

## СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ: ЕВОЛЮЦІЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

Л.О. КОРШЕВНЮК

*Ставтеся до майбутнього –  
як ніби воно вже тут.  
Ларрі Еллісон,  
співзасновник Oracle*

**Анотація.** Досліджено історичне формування та обґрунтовано перспективні напрями подальшого розвитку системних ідей в науці, послідовні зміни проблематики, виникнення і еволюція методології системного аналізу. Виокремлено шість історичних етапів від першого стародавнього «зародкового» (III ст. до н.е. – початок н.е.) до шостого сучасного етапу «піднесення» (початок XXI ст. – 2020 рр.). Кожний етап розкрито у розрізах часового інтервалу, основних територій розвитку, видатних вчених і дослідників, подій, об'єктів наукового вивчення, актуальної проблематики і методології. Проаналізовано сьомий майбутній «інтеграційний» етап (2020–2050 рр.), якому будуть властиві неформалізовані динамічні трансгалузеві проблеми у складних системах різної природи, що потребуватимуть розв'язань у режимі реального часу. Ключовим і перспективним напрямом розвитку передбачається методологічна інтеграція процедур системного аналізу та технологій штучного інтелекту.

**Ключові слова:** системний аналіз, системи штучного інтелекту, історичний розвиток науки, футурологія, передбачення.

### ВСТУП

Сучасні умови перебігу процесів у системах довільної природи та особливості діяльності людини у різноманітних галузях виявляють такі тенденції розвитку:

- 1) розширення сфер пізнання і підкорення людиною природного середовища, виникнення нових технологій і цілих галузей, що потребують розв'язання складних проблем;
- 2) поступове і швидке ускладнення систем завдяки постійним процесам інтеграції підсистем та елементів;
- 3) стрімке прискорення існуючих процесів;
- 4) значне почастищення моментів настання ситуацій якісних змін у структурі процесів або повної заміни процесів новими.

Результатом таких тенденцій є те, що якщо ще нещодавно, у другій половині минулого сторіччя, переважна більшість нагальних актуальних

завдань у діяльності людини належала до класу детермінованих проблем, певна кількість складних завдань — до класу слабкоструктурованих і незначна кількість найскладніших завдань у стратегічних галузях — до неформалізованих, то в сучасних умовах розвитку суспільних відносин і технологій переважна більшість завдань належить до класів слабкоструктурованих, складноформалізованих та неформалізованих проблем [1].

Однією з основних і найвиразніших причин таких перетворень є стрімке наростання процесів світової інтеграції та глобалізації. Для України врахування таких процесів та особливостей їх перебігу є надзвичайно важливим для коректного розв'язання складних проблем у всіх галузях діяльності людини. У сучасних умовах країни, що стали на шлях ринкового розвитку, незалежно від їх волі чи бажання швидко втягуються у процеси глобалізації. Тому важливим і необхідним є точне розуміння нових тенденцій і процесів, що забезпечить побудову коректних та ефективних стратегій розвитку країни [2, 3].

На міждержавному світовому рівні, і в Україні зокрема, ще й досі актуальними і невирішеними залишаються задачі прийняття рішень і управління сучасними динамічними процесами, зокрема інтеграційними, у системах довільної природи, що обґрунтовується наявністю характерних проблем [2, 4]:

1) неузгодженість цілей управління з інтересами учасників управлінських процесів, що потребує розв'язання і врегулювання внутрісистемних конфліктів;

2) переважна більшість рішень має багатоетапний характер і передусім спрямована на дотримання інтересів окремих підрозділів ніж системи в цілому;

3) велика кількість випадкових подій і ризиків, низький рівень явних причинно-наслідкових зв'язків у процесах взаємопов'язаних систем різної природи, і як наслідок складність прогнозування процесів;

4) суб'єктивний характер експертного оцінювання стану досліджуваної системи і параметрів процесів та суперечливість експертних знань;

5) надзвичайно великий обсяг вихідних даних та інформаційних джерел, недостовірність, невизначеність та нечіткість багатьох даних;

6) складна динаміка процесів і систем, часті випадки різкої зміни структури процесів.

Такі специфічні і загальні проблеми в розв'язанні актуальних завдань потребують використання системного підходу і створення засобів аналізу й оптимізації складних економічних, соціальних, технічних та інших систем, що виникли внаслідок стрімкого науково-технічного прогресу і соціально-економічного розвитку світової цивілізації у XXI ст. і мають специфічні властиві Україні особливості, проблеми і ризики. У свою чергу такі завдання потребують поєднання зусиль фахівців у різних галузях діяльності, уніфікації підходів різних наукових і практичних напрямів та визначення компромісів між ними. Інтеграція методів дослідження і проектування складних систем, застосування математичних, організаційних і методологічних інструментів пошуку і реалізації рішень, спрямованих на усунення проблем, дали значний поштовх виникненню і розвитку над- і міждисциплінарних досліджень із системного аналізу соціальних, економічних, технічних та інших процесів, які сьогодні в Україні стають найпріоритетнішим науковим напрямом.

## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

**Мета роботи** — аналіз історичного розвитку системних ідей в науці, проблем і методів системного аналізу, виділення актуальної проблематики і методології та формування обґрунтованих перспективних напрямів подальшого розвитку методології системного аналізу для цілей розв’язання майбутніх неформалізованих і динамічних задач аналізу, ідентифікації, прийняття рішень та управління. Саме ці напрями визначають актуальний в майбутньому новий методологічний інструментарій, який необхідно завбачливо планувати й розробляти вже тепер.

## ЕВОЛЮЦІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

Цілі майбутнього можливо уявити і досягнути через дослідження минулого та усвідомлення сучасних процесів. Розвиток системного аналізу як методології розв’язання взаємопов’язаних проблем різної природи має цікаву насичену історію [2, 3, 5]. Формування системних ідей і поглядів у світі почалося разом з виникненням суспільних відносин ще у давні часи. У процесі розвитку від перших системних уявлень до сучасного системного аналізу як загальнометодологічної науки пізнання можна виокремити шість основних історичних етапів (рис. 1).

*Перший стародавній «зародковий» етап* (III ст. до н.е. – початок нашої ери). На цьому етапі відбуваються емпіричне виникнення і становлення перших системних ідей, які формуються у процесі практичної діяльності людства і розвитку ранніх філософських шкіл. Системність оточення і Всесвіту виявила себе у процесах вивчення законів природи та навколишнього середовища. У практичній пізнавальній практиці людства виникали потреби у чіткій організації певних відносин, наприклад, потреба у системі поділу земельних ділянок або у системі врахування урожаю і натуральних продуктів у стародавньому Єгипті [6].

Приблизно у III–II ст. до н.е. у стародавній Греції виникло поняття «система» (старогрец. *σύστημα*), що означало уклад, устрій, спільноту, єднання, цілісне, складене з частин, або певні дії з упорядкування. Спочатку термін «система» використовувався у сфері соціально-історичного розвитку, а пізніше ідеї системності були перенесені на опис Всесвіту. У перших античних джерелах поняття «система» застосовувалось для опису упорядкованості природних об’єктів, а для штучних об’єктів використовувався термін «синтаґма» (старогрец. *σύνταγμα*). Пізніше систему стали розглядати як таку, що пояснює все істотне [7, 8].

Основи системних уявлень на даному етапі закладені відомими філософами античності. Вивченням законів взаємодії речей та відношень у закономірностях розвитку Всесвіту займалися Піфагор (570–490 рр. до н.е.) та його послідовники. Піфагор бачив систему у нерозривному взаємозв’язку всього існуючого, природи, людини, космосу [8, 9]. Сучасник і критик Піфагора Геракліт (540–480 рр. до н.е.) вважав, що єдність речей є очевидною і «лежить» прямо на поверхні і залежить від збалансованих взаємодій між протилежностями. За його вченням поєднання, тобто «речі, що взяті разом», в одному сенсі описуються як «ціле», тобто такі, що фактично формують систему, а в іншому сенсі — як «не ціле», тобто як набір одиничних компонентів: «з усього — одне, з одного — все» [8, 10]. А античний філософ Анаксагор (500–428 рр. до н.е.) стверджував «все у всьому» і «з усього — все». Він вважав, що жодна річ не може виникнути чи зникнути, а утворюється з об’єднання вже існуючих речей — у кінцевому підсумку з нескінченно малих елементів дійсного світу, «гомеомерій» (насіння речей), які спочатку були в безладі і утворювали хаос [11].

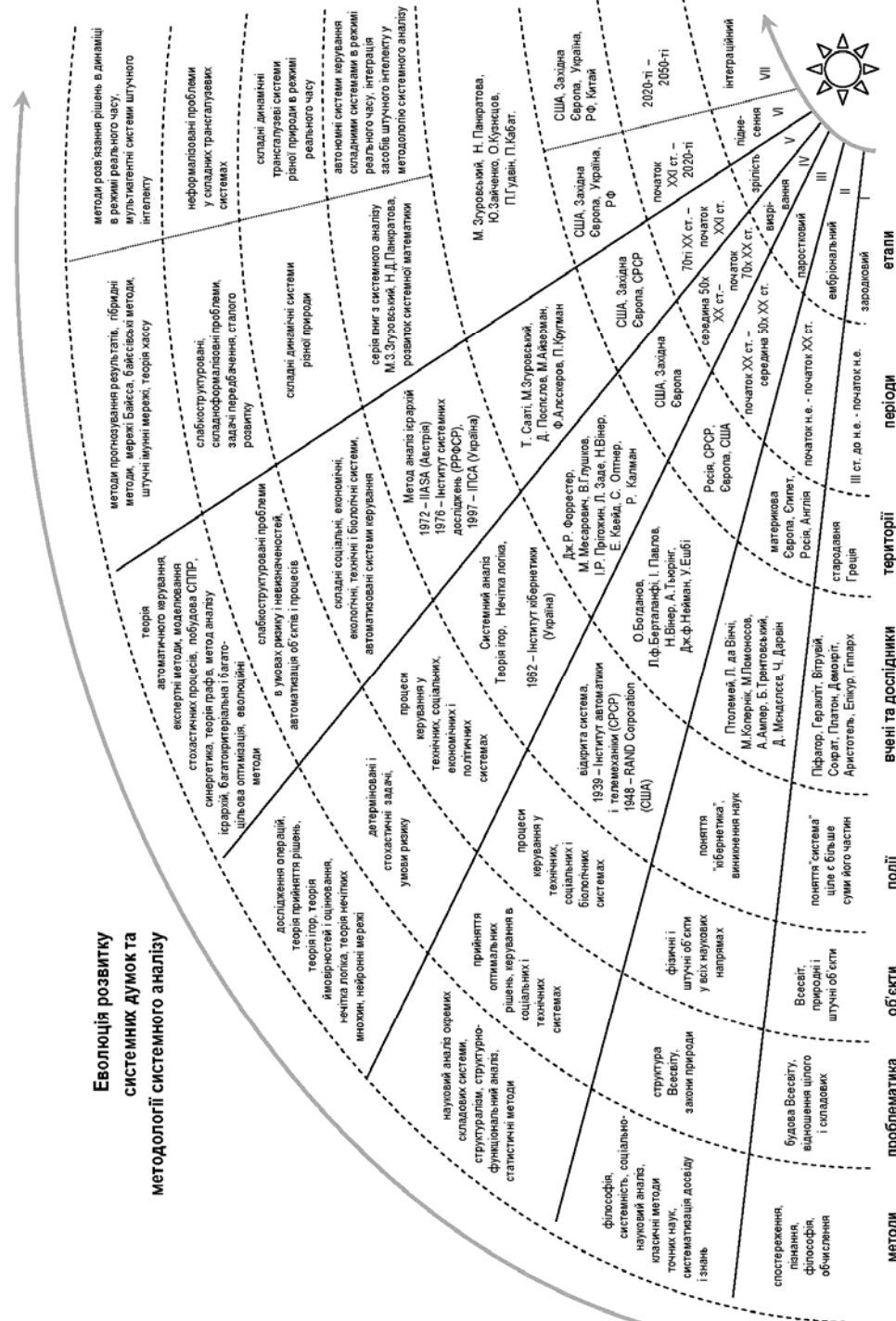


Рис. 1. Періоди еволюції системних ідей та їх характеристики

Сократ (469–399 рр. до н.е.) повернув античне філософське мислення до себе самого — до дослідника, до аналізу власних принципів, прийомів і методів пізнання [12]. Він фактично осяг важливість і необхідність комплексного погляду на природу речей і поклав міркування системності в основу методів пізнання та дослідження. Аристотель (384–322 рр. до н.е.) започаткував формальну логіку та систематизував знання античного світу [13]. Він створив загальну систему філософії, що охоплює всі сфери людського буття: соціологію, політику, логіку і фізику. Древньогрецький філософ і мислитель Епікур (342–270 рр. до н.е.) у свої творах для опису космосу, світового порядку і загальної організованості Всесвіту використовував поняття «система» [14]. Відомий древньогрецький астроном і географ Гіппарх (190–120 рр. до н.е.) систематизував і створив перший у Європі зоряний каталог з точними координатами понад 1000 зірок, запропонував систему зоряних величин, яка в удосконаленому вигляді фактично застосовується і тепер, та розробив моделі прогнозування руху небесних тіл з прийнятною на той час точністю [15].

Отже, на першому стародавньому етапі розвитку системного аналізу виникали та відшліфовувались окремі ідеї, гіпотези, поняття і випадкові інтуїтивні відкриття видатних філософів і мислителів. Давні дослідники намагались осягнути належний зв'язок речей і досягнути справжнього розуміння того, як влаштований світ: знати все як одне. Основні наукові методи, що були створені і розвинуті на цьому етапі, були спрямовані на пізнання та аналіз будови Всесвіту як цілісної системи, опису законів природи, створення моделей світоустрою, вивчення людини і її місця у Всесвіті та дослідження соціальних відносин у суспільстві. Необхідно відзначити фактичне зародження елементів системного аналізу динамічних процесів, що виявилось у дослідженнях не лише сучасного для філософів буття, а й через призму зв'язків між минулим та майбутнім.

*Другий «ембріональний» етап* (початок нашої ери — початок ХХ ст.). У період пізньої античності до кінця VI ст. здійснюється подальша універсалізація і узагальнення поняття «система», що дозволяло застосовувати його до фізичних і штучних об'єктів у всіх галузях пізнання Всесвіту. У середньовічний умовний період 500–1500 рр. н.е. буття з предмета спостереження перетворюється на предмет соціально-наукового аналізу. У період нової історії від початку XVI ст. аж до початку ХХ ст. виникають, відокремлюються та стрімко розвиваються різні науки, кожна з яких аналізує свою предметну галузь. На цьому етапі системність свідомо чи несвідомо становиться методом кожного наукового напряму.

Відомий олександрійський астроном і математик Клавдій Птолемей (87–165 рр.) виходив із системної інтерпретації Всесвіту, і майже на півтори тисячі років сформулював геоцентричну модель будови Сонячної системи [15]. Філософ і лікар Клавдій Гален (130–200 рр.) систематизував античні знання у єдиний науковий напрям у біологічних науках та медицині [16]. Італійський дослідник Леонардо да Вінчі (1452–1519 рр.) зробив вагомий внесок у розвиток системної наукової думки середньовіччя. Він протиставляє абстрактним міркуванням методологію спостереження, експерименту та індукції. [17]. Вагому роль у розвитку системних уявлень відіграли дослідження німецько-польського астронома Миколи Коперніка (1473–1543 рр.), який визнав помилковість геоцентричної системи Птолемея і запропонував геліоцентричну систему Всесвіту [18]. Італійський вчений і астроном Галілео Галілей (1564–1642 рр.) заклав основи класичної механіки і дав поштовх

теорії ймовірностей і теорії множин. Галілей розглядав Всесвіт як величезну систему, механізм, а складні природні процеси — як поєднання взаємопов'язаних елементарних причин, головно з яких — це механічний рух [19]. Вагомий внесок у системні уявлення зробив Джордано Бруно (1548–1600 рр.), який стверджував, що Світ — це система систем [20]. Німецький математик, астроном і оптик Йоганнес Кеплер (1571–1630 рр.) побудував систему динаміки планет, що дозволяла точно прогнозувати їх рух [21]. Англійський філософ, фізик, математик, астроном і алхімік Ісаак Ньютон (1643–1727 рр.) зробив першу систематичну публікацію закону всесвітнього тяжіння і трьох законів механічного руху [22].

Видатний російський вчений Михайло Васильович Ломоносов (1711–1765 рр.) розглядав різні науки і наукові напрями у логічній системній єдності, яка обумовлена єдністю фундаментальних законів природи, з яких випливає цілісне розмаїття явищ [23]. Німецький філософ Іммануїл Кант (1724–1804 рр.) активно розвинув системні погляди у філософії [24]. Французький вчений П'єр Сімон Лаплас (1749–1827 рр.) розробив основи небесної механіки, обґрунтував виникнення Сонячної системи з первинної туманності та фактично розвинув і систематизував апарат теорії ймовірностей [25]. Французький фізик і математик Андре-Марі Ампер (1775–1836 рр.) показав необхідність застосування наукового підходу до управління складними системами та запропонував термін «кібернетика» для означення окремої науки з управління державою [26]. Видатний англійський вчений і дослідник Чарльз Дарвін (1809–1882 рр.) обґрунтував наукові основи еволюційної теорії і разом з Альфредом Уоллесом сформулював принципи природного добору, привніс системні математичні підходи у біологію [27]. Відомий російський вчений Дмитро Іванович Менделєєв (1834–1907 рр.) відкрив фундаментальний закон світоутворення, який сформулював у періодичній системі елементів [28]. Подальший розвиток системних ідей Д.І. Менделєєва привів до сприйняття атома як складної системи. Англійський фізик Ернест Резерфорд (1871–1937 рр.) створив планетарну модель атома [29].

Таким чином, у періодах пізньої античності, середньовіччя та нової історії розвиток системних ідей відбувався поступово, з переходом від стихійного і неусвідомленого використання системності в науковому пошуці до планомірного усвідомленого застосування системного підходу у всіх наукових напрямках. У цей час відбувається систематизація наукового досвіду і знань, формується та застосовується класична методологія точних наук. При цьому науковий розвиток спрямовується не лише на вирішення практичних завдань, але й сам формулює фундаментальні проблеми, які надалі отримують свій розв'язок. Необхідно зазначити, що на другому «ембріональному» етапі багато дослідників розробляли окремі системні ідеї, не називаючи їх системними, оскільки така галузь знань ще не була відокремлена.

*Третій «паростковий» етап* (початок ХХ ст. – середина 50-х років ХХ ст.). Цей етап характеризується поширенням і укріпленням системних уявлень у кожній галузі науки. Стрімкий розвиток індустріального суспільства у першій половині ХХ ст., вибухові соціальні процеси, транспортно-комунікаційна фаза науково-технічного прогресу і військові конфлікти на початку сторіччя привели до значної позитивної динаміки у фундаментальних і прикладних природничих науках і відповідно до подальшого розвитку системних ідей та мислення. Так, датський фізик і нобелівський лауреат

Нільс Бор (1885–1962 рр.) розвинув концепцію системного сприйняття атома Резерфорда, відкрив дуалізм електрона і запропонував квантову теорію атома [30]. Видатний російський вчений, академік і нобелівський лауреат Іван Петрович Павлов (1849–1936 рр.) створив учення про вищу нервову діяльність і фактично започаткував активну фазу системних досліджень у фізіології, психіатрії та психології людини [31]. Російський вчений Олександр Олександрович Богданов (справжнє прізвище Малиновський, 1873–1928 рр.) заснував перший у світі Інститут переливання крові, випередив праці Н. Вінера та Л. фон Берталанфі і справедливо вважається попередником кібернетики та загальної організаційної науки — тектології [32]. Англійський математик Алан Тьюрінг (1912–1954 рр.), якого вважають засновником інформатики і теорії штучного інтелекту [33], та угорсько-американський дослідник і вчений Джон фон Нейман (1903–1957 рр.) — творець сучасної архітектури обчислювальних машин, теорії ігор і моделі клітинних автоматів [34], зробили важливий внесок у розвиток інформаційних технологій і обчислювальних засобів. Австрійський біолог Людвіг фон Берталанфі (1901–1972 рр.) на поєднанні знань з фізики, хімії і біології запропонував узагальнену системну теорію, упровадив поняття відкритої системи [35].

Американський математик Норберт Вінер (1894–1964 рр.) вважається одним із засновників кібернетики і теорії штучного інтелекту [36]. Він фактично спровокував масове усвідомлення системності світу і застосування системних понять. Варто відзначити внесок і інших відомих учених: англійський психіатр і кібернетик Уільям Росс Ешбі (1903–1972 рр.) увів поняття самоорганізації [37]; мексиканський біолог Артуро Розенблют (1900–1970 рр.) разом з Н. Вінером розробили клітково-автоматну модель збудженого середовища; англійський біолог Джон Бердон Сандерсон Холдейн (1892–1964 рр.) — один із засновників популяційної, математичної, молекулярної і біохімічної генетики та синтетичної теорії еволюції [38], та інші.

Цей період характеризується відкриттям спеціалізованих наукових і прикладних установ, що орієнтовані на проведення системних досліджень у різних галузях. У 1939 р. у Москві був заснований Інститут автоматики і телемеханіки, який з 1969 р. був перейменований у загальновідомий Інститут проблем керування, у 1948 р. у США була створена відома дослідницька організація RAND Corporation (**R**esearch **A**ND **D**evelopment). Розквітають і набувають широкого застосування методи збирання та статистичного аналізу даних. Більшість підходів поки орієнтовані на дослідження окремих складових систем. Разом з тим виникає науковий напрям «структуралізм», а також такі класи методів системних досліджень, як структурно-функціональний аналіз та структурно-семантичний аналіз. Явища і процеси розглядаються як структурно розділена цілісність, у якій для кожного структурного елемента передбачено своє функціональне і семантичне призначення.

Таким чином, на «паростковому» етапі розвитку системного аналізу у першій половині XX ст. відбувається перехід від механістичної картини Всесвіту, від механіцизму у науковому пізнанні до узагальнень, нового системного бачення, структуралізму, елементів формалізації і математизації досліджуваних процесів і систем та зародження науки про дослідження

складних систем. Фахівці різних наукових галузей вивчили, що більшість природних систем, наприклад біологічні і соціальні, є відкритими і фактично не перебувають у стійкому і рівноважному стані, тому їх дослідження не можливе в межах механістичного світогляду, за яким система досліджується як сума її частин. Поняття «система» дедалі частіше застосовують для позначення складного структурно організованого об'єкта, у якому можна виокремити структуру, взаємодію частин, стани і переходи. Конкретні наукові принципи системної методології і аналізу систем почали викристалізуватися у 20–30-х роках ХХ ст.

*Четвертий етап «визрівання»* (середина 50-х років ХХ ст. – початок 70-х років ХХ ст.) характеризується початком широкого проникнення системності у всі галузі науки. Виникають окремі системні наукові напрями, такі як системотехніка, системологія, системна біологія, системна інженерія тощо. На даному етапі у країнах-лідерах та у найбільших транснаціональних корпораціях відбувається подальше створення спеціалізованих установ і підрозділів з проведення системних досліджень у певних предметних галузях. Корпорація з розроблення систем (System Development Corporation) — одна з перших фірм з розроблення програмного забезпечення — була створена у 1955 р. як група з інженерії систем для військових проектів у корпорації RAND. У 1959 р. у США в Кейсівському технологічному інституті (Case Institute of Technology) був створений Центр системних досліджень (Systems Research Center) [39]. У 1963 р. корпорація «IBM» започатковує Інститут системних досліджень (Systems Research Institute) [39]. У 1957 р. був заснований обчислювальний центр Академії наук УРСР, який у 1962 р. перетворений в Інститут кібернетики.

Починаючи з кінця 1950-х років у різних країнах світу (США, Японії, СРСР, Польщі, Болгарії та ін.) організуються і проводяться наукові конференції, симпозіуми та семінари із системної проблематики. У цей період починається видання спеціальної літератури, зокрема періодичної, про проблеми теорії систем. Починаючи з 1956 р. у США виходить щорічне видання «General Systems», а з 1959 р. у СРСР — «Системные исследования». Широкої популярності набув журнал Американського інституту радіоінженерів «IEEE Transaction on Systems Science and Cybernetics» [39].

Значуща роль у поширенні і закріпленні системних принципів у всіх галузях діяльності людини в цьому і у всіх наступних періодах належить появі та стрімкому розвитку автоматизованих обчислювальних засобів. У 1950-х роках з'явилися перші великі комп'ютери, які використовувались для обчислень під час розв'язування військових та наукових завдань. 1960-ті роки ознаменовані виникненням систем керування інформацією та впровадженням обчислювальних засобів, крім військового і наукового, ще і в корпоративний сектор економіки. Нагромадження великих обсягів даних зумовило наприкінці 1960-х – початку 1970-х років появу систем керування базами даних (СКБД) та розділення напряму розвитку обчислювальних засобів на два вектори: 1) розвиток обчислювальних можливостей електронних систем для математичних розрахунків та 2) розвиток можливостей комп'ютерів для менеджменту даних, тобто для збереження, оброблення і оперативного доступу до даних.



Вагомий внесок у розвиток системності в науці зробили американський інженер Дж. Р. Форрестер, (запропонував теорію системної динаміки [40]), сербсько-американський математик і системний теоретик Михайло Д. Месарович, який фактично заснував системну біологію і математичну загальну теорію систем [41], Г.П. Щедровицький, В.М. Глушков, В.А. Геодакян, російсько-бельгійський вчений І.Р. Пригожин (виконав ґрунтовні дослідження синергетики та самоорганізації систем [42]), В.О. Лефевр, Д.О. Поспелов, Ф.С.Темніков, М.Г. Гаазе-Рапопорт, Е.Л. Наппельбаум, А.І.Уйюмов, Р. Калман, К. Боулдінг, У. Росс Ешбі, азербайджано-американський вчений Л. Заде (запропонував нечітку логіку, теорію м'яких обчислень, лінгвістичні змінні, вербальні уявлення і обчислення, що значно збільшили можливості формалізації прикладних задач системного аналізу [43]), С. Оптнер та інші відомі вчені.

Методологічно у цей період становлення теорії систем, досягнення у математиці й електронно-обчислювальній техніці сприяли виникненню і розвитку галузі науки з прийняття рішень щодо організації управління, дослідження операцій, теорії ймовірностей і оцінювання, теорії ігор, нечіткої логіки та штучних нейронних мереж.

Таким чином, із середини ХХ ст. після Другої світової війни потреби практики викликали необхідність у спеціальному теоретичному і методологічному обґрунтуванні процесів розв'язування актуальних детермінованих і стохастичних задач з урахуванням умов ризику. Основними об'єктами задач є процеси керування у соціальних, економічних і технічних системах. Різко зросли комплексність і складність задач, збільшилась кількість взаємопов'язаних факторів, посилилась залежність між окремими елементами систем, значно зросли витрати на реалізацію рішень та можливі ризики невдачі. За таких умов у результаті розвитку й узагальнення була сформована широка і універсальна методологія розв'язання проблем — *системний аналіз* [1].

*П'ятий етап «зрілості»* (початок 70-х років ХХ ст. – початок ХХІ ст.). У цей період учені різних наук і наукових напрямів, філософи, математики, фізики, хіміки, біологи та інші виробили остаточне спільне розуміння загального поняття складної системи як структурно організованого об'єкта, у якому виділяють структури і взаємодії частин, стани і переходи та розуміння того, що парадигма системного аналізу надає можливість аналізувати складні об'єкти різної природи з позицій єдиної загальної методології.

Основна проблематика даного періоду зосереджена на дослідженні процесів складних соціальних, економічних, екологічних, технічних та біологічних систем, створенні автоматизованих систем керування. Актуальними постають слабкоструктуровані і складноформалізовані проблеми в умовах наявності ризику і невизначеностей, що містять невідомі компоненти або компоненти, які складно оцінити кількісно. Для зазначених проблем властива наявність як кількісних, так і якісних залежностей, причому, як правило, якісні та маловідомі характеристики проблеми превалюють над кількісними, і характерною є відсутність методів розв'язування задач на основі безпосередніх перетворень даних. Такі задачі частково описуються певними математичними моделями, але через недостатність наявної інформації на момент розв'язування не мають однозначного алгоритмічного розв'язку. В минулому основою розв'язання проблем даного класу були лише творчі можливості людини, її інтуїція, кваліфікація та досвід. Сучасний інструментарій мето-

дології системного аналізу дозволяє формалізувати якісні дані та виконувати пошук раціональних рішень за умов неповної і суперечливої інформації.

У цей період активно розвиваються лінгвістичні підходи до формалізації якісних понять, експертні методи оцінювання факторів задачі, характеристик об'єктів і параметрів альтернатив, методики ідентифікації і моделювання стохастичних процесів, теорія автоматичного керування, прикладна і системна математика, теорія графів, методи багатокритеріальної і багатоцільової оптимізації, еволюційні методи пошуку розв'язків [44]. Американський математик Т. Сааті запропонував популярний метод аналізу ієрархій, який дає змогу структурувати складну проблему у вигляді ієрархії і виконати кількісне порівняння альтернативних варіантів розв'язання [45]. Значного поширення набуває застосування принципів синергетики і самоорганізації в управлінні системами різної природи. Системний підхід до розв'язання різноманітних задач в управлінській діяльності відображається у розвитку методології побудови «дорожньої карти» розв'язання проблеми та у розвитку напряму управління проектами [1, 5].

Збільшення потужності комп'ютерів у поєднанні з новими інструментами і методами програмування, поява персональних комп'ютерів та розповсюдження системного і прикладного програмного забезпечення у цей період було настільки широким, що зумовило тотальне проникнення тих чи інших засобів автоматизації і комп'ютеризації у кожен сферу діяльності людини. Розпочалася ера мережевих технологій, об'єднання обчислювальних машин мережі, мереж у ще більші мережі та була сформована глобальна світова обчислювальна мережа Інтернет. За кількісним розширенням і об'єднанням систем починається наступний крок якісного розвитку корисних прикладних можливостей обчислювальних систем, етап виникнення і широкого впровадження людино-машинних систем. Варто відзначити виникнення і активний розвиток в цей період систем підтримання прийняття рішень [46].

Серед основних подій цього періоду слід відзначити створення у 1972 р. в Австрії Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (IIASA), у 1976 р. у РРФСР Інституту системних досліджень РАН та у 1997 р. в Україні Інституту прикладного системного аналізу (ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ»). Значний внесок у розвиток системного аналізу в цей період був зроблений багатьма світовими дослідниками, зокрема, Д.М. Гвішіані, М.З. Згуровським, Д.О. Поспеловим, С. Пейпертом, Б.А. Трахтенбротом, Б.А. Березовським, П. Кругманом, М.А. Айзерманом, Ф.Т. Алескеровим та іншими. Французький і американський математик Б. Мандельброт запропонував фрактальну геометрію, що знайшла застосування у дослідженні нелінійних динамічних систем.

Таким чином, у цей період відбувається процес глибокого формування системного аналізу як методу аналітичної діяльності, методу наукових досліджень. Системний метод активно використовує процес широкої комп'ютеризації і автоматизації діяльності для наукових відкриттів і здійснення технологічних розробок. Системний аналіз наприкінці ХХ ст. стає загальним світоглядом, який використовують фахівці в усіх галузях і наукових напрямах.

*Шостий сучасний етап «піднесення»* (початок ХХІ ст. – 2020 рр.) характеризується виникненням і актуальністю значної кількості складноформалі-

зовних проблем, вирішення яких ґрунтується на неструктурованій інформації за високого ступеня невизначеності. Більшість таких проблем містять лише якісний опис параметрів проблеми і зв'язків між ними, а кількісні залежності важко і часто неможливо достовірно визначити через відсутність або неповноту необхідних даних.

Розв'язування сучасних проблем ускладнюється особливостями динаміки розвитку досліджуваних систем, що проявляється у змінах структури процесів чи систем у часі, руйнуванням старих та утворенням нових взаємозв'язків між елементами системи. Як наслідок наявні історичні дані та залежності не відповідають новим умовам функціонування і структурам систем і в повному обсязі виявляються непридатними до застосування. Тому на даному етапі значного розвитку набули інструменти застосування експертних методів та методологія передбачення.

Прикладами актуальних проблем, пов'язаних з динамікою розвитку, можуть бути: *в економічних і фінансових системах* – розподіл обмежених фінансових ресурсів, прогнозування курсу цінних паперів і валют, прогнозування попиту на нові товари, наявність товарів на нових ринках, прогнозування динаміки міжнародної торгівлі тощо; *в організаційних і соціальних системах* — прогнозування впливів політичних змін на соціальні трансформації, передбачення розвитку соціодемографічних процесів, моделювання соціальних процесів під впливом природних лих та проявів тероризму, аналіз сталого розвитку суспільства тощо; *у технічних системах* — технологічне передбачення, адаптивне керування динамічними технічними об'єктами, підвищення надійності систем, прогнозування динаміки надійності та подовження строків використання складного обладнання тощо [47].

Стрімку позитивну динаміку у розвитку системного аналізу на сучасному етапі забезпечують праці таких учених, як М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова, О.П. Кузнецов, Ф.Т. Алескеров, Ф.Ф. Пашенко, П. Гудвін, П. Кабат та багато інших. Більшість досліджень виконується і тепер.

Цей період характеризується стрімким розвитком прогресивних сучасних методів інтелектуального аналізу даних і технологій штучного інтелекту, байєсівських методів і мереж Байєса (зокрема праці П.І. Бідюка), нейронних мереж (зокрема праці Ю.П. Зайченка), штучних імунних мереж, мультиагентних систем, прикладних методів на основі нечіткої логіки і теорії хаосу. Характерним є створення гібридних систем і методів, наприклад, нейронечітких моделей, нейроімунних мереж, нечітких мереж Байєса і т. ін.

Найбільш цікавим з практичних позицій постає *майбутній сьомий «інтеграційний» етап (2020–2050 рр.)*, який вже планомірно настає. Основні нагальні проблеми, які виникатимуть у найближчому майбутньому та з якими вже стикаються вчені і практики за останнє десятиріччя, — це неформалізовані динамічні проблеми у складних системах різної природи, що потребують розв'язування у режимі реального часу. Динамічні проблеми значно складніші за статичні, оскільки в їх розв'язуванні необхідно враховувати змінність у часі не тільки структури досліджуваної системи, але й усіх або певних параметрів задачі [48]. У реальних сучасних прикладних проблемах досить часто стикаються з різкими змінами структури процесів чи систем, кризовими явищами та екстремальними ситуаціями. Крім того, у таких проблемах, наприклад з часом, можуть змінюватись цілі управлін-

ня, оцінки альтернатив і сам набір альтернатив, а певні параметри задачі описуються функціями у часі. Для динамічних проблем характерним є те, що критерієм оптимальності є не функції, як у статичних проблемах, а складні функціонали, залежні від функцій часу, що описують динаміку системи, стосовно якої розв'язується проблема.

У багатьох актуальних задачах майбутнього етапу кількісні залежності невідомі через відсутність або недостовірність необхідних даних; відомі здебільшого тільки загальні закономірності, що описані розпливчасто, щодо яких побудувати строгу математичну модель неможливо. На стадії постановки задачі передбачити і спрогнозувати зміни всіх параметрів динамічних проблем дуже складно, тому такі проблеми намагаються розв'язувати покровоко і частково з постійною адаптацією до поточних умов.

Проблеми майбутнього вже не зможуть бути розкладені та зведені до розв'язування однієї чи декількох простих задач невеликим набором інструментів з існуючих методів. Здебільшого це комплексні взаємопов'язані динамічні задачі часто з різних галузей, що містять параметри та дані різної природи і мають різні ступені взаємного впливу. Характерними для таких задач є недостатність даних, умови реального часу, наявність невизначеностей та ризиків довільної природи із загрозою їх каскадного настання.

Приклади зазначених проблем:

у *фінансових, економічних і соціальних системах*: передбачення та розроблення дієвих заходів запобігання світовим фінансовим і економічним кризам та їх відвернення, точне прогнозування динаміки обсягів попиту на обраних товарних ринках, розроблення методик комплексного спільного врахування ризиків довільної природи, наприклад, економічних, фінансових, екологічних і кліматичних, соціодемографічних, біологічних і пандемічних, терористичних, політичних, технологічних та інших ризиків у межах єдиної задачі точного прогнозування динаміки світової економіки;

у *біологічних і екологічних системах*: розроблення систем комплексного «фонового» моніторингу процесів функціонування організму людини та установлення точних діагнозів захворювань, прогнозування ефективності лікування та розроблення персоналізованих ліків прямої дії, прогнозування процесу глобального потепління, кліматичних змін і впливів на біосферу через збільшення емісії CO<sub>2</sub>;

у *технічних системах*: створення автономних універсальних систем керування антропоморфною робототехнікою, побудова автономної універсальної системи керування безпілотними літальними апаратами або безпілотними автомобілями у всіх умовах, у яких здатна ефективно керувати людина, автоматизоване прийняття рішень щодо керування складними об'єктами на основі даних неруйнівного контролю, такими як атомні електростанції, хімічні підприємства, небезпечні техногенні об'єкти.

Особливістю нових проблем є їх трансгалузевість, за якої проблема одночасно стосується систем різної природи і може потребувати у межах одного загального розв'язувального процесу спільного і глибокого дослідження, наприклад, технічних, екологічних, соціальних і фінансових систем.

Натепер більшість таких проблем часто навіть не намагаються розв'язувати комплексно, зараховуючи їх до категорії проблем VUCA-світу (VUCA: volatility, uncertainty, complexity, ambiguity — нестабільність, неви-

значеність, складність, неоднозначність) [49]. З різною мірою успіху вдається розв'язувати лише окремі локальні підзадачі. Проте існуючі розв'язки певних ділянок загальних проблем не здатні забезпечити необхідний рівень автоматизації і автономності процесів у реальній людській діяльності.

Фактично проблеми майбутнього потребуватимуть спільного та взаємозв'язаного розв'язання окремих складових задач у режимі реального часу, і у зв'язку з цим уже тепер виникають два вкрай важливі напрями розвитку наукової і прикладної методології.

Сучасний світ активно рухається у напрямку автоматизації людської діяльності, і вже не тільки фізичної роботи, але й інтелектуальної розумової діяльності, зокрема в дослідженнях і прийнятті рішень. Рутинна інтелектуальна робота, передусім на частинах роботи, де необхідно обробляти великі масиви інформації, передоручається *штучному інтелекту*. Він її виконає швидше і краще, а людина зможе зосередитися на найскладніших творчих частинах.

Утім усі сучасні технології штучного інтелекту розвиваються і досягли успіху лише в комбінаторних чи обчислювальних застосуваннях, тобто у розв'язанні задач, де необхідно проаналізувати величезні масиви даних, перебрати велику кількість варіантів розв'язків і вибрати серед них найбільш прийнятні щодо заданих критеріїв. Якщо складна прикладна проблема за допомогою методології системного аналізу може бути зведена до таких постановок задач, то її, безумовно, ефективно розв'яже штучний інтелект. У найближчі два десятиріччя в діяльності, де алгоритми обробляють дані швидше, краще і в перспективі дешевше ніж людина, людська інтелектуальна праця поступово буде витіснена штучним інтелектом.

Розвиток технологій штучного інтелекту в останні роки зумовив появу і лавиноподібне збільшення технологій *інтернету речей* (IoT — Internet of Things), за якими фізичні пристрої буття обладнують можливостями обміну даними через під'єднання до обчислювальних мереж. За прогнозами експертів загальний обсяг ринку інтернету речей до 2026 р. сягне 1,11 трлн дол. США [50]. У свою чергу, поширення технологій інтернету речей спонукає до ще інтенсивнішого розвитку штучного інтелекту. Тому можна передбачати, що вже за першу половину наступного етапу сукупність усіх технологій, що належать до штучного інтелекту, стане ключовою методологією оброблення даних для прийняття рішень майже у всіх сферах, об'єднавши й інтегрувавши інші існуючі методи роботи з даними.

Але для розв'язання складних прикладних проблем майбутнього, де, крім використання існуючих знань, необхідно продукувати й нові і потрібна велика творча складова, технології сучасної обчислювальної парадигми штучного інтелекту недостатньо ефективні, а в більшості випадків непридатні.

Цікавим є те, що науковий напрям штучного інтелекту виник і розвивався як комплекс окремих інкапсульованих технологій, які побудовані на ідеях природного інтелекту та які фактично лише обслуговували обчислювальні ділянки загальних методологій аналізу систем і процесів та методів прийняття рішень. А необхідне для майбутнього етапу нове покоління технологій штучного інтелекту, які доцільно буде назвати *мислячим штучним інтелектом* (*Thinking Artificial Intelligence* або *Smart Artificial Intelligence*),

зможє з'явитись лише за допомогою якісно нової інтеграції та розвитку міцних зв'язків між системним аналізом і штучним інтелектом.

Нового значення набуває і необхідність подальшого розроблення методології системного аналізу, яка ще на стадіях постановки і декомпозиції задач фактично забезпечить адміністрування та взаємне узгодження процесів і методів розв'язання окремих галузевих задач з урахуванням комплексних ризиків системи таким чином, щоб вирішення окремих задач інтегрувались у єдине узагальнене вирішення комплексної проблеми.

Вочевидь, що в таких умовах вибір процедур і методології системного аналізу для застосування до розв'язуваної проблеми значною мірою залежить від процесу імплементації методів розв'язання задач. Це пояснюється тим, що методи, які попередньо мають усі ознаки ефективної застосовності у конкретних умовах використання, можуть виявитись неприйнятними, що надто пізно потребуватиме змін постановок локальних оптимізаційних задач чи виконання додаткових процедур системного аналізу і коригування постановки загальної проблеми. У складних динамічних проблемах реального часу такий розвиток процесу часто є неприпустимим, оскільки може призвести до втрати актуальності або до розбалансування вирішення загальної проблеми. А у критичних системах з обмеженістю ресурсів, наприклад, часу, фінансів, міцності, простору, — навіть до катастрофічних наслідків для системи.

Утім, навпаки, конкретні реалізації, застосування і коригування методів розв'язання окремих задач перебувають під безпосереднім контролем процедур системного аналізу загальної розв'язуваної проблеми. Це пояснюється тим, що вже на етапі застосування методів розв'язання окремих локальних задач необхідно враховувати, що їх проміжні розв'язки в подальшому можуть використовуватись для пошуку загального розв'язку та для виконання наступних процедур аналізу, адаптації моделей, коригування їх параметрів, ініціації повторних обрахунків тощо, що не може бути вирішено безпосередньо на рівні методу розв'язання, оскільки може залежати від загальної постановки проблеми, методів та отриманих проміжних і кінцевих розв'язків інших супутніх задач. Такі положення можуть бути вирішені на рівні виконання процедур системного аналізу і розв'язання загальної проблеми.

Отже, на майбутньому етапі, який уже настає, технології штучного інтелекту практично не зможуть розвинути якісно нові необхідні можливості без інтеграції у методологію системного аналізу, а методологія системного аналізу в багатьох галузях буде стикатися з певними труднощами у розв'язанні нових прикладних проблем без інтеграції зі штучним інтелектом ще на первісному рівні процедур дослідження систем і процесів. Можна стверджувати, що окремі процедури системного аналізу залежатимуть здебільшого від використовуваних засобів штучного інтелекту і фактично міститимуть частини цих інтелектуальних методів.

Таким чином, глибока зустрічна та взаємодоповнювальна інтеграція системного аналізу і штучного інтелекту на рівні методології постає немінучим процесом, який зрештою виявляється достатньо корисним і цілком відповідає викликам та завданням нового етапу, відповідно названого інтеграційним.

Основними факторами такого об'єднувального процесу стануть тривале зростання складності систем та актуалізація саме динамічних постановок проблем, оскільки розв'язки статичних задач уже не відповідатимуть новим

запитає галузей. Сама структура прикладних методів системного аналізу у майбутньому інтеграційному етапі буде орієнтована на дослідження систем і розв'язання проблем у динамічних умовах з урахуванням невизначеностей і передбачатиме зворотний зв'язок від реалізації методів розв'язання кінцевих окремих задач загальної проблеми.

Саме зазначений процес інтеграції забезпечить якісний перехід обчислювальної парадигми сучасних технологій штучного інтелекту до мислячої і ключовим драйвером такої трансформації буде методологія системного аналізу.

Наприкінці майбутнього інтеграційного етапу з'являться перші реалізації мислячих інтелектуальних систем із зростаючою автоматизацією процесів та автономізацією процедур. Нова методологія та реалізовані на її основі системи фактично зможуть отримувати вхідну неформалізовану проблему та знаходити і приймати рішення з мінімальною участю людини.

У результаті властиві методології системного аналізу універсальність та застосовність для систем зі складовими різної природи набудуть нових проявів, що дозволить поєднувати і спільно досліджувати різноманітні елементи довільної природи та розв'язувати надскладні проблеми реального світу комплексно.

Наприклад, можливість у реальному часі комплексно враховувати цілком різноманітні ризики у єдиній проблемі, наприклад, технічні, фінансові, екологічні, кліматичні, політичні, техногенні, соціодемографічні [51], дозволить підійти до розв'язання проблем зниження темпів глобального потепління, зменшення терористичної активності, вирівнювання балансу розвитку різних регіонів світу, що зменшить прояви загальнокризових явищ та значно зменшить непродуктивне навантаження на світову економіку; страховим компаніям і фінансовому сектору надасть додаткові можливості для розширення діапазону послуг та випадків страхування, які нині обмежені стандартними підходами до актуарних розрахунків; наблизить технічні системи до створення цілком автономних систем безпілотного керування роботехнікою, авто- і авіатранспортом тощо [52].

Вочевидь, дослідження та вирішення складних динамічних проблем майбутнього періоду більш орієнтовані не стільки на їх розв'язання за допомогою конкретних методів, а більше на опис і вибір принципів та правил застосування методів розв'язання задач, і вже у процесі функціонування системи в автоматизованому чи у напівавтоматизованому режимі реалізовуватимуться конкретні методи, які будуть найбільш релевантні поточній ситуації та стану системи відповідно до заданих правил і принципів.

Відбудеться перехід від використання методів розв'язання задач до *проектування процесу розв'язання задач* на основі палітри автоматизованих методів розв'язання. Схожий процес узагальнення та підняття на рівень вище вже відбувався у минулі десятиріччя з переходом програмування обчислювальних пристроїв від кодів до мови асемблера і потім до мов програмування високого рівня.

Отже, для того, щоб увійти в новий майбутній етап розвитку наукового напрямку системного аналізу з конкурентними можливостями доцільно сфокусувати дослідження на розробленні нових інтелектуальних методів системного аналізу та запропонувати підходи до проектування процесів розв'язання складних неформалізованих динамічних задач різноманітних галузей на основі інтеграції існуючої методології аналізу і технологій штучного інтелекту. Як влучно відзначив Пітер Друкер: «Найкращий спосіб передбачити майбутнє — це створити його» [53].

## ВИСНОВКИ

Виконано аналіз історичного розвитку системних уявлень, процесу формування і розвитку системного аналізу як наукової та прикладної дисципліни, досліджено еволюцію і перспективи проблематики та методології системного аналізу. Відзначено, що в еволюції системного підходу простежується характерна закономірність. Наприкінці кожного етапу відбувається *методологічне насичення* щодо можливостей вирішення актуальних завдань для даного періоду. Нові методи і підходи, що виникають наприкінці кожного етапу, дозволяють розв'язувати те саме коло задач і при цьому лише несуттєво підвищують ефективність процесів прийняття рішень і самих рішень. Разом з цим прогрес і виникаючі потреби прикладної науки ставлять дедалі складніші завдання і проблеми наступного рівня і вимагають пошуку якісно нових підходів до їх вирішення. Така ситуація приводить до утворення переходів і нових витків у дослідженнях та в розвитку системних ідей, що, відповідно, відображається в появі чергових етапів в еволюції системної парадигми.

У сучасному періоді розвитку науки вкрай актуальними є і будуть надалі задачі структуризації і прийняття рішень у складних динамічних системах різної природи в умовах наявності невизначеностей. Багато існуючих підходів орієнтовані на розв'язання задач «у статиці» і не можуть бути ефективно використані в сучасних реаліях. Тому за основними напрямками розвитку системного аналізу слід очікувати подальший розвиток методологій передбачення і прогнозування, методів інтелектуального аналізу даних і управління сталим розвитком, розроблення методів і підходів до оцінювання результатів альтернативних варіантів рішень та методів прийняття рішень у динаміці.

Ключовим і перспективним напрямом подальшого розвитку передбачається методологічна інтеграція технологій штучного інтелекту та процедур системного аналізу. Тому для забезпечення майбутньої конкурентоспроможності наукової галузі доцільно приділити увагу розробленню нових та універсальних інтелектуальних методів системного аналізу і підходів до проектування процесів розв'язання складних динамічних проблем довільної природи.

## ЛІТЕРАТУРА

1. М.З. Згуровский и Н.Д. Панкратова, *Системный анализ: проблемы, методология, приложения*. Киев.: Наук. думка, 2005.
2. М.З. Згуровский, *Шляхи нашого відродження*, Київ: Генеза, 2002.
3. О.В. Половцев, П.І. Бідюк, Л.О. Коршевнюк, та І.І. Семенчев, *Системний підхід до моделювання, прогнозування та управління фінансово-економічними процесами*. Донецьк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2009.
4. L. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning — I", *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199–249, 1975. doi:10.1016/0020-0255(75)90036-5
5. М.З. Згуровский, А.В. Доброногов, и Т.Н. Померанцева, *Исследование социальных процессов на основе методологии системного анализа*. Киев: Наук. думка, 1997.
6. Р.М. Нуреев, *Всемирная история экономической мысли: в 6 т.*, гл. ред. В.Н. Черковец, т. 2. Москва: Мысль, 1987.
7. А.М. Кориков и С.Н. Павлов, *Теория систем и системный анализ: учеб. пособие*. Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2008.
8. А.В. Ахутин, *Античные начала философии*. Санкт-Петербург: Наука, 2007.



9. L. Zhmud, *Pythagoras and the Early Pythagoreans*. Oxford: Oxford University Press, 2012.
10. Ф.Х. Кессиди, *Гераклит*, 3-е изд., испр., доп. Санкт-Петербург: Алетея, 2004.
11. И.Д. Рожанский, *Анаксагор*. Москва: Мысль, 1983.
12. Ф.Х. Кессиди, *Сократ*, 4-е изд., испр. и доп. Санкт-Петербург: Алетея, 2001.
13. В.П. Зубов, *Аристотель. Человек. Наука. Судьба наследия*. Москва: Едиториал УРСС.
14. М.М. Шахнович, *Сад Эпикура. Философия религии Эпикура и эпикурейская традиция в истории европейской культуры*. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2002.
15. В.А. Бронштэн, *Клавдий Птолемей*. Москва: Наука, 1988.
16. Клавдий Гален, *О назначении частей человеческого тела*, пер. С.П. Кондратьева, под ред. и с примеч. В.Н. Терновского, вступ. ст. В.Н. Терновского и Б.Д. Петрова. Москва: Медицина, 1971.
17. Леонардо да Винчи, *Избранные произведения Леонардо да Винчи*, пер. Василий Зубов, Владимир Шилейко, Абрам Эфрос. Москва: Изд-во студии Артемия Лебедева, 2010.
18. И.С. Дмитриев, *Искушение святого Коперника: ненаучные корни научной революции*. Издательство С.-Петербургского университета, 2006.
19. И.С. Дмитриев, *Увещание Галлея*. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2006.
20. А.Х. Горфункель, *Джордано Бруно*. Москва: Мысль, 1973.
21. Ю.А. Данилов, “Гармония и астрология в трудах Кеплера”, *Прекрасный мир науки*. Москва: Прогресс-Традиция, 2008, с. 253–265.
22. A. Einstein and L. Infeld, *The Evolution of Physics*. Touchstone, 1967.
23. Г.Е. Павлова и А.С. Федоров, *Михаил Васильевич Ломоносов*. Москва: Наука, 1986.
24. И. Кант, *Критика практического разума*. Київ: Юніверс, 2004.
25. Б.А. Воронцов-Вельяминов, *Лаплас*. Москва: Наука, 1985.
26. Л.Д. Белькинд, *Андре-Мари Ампер*. Москва: Наука, 1968.
27. Ч. Дарвин, *Происхождение видов путём естественного отбора*. Санкт-Петербург: Наука, 1991.
28. Д.И. Менделеев, *Периодический закон*, ред. Б.М. Кедрова. Москва: Издательство академии наук СССР, 1958.
29. *Резерфорд—ученый и учитель. К 100-летию со дня рождения*, под редакцией П.Л. Капицы. Москва: Наука, 1973.
30. Д.С. Данин, “Нильс Бор”, *Жизнь замечательных людей*. Москва: Молодая гвардия, 1978.
31. В.И. Артамонов, *Психология от первого лица. 14 бесед с российскими учеными*. Москва: Академия, 2003.
32. Е.В. Сеницын, “Тектология А. Богданова и современные методы анализа сложных систем”, *Вестник международного института А.Богданова*, № 1, с. 49–57, 2000.
33. Ю.В. Матиясевич, “Алан Тьюринг и теория чисел”, *Математическое просвещение*. Москва: Изд-во МЦНМО, 2013, вып. 17, с. 6–34.
34. J. Von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, 60th Anniversary Commemorative Ed. Princeton University Press, 2007.
35. L. von Bertalanffy, *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*, rev. ed., George Braziller, 2007.
36. Н. Винер, *Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине*, пер. с англ. И.В. Соловьева и Г.Н. Поварова; под ред. Г.Н. Поварова. Москва: Наука; Главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983.
37. У.Р. Эшби, *Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения*. Москва: ИЛ, 1962.
38. Г.Э. Фельдман, *Джон Бэрдон Сандерсон ХОЛДЕЙН 1892–1964*. Москва: Наука, 1976.
39. Ю.С. Мануйлов и Новиков Е.А., *Методология системных исследований*. Санкт-Петербург: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2008.
40. J.W. Forrester, *World Dynamics*, 2nd rev. ed., Wright-Allen Press, 1971.
41. Mihailo Mesarovic, *Abstract Systems Theory*. Springer, 1989.
42. И. Пригожин и И.Стенгерс, *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой*. Москва: Прогресс, 1986.

43. L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and Control*, no. 8, pp. 338–353, 1965. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
44. П.І. Бідюк, Л.О. Коршевніук, та Н.В. Кузнєцова, *Моделі і методи прикладної статистики: навч. посіб.* Київ: НТУУ «КПІ», 2014.
45. Т. Саати, *Принятие решений. Метод анализа иерархий*, пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. Москва: Радио и связь, 1993.
46. П.І. Бідюк, Л.О. Коршевніук, А.С. Коваленко, та О.П. Гожий, *Проектування інформаційних систем підтримки прийняття рішень: навч. посіб.* Київ: НТУУ «КПІ», 2013.
47. М.З. Згуровский и Н.Д. Панкратова, *Технологическое предвидение*. Киев: Политехника, 2005.
48. Н.Д. Панкратова, "Системный анализ в динамике диагностирования сложных технических систем", *Системні дослідження та інформаційні технології*, № 1, с. 33–49, 2008.
49. B. Nanus, *Leaders: The strategies for taking charge*. New York: Harper & Row, 1985.
50. *Internet of Things (IoT) Market Size, Share and Industry Analysis By Platform, By Software & Services, By End-Use Industry And Geography Forecast, 2019–2026, Region : Global, Report ID: FBI100307* [Електронний ресурс]. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market-100307>
51. Л.О. Коршевніук та П.І. Бідюк, "Формалізація постановки задачі керування ризиками в системах різної природи", *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 6, с. 49–54, 2013.
52. Л.О. Коршевніук, "Визначення пріоритетів ризикових ситуацій при керуванні динамічними системами", *Механіка гіроскопічних систем [Системи та процеси керування]: наук.-техн. зб.*, № 30, с. 5–16, 2015. doi:<http://dx.doi.org/10.20535/0203-377130201569860>
53. *Цитати Пітера Друкера* [Електронний ресурс]. Доступно: [https://uk.wikiquote.org/wiki/Пітер\\_Фердинанд\\_Друкер](https://uk.wikiquote.org/wiki/Пітер_Фердинанд_Друкер)

Надійшла 26.06.2020

### INFORMATION ON THE ARTICLE

**L.O. Korshevniuk**, ORCID: 0000-0003-1597-8901, Educational and Scientific Complex "Institute for Applied System Analysis" of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, e-mail: [lev@cabinet.kiev.ua](mailto:lev@cabinet.kiev.ua).

**SYSTEM ANALYSIS: EVOLUTION AND PERSPECTIVES OF FUTURE DEVELOPMENT** / L.O. Korshevniuk

**Abstract.** The paper considers the historical formation and directions of further developing system ideas in science, problem changes, and the evolution of a system analysis methodology. There are six historical periods defined from the first ancient "embryonic" (III century BC – beginning of AD) to the sixth modern "rising" period (beginning of the XX century – 2020s). Each period is described in the parameters of time intervals, main territories, outstanding scientists and researchers, events, objects of scientific studies, issues, and methodology. The seventh future "integration" period (the 2020s–2050s) is predicted to be characterized by informal, dynamic trans-industry problems in complex systems of various nature and will require real-time solutions. The issue discovers that technical science development's key and perspective direction is the methodological integration of system analysis procedures and artificial intelligence technologies.

**Keywords:** systems analysis, artificial intelligence systems, historical development of science, futurology, foresight.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ: ЭВОЛЮЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ** / Л.А. Коршевніук

**Аннотация.** Исследовано историческое формирование и обоснованы перспективные направления дальнейшего развития системных идей в науке, последовательные изменения проблематики, появление и эволюция методологии сис-

темного аналізу. Виділено шість історических етапів від першого древнього «зачаточного» (III в. до н.е. – початок н.е.) до шостого сучасного етапу «підйому» (початок ХХ в. – 2020 рр.). Кожен етап розкритий в параметрах часових інтервалів, основних територій розвитку, видатних учених і дослідників, подій, об'єктів наукового вивчення, актуальної проблематики і методології. Проаналізовано сьомий майбутній «інтеграційний» етап (2020–2050 рр.), якому будуть присущі неформалізовані динамічні трансгалузеві проблеми в складних системах різної природи, що вимагають рішень в режимі реального часу. Ключовим і перспективним напрямком розвитку передбачається методологічна інтеграція процесу системного аналізу і технологій штучного інтелекту.

**Ключові слова:** системний аналіз, системи штучного інтелекту, історическе розвиток науки, футурологія, передбачення.

## REFERENCES

1. M.Z. Zgurovsky and N.D. Pankratova, *System analysis: problems, methodology, applications*. Kiev: Naukova Dumka, 2005.
2. M.Z. Zgurovsky, *The path of our rebirth*. Kiev: Geneza, 2002.
3. O.V. Polovtsev, P.I. Bidyuk, L.O. Korshevniuk, and I.I. Semenchov, *System approach to modeling, prognostics and management by financial and economic processes*. Donetsk: TOV «Shidnyi vydavnychiy dim», 2009.
4. L. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning — I”, *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199–249, 1975. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](http://dx.doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)
5. M.Z. Zgurovsky, A.V. Dobronogov, and T. N. Pomerantseva, *Research of social processes on the basis of methodology of the system analysis*. Kiev: Naukova Dumka, 1997.
6. R.M. Nureyev, *The World History of Economic Thought: in 6 vol.*, gen. ed. by V.N. Cherkovets, vol. 2. Moscow: Mysl', 1987.
7. A.M. Korikov and S.N. Pavlov, *Systems theory and system analysis: tutorial*. Tomsk: Tomsk State University of Control System and Radio Electronics, 2008.
8. A.V. Akhutin, *Ancient principles of philosophy*. St. Petersburg: Nauka, 2007.
9. L. Zhmud, *Pythagoras and the Early Pythagoreans*. Oxford: Oxford University Press, 2012.
10. F.K. Kessidi, *Heraclitus*, 3rd ed., rev. and exp. St. Petersburg: Aleteya, 2004.
11. I.D. Rozhanskii, *Anaxagoras*. Moscow: Mysl', 1983.
12. F.K. Kessidi, *Socrates*, 4th ed., rev. and exp. St. Petersburg: Aleteya, 2001.
13. V.P. Zubov, *Aristotle. Person. The science. The fate of the heritage*. Moscow: Editorial URSS.
14. M.M. Shakhnovich, *Garden of Epicurus: Philosophy of religion of Epicurus and Epicurean tradition in history of European culture*. St. Petersburg: SPb University press, 2002.
15. V.A. Bronstein, *Claudius Ptolemy*. Moscow: Nauka, 1988.
16. Galen Claudius, *On the appointment of the human body parts*, translated by S.P. Kondrat'eva, ed. and comm. by V.N. Ternovskiy. Moscow: Meditsina, 1971.
17. Leonardo da Vinci, *Selected works Leonardo da Vinci*, translated by V. Zubov, V. Shileyko, A. Efros. Moscow: Art. Lebedev Studio Publishing House, 2010.
18. I.S. Dmitriev, *Temptation of St. Copernicus: Unscientific roots of the Scientific Revolution*. St. Petersburg: SPb University press, 2006.
19. I.S. Dmitriev, *Exhortation of Galileo*. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2006.
20. A.H. Gorfunkel, *Giordano Bruno*. Moscow: Mysl', 1973.
21. Y.A. Danilov, “Harmony and an astrology in Kepler's works”, in *Wonderful world of science*, (in Russian), Moscow: Progress-Traditcia, 2008, pp. 253–265.
22. A. Einstein and L. Infeld, *The Evolution of Physics*. Touchstone, 1967.
23. G.E. Pavlova and A.S. Fedorov, *Mikhail Vasilievich Lomonosov*. Moscow: Nauka, 1986.
24. I. Kant, *Critique of Pure Reason*. Kiev: Universe, 2004.
25. B.A. Vorontsov-Velyaminov, *Laplace*. Moscow: Nauka, 1985.

26. L.D. Belkind, *Andre-Marie Ampere*. Moscow: Nauka, 1968.
27. C. Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. St. Petersburg: Nauka, 1991.
28. D.I. Mendeleev, *Periodic law*, ed. by B.M. Kedrov. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House, 1958.
29. *Rutherford — scientist and teacher: the 100th anniversary of his birth*, ed. by P. L. Kapitsa. Moscow: Nauka, 1973.
30. D.S. Danin, *Niels Bohr (Life of Wonderful People)*. Moscow: Molodaya Hvardyya, 1978.
31. V.I. Artamonov, *Psychology in the First Person. 14 conversations with Russian scientists*. Moscow: Akademia, 2003.
32. E.V. Sinitin, “A. Bogdanov’s Tektologia and modern methods of analysis of complex systems”, *Bulletin of international A. Bogdanov institute*, no. 1, pp. 49–57, 2000.
33. Y.V. Matiyasevich, “Alan Turing and Number Theory”, *Math. Education*, Moscow: Publishing house MCCME, no. 17, pp. 6–34, 2013.
34. J. Von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, 60th Anniversary Commemorative Ed., Princeton University Press, 2007.
35. L. von Bertalanffy, *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*, rev. ed., George Braziller, 2007.
36. N. Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, transl. from En. by I.V. Solovev and G.N. Povarov; ed. by G.N. Povarov. Moscow: Nauka, 1983.
37. W.R. Ashby, *Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behavior*. Moscow: IL, 1962.
38. G.E. Feldman, *John Burdon Sanderson Haldane 1892-1964*. Moscow: Nauka, 1976.
39. Y.S. Manuylov and E.A. Novikov, *System research methodology*. St. Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy, 2008.
40. J.W. Forrester, *World Dynamics*, 2nd rev. ed., Wright-Allen Press, 1971.
41. Mihailo Mesarovic, *Abstract Systems Theory*. Springer, 1989.
42. I. Prigogine and I. Stengers, *Order out of chaos: Man’s new dialogue with nature*. Moscow: Progress, 1986.
43. L.A. Zadeh, “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, no. 8, pp. 338–353, 1965. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
44. P.I. Bidyuk, L.O. Korshevniuk, and N.V. Kuznetsova, *Models and methods of applied statistics: Tutorial*. Kyiv: NTUU “KPI”, 2014.
45. T.L. Saaty, *Decision Making. Analytic hierarchy process*, transl. from En. by R.G. Vachnadze, Moscow: Radio and communications, 1993.
46. P.I. Bidyuk, L.O. Korshevniuk, A.Ye. Kovalenko, and O.P. Gozhiy, *Design of decision support information systems: Tutorial*. Kyiv: NTUU “KPI”, 2013.
47. M.Z. Zgurovsky and N. D. Pankratova, *Technological foresight*. Kiev: Polytehnika, 2005.
48. N.D. Pankratova, “System analysis in the dynamics of diagnosing complex technical systems”, *Systems research and information technology*, no.1, pp. 33–49, 2008.
49. B. Nanus, *Leaders: The strategies for taking charge*. New York: Harper & Row, 1985.
50. *Internet of Things (IoT) Market Size, Share and Industry Analysis By Platform, By Software & Services, By End-Use Industry And Geography Forecast, 2019 - 2026, Region: Global, Report ID: FBI100307* [Online]. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market-100307>. Accessed Jan. 19, 2019.
51. L.O. Korshevniuk and P.I. Bidyuk, “Formalization of the Problem or Risk Management in Systems of Different Natures”, *Research Bulletin of the NTUU KPI*, no. 6, pp. 49–54, 2013.
52. L.O. Korshevniuk, “Prioritizing risk situations in dynamic systems control”, *Mechanics of gyroscopic systems [Systems and control processes]: Sci.-Tech. Coll.*, no.30, pp. 5–16, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377130201569860>
53. *Quotes from Peter Drucker* [Online]. Available: [https://uk.wikiquote.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D1%82%D0%B5%D1%80\\_%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%B4\\_%D0%94%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%B5%D1%80](https://uk.wikiquote.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D1%82%D0%B5%D1%80_%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%B4_%D0%94%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%B5%D1%80) (in Ukrainian). Accessed Mar. 06, 2019.