

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 519.2

КОНЦЕПЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНТРОПІЙНОГО ПРОСТОРУ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ЗАДАЧ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Козуля Т. В. – д-р техн. наук, професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, Національний Технічний Університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вирішення завдань поглиблення міждисциплінарних системних досліджень при пошуку рішень задач сталого розвитку для реальних соціально-еколого-економічних об'єктів на основі системологічного моделювання та запровадження інформаційно-ентропійного простору визначення оцінки стану та функціональності таких об'єктів для прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності.

Мета. Моделювання поточної ситуації дослідного соціально-еколого-економічного об'єкта у вигляді кооперативного зв'язку «дослідна система – навколишнє середовище» на базі системологічної моделі, що визначатиме умови досягнення цілі дослідження об'єкта завдяки виявленню синергетичної взаємодії внутрішніх і зовнішніх факторів у інформаційно-ентропійному просторі подання функціонування об'єкта.

Метод. У роботі наведено результати логіко-експериментального дослідження з оцінки стану складних об'єктів соціально-еколого-економічної природи, їх розвитку в умовах стохастичного зовнішнього середовища з позицій відповідності вимогам сталого розвитку на основі запропонованого підходу, що становить системологічну основу створення ентропійної моделі дослідного об'єкта, алгоритмізації розв'язку задачі оцінки цільового стану складних системних об'єктів за значенням екологічного функціоналу якості, що становить співвідношення ентропійних функцій стану «системи об'єкта – навколишнє середовище» і процесів взаємодії між ними, отриманих за результатами статистичного аналізу даних моніторингу об'єктів, віднесених до техногенних (економічних), соціальних і природних систем.

Результати. Вперше запропоновано використання комплексного поєднання положень системології для визначення структури об'єкта дослідження, теоретичного знання з інформаційної ентропії для опису параметрів стану будь-якого елемента систем об'єкта та метрики ентропійного опису станів і процесів. Для остаточної оцінки рівноваги функціонування дослідного об'єкта впроваджено відносний функціонал відповідності, що дозволяє оцінити наявність точок нестабільності системного і процесного характеру на основі моделі вкладеної системної структури, що важливо для прийняття рішень з передбаченням синергетичних позитивних відгуків.

Висновки. Визначені переваги запропонованого комплексного підходу ентропійного оцінювання станів систем і процесів у них на основі системологічної моделі «об'єкт – навколишнє середовище» для визначення умов регулювання сталого розвитку дослідного об'єкта завдяки використанню виявлених самодовільних і природних синергетичних відгуків. Отримано універсальну базу дослідження складних системних утворень з оцінки сталості їх стану та функціональності завдяки синергії процесів і зв'язків «об'єкт – навколишнє середовище» на основі комплексного використання системологічного моделювання, ентропійного оцінювання вхідних даних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: системологія моделювання, вкладені системні системи, ентропійна функція стійкості, синергетичні ефекти логічні структури оцінки стану процесів і станів, ентропійний функціонал.

АБРЕВІАТУРИ

НС – навколишнє середовище;
НЧС – надзвичайна ситуація;
ВСС – вкладена складна система чи структура;
MSRV – max синергетична випадкова величина;
PID – the Partial Information Decomposition framework, система часткового розкладання інформації.

НОМЕНКЛАТУРА

S_{inside}^1 – ентропія стану об'єкта;

$S_{inside_i}^1$ – ентропія стану складових систем об'єкта;

$S_{outside}^2$ – ентропія зовнішнього середовища;

$S_{outside_j}^2$ – ентропія стану систем зовнішнього середовища, що безпосередньо оточують об'єкт;

$S_{process_{inside}}^1$ – ентропія процесів, що стосуються внутрішнього простору об'єкта дослідження;

$S_{process}^1_{inside_i}$ – ентропія процесів у системах внутрішнього простору об'єкта;

$S_{process}^2_{outside}$ – ентропія процесів, що відбуваються в зовнішньому просторі об'єкта дослідження;

$S_{process}^2_{outside_j}$ – ентропія процесів, які відзначені в системах, оточуючих об'єкт зовні;

$I(X:Y)$ – взаємна інформація Шеннона;

$H(Y)$ – ентропія загальної кількості інформації;

P_r – умовний розподіл ймовірностей;

$H(Y|X)$ – умовна ентропія;

$I(X; 1,2)$ – терм компонента надмірності між змінними 1 і 2;

$I(X; 1,2 \setminus 1,2)$ – терм синергетичної інформації двох змінних;

F – функціонал відносної рівноваги;

F_{system} – функціонал оцінки рівня стану систем як порівняння відносних ентропійних функцій стану систем об'єкта та систем зовнішнього оточення;

$F_{process}$ – функціонал оцінки стану процесів як відношення ентропійної функції визначення процесів у системах і між системами в об'єкті до ентропійної оцінки стану зовнішніх процесів і впливу на об'єкт;

S_1 – загальна ентропійна характеристика стану об'єкта відповідно до дослідження на системологічному рівні «об'єкт – навколишнє середовище»;

S_2 – загальна ентропійна характеристика стану систем зовнішнього середовища відповідно до дослідження на системологічному рівні «об'єкт – навколишнє середовище»;

$\Delta S^1_{inside_i}$ – ентропійна оцінка змін у стані систем об'єкта за зменшенням величини ентропії або зростанням функції ентропії до max значення, що відповідає стану рівноваги «об'єкт – НС»;

$\Delta S^2_{outside_j}$ – ентропійна оцінка змін у стані систем НС за зменшенням величини ентропії або зростанням функції ентропії до max значення, що відповідає стану рівноваги «об'єкт – НС»;

$\Delta S_{process}^2_{outside_j} \rightarrow 0$ – зміни ентропійної функції перебігу процесів у зовнішньому середовищі, що забезпечують відсутність впливу на об'єкт;

$S^1_{inside_i} (std \text{ or } norm)$ – ентропія стану систем об'єкта, що відповідає гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S^1_{inside_i} (norm \text{ func})$ – ентропія функціональності систем об'єкта відповідно до гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S^2_{outside_j} (std \text{ or } norm)$ – ентропія стану систем навколишнього середовища, оточуючого об'єкт, за умови гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S^2_{outside_j} (norm \text{ func})$ – ентропія функціональності систем навколишнього середовища, оточуючого об'єкт, за умови гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S_{process}^1_{inside_i} (norm \text{ func})$ – ентропійна функція, що відповідає за стан перебігу процесів в системах об'єкта для підтримки гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S_{process}^2_{outside_j} (norm \text{ func})$ – ентропійна функція, що відповідає за стан перебігу процесів в системах зовнішнього середовища, оточуючих об'єкт, для підтримки гомеостазу «об'єкт – НС»;

S_1^{norm} – функція ентропії стану об'єкта, що визначає рівновагу чи досягнення цільової функції для системи «об'єкт – НС»;

S_2^{norm} – функція ентропії стану систем НС, взаємодіючих з об'єктом, що визначає рівновагу чи досягнення цільової функції для системи «об'єкт – НС».

ВСТУП

Вирішення завдань забезпечення сталого розвитку суспільства (sustainable development) є усе більш проблемним у зв'язку з великою масштабністю та інтенсивністю господарської діяльності в умовах зростання темпів її розвитку і непередбачуваності відгуків навколишнього середовища на інформаційний тиск з боку соціально-економічних систем. Проблемні області досліджень пов'язані з необхідністю своєчасного виявлення ознак розвитку НС, що викликані негативними наслідками синергетичних відгуків від прихованих (недооцінених) перебігів процесів як наслідків взаємодії природних елементів систем з техногенними факторами впливу на соціально-екологічні складові дослідного об'єкта.

Пошук шляхів, механізмів, методів, які могли б запобігти руйнуючому впливу господарської діяльності на навколишнє природне середовище, пов'язаний з обґрунтуванням і прийняттям до дії науково-теоретичних основ з конкретним змістом поняття «сталий розвиток». При розв'язку таких комплексних проблемних задач доцільно у першу чергу сформулювати міждисциплінарну наукову базу, що дозволить виявити універсальні закономірності розвитку систем будь-якої природи за реалізацією довільних процесів, що становлять самоорганізацію систем.

Теорія самоорганізації є наукою про складну й сталу нерівновагу, нестационарні та динамічні структури. Саме це й пов'язують з синергетикою як теорією самоорганізації [1–3], дисипативних структур [4–5], динамічного хаосу [6].

Загалом поширеним є визначення синергетики як теоретичного опису засобів кооперації, когерентного взаємоузгодження поведінки природних і людських систем в складно організованих утвореннях. Для системних досліджень таких об'єктів і кібернетичних ідей синергетика дозволяє виявити принципи еволюції й коеволуції систем, встановити причини нестабі-

льності та хаосу, запровадити методи управління нестійкими складними системами завдяки використанню визначених процесів підтримки їх самоорганізації і рівноваги з НС [7].

Синергетичний підхід, пов'язаний з нелінійним аналізом складних динамічних систем і явищ, обчисленням експериментальних даних і математичним моделюванням, пропонується вважати основою для формування корпоративних знань у будь-якій науковій галузі, для вивчення та отримання цільової інформації та рішень. Трансдисциплінарні риси синергетичного підходу надають можливість перенесення когнітивних схем з однієї суб'єктної області на іншу з виникненням спільних просторів існування.

У межах синергетичного аналізу щодо стану системи будь-якої складності діють еволюційні правила заборони. Це дозволяє визначати напрями переходів до стаціонарного співвідношення системи з навколишнім середовищем (гармонізації). На основі об'єднання систем об'єкта з оточуючими його системами НС в єдине утворення визначають умови для процесів синергетичної дії з підтримки самоорганізації рівноваги «об'єкт – НС» [1–14].

Грунтовні рішення на синергетичній основі вимагають комплексності структурування об'єкта дослідження системного рівня складності. Це важливо в умовах динамічних змін у природних системах, що знаходяться у взаємодії з соціально-економічним простором. Для регулювання їх сталого розвитку доцільним є звернення до положень системології.

Таким чином, пошук чи розробка методів аналізу й моделювання складних систем визначатиметься тим, що роль системи більш високого порядку (надсистеми) встановлюється через функціональне призначення (цільову функцію) та відзначені при дослідженні сутнісні властивості.

Система зі своїми функціональними властивостями є наслідок наявності функціонального запиту надсистеми на її певну функцію. У процесі функціонування системи в надсистемі її функція (поточна внутрішня детермінанта) поступово наближається до функції (граничної внутрішньої детермінанти), що задається запитом надсистеми. Таким чином здійснюється узгодження внутрішньої детермінанти з зовнішньою детермінантою, що є основою аналізу складних систем на основі системологічного підходу [15].

У разі розгляду задач сталого розвитку при вивченні об'єкта дослідження як соціально-еколого-економічної системи встановлюється ступінь адаптованості її до запиту надсистеми, що становить вимоги безпеки навколишнього середовища.

Об'єкт дослідження – системологія моделювання складних об'єктів сталого розвитку на основі подання їх в інформаційно-ентропійному просторі оцінювання стану та функціональності як «об'єкт – НС».

Предмет дослідження – побудова моделей системних об'єктів як вкладених складних систем, інформаційно-ентропійного простору оцінки стану систем і процесів у них за ентропійною функцією.

Мета дослідження – отримання системної моделі оцінювання стану динамічно розвиваючих системних об'єктів з пошуку точок сталості за рахунок виникнення синергетичних відгуків на зовнішні управлінські дії для регулювання рівноваги «об'єкт – навколишнє середовище». Такий підхід є універсальним з пошуку умов забезпечення сталого розвитку будь-якого об'єкта при певному зовнішньому оточенні.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для вирішення певних завдань соціально-еколого-економічного змісту стосовно сталого розвитку пропонується мати моніторингові результати виду «об'єкт – навколишнє середовище», інформацію щодо умов рівноваги між системами об'єкта і системами НС за рахунок перебігу певних процесів у зовнішньому середовищі та об'єкті безпосередньо. Результат таких процесів повинен мати синергетичну дію проти дестабілізуючих сил, тобто таке співвідношення функцій ентропії стану самих систем дослідного об'єкта і процесів у них, що становить \min відхилення функції порядку чи відповідності виду $S = S_{inside}^1 + S_{outside}^2$.

Динамічна стабільність чи стала рівновага в «об'єкт – НС» контролюється величиною співвідношення ентропії стану систем і процесів у них, визначається результатами ентропійного оцінювання стану взаємодії систем об'єкта з зовнішнім середовищем. Для ґрунтовності використання ентропійного оцінювання статистики і динаміки «об'єкт – НС» з прийняття рішень сталого розвитку пропонується:

1) формування моделі дослідного системного об'єкта типу «система + внутрішні процеси – навколишнє середовище = зовнішні системи + процеси впливу/взаємодії» з оцінкою її стану загальною функцією ентропії з урахуванням $S_{inside}^1, S_{inside_i}^1$ і $S_{process_{inside}^1}, S_{process_{inside_i}^1}$; $S_{outside}^2, S_{outside_i}^2$ і $S_{process_{outside}^2}, S_{process_{outside_i}^2}$;

2) визначення метрики оцінки стану систем як сталих об'єктів і процесів як динамічних систем в інформаційно-ентропійному просторі їх існування;

3) пошук синергетичних рішень для визначення точок довольного регулювання рівноважного стану системного об'єкта при розв'язанні задач сталого розвитку соціально-еколого-економічних систем.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Наукові дослідження з вивчення питань інноваційних технологій та природи нових об'єктів і їх властивостей повинні мати справу з основами синергетики як науки міждисциплінарного характеру про процеси розвитку й самоорганізації різних складних систем, ґрунтуючись на тектології Богданова А. І., теорії систем Л. фон Берталанфі, кібернетики Н. Вінера. Завдяки такій комплексності в дослідженнях надаються загальні уявлення про системи, їх структури та механізми підтримки їх цілісності або гомеостазу на осно-

ві врахування синергетичної саморегуляції через перебіг певних процесів взаємодії між системами [1–14].

Завдяки зверненню до процесів еволюції складних саморозвиваючих систем, опираючись на методи нелінійної математики й розділів природних і технічних наук, які вивчають процеси, виявляють стійкі інформаційні закономірності становлення зв'язків об'єкта з оточуючими системами НС.

Процеси в залежності від наслідків їх реалізації на стані дослідних систем і зовнішнього середовища при розв'язку проблем сталого розвитку – забруднення повітря, продовольча безпека, дефіцит води; «тимчасова захворюваність» тощо, які за екологічно-організаційним рівнем мають локальний, глобальний масштаб, пов'язуються з синергетичним відгуками [8–13]. Це є в свою чергу основою використання функціональних можливостей і властивостей об'єкта як засобу керування його якістю.

Підвищення складності систем у результаті еволюції пов'язують з проявом синергії. За думкою науковців взаємодія між системами має можливості стабілізувати нерівноважні й стохастичні варіації завдяки синергетичним явищам [8].

Дослідження складних систем пов'язуються з отриманням інформації про властивості об'єкта у цілому і його взаємодії з системами НС. Така інформація використовується для системологічного опису «об'єкт – НС», що визначає крім стану систем в об'єкті дію сил зв'язку між ними і з системами НС та особливості щодо встановлення гомеостазу об'єкта з НС. За думкою науковців це можливо завдяки стійкості синергії до шуму [5–8].

Кількісне визначення синергії між стохастичними змінними є важливою задачею теорії інформації [9]. Інформаційна синергія виникає тоді, коли багато джерел разом прогнозують результат змін краще, ніж сума прогнозів за окремими джерелами, тобто об'єктні процеси розглядаються цілісно через основні положення теорії інформаційної синергії.

Проведення процесу синергетичного моделювання за умови міждисциплінарних досліджень загалом становить такі складові [14–17]:

- 1) постановка завдання в дисциплінарному плані, в т.ч. міждисциплінарна експертиза;
- 2) визначення, аналіз, оцінка дослідних даних щодо основних процесів, зворотних зв'язків за принципами синергетики на емпіричному матеріалі;
- 3) побудова когнітивної моделі для відображення структурно-функціональних зв'язків в об'єкті у вигляді «дослідна система – навколишнє середовище» для формалізації динаміки;
- 4) математичне рішення моделі для визначення умов рівноваги та синергетичних ефектів від окремих процесів взаємодії «об'єкт – НС»;
- 5) прийняття рішень щодо коригування моделі на основі прогностичних даних у часовій динаміці моделі відповідно до реальної системи.

Задача побудови моделі на єдиній платформі інформаційної ентропії для узгодження в одній моделі

статисти станів складових систем об'єкта і процесів внутрішнього характеру і зовнішнього впливу систем НС на об'єкт розглядається в даній статті.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

При комплексному науковому пошуку доцільно спочатку використати системно два підходи методології дослідження: *аспектний* – акцентування уваги на окремих задачах проблеми з позицій актуальності та врахування ресурсів; *концептуальний* – встановлення ключових положень, що визначають загальні напрями, архітектоніку та поступовість досліджень. У такому порядку будується певний вектор пошуку відповіді на питання наукового порядку та виходу з невизначеності щодо стану об'єкта дослідження і перебігу процесів в ньому з підтримки його функціональності через встановлення інформації про нього та знання про його природу.

Невизначеність знижується на кількість інформації, яка отримана в процесі вибору або ухвалення рішення з наявного числа альтернатив. До уваги береться саме інформація, а не дані. Під *даніми* розуміють початкові відомості (сигнали) про варіації (відхилення, невідповідності) змінних (ступінь агрегації низький). При формуванні інформації розрізняють проміжні відомості як агрегація первинних даних, що інформують про динаміку змін; заключні відомості – нагромадження й агрегація інформаційних даних, що використовують у процесі прийняття рішень [16–17].

Синергетичний підхід має на увазі дослідження системних утворень «об'єкт – навколишнє середовище (зовнішні системи)», надання інформації щодо стану об'єкта з виходом на знання і управляючу дію щодо отримання цільового результату з інновації чи збереження природної цілісності об'єкта.

У наукових публікаціях простежується дві головні концепції проведення таких комплексних досліджень, що мають включати мезо- та макрорівні розгляду складних систем, а саме синергетичні аспекти теорії інформації (синергетична інформація, отримання знань) і синергічна ентропія в теорії ентропії стосовно визначення динамічних змін і встановлення логічної узгодженості «стан – процес».

Отже, з урахуванням наявного зовнішнього середовища, результатів виявлення процесів, що контролюють умови функціонування об'єкта, формується основа для управління якістю дослідного об'єкта як системного утворення, що визначається техногенним, природним чи соціальним аспектами [7–16].

Змінність стану систем і їх функціональності уразі динамічної природи спостережуваних об'єктів потребує своєчасного отримання інформації стосовно результату Y за допомогою набору джерел змінних $X \equiv \{X_i\}_i$ згідно з класичним врахуванням взаємної інформації Шеннона [11]:

$$I(X : Y) = H(Y) - H(Y | X), \quad (1)$$

де $H(Y)$ – ентропія Y позначає загальну кількість інформації, необхідної в середньому для визначення унікального значення Y :

$$H(Y) = -\sum_y \Pr(Y = y) \log_2 \Pr(Y = y). \quad (2)$$

Для умовної ентропії $H(Y|X)$ відповідно до ланцюгового правила $H(X, Y) = H(X) + H(Y|X)$ мають вираз виду

$$H(Y|X) = -\sum_x \Pr(X = x) \sum_y \Pr(Y = y | X = x) \times \log_2 \Pr(Y = y | X = x) \quad (3)$$

Таким чином позначається решта ентропії Y , враховуючи, що $H(X)$ та $I(X:Y)$ поширюються на вектори змін у системі «об'єкт – НС».

Запропоновано для урахування невизначеності щодо Y ввести і використовувати поняття максимально синергетичних випадкових величин (MSRV). Типовий MSRV має близько 75 % максимально можливої інформації з X . Це означає, що набір MSRV є розрахунковим або взаємна інформація невеликого набору MSRV стає максимально можливою взаємною інформацією для практичного використання [10].

Пошук синергетичних ефектів при наявності, дії, взаємодії певних факторів внутрішнього характеру і зовнішнього починається з визначення набору дискретних стохастичних змінних X , який відображають матрицею спільних ймовірностей розмірності m^n , де n – кількість змінних; m – кількість можливих значень на змінну. Ця матриця однозначно визначена $m^n - 1$ незалежними параметрами, кожен на одиничній лінії.

За алгоритмом розрахунку максимально синергетичних випадкових величин для встановлення синергетичної інформації розглядається розподіл $\Pr(X_1, X_2, Y)$. Усі змінні обмежені однаковою кількістю можливих значень відповідно до умов експерименту так названим «простором стану». До робочих відносять дані, які отримані шляхом вибіркової вибірки розподілу ймовірностей з виміром синергійної інформації $I_{\text{syn}}(X \rightarrow Y)$ [10].

Більшість теоретичних робіт щодо визначення синергетичної інформації використовує систему часткового розкладання інформації PID, що становить

$$I(X:Y) = \text{synergy} + \text{individual}. \quad (4)$$

Синергетична інформація Y зберігає інформацію про X , менше інформації вона може зберігати про окремі X_i і навпаки, оскільки ці два типи інформації потрібно підсумувати до величини $I(X:Y)$ як невід'ємного терму. В цьому випадку синергетична інформація $I_{\text{syn}}(X \rightarrow Y)$ не має даних про кількість «індивідуальної» інформації, що Y може зберігати про X_i . Синергетична інформація $I_{\text{syn}}(X \rightarrow Y)$ встанов-

люється за максимізацією ідентичності $I_{\text{syn}}(X \rightarrow X)$, яка зберігає максимум інформації про всі окремі змінні X_i . Для успішності запропонованої вимоги, щоб міра синергії виконувалась, синергетична інформація та індивідуальна інформація є взаємозалежними – збільшення однієї складової означає зменшення на стільки ж іншої [10–12].

Синергетичний підхід щодо дослідження системних утворень враховує зміни стану систем, зміни умов функціонування об'єкта у динамічному сенсі відповідно до поставлених задач для прийняття рішень. Згідно з наданою основою аналізу виявлення синергетичних ефектів при дослідженні складних систем (1)–(4) для моделі «системна структура дослідної системи – системи навколишнього середовища» запропоновано таку послідовність інформаційного оцінювання стану об'єкта з урахуванням невизначеності ситуації при спостереженнях [7–17]:

1) оцінка моніторингової інформації – умовний розподіл ймовірностей, умовна ентропія щодо результатів вимірювань показників стану та змінних;

2) пошук факторів впливу на результат підсилюючої позитивної дії чи факторів послаблення негативного зовнішнього впливу відповідно до оцінки стану дослідної системи чи цільової функції з урахуванням досвіду використання методу PID, методики роботи з синергетичною інформацією MSRV, характеристики взаємної і повної інформації;

3) отримання синергетичної інформації для повного і цілісного визначення ситуації «об'єкт – НС» у вигляді $\Pr(X_1, X_2, Y)$ на основі використання статистичного аналізу, ентропійного оцінювання при дослідженнях «стан-процес»;

4) визначення синергетичних дій в аналізованій ситуації з метою прийняття рішень щодо підсилення позитивних ефектів чи реалізації цільової функції.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Пропонується для характеристики статичних і динамічних результатів дослідження системної структури об'єкта та його оточуючого середовища, їх взаємодії використати ентропійну функцію як універсальну основу побудови системологічної моделі об'єкта дослідження, встановлення синергетичних ефектів в реалізації стану «об'єкт – НС» та оцінки зв'язку «стан – процес – зміни – стан».

Рекомендовано за теорією ентропійного аналізу для отримання детермінованої інформації при вирішенні питань соціально-еколого-економічного змісту використати інформаційну природу функції ентропії для аналізу стану системи та її функціональності. Враховуючи досвід застосування критерію ідентичності інформації на основі асоціацій ідентичності цільового джерела [12], визначаються ідентичності частин інформації відповідно до асоціативних зв'язків між цільовою функцією та змінними джерела при наявності обмежень на значення синергетичних термів. Пропонується використати загальні вирази, які відокрем-

люють кожен терм PID на стохастичний та детермінований компонент. У разі складного об'єкта «система – НС» введення такої ідентифікації при розгляді системи факторів дозволить встановлювати інформацію щодо наявності синергії.

Для створення єдиного матеріального та інформаційного простору складної системи, універсальної основи оцінювання стану, дії та взаємодії чинників будь-якої природи пропонується ентропійна та синергійна функція системних рішень. Ця функція дозволить надати комплексну оцінку складноструктурованим системним об'єктам і їх компонентам/елементам із можливістю співставлення оціночних результатів для ідентифікації стану та динаміки систем.

При наявності конкретної цілі X , утвореної однією змінною чи набором змінних і двома змінними (первинні джерела) 1 і 2, за якими необхідно надати інформацію про X , взаємна інформація кожної змінної про ціль визначається як

$$I(X;1) = I(X; 1.2) + I(X; 1 \setminus 2). \quad (5)$$

де $I(X; 1.2)$ – терм компонента надмірності між змінними 1 і 2 при спостереженні 1 або 2 окремо; $I(X; 1 \setminus 2)$ або $I(X; 2 \setminus 1)$ – терми кількісного визначення компонента, унікального для 1 або 2, відповідно, – інформація, яку отримують за однією зі змінних, але її неможливо отримати за іншою [12].

Спільна інформація 1 і 2 визначається за таким обчислюванням

$$I(X;12) = I(X; 1.2) + I(X; 1 \setminus 2) + I(X; 2 \setminus 1) + I(X;12 \setminus 1,2), \quad (6)$$

де $I(X;12 \setminus 1,2)$ – терм синергетичної інформації двох змінних, тобто інформація, яку можна отримати лише при комбінації двох варіабельностей (при поєднанні двох змінних) [12].

Враховуючи рівності стандартних інформаційно-теоретичних ланцюгових правил, мають таке визначення інформації:

$$I(X;12) = I(X; 1) + I(X; 2 \setminus 1) = I(X; 2) + I(X; 1 \setminus 2), \quad (7)$$

де $I(X;1 \setminus 2)$ – умовна взаємна інформація, тобто середня інформація, яку 2 надає про X , як тільки знання 1 відоме, то розкладається

$$I(X; 2 \setminus 1) = I(X; 2 \setminus 1) + I(X;12 \setminus 1,2). \quad (8)$$

Аналогічно визначається умовна взаємна інформація, якщо 1 надає про X інформацію, як тільки знання 2 відоме $I(X;1 \setminus 2)$.

Отже, при дослідженні складного об'єкта, рішення щодо природної рівноваги чи досягнення цільової функціональності встановлюється завдяки узгоджен-

ню роботи інформації внутрішнього і зовнішнього характеру (вирази (1–8)). Умовна інформація дорівнює сумі унікальних і синергетичних умов (рівняння (4)).

Відповідно до методологічних основ визначення інформаційно-ентропійного простору через функцію ентропії стану за емпіричними даними та інформації щодо ситуації в об'єкті, якій взаємодіє з системами навколишнього середовища, модель «об'єкт – НС» на макрорівні дослідження надається у вигляді вкладеної системної структури (рис. 1).

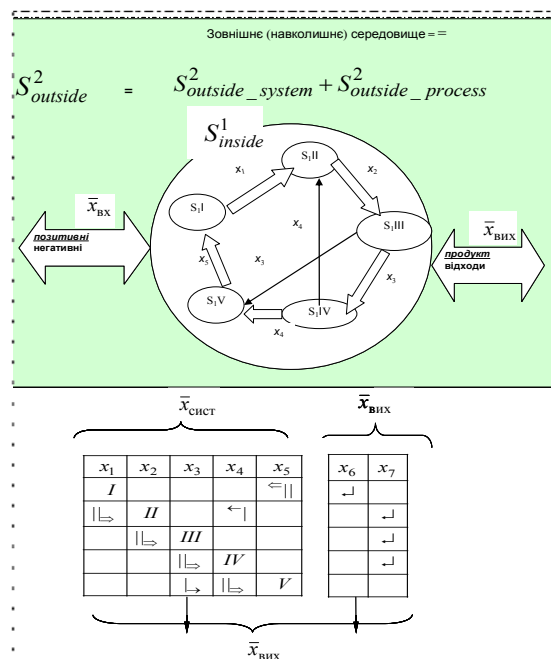


Рисунок 1 – Системологічне подання системи дослідження як «об'єкт – навколишнє середовище»

Для відображення аналітичної моделі об'єкта як ВСС враховують кооперативний зв'язок двох систем, що визначається узагальненою ентропією як функцією стану систем об'єкта і НС та процесів, що мають місце в внутрішньому просторі систем об'єкта і зовні, як результат взаємодії «об'єкт – НС» (рис. 2).

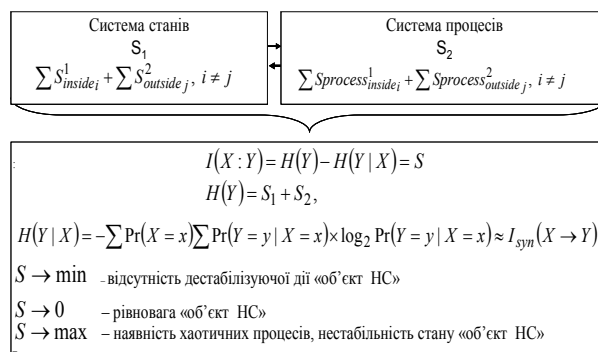


Рисунок 2 – Схема аналітичної моделі «об'єкт – НС»

Відповідно до запропонованої методології системологічного підходу подання аналітичної моделі дослідного об'єкта соціально-еколого-економічної природи з урахуванням синергетичних відгуків при певних взаємодіях його з НС розроблено алгоритм з по-

шуку рішень з сталого розвитку «об'єкт – НС», що враховує у комплексі всі рівні дослідження від локального до макрорівня оцінки стану об'єкта (рис. 3).

Алгоритмічне забезпечення передбачає, що дослідний системний об'єкт відповідає меті поставленої задачі, знаходиться у стані рівноваги завдяки сталості його функціональності за умови наявності внутрішньої та зовнішньої стабільності взаємодії «об'єкт – НС». Таким чином виключаються точки напруги щодо порушення стану рівноваги, підтримуються встановлені механізми довільного регулювання гомеостазу в системах об'єкта та НС завдяки перебігу процесів, що забезпечують функціональність «об'єкт – НС» і виключають дестабілізуючий вплив між системами.

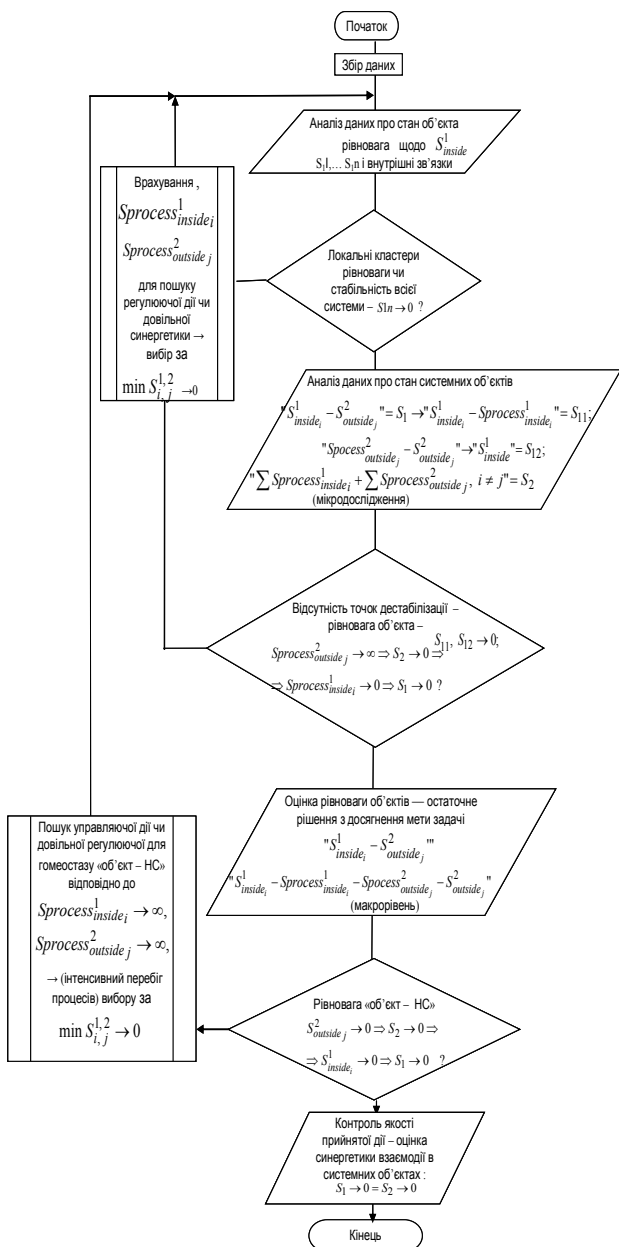


Рисунок 3 – Алгоритмічне забезпечення реалізації задачі оцінювання за ентропійної функцією стану «об'єкт – навколишнє середовище»

Відповідно до наданої методики аналізу пропонується така система ентропійного оцінювання:

1) функціонал оцінки відносної рівноваги, що визначається як відношення функції стану «об'єкт – НС» до функції характеристики процесів у складових і в системі «об'єкт – НС» (рис. 1, 2):

$$F = \frac{F_{system}}{F_{process}} = \frac{S_{inside_i}^1 = 0 / S_{process_{inside_i}^1} \rightarrow 0}{S_{outside_j}^2 = 0 / S_{process_{outside_j}^2} \rightarrow 0} \rightarrow 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{S_{inside_i}^1 / S_{outside_j}^2}{S_{process_{inside_i}^1} / S_{process_{outside_j}^2}} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{S_1}{S_2} \rightarrow 0 \Rightarrow F = 0;$$

2) рішення щодо досягнення рівноваги на локальному рівні спостережень «об'єкт – НС», отримане за результатами аналізу та оцінки таким чином:

$$\frac{S_{inside_i}^1 = \max = \Delta S_{inside_i}^1 \rightarrow 0 \Rightarrow S_1 = 0}{S_{outside_j}^2 = \max = \Delta S_{outside_j}^2 \rightarrow 0 \Rightarrow S_2 \rightarrow 0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta S_{process_{outside_j}^2} \rightarrow 0.$$

– рівновага систем об'єкта при рівноважному стану зовнішніх систем, що дозволяє реалізувати ситуацію відсутності впливу на об'єкт $\rightarrow F \rightarrow 0$;

$$\frac{S_{inside_i}^1 = \max \left(S_{process_{inside_i}^1} = \max \rightarrow \Delta S_{inside_i}^1 \rightarrow 0 \right) \Rightarrow}{S_{outside_j}^2 = \max \left(S_{process_{outside_j}^2} = \max \rightarrow \Delta S_{outside_j}^2 \rightarrow 0 \right) \Rightarrow}$$

$$= \frac{S_1 \rightarrow 0}{S_2 \rightarrow 0} \Rightarrow \Delta S_{process_{outside_j}^2} \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta S_1 \rightarrow 0,$$

– рівновага систем об'єкта, що мають максимальне значення ентропії стану після перебігу внутрішніх процесів синергетичної дії $S_{process_{inside_i}^1} = \max$ при рівноважному стану зовнішніх систем $\Delta S_{outside_j}^2 \rightarrow 0$ за умовами їх гомеостазу $S_{process_{outside_j}^2} = \max$, що усуває вплив систем НС на об'єкт і таким чином мають ситуацію стабілізації «об'єкт – НС» $\rightarrow F \rightarrow 0$;

3) оцінка умов рівноваги, яка визначає можливості систем об'єкта і зовнішнього середовища зберігати свої функціональності без порушення гомеостазу «об'єкт – НС» за рахунок зростання перебігу процесів синергетичної дії – нівелювання впливу на об'єкт, підтримка процесів стабілізації ситуації відповідно до співвідношення з нормованими чи функціональними значенням (макрорівень досліджень) (рис. 3):

$$F = \frac{F_{system}}{F_{process}} = \frac{\left(\frac{S_{inside}^1}{S_{inside}^1 (std or norm)} \right) / \left(\frac{S_{process}_{inside}^1}{S_{process}_{inside}^1 (std or nor)} \right)}{\left(\frac{S_{outside}^2}{S_{outside}^2 (std or norm)} \right) / \left(\frac{S_{process}_{outside}^2}{S_{process}_{outside}^2 (std or nor)} \right)}$$

$$\rightarrow 1 \Rightarrow \frac{\left(\frac{S_{inside}^1}{S_{inside}^1 (norm func)} \right) / \left(\frac{S_{outside}^2}{S_{outside}^2 (norm func)} \right)}{\left(\frac{S_{process}_{inside}^1}{S_{process}_{inside}^1 (norm func)} \right) / \left(\frac{S_{process}_{outside}^2}{S_{process}_{outside}^2 (norm func)} \right)}$$

$$\rightarrow 1 \Rightarrow \frac{S_1 / S_1^{norm}}{S_2 / S_2^{norm}} \rightarrow 1 \Rightarrow F = 1;$$

4) максимізація ентропії з характеристики стану об'єкта як $S_1 \rightarrow \infty$ при $S_2 \rightarrow 0$, що є фактом перебігу процесів, не спрямованих на стабілізацію ситуації, визначається як $F \rightarrow \infty$ і значенням функціоналу, що не становить нульового значення – $0 < F < 1$:

$$\frac{S_{inside}^1 = \max \left(S_{process}_{inside}^1 = \max \rightarrow \Delta S_{inside}^1 \rightarrow \infty \right)}{S_{outside}^2 = \max \left(S_{process}_{outside}^2 = \max \rightarrow \Delta S_{outside}^2 \rightarrow 0 \right)}$$

$$\Rightarrow \frac{S_1 \rightarrow \infty}{S_2 \rightarrow 0} \Rightarrow \infty;$$

– нестабільність за рахунок позитивного відгуку об'єкта на зовнішній вплив;

$$\frac{S_{inside}^1 = \min \left(S_{process}_{inside}^1 = \max \rightarrow \Delta S_{inside}^1 \rightarrow \max \right)}{S_{outside}^2 = \max \left(S_{process}_{outside}^2 = \max \rightarrow \Delta S_{outside}^2 \rightarrow \infty \right)}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta S_1 \rightarrow \min}{S_2 \rightarrow \infty} \Rightarrow \infty$$

– нестійка стабільність при внутрішніх можливостях систем об'єкта, але при постійній дії дестабілізуючих зовнішніх впливів.

Відповідно до наданого алгоритмічного забезпечення (рис. 3) при дослідженні складних об'єктів на системологічному рівні розв'язку задач відзначаються точки напруги в будь-якій складовій системі об'єкта дослідження і систем НС. Вони вважаються промоторами порушення рівноваги (стабільності стану), ініціалізації перебігу стохастичних процесів, порушення мереж зв'язку, роботи програм тощо. Це фіксується значеннями ентропійної функції стану та ентропійної функцією функціональності «об'єкт – НС» згідно з

запропонованим відносним ентропійним функціоналом рівноваги (формули (9)–(14)).

Нівелювання дії негативних ситуацій – це пошук процесів, що діють в системі «об'єкт – НС» і є при певному корегуванні каталізаторами позитивних довірливих процесів стабілізації ситуації, тобто ініціаторами синергетики сталості «об'єкт – НС».

5 РЕЗУЛЬТАТИ

При моделюванні ситуації за результатами дослідження полігону «Зміївська ТЕС – НС» стосовно го-меостазу «об'єкт – НС» відзначено, що надмірне надходження забруднювачів в НС викликає перебіг процесів у ґрунтах. Проведено аналіз величин ентропії перебігу реакцій за умови надмірного забруднення та співставлення з результатами фазового аналізу проб ґрунтів на наявність речовин, що нівелюють негативні наслідки за рахунок утворення з'єднань, які містять техногенні елементи. Це є певним синергетичним ефектом згідно з відсутністю їх в рослинному матеріалі, тобто зовнішні процеси своєю результативністю забезпечують стійкість «техногенний об'єкт – природне навколишнє середовище» (рис. 4) [19].

Таким чином, відповідно до ситуації навантаження ґрунтів важкими металами від викидів ТЕС відбувається ініціалізація перебігу процесів, що зв'язують їх у нерозчинні речовини. Цим досягається довільне очищення ґрунтів, а тим самим створюється бар'єр до забруднення рослин, як ланцюга подальшого забруднення НС. Відбувається реалізація ситуації синергетики за моделлю (11).

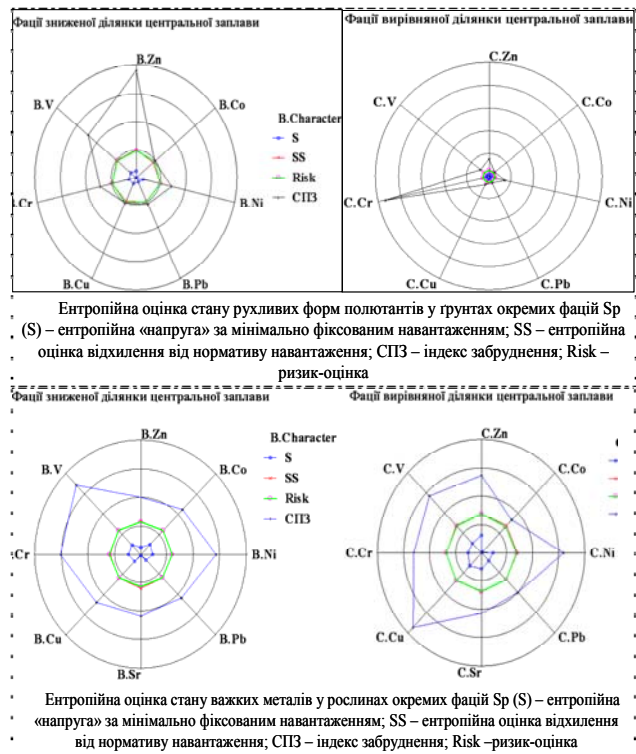


Рисунок 4 – Результати реалізації ентропійного аналізу і моделювання ситуації за станом «об'єкт – навколишнє середовище»

Аналогічні результати щодо використання ентропійної функції в аналітичних цілях для оцінювання стану дослідних об'єктів і перебігу процесів в їх системах і оточуючому середовищі за концепцією інформаційно-ентропійного простору та побудови моделей ВСС отримані при досліді «полігон відходів – НС», «підприємство – захворюваність населення», «підприємство – природні екосистеми» тощо за відповідним алгоритмом ентропійного аналізу «стан – процес» [16–17], [19].

6 ОБГОВОРЕННЯ

Застосування методології комплексної оцінки на основі інформаційно-ентропійного аналізу стану і процесів дозволило на практиці отримати:

1) характеристики екологічного стану об'єкта з урахуванням оточуючого середовища, тобто взаємодії «об'єкт – НС», у вигляді оцінки імовірності порушень екологічної рівноваги, ризику виникнення дестабілізуючих процесів і формування термодинамічного потоку факторів впливу на еколого-соціальні системи з боку техногенних систем;

2) оцінку екологічного ризику і ризику здоров'ю населення як інтегрованих характеристик ефектів дії на живий організм дестабілізуючих факторів НС;

3) прогнози з можливості стабілізації ситуації за рахунок позитивної синергетики процесів, що визначають саморегулювання відповідно до співвідношення негативних факторів, які промотують нівелювання негативних явищ і наслідків як-то забруднення екосистем, захворюваність населення [16–17], [19].

Відповідно до практики з реалізації ентропійного підходу розв'язку задач якості в межах проблем сталого розвитку запропоновано схему алгоритмічного забезпечення узагальненого вигляду для оцінки рівноваги в системах виду «об'єкт – НС» (рис. 5) [16–17], [19].

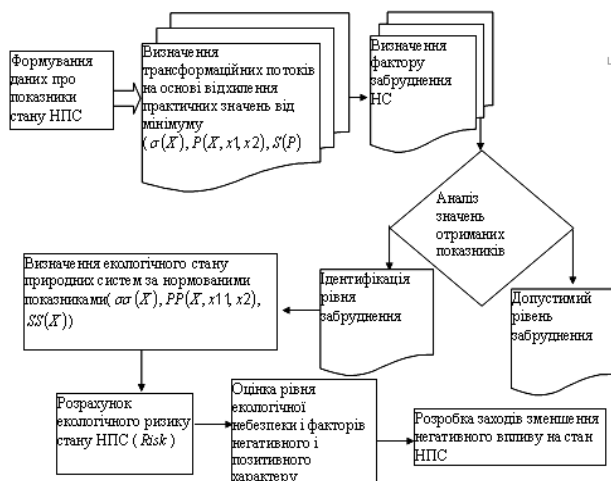


Рисунок 5 – Алгоритм виявлення впливу соціально-економічних об'єктів на навколишнє середовище

Таким чином, на рівні інформаційного аналізу ситуації у дослідженій складній системі «об'єкт – НС» © Козуля Т. В., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-3

при використанні ентропійної функції визначення станів і процесів є можливість виявити точки напруги, що призводять до дестабілізації системи, або встановити можливості підтримки самодовільного регулювання рівноваги за рахунок синергетики позитивних ефектів перебігу певних процесів.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано комплексне оцінювання стану та функціональності системних об'єктів для розв'язку задач сталого розвитку за такими рішеннями:

1) формування моделі дослідного системного об'єкта типу «система – навколишнє середовище (зовнішні системи впливу/взаємодії)» за системологічним поданням його складної структури для опису стану і процесів в системах об'єкта та зовнішньому навколишньому оточенні;

2) визначення метрики оцінки стану систем як сталих об'єктів і процесів як динамічних систем в інформаційно-ентропійному просторі їх існування завдяки впровадженню ентропійної оцінки відношення «стан/процес» та функціоналу відносно рівноваги для загального висновку щодо гомеостазу «об'єкт – НС»;

3) надання синергетичних рішень для визначення точок довольного регулювання рівноважного стану системного об'єкта при розв'язанні задач сталого розвитку соціально-еколого-економічних систем.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у комплексному вирішенні завдань сталого розвитку складних систем як «об'єкт – НС» на основі системологічного їх відображення в інформаційно-ентропійному просторі стану та функціонування для пошуку можливостей врахування процесів саморегулювання і самопідтримки об'єкта на певному рівні функціональності за рахунок відзначення позитивних процесів синергетичного характеру.

Практична цінність полягає у можливості знаходити стійкі рішення сталого розвитку об'єкта і заощаджувати ресурси його підтримки завдяки використанню аналітичної системи запропонованої концепції інформаційно-ентропійного простору пошуку рішень на основі врахування синергетичних ефектів.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці відповідної бази інформаційної підтримки побудови ВСС і автоматизації розрахунків ентропійної функції станів і процесів на рівні їх універсалізації з пошуку синергетичних рішень для сталого розвитку «об'єкт – НС».

ПОДЯКИ

У даній роботі використано результати, отримані автором протягом 2012–2021 років на кафедрі програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління (АСУ) Національного технічного університету «ХПІ» завдяки науковій співпраці з Українським науково-дослідницьким інститутом екологічних проблем, надалі з ГП «УкрНТЦ «Енергосталь».

ЛІТЕРАТУРА

1. Haken H. Synergetics: Introduction and Advanced / H. Haken. – Topics Springer Science & Business Media. – 2004. – 758 p.
2. Zyrianov A. Synergetic Modeling of the System of State Organization of Society / A. Zyrianov, S. Likholetova, A. Bauken // WISDOM. – 2022. – Vol. 23, № 3. – P. 103–113. DOI: <https://doi.org/10.24234/wisdom.v23i3.829>
3. Designing synergetic and sustainable policy mixes – a methodology to address conflicting environmental issues / [H. Kosowa, W. Weimer-Jehlea, Ch. D. Leóna, F. Minna] // Environmental Science & Policy. – 2022. – Vol. 130 – P. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.007>
4. Socio-technical energy scenarios: State of the art and CIB-based approaches / [W. Weimer-Jehle, S. Vögele, W. Hauser et al.] // Clim. Change. – 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02680-y>
5. Weitz N. SDG Synergies: An Approach for coherent 2030 / N. Weitz, H. Carlsen, C. Trimmer. – Agenda Implementation. SEI Policy Brief May. – 2019. DOI: <https://www.sei.org/wpcontent/uploads/2019/04/sei-brief-2019-sdg-synergies-2.pdf>
6. Boeing G. Visual Analysis of Nonlinear Dynamical Systems: Chaos, Fractals, Self-Similarity and the Limits of Prediction / G. Boeing. – Systems. – 2016. – Vol. 4, № 37. – 18 p. DOI: 10.3390/systems4040037.
7. Князева Е. Н. Синергетика: Нелинейность времени и ландшафты коэволюции. / Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов. – М. : КомКнига, 2007. – 272 с.
8. Corning P. A. Systems Theory and the Role of Synergy in the Evolution of Living Systems / P. A. Corning // Systems Research and Behavioral Science Syst. – 2013. – № 15. – P. 273–295. DOI: <https://doi.org/10.1002/sres.2191>
9. Shapiro J. A. Evolution: A View from the 21st Century. FT Press Science: Upper Saddle River, NJ. / J. A. Shapiro. – Evol. Intel. – 2012. – 5:207–209. – P. 207–209. DOI: 10.1093/gbe/evs008
10. Quax R. Quantifying synergistic information using intermediate stochastic variables / R. Quax, O. Har-Shemesh, P. Sloot // Entropy. – 2017. – 19(2). 85. DOI: <https://doi.org/10.3390/e19020085>
11. Shannon C. E. Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon, W. Weaver. – University Illinois Press : Champaign, IL, USA, 1963. – 131 p.
12. Chicharro D. The Identity of Information: How Deterministic Dependencies Constrain Information Synergy and Redundancy / D. Chicharro, G. Pica, S.ID Panzeri // Entropy. – 2018. – 20. 169. DOI: 10.3390/e20030169
13. Perdigão Rui A. P. Polyadic Entropy, Synergy and Redundancy among Statistically Independent Processes in Nonlinear Statistical Physics with Microphysical Codependence / Rui A. P. Perdigão // Entropy. – 2018. – 20(1). 26. – 9 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20010026>
14. Techno-Ecological Synergies of Solar / [R. Hernandez, A. Armstrong, J. Burney et al.] // Energy for Global Sustainability. United States. – 2019. – P. 560–568. – Web. Vienna: Premier Publishing s.r.o., 2020. – P 43–64. DOI: 10.1038/s41893-019-0309-z.
15. Бондаренко М. Ф. Системологические методы концептуального моделирования слабоструктурированных проблемных областей на основе естественной классификации / [М. Ф. Бондаренко, С. И. Моторин, О. А. Нестеренко, Е. А. Соловьева] // Проблемы бионики. – 1999. – Вып. 51. – С. 9–18.
16. Kozulia T. Comprehensive study of the systemic formation «object-environment» safety state / T. Kozulia, M. Kozulia, I. Didmanidze // Technogenic and Ecological Safety. – 7(1/2020). – P. 3–12. doi: 10.5281/zenodo.3558994
17. Kozulia T. Methodical bases of information support for complex analysis of system objects difficult / weakly structured / T. Kozulia, M. Kozulia // Modern Problems Of Computer Science And IT-Education : collective monograph / [editorial board K. Melnyk, O. Shmatko]. – Vienna : Premier Publishing s.r.o., 2020. – P 43–64. ISBN 978-3-903197-19-0
18. Бондарь А. В. Динамика информационной энтропии проектов и практические аспекты ее оценки / А. В. Бондарь // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – № 2 (4). – С. 45–52.
19. Kozulia T. V. Using the systemological basis and information entropy function in the study at uncertainty conditions of system-structured objects / T. V. Kozulia, M. M. Kozulia // Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. – 2022. – № 3 (139). – P. 118–127. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85135587722&origin=resultslist&sort=plf->
Стаття надійшла до редакції 29.03.2023.
Після доробки 11.05.2023.

UDC 519.2

THE CONCEPT OF INFORMATION-ENTROPY SPACE FOR SYSTEM OBJECTS MODELS BUILDING USED IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT TASKS

Kozulia T. V. – Doctor of Science, Professor of Software Engineering and Intellectual Technology Management department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Solving tasks of interdisciplinary research deepening during sustainable development problems solutions search for real social-ecological-economical objects based on systemological modelling and introducing information-entropy space of such objects state and functionality determining for making managerial decisions in uncertainty conditions.

Objective. Modelling current situation of researched social-ecological-economical object as the cooperative connection «studied system-environment» based on systemological model, which determines object study goal conditions due to discovery of internal and external factors interaction inside information-entropy space of object functioning representation.

Method. The paper presents the logical-experimental research results of complex social-ecological-economical objects state estimation, their development in stochastic environment conditions from the point of view of sustainable development requirements match based on proposed approach. This approach is the systemological basis of studied object entropy model creation and algorithmization by ecological functional of quality of the complex system objects goal state. The quality functional is the interrelation of

«object systems-environment» state entropy functions and their interaction processes, which are gotten through monitoring data statistical analyses of objects that belong to technogenic (economical), social and natural systems.

Results. The usage of systemology basis complex union for studied object structure identification is suggested for the first time, along with identification of theoretical knowledge for informational entropy for any object system element description and entropic description of states and process. The relative accordance functional is introduced for final evaluation of the studied object equilibrium. It allows to estimate the presence of system and processes unstable points on the basis of nested system structure. It is important for decision making with synergistically positive feedbacks prediction.

Conclusions. The systems and process states entropic estimation complex approach is determined. The systemological model «object-environment» is the basis for determining conditions of studied object sustainable development due to usage of found spontaneous and natural synergistically feedbacks. The universal research base for complex systems study was received for their state and functionality estimation due to process synergy and «object-environment» connections that are based on complex usage of systemological modelling and input information entropy estimation.

KEYWORDS: systemological modelling, nested systems, entropy stability function, synergistically effects, states and process estimation logical structures, entropy functional.

REFERENCES

1. Haken H. Synergetics: Introduction and Advanced. Topics Springer Science & Business Media, 2004, 758 p.
2. Zyrianov A., Likholetova S., Bauken A. Synergetic Modeling of the System of State Organization of Society, *WISDOM*, 2022, Vol. 23, № 3, pp.103–113. DOI: <https://doi.org/10.24234/wisdom.v23i3.829>
3. Kosowa H., Weimer-Jehlea W., Leóna Ch. D., Minna F. Designing synergetic and sustainable policy mixes – a methodology to address conflictive environmental issues, *Environmental Science & Policy*, 2022, Vol. 130, pp. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.007>
4. Weimer-Jehle W., Vögele S., Hauser W., Kosow H., Poganietz W. P., Prehofer S. Socio-technical energy scenarios: State of the art and CIB-based approaches. *Clim. Change*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02680-y>
5. Weitz N., Carlsen H., Trimmer C. SDG Synergies: An Approach for coherent 2030, Agenda Implementation. SEI Policy Brief May, 2019. DOI: <https://www.sei.org/wpcontent/uploads/2019/04/sei-brief-2019-sdg-synergies-2.pdf>
6. Boeing G. Visual Analysis of Nonlinear Dynamical Systems: Chaos, Fractals, Self-Similarity and the Limits of Prediction, *Systems*, 2016, Vol. 4. № 37, 18 p. DOI: 10.3390/systems4040037.
7. Knjazeva E. N., Kurdjumov S. P. Sinergetika: Ne-linejnost' vremeni i landshafty kojevoljucii. Moscow, KomKniga, 2007, 272 p.
8. Corning P. A. Systems Theory and the Role of Synergy in the Evolution of Living Systems, *Systems Research and Behavioral Science Syst*, 2013, № 15, pp. 273–295. DOI: <https://doi.org/10.1002/sres.2191>
9. Shapiro J. A. Evolution: A View from the 21st Century. FT Press Science: Upper Saddle River, NJ., Evol. Intel, 2012, 5:207–209, pp. 207–209. DOI: 10.1093/gbe/evs008
10. Quax R., Har-Shemesh O., Sloot P. Quantifying synergistic information using intermediate stochastic variables, *Entropy*, 2017, 19(2). 85. DOI: <https://doi.org/10.3390/e19020085>
11. Shannon C. E., Weaver W. Mathematical Theory of Communication. University Illinois Press, Champaign, IL, USA, 1963, 131 p.
12. Chicharro D., Pica G., Panzeri S. ID The Identity of Information: How Deterministic Dependencies Constrain Information Synergy and Redundancy, *Entropy*, 2018, 20. 169. DOI: 10.3390/e20030169
13. Perdigão Rui A. P. Polyadic Entropy, Synergy and Redundancy among Statistically Independent Processes in Nonlinear Statistical Physics with Microphysical Codependence, *Entropy*, 2018, 20(1). 26, 9 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20010026>
14. Hernandez R., Armstrong A., Burney J. et al. Techno-Ecological Synergies of Solar, *Energy for Global Sustainability. United States*, 2019, pp. 560–568. Web. Vienna: Premier Publishing s.r.o., 2020, P 43–64. DOI: 10.1038/s41893-019-0309-z.
15. Bondarenko M. F., Motorin S. I., Nesterenko O. A., Solov'eva E. A. Sistemologicheskie metody konceptual'nogo modelirovaniya slabostrukturovannykh problemnykh oblastej na osnove estestvennoj klassifikacii, *Problemy bioniki*, 1999, Vyp. 51, pp. 9–18.
16. Kozulia T., Kozulia M., Didmanidze I. Comprehensive study of the systemic formation «object-environment» safety state, *Technogenic and Ecological Safety*, 7(1/2020), pp. 3–12. DOI: 10.5281/zenodo.3558994
17. Kozulia T., Kozulia M. Methodical bases of information support for complex analysis of system objects difficult / weakly structured, *Modern Problems Of Computer Science And IT-Education : collective monograph*, [editorial board K. Melnyk, O. Shmatko]. Vienna, Premier Publishing s.r.o., 2020, pp. 43–64. ISBN 978-3-903197-19-0
18. Bondar' A. V. Dinamika informacionnoj jentropii proektov i prakticheskie aspekty ee ocenki, *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI»*. Serija: Novi rishennja v suchasnyh tehnologijah. Harkiv: NTU «HPI», 2020, № 2 (4), pp. 45–52.
19. Kozulia T. V., Kozulia M. M. Using the systemological basis and information entropy function in the study at uncertainty conditions of system-structured objects, *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, 2022, № 3 (139), pp. 118–127. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85135587722&origin=resultslist&sort=plf->