41490	23672	941	10	1563
2012	85247	122488	42718	23653	901	53	1522
2013	85914	115940	41427	21848	1187	104	1875
2014	76928	105683	35576	23191	729	134	1934
2015	61614	90090	27344	22985	464	134	2102
2016	66323	94383	32450	21244	660	124	2832
2017	58863	89462	25757	22449	769	149	2989
2018	60883	93526	28055	22145	897	197	3209
2019	60452	89359	26076	21771	560	426	3349
2020	57017	86363	22847	19994	650	794	4243

⁷Побудовано з використанням даних Державної служби статистики України – <https://www.ukrstat.gov.ua/>.

Таблиця 6.12 – Витрати на охорону навколишнього природного середовища за видами природоохоронних заходів, у фактичних цінах, тис. грн⁸

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Усього	21925579,9	32488702,1	31491958,5	34392270,3	43735862,1	41332201,7
у тому числі на						
охорону атмосферного повітря і проблеми зміни клімату	3153766,4	4263419,2	4712301,7	6403592,6	7240656,7	7971112,2
очищення зворотних вод	6733710,7	8960117,4	9341782,6	11316115,1	12626613,3	12325011,2
поводження з відходами	6200941	8928254,3	9979183,2	10012249,3	15981405,2	14096941,5
захист і реабілітацію ґрунту, підземних і поверхневих вод	1324662,6	1617183,2	2268283,8	2732666,6	3305851,4	4131255,3
зниження шумового і вібраційного впливу	13159,1	361994,2	696443,7	278081,9	36057,2	478199,9
збереження біорізноманіття і середовища існування	369934,6	594125,8	944563,7	871182,7	1171144,4	1339109,7
радіаційну безпеку	3866567,9	7053479,2	3114089,4	2166508,2	2709785,3	514031,8
науково-дослідні роботи природоохоронного спрямування	59108,7	58649,5	89267,0	124199,0	126955,8	127887,1
інші напрями природоохоронної діяльності	203728,9	651479,3	346043,4	487674,9	537392,8	348653,0

⁸ Побудовано з використанням даних Державної служби статистики України – <https://www.ukrstat.gov.ua/>.

Питання для самоконтролю і завдання

Дайте відповіді на такі питання:

- У чому полягає завдання регресійних статистичних моделей при дослідженні екологічних питань сталого розвитку? Наведіть приклади екологічних проблем, дослідження яких вимагає застосування регресійних статистичних моделей.
- Яким чином здійснюється розрахунок допоміжних статистик? Наведіть приклади з виконаних завдань.
- Які є способи здійснення ідентифікації регресійної моделі? Поясніть їх на прикладах задач, які ви виконували за цим розділом.
- Яким чином здійснюється оцінка параметрів регресії? Поясніть це на прикладах задач, які ви виконували за цим розділом.
- Для чого потрібно розраховувати залишки регресії? Поясніть результати розрахунків на прикладах задач, які ви виконували за цим розділом.
- Яким чином оцінюється точність і адекватність регресійної моделі? Поясніть на прикладах задач, які ви виконували за цим розділом.
- Як здійснюється визначення довірчої області параметрів регресії? Що означає границя довірчої області параметрів моделі? Поясніть розрахунки на прикладах задач, які ви виконували за цим розділом.
- Які є типи візуалізації розподілу даних вимірювань? За якими критеріями обираються способи візуалізації? Поясніть це на прикладі рис. 6.2 – Поле кореляції кількості викидів діоксиду сірки та випадків захворюваності на новоутворення.
- Які способи візуалізації екологічних проблем та результатів їх дослідження застосовуються найчастіше у глобальних звітах зі сталого розвитку?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Бараннік В. О. Моделювання і прогнозування стану довкілля: навч. посібник. Харків: ХНАМГ, 2017. 85 с.
- 2 Бідюк П. І. Аналіз часових рядів: навч. посібник // П. І. Бідюк, В. Д. Романенко, О. Л. Тимошук. Київ: Політехніка. 2010. 317 с.
- 3 Всеєвропейська стратегія збереження біологічного та ландшафтного різноманіття (1995). Прийнята на Пан-Європейській конференції «Довкілля для Європи» 25.10.1995 в Софії. *Офіційний сайт Верховної Ради України: Законодавство України*. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/994_711.
- 4 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.
- 5 Доповідь Всесвітньої комісії з питань навколишнього середовища та розвитку: Наше спільне майбутнє. *Офіційні звіти Генеральної Асамблеї ООН*. Сорок друга сесія (A/42/427), 4 серпня 1987. URL: <http://www.un.org/ua/ga/pdf/brundtland.pdf>.
- 6 Декларація Конференції ООН з проблем навколишнього середовища людини [Стокгольмська декларація] (1972). *Документи ООН. Декларації. Конференція ООН з проблем навколишнього середовища людини, Стокгольм, 1972*. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/declarathenv.shtml.
- 7 Декларація Ріо-де-Жанейро з навколишнього середовища та розвитку. *Документи ООН. Декларації. Конференція ООН з навколишнього середовища та розвитку, Ріо-де-Жанейро, 3–14 червня 1992 року*. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/pdf/riodecl.pdf.
- 8 Декларація тисячоліття ООН. *Документи ООН. Декларації. Резолюція 55/2 Генеральної Асамблеї від 8 вересня 2000 року*. URL: http://www.un.org/ua/documents/decl_conv/declarations/summitdecl.shtml.
- 9 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.

- 10 Зайченко Ю. П. Дослідження операцій: підручник. 7-е вид., перероб. і доп. К., 2006. 816 с.
- 11 Йоганнесбурзька декларація зі сталого розвитку. *Документи ООН. Декларації. Всесвітня зустріч на найвищому рівні зі сталого розвитку, 26 серпня-4 вересня 2002 року.* URL: http://www.un.org/ua/documents/decl_conv/declarations/decl_wssd.shtml.
- 12 [Йоганнесбурзький] план виконання рішень Всесвітньої зустрічі на найвищому рівні зі сталого розвитку (2002). Прийнятий на 17-му пленарному засіданні 4 вересня 2002 року. A/CONF.199/20, Резолюція 2. *Документи ООН.* URL: http://www.un.org/ru/events/pastevents/pdf/plan_wssd.pdf.
- 13 Кендалл М. Дж. Багатовимірний статистичний аналіз і тимчасові дані / М. Дж. Кендалл, А. М. Стюарт. 1976. 736 с.
- 14 Конвенція ООН про біологічну різноманітність. Прийнята 3-14 липня 1992. Конвенцію ратифіковано Законом України № 257/94-ВР від 29 листопада 1994. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_030#Text.
- 15 Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються навколишнього середовища [Орхуська конвенція]. Підписана 25 червня 1998. Ратифіковано Законом України № 832-XIV (832-14) від 06 липня 1999. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_015#Text.
- 16 Кіотський протокол до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату. Підписано 11 грудня 1997. Ратифіковано Законом України N 1430-IV (1430-15) від 04 лютого 2004. URL: tps://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801#Text.
- 17 Коряшкіна Л. С. Методи оптимізації та дослідження операцій : практикум. У 2-х ч. Ч. 1. Дослідження операцій / Л. С. Коряшкіна, С. А. Ус. Дніпро, 2020. 182 с.
- 18 КСР: Доповідь Цільової групи з оцінки прогресу у досягненні ЦРТ за 2015 рік. Ціль розвитку тисячоліття 8. Підсумки у галузі глобального партнерства з метою розвитку. *Документи ООН.* URL: <http://www.un.org/ua/millenniumgoals/summary2015.pdf>.
- 19 Лаврик В. І. Методи математичного моделювання в екології. Київ, 1998. 132 с.
- 20 Майбутнє, якого ми прагнемо. *Документи ООН. Резолюція 66/288 Генеральної Асамблеї ООН від 27 липня 2012 року.* URL: <http://www.un.org/ua/documents/ods.asp?m=A/RES/66/288>.
- 21 Малієнко А.В. Нелінійна модель задачі оптимізації видобутку вугілля з урахуванням технологічних, енергетичних і виробничих потужностей шахти /

- А. В. Малієнко, Л. С. Коряшкіна, С. В. Козир. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2019. № 101. С. 50-56.
- 22 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.
- 23 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.
- 24 Нейман Дж. Теорія ігор та економічна поведінка / Дж. Нейман, О. Моргенштейн. 1970. 707 с.
- 25 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.
- 26 Палехова Л. Л. Управління сталим розвитком: довідник базових понять: навч. посіб. Дніпро: НТУ «ДП», 2020. 330 с.
- 27 Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку на період до 2030 року. *Документи ООН. Резолюція A/70/L.1 Генеральної Асамблеї ООН від 25 вересня 2015 року*. URL: <http://www.un.org/ua/documents/ods.asp?m=A/70/L.1>.
- 28 Порядок денний на 21 століття. Прийнята Конференцією ООН з навколишнього середовища та розвитку, Ріо-де-Жанейро, 3-14 червня 1992 року. *Документи ООН. A/CONF.151/26/REV.1(VOL.I)*. URL: http://www.un.org/ua/documents/decl_conv/conventions/agenda21.shtml.
- 29 Протокол про стратегічну екологічну оцінку до Конвенції про оцінку впливу на довкілля у транскордонному контексті, Київ, 2003. *Документи ООН. Конвенції та угоди*. URL: http://www.unep.org/env/eia/about/sea_text.html.
- 30 Рамкова конвенція ООН про зміну клімату. Прийнята 9 травня 1992 року. ратифіковано Законом N 435/96-ВР від 29 жовтня 1996. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text.
- 31 Робертс Ф. С. Дискретні математичні моделі з додатками до соціальних, біологічних та екологічних завдань. 1986. 496 с.
- 32 Система екологічного управління: сучасні тенденції та міжнародні стандарти : посібн. Міністерство екології та природних ресурсів України. Київ, 2017. 68 с.
- 33 Таха Х. Введення у дослідження операцій. 7-е издание. 2005. 912 с.
- 34 Тимошенко Л. В. Визначення пріоритетності фінансування природоохоронних проектів / Л. В. Тимошенко, С. А. Ус, Д. В. Куліченко. *Економічний вісник НГУ*. 2017. № 1. С. 168-175.

- 35 Тимошенко Л. В., Ус С. А. Когнітивне моделювання в управлінні підприємницькою структурою як еколого-економічною системою. *Економічний вісник НГУ*. 2020. № 4 (72). С. 89-100.
- 36 Тимошенко Л. В., Ус С. А., Бальнов М. О. Обґрунтування методичних підходів до прогнозування обсягів продажу продукції з сезонними коливаннями її реалізації. *Ефективна економіка*. № 3. 2015. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3886>.
- 37 Ус С. А. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. / С. А. Ус, Л. С. Коряшкіна. 2-ге вид., випр. Дніпро : НТУ «ДП», 2018. 302 с.
- 38 Хом'як Т. В. Застосування методів згладжування для прогнозування обсягу виробництва / Т. В. Хом'як, А. В. Малієнко, Г. В. Симонець. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Збірник наукових праць, Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 1. С. 8-12.
- 39 Цілі розвитку тисячоліття: доповідь за 2015 рік. *Документи ООН*. Нью-Йорк, 2016. 75 с. URL: <http://www.un.org/ua/millenniumgoals/mdgreport2015.pdf>.
- 40 Чайка В. Н. Сертифікація агропромислових підприємств на відповідність стандартам ІФОАМ. *Управління сталим розвитком в умовах перехідної економіки: монографія*. Дніпропетровськ-Коттбус, 2015. С. 53-66.
- 41 Швець В. Я., Палехова Л. Л., Палехов Д. Адаптивний менеджмент для цілей циркулярної економіки. Створення високотехнологічних екокомплексів в Україні на основі концепції збалансованого (сталого) розвитку України: монографія. Відп. ред. В. І. Большаков. Дніпро, 2017. С. 208-212.
- 42 Шеннон Р. Імітаційне моделювання – мистецтво та наука. 1978. 418 с.
- 43 Шиян А. А. Теорія ігор: основи та застосування в економіці та менеджменті. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 164 с.
- 44 Carson R. *Silent Spring*. Mariner Book, Houghton Mifflin Company, Boston, 2002. URL: https://openlibrary.org/works/OL1884862W/Silent_spring.
- 45 Circular Economy System. Ellen MacArthur Foundation. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/interactivediagram>.
- 46 CSD Indicators of Sustainable Development. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. 3rd Edition, 2007. URL: <https://sustainable-development.un.org/content/documents/guidelines.pdf>.
- 47 EU: Towards the Circular Economy: A Zero Waste Programme for Europe (2014). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 2.7.2014. URI: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0001.01/DOC_1&format=PDF.

- 48 EU: Manifesto for Resource-Efficient Europe (2012). Adopted in Brussels, 17 December 2012 by European Commission. European resource efficiency platform (EREP). URL: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-12-989_en.htm.
- 49 EU: Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (COM/2015/0614 final). Brussels, 02.12.2015. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614>.
- 50 Europe 2020: A Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A52010DC2020>.
- 51 Hardin G. The Tragedy of the Commons. In: *Science*, Vol. 162, No. 3859, 1968. PP. 1243-1248.
- 52 ILO: Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all. International Labour Organization, 2015. URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---emp_ent/documents/publication/wcms_432859.pdf.
- 53 ISO 14031:2013, IDT. Environmental management – Environmental performance evaluation – Guidelines. URL: <https://www.iso.org/standard/52297.html>.
- 54 Environmental Indicator Report (2018). In support to the monitoring of the Seventh *Environment Action Programme*. European Environment Agency. Publications Office of the European Union, 2019. 34 p.
- 55 Kozyr S.V. Simulation modeling for forecasting daily load of the coal face / S.V. Kozyr, O.P. Kupenko. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*. 2018. Vol. 16. ISSN 2412-5954 / DOI 10.2412/mmse.51.62.826
- 56 Meadows D. H. The Limits to Growth: A report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind / Donella H. Meadows, Jørgen Randers, Dennis L. Meadows, William W. Behrens. Published by Universe Books, 1972. 205 p.
- 57 Mesarovic M. D. Mankind at the Turning Point: The Second Report to the Club of Rome / Mihajlo Mesarovic and Eduard Pestel. Published by E.P. Dutton, 1974.
- 58 IUCN: World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development (1980) / Prepared by the International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). URL: <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/WCs-004.pdf>.
- 59 Palekhov D. Potential for Strategic Environmental Assessment (SEA) as a Regional Planning Instrument in Ukraine. *Umweltrecht in Forschung und Praxis*, Band 66. Hamburg : Dr. Kovač, 2014. 374 p.

- 60 Palekhov D., Palekhova L. Environmental sustainability in achieving the sustainable production and consumption: challenges of a Post-Soviet transition economy. In: *Transposition of the Acquis Communautaire – Migration and Environment. Umweltrecht in Forschung und Praxis* 66. Verlag Dr. Kovač, Hamburg. 2021. PP. 60-87.
- 61 OECD Measuring Sustainable Development (2004). *Integrated Economic, Environmental and Social Frameworks*. The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 429 p. URL: <http://www.oecd.org/site/worldforum/33703829.pdf>.
- 62 OECD Sustainable Manufacturing Indicators (2020). *Better Policies for better lives. Overview of the OECD Sustainable Manufacturing Indicators*. URL: <https://www.oecd.org/innovation/green/toolkit/oecd sustainable manufacturing indicators.htm>.
- 63 Palekhova L., Palekhov D. Anwendung von Energieeffizienzkriterien für Marktstrategien von Großunternehmen in den Transformationsländern. In: *Energieeffizienz im Bau und Maschinenwesen* [Herausgeber: K. Fraňa, S. Simon, J. Grunewald]. Technische Universität in Liberec, 2017. P. 44-53. ISBN: 978-80-7494-362-1.
- 64 Palekhova L., Trehub M. The problems of the sustainable industrial use of lands under changing climate. In: *NESEFF-NETZWERKTREFFEN Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg*. 2018. ISBN 978-3-940471-25-3.
- 65 Rosemarin A. *Baltic 21. Creating an Agenda 21 for the Baltic Sea Region. Main Report*, 1996 ISBN: 91 88714 28 4. 60p.
- 66 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.
- 67 Social Indicators UN (2019). *Demographic and Social Statistics*. Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. URL: <https://unstats.un.org/unsd/demographic/products/socind/>.
- 68 Strong Maurice. *Opening Statement by Secretary-General of the United Nations Conference on the Human Environment Conference [Stockholm Conference]*, 1972. URL: <http://www.mauricestrong.net/index.ph/speeches-remarks3/103-stockholm>.
- 69 UNCTAD: *Trading into Sustainable Development: trade, market access, and the Sustainable Development Goals. Developing countries in international trade studies. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD/DITC/TAB/2015/3)*. New York-Geneva, 2016. 86 p. URL: https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/ditctab2015d3_en.pdf.
- 70 UNEP: *Towards a Green Economy. Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. UNEP: 2011, 52 p.
- 71 UNEP: *10 sectors for a greener planet*. UNEP: 2017. URL: <http://www.greenup-unesp.org/green-economy/ten-sectors.htm?lng=en#.WQpEytz-vJ>.

- 72 UNEP: Global Environment Outlook 5 / Environment for the future we want, UNEP: 2012. 22 p. URL: http://web.unep.org/geo/sites/unep.org/geo/files/documents/geo5_report_full_en_0.pdf.
- 73 Us S. A. Koriashkina L.S. Stanina O. D. An optimal two-stage allocation of material flows in a transport-logistic system with continuously distributed resource. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2019. № 1. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-1-24>.
- 74 Us S.A., Stanina O.D On some mathematical models of facility location problems of mining and concentration industry // *New Developments in Mining Engineering 2015. Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining* // Edited by Volodymyr Bondarenko, Iryna Kovalevska, Genadiy Pivnyak/ CRC Press / Balkema - Taylor & Francis Group, London, 2015. P. 419-424
- 75 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.
- 76 Walter R Stahel. *The Circular Economy: A User's Guide*. Published by Routledge, 2019. 118 p.
- 77 World Bank Group – Indicators. Social Indicators WB (2020). Social Development. *World Bank – Databank*. URL: <https://data.worldbank.org/indicator> view=chart.
- 78 Wolf A., Karlsson M. Evaluating the environmental benefits of industrial symbiosis: discussion and demonstration of a new approach. *Journal of Cleaner Production*, 2008. Vol. 16 (14), 2021. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/194764425.pdf>.
- 79 Woolven J. A new measure of business success. Medium, 2021. <https://medium.com/circulatenews/a-new-measure-of-business-success-9e53b7aafafa>.
- 80 World Bank Group (2020). *Trading for development in the Global Value Chains*. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. DC 20433. Washington, USA. 293 p. URL: <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2020>.
- 81 World Energy Council (2020): *World Energy Trilemma Index*. Cornhill London EC3V 3NH. World Energy Council, 2019. 211 p.
- 82 World Happiness Report (2020). Publication of the Sustainable Development Solutions Network. New York, 202 p. URL: <https://happiness-report.s3.amazonaws.com/2020/WHR20.pdf>.

ДОДАТКИ

КЛЮЧОВІ МІЖНАРОДНІ ДОКУМЕНТИ ЗІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

У розділі надається стисла історична довідка та найважливіші положення міжнародних документів, які в цілому вплинули на формування сучасної процедури планування сталого розвитку і започаткували новий підхід до прийняття управлінських рішень. Деякі документи стосуються домовленостей, до яких держави взяли на себе зобов'язання виконувати конкретні норми та вимоги у своєму внутрішньому законодавстві і практиці планування розвитку.

1992 Декларація принципів, що прийнята на Конференції ООН в Ріо-де-Жанейро

1992 Порядок денний на XXI століття, що прийнятий на Конференції ООН в Ріо-де-Жанейро

1998 [Орхуська] Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються навколишнього середовища

2001 Директива 2001/42/ЄС Європейського Парламенту і Ради щодо оцінки впливу певних планів і

2015 Перетворення нашого світу: Порядок денний в області сталого розвитку на період до 2030 року

1992



Декларація Ріо-де-Жанейро щодо навколишнього середовища і розвитку (англ. *Rio Declaration on Environment and Development*) – прийнята 14 червня 1992 року на 19-му пленарному засіданні Конференції Організації Об'єднаних Націй з питань природного навколишнього середовища і розвитку – «Саміті Землі», що відбувся у Ріо-де-Жанейро 3-14 червня 1992 року. Декларація затверджена Резолюцією I як один з трьох підсумкових документів Конференції (A/CONF.151/26, Vol. I) [2].

Метою Декларації є прагнення до встановлення нового і справедливого глобального партнерства через створення нових рівнів співпраці між державами, ключовими суспільствами та людьми у глобальному середовищі. Декларація розвиває положення, що містяться в Декларації конференції ООН з проблем навколишнього середовища, прийнятої в Стокгольмі 16 червня 1972 року (Стокгольмська декларація), і містить в собі 27 принципів екологічно коректної поведінки світової спільноти.

Декларація проголошує право людини на здорове і плідне життя у гармонії з природою; (принцип 1), що поширюється й на майбутні покоління (принцип 3). Держави не тільки мають суверенне право розробляти власні ресурси згідно зі своєю політикою в сфері довкілля і розвитку, але, й несуть відповідальність за те, щоб діяльність в рамках їхньої юрисдикції чи контролю не завдавала шкоди навколишньому середовищу інших держав (принцип 2).

Держави приймають ефективні законодавчі акти в галузі навколишнього середовища (принцип 11), захист навколишнього середовища декларується невід'ємною складовою процесу розвитку і не може розглядатися у відриві від нього (принцип 4). Вказуючи на нерозривний зв'язок між економічними і екологічними проблемами, вимагається ліквідація нежиттєздатних моделей виробництва та споживання (принцип 8), та що забруднювач має в принципі покривати витрати, пов'язані з забрудненням (принцип 16).

Усі зацікавлені сторони мають право брати участь у вирішенні екологічних питань; кожна людина має право на доступ до інформації та судовий захист з питань навколишнього середовища (принцип 10). Запобіжні заходи повинні вживатися навіть тоді, коли відсутня повна наукова впевненість у загрозі серйозної або незворотної шкоди (принцип 15).

Декларація підкреслює роль оцінки екологічних наслідків в якості національного інструменту, що використовується у відношенні планованих видів діяльності, які можуть чинити значний негативний вплив на навколишнє середовища і які підлягають ствердженню рішенням компетентного національного органу (принцип 17).

Проблеми миру, розвитку та довкілля взаємозалежні та нероздільні (принцип 25). Усі держави співпрацюють у вирішенні завдань сталого розвитку, включаючи викорінення бідності (принцип 5), нарощування наукового потенціалу (принцип 9), створення сталої глобальної економіки (принцип 12) в дусі доброї волі і партнерства (принципи 26, 27).

1992



Порядок денний на XXI століття (англ. *Agenda 21*) – прийнятий 14 червня 1992 року на 19-му пленарному засіданні Конференції Організації Об'єднаних Націй з питань природного навколишнього середовища і розвитку – «Саміті Землі» (англ. *United Nations Conference on Environment and Development (Earth Summit), Rio de Janeiro*), що відбувся у Ріо-де-Жанейро 3-14 червня 1992 року. Порядок денний на XXI століття затверджено Резолюцією 1 (Додаток 2) як один з трьох підсумкових документів Конференції (A/CONF.151/26, Vol. I) [3].

Порядок денний є програмним документом, спрямованим на створення глобального партнерства держав, народів та міжнародних організацій. В документі наголошується, що економічний і соціальний розвиток та охорона навколишнього середовища є взаємозалежними і взаємодоповнюючими компонентами сталого розвитку.

Документ висуває дві взаємопов'язані цілі розвитку: (1) досягнення високої якості навколишнього середовища і здорової економіки для всіх народів світу; (2) задоволення потреб людей і збереження сталого розвитку протягом тривалого періоду для майбутніх поколінь.

Порядок складається з преамбули і чотирьох розділів, що охоплюють 40 глав. Перший розділ «Соціальні і економічні аспекти» розробляє програмні дії у напрямках: прискорення сталого розвитку в країнах, що розвиваються, боротьба з бідністю, зміна структур споживання, динаміка населення і сталий розвиток, охорона і зміцнення здоров'я людини, сприяння сталому розвитку населених пунктів, врахування питань сталого розвитку в процесі прийняття управлінських рішень.

Другий розділ «Збереження та раціональне використання ресурсів у цілях розвитку» висвітлює причини навантаження на довкілля і розробляє заходи для вирішення глобальних екологічних проблем, у тому числі – захисту атмосфери, раціонального використання вразливих екосистем і земельних ресурсів, сталого ведення сільського господарства, збереження біологічного різноманіття, захисту океанів і морів, поводження з відходами та інших.

Третій розділ «Зміцнення ролі основних груп населення» характеризує значення окремих суспільних груп населення (жінок, дітей і молоді, корінних народів і місцевих громад, неурядових організацій, фермерів, науковців та інших) у досягненні цілей сталого розвитку суспільства.

Четвертий розділ «Засоби здійснення» закладає основоположні підвалини стимулювання сталого розвитку, що можуть успішно використовуватися як на глобальному, так і на регіональному рівні. Розділ висвітлює методи реалізації завдань Порядку денного, наприклад – фінансові ресурси і механізми, передача екологічно чистих технологій тощо.

Програма дій з подальшого впровадження Порядку денного на XXI століття, ухвалена Генеральної Асамблеєю ООН на спеціальній сесії «Планета Земля +5», що відбулася в 1997 році.

1998



Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля [Орхуська конвенція] (англ. *Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-Making and Access to Justice in Environmental Matters [Aarhus Convention]*) – підписана 25 червня 1998 року 38 державами – учасницями, у тому числі Україною, на Четвертій конференції міністрів європейських країн з питань навколишнього середовища «Навколишнє середовище для Європи», що відбулася в Орхусі (Данія), а потім відкрита для підписання до 21 грудня 1998 року. Конвенція набрала чинності 30 жовтня 2001 року. Україна ратифікувала угоду 6 липня 1999 року (Законом України від 06.07.1999 № 832-XIV) [30].

Підписанням Конвенції її держави-учасники визнали, «що в питаннях, які стосуються навколишнього середовища, удосконалення доступу до інформації та участь громадськості в процесі прийняття рішень підвищують якість рішень, які приймають, та процесу їх виконання, сприяють поліпшенню поінформованості громадськості щодо екологічних проблем, дають громадськості можливість висловлювати свою стурбованість, а державним органам – вести належний облік таких інтересів».

Конвенція є новим видом природоохоронної угоди, що створює демократичний контекст взаємодії громадськості і державних органів влади; визнає зобов'язання перед зацікавленими сторонами та майбутніми поколіннями. Метою угоди, що визначена у статті 1, є сприяння захисту права кожної людини нинішнього і майбутніх поколінь жити в навколишньому середовищі, сприятливому для її здоров'я та добробуту.

Конвенція включає три блока екологічних прав: 1. Доступ громадськості до державних документів, що містять екологічну інформацію (статті 4 - 5); 2. Участь громадськості в обговоренні та прийнятті рішень щодо конкретних видів діяльності, документів, нормативних актів (або) загально-обов'язкових юридичних актів, що пов'язані з навколишнім середовищем (статті 6-8); 3. Доступ до правосуддя в екологічних справах (стаття 9). Екологічна інформація може надаватися у письмовій, аудіовізуальній, електронній чи будь-якій іншій матеріальній формі.

Стаття 6 визначає поняття «зацікавлена громадськість», що має інтерес та приймає участь у процедурі прийняття рішень з питань, що стосуються навколишнього середовища (п. 2); встановлює вимоги до процедури участі громадськості у процесі прийняття рішень (п. 3-7). Стаття 7 викладають принципи участі громадськості у процесі розробки програм і політичних документів, пов'язаних з навколишнім середовищем, а стаття 8 – особливості участі громадськості у підготовці нормативних актів виконавчої влади і (або) загальнообов'язкових юридичних актів.

Стаття 9 викладає умови доступу до правосуддя, у тому числі, якщо вимоги статей 4-8 були порушені, а також розглядає питання зі створення відповідних механізмів для усунення перешкод на доступ до правосуддя.

2001



Директива 2001/42/ЄС Європейського Парламенту і Ради щодо оцінки впливу певних планів і програм на навколишнє середовище (англ. *Directive 2001/42/EC of the European Parliament and of the Council of 27 June 2001 on the assessment of the effects of certain plans and programmes on the environment*) – прийнята Європейським Парламентом і Радою Європейського Союзу 27 червня 2001 року [14].

Директива відома як Детектива про СЕО, хоча не містить її визначення. Стаття 1 проголошує, що ціллю Директиви є забезпечення високого рівня захисту навколишнього середовища та сприяння інтеграції екологічних міркувань до підготовки та прийняття планів, які, ймовірно, матимуть значний вплив на навколишнє середовище. Метою є сприяння сталому розвитку, забезпечуючи проведення екологічної оцінки певних планів і програм відповідно до цієї Директиви.

У статті 2 визначено, що об'єктами оцінки є «проекти та програми», які: 1) підлягають підготовці та/або ухваленню органом державної влади на державному, регіональному або місцевому рівнях, або які підготовлені органом державної влади для ухвалення шляхом проходження законодавчої процедури в Парламенті або Уряді; та 2) вимагаються згідно з положеннями законодавчих, регуляторних або адміністративних актів.

Стаття 3 визначає сферу застосування екологічної оцінки. Процедура проводиться якщо: 1) проекти та програми можуть суттєво вплинути на стан навколишнього природного середовища відповідно до критеріїв, зазначених у Директиві; 2) проекти та програми (а) підготовлені для сільського господарства, лісового господарства, рибного господарства, енергетики, промисловості, транспорту, управління відходами, експлуатації водних ресурсів, телекомунікацій, туризму, містобудування та планування сільської місцевості або землекористування, і які встановлюють основу для майбутнього надання дозволу на реалізацію проектів, наведених у Додатках I і II до Директиви 85/337/ЄЕС, або (б) до яких, з огляду на можливий вплив на стан місцевості їхньої реалізації, встановлено необхідність проведення оцінки згідно зі статтями 6 або 7 Директиви 92/43/ЄЕС.

Статті 5-7 викладають загальні порядок виконання процедури екологічної оцінки, зокрема вимоги до складання звіту про стан навколишнього природного середовища (стаття 5), проведення консультацій (стаття 6) та транскордонних консультацій (стаття 7), до включення результатів оцінки при підготовці рішень (стаття 8), щодо інформування та надання відомостей громадськості та будь-якій державі-члену, з якою проводилися консультації (стаття 9), проведення моніторингу (стаття 10).

У Додатку I надається інформація, яка опрацьовується і описується в екологічному звіті. Додаток II містить критерії визначення імовірної суттєвості впливу, що стосується двох класів параметрів, зазначених у частині 5 статті 3: 1) характеристики проектів та програм; 2) характеристики впливу та району, на який імовірно буде здійснено вплив.

2015


 THE GLOBAL GOALS
 For Sustainable Development

Перетворення нашого світу: Порядок денний в області сталого розвитку на період до 2030 року (англ. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*) – прийнято 25 вересня 2015 року на 4-му пленарному засіданні 70-ї сесії Генеральної Асамблеї ООН як підсумковий документ Саміту Організації Об'єднаних Націй з прийняття Порядку денного в галузі розвитку на період після 2015 року, який відбувся 25-27 вересня 2015 року (Резолюція Генеральної Асамблеї ООН № 70/1 від 25 вересня 2015 року). Відповідно до пункту 21 Порядок денний (нові цілі та завдання) набув чинності з 1 січня 2016 року [31].

Порядок денний 2030 є новим планом дій на період до 2030 року, метою якого є виведення світу на траєкторію сталого розвитку. Документ поділений на три розділи: Преамбула, Декларація та Цілі і завдання в галузі сталого розвитку. У Преамбулі вказано: «Сімнадцять Цілей сталого розвитку і 169 завдань, що їх ми проголошуємо сьогодні, демонструють масштабність і амбітність цього нового всезагального Порядку денного. ... Вони мають комплексний та неподільний характер і забезпечують зрівноваження трьох вимірів сталого розвитку: економічного, соціального та екологічного».

В Декларації (п. 33) проголошено: «Ми визнаємо, що соціально-економічний розвиток залежить від раціонального використання природних ресурсів нашої планети. Тому ми сповнені рішучості зберігати та раціонально використовувати океани та моря, прісноводні ресурси, а також ліси, гори й посушливі землі, а також охороняти біорізноманіття, екосистеми й дику флору та фауну». Документ ретельно описує Цілі сталого розвитку (англ. *Sustainable Development Goals, SDGs*), що стосуються таких сфер, як бідність, голод і продовольча безпека, здоров'я, освіта, гендерна рівність, вода і санітарія, енергетика, економічне зростання, інфраструктура і індустріалізація, нерівність, міста, стале виробництво і споживання, зміна клімату, океани, біорізноманіття, мир і правосуддя, партнерство.

В документі (п.55) підкреслюється, що: «Уряд кожної держави також сам вирішуватиме, як ці рекомендовані глобальні завдання будуть відображені у національних процесах планування, політичних заходах і стратегіях. Важливо визнати наявність зв'язку між сталим розвитком та іншими значущими процесами, що відбуваються в економічній, соціальній та екологічній сферах».

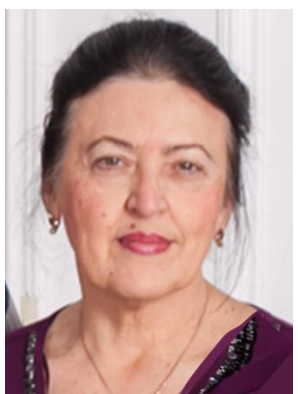
Усі Цілі мають конкретні екологічні завдання, наприклад: Ціль 1 – зменшити незахищеність і вразливість перед викликаними зміною клімату й екологічними потрясіннями; Ціль 7 – розвивати екологічно чисту енергетику; Ціль 9 – сприяти розвитку екологічно стійкої і сталої інфраструктури; Ціль 11 – забезпечити екологічну стійкість міст і населених пунктів та зменшити їхній негативний екологічний вплив; підтримувати позитивні економічні, соціальні та екологічні зв'язки між шляхом підвищення ефективності планування національного і регіонального розвитку та ін.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ



Світлана Альбертівна Ус – кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», експерт Національного агентства забезпечення якості вищої освіти. Брала участь у проєкті Erasmus+, QUARE: Quality Assurance System in Ukraine: Development on the Base of ENQA Standards And Guidelines. Автор більше 70 наукових статей, двох монографій, 17 навчальних посібників.

Наукові інтереси: прийняття рішень в умовах невизначеності, моделювання складних систем, оптимізація розподілу матеріальних потоків у транспортно-логістичних системах, моделювання процесів зі сталого розвитку.



Палехова Людмила Львівна – кандидат економічних наук, професор кафедри маркетингу; заступник директора інституту економіки за програмами «Освіта для сталого розвитку», НТУ «Дніпровська політехніка». Експерт з питань управління сталим розвитком у міжнародній мережі університетів NESEFF. Координатор більше 40 міжнародних проєктів, які виконуються зокрема сумісно з Бранденбурзьким технічним університетом Коттбус-Зенфтенберг (Німеччина) та іншими університетами ЄС. Оpubліковано понад 160 наукових праць. Є головою редакційної колегії серії монографій «Управління сталим розвитком в умовах перехідної економіки»

(«Університети в підтримку сталого розвитку»), що видається за підтримки проєктів DAAD.

Наукові інтереси: стратегічний менеджмент і маркетинг сталого розвитку, планування сталого розвитку бізнесу та територій, моделі відповідального споживання і виробництва.

ВІДОМОСТІ ПРО ПРОЄКТ

Співпраця між Бранденбурзьким технічним університетом Коттбус-Зенфтенберг (БТУ), Німеччина, та Національним технічним університетом «Дніпровська політехніка» почалася ще в далекому 1998 році. Протягом 25 років виконується велика кількість сумісних проєктів, що підтримуються програмами DAAD та ERASMUS+, зокрема, навчальні та дослідницькі проєкти, семінари та програми стажування, міжнародні багатосторонні конференції, а також різноманітні навчальні тренінги і постійно діючі 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-партнери реалізують систему взаємопов'язаних програм та заходів у рамках Меморандуму «Про реалізацію спільного дослідницького проєкту сталості та цифрового навчання у вищій освіті» за підтримки Німецького товариства міжнародного співробітництва (GIZ). Кожного року за допомогою БТУ в НТУ «Дніпровська політехніка» розробляються і вводяться нові дисципліни, що спрямовані на отримання знань з питань сталого розвитку для різних спеціальностей – «Моделювання сталого розвитку», «Маркетинг сталого розвитку», «Стратегічна екологічна оцінка», «Маркетинг у ланцюгах створення вартості», «Маркетингові інструменти в циркулярній економіці» та ін.

З початком повномасштабного вторгнення російських військ в Україну в лютому 2022 році співпраця університетів не зупинилася, а навпаки посилилася та перейшла на інший рівень. У рамках програми DAAD «Україна цифрова: забезпечення успішності студентів під час кризи, 2022» був започаткований проєкт «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 з фінансової підтримки українських студентів і викладачів, науково-дослідні програми та широкий спектр навчальних онлайн-тренінгів.

Успіхи з виконання проєкту з цифровізації навчання заклали підґрунтя для його продовження у 2023 році, що теж підтримується програмою DAAD. Спеціальні дослідження, що були проведені в НТУ «Дніпровська політехніка» за ініціативою студентів, дозволили виявити рівень забезпеченості навчального процесу цифровими інформаційними матеріалами та визначити потребу у розробці навчальних посібників та інших навчальних ресурсів для окремих дисциплін різних спеціальностей. Такими, наприклад, став навчальний посібник «Моделювання сталого розвитку територій».

Ус Світлана Альбертівна,
Палехова Людмила Львівна

МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Навчальний посібник

Українською мовою

Затверджено Вченою Радою

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
як навчальний посібник для здобувачів закладів вищої освіти
Протокол № 13 від 26 грудня 2023 року

Дизайн обкладинки та макетування – О. В. Свірідова

Підп. до друку 11.01.2024. Формат 60x90/8.
Папір офсет. Друк цифровий. Ум. друк. арк. 11,49
Обл.-вид. арк. 16,7 Тираж 90 пр. Зам. №08/0124

Підготовлено до друку
в Національному технічному університеті
«Дніпровська політехніка»

Видавець «Свідлер А.Л.»
49041, м. Дніпро, а/с 2493, тел./факс +38 (067) 635-78-83
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи: Серія ДК
№ 3876 від 10.09.2010 р.
Надруковано в типографії видавництва «Свідлер А.Л.»
<http://www.garant-sv.com.ua>