

---

# ТЕОРЕТИКО-МЕТОЛОГІЧНІ ПИТАННЯ В ГАЛУЗІ ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ

---

УДК 504:7

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-4-27-11>

## РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ, ЯК СТІЙКОСТІ ФУНКЦІОНАЛА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Машков О.А.<sup>1</sup>, Жукаускас С.В.<sup>1</sup>, Нігородова С.А.<sup>1</sup>, Міхеєв В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління  
м. Київ, 02000, вул. Митрополита Василя Липківського 35  
mashkov\_oleg\_52@mail.ru

<sup>2</sup>Дежавне космічне агентство України  
м. Київ, 02000, вул. Московська, 8  
yd@nkau.gov.ua

Наукові дослідження присвячені розвитку теорії функціональної стійкості екологічних систем, як стійкості функціонала екологічної безпеки. Запропоновано концептуальні, теоретичні та технологічні основи теорії функціональної стійкості екологічних систем. У концептуальних основах зосереджена система поглядів забезпечення функціональної стійкості екологічної системи. В теоретичних основах дана ідея всебічно досліджується за допомогою науково-обґрунтованих підходів, методів, методик, алгоритмів і математичних моделей. У результаті з'являється комплекс теоретичних розробок щодо аналізу і синтезу функціональної стійкої екологічної системи. Технологічні основи відображають практичну сторону використання основних ідей і теоретичних результатів на всьому життєвому циклі екологічної системи. Запропоновано конкретні практичні рекомендації щодо забезпечення функціональної стійкості на етапах проектування, створення та функціонування екологічних систем. Визначено, що ознакою функціональної стійкості системи екологічного моніторингу є вирішення задачі екологічного спорстереження в повному обсязі з заданою точністю. При цьому показником функціональної стійкості системи екологічного моніторингу є ймовірність знаходження в цьому стані, що характеризує наявність надмірності і можливість реалізувати поновлююче керування з метою парирування наслідків нештатних ситуацій. Встановлено, що стратегія забезпечення функціональної стійкості системи екологічного моніторингу являє собою комплекс заходів, поєднаних загальною метою, спрямованих на вирішення відповідних задач на всіх етапах життєвого циклу системи для формування і підтримки властивості функціональної стійкості. Загальна ідея стратегії забезпечення функціональної стійкості полягає у створенні необхідної надмірності і можливості використовувати її для подальшого функціонування, а також і парирування наслідків нештатних (аварійних, катастрофічних) ситуацій. Для цього розв'язуються задачі оптимізації надмірності в системі та парирування наслідків нештатних ситуацій за рахунок введеної надмірності; забезпечення відновлення системи та збереження екологічної безпеки. *Ключові слова:* антропогенний і техногенний вплив, екологічна безпека, екологічна система, живучість, запас екологічної стійкості, навколишнє середовище, надійність, техногенно небезпечні об'єкти, функціональна стійкість.

The development of the theory of functional sustainability of ecological systems as the stability of the functional environmental safety. Mashkov O.A., Zhukauskas S.V., Nigorodova S.A., Mikheev V.S. Scientific researches are devoted to the development of the theory of functional stability of ecological systems, as stability of functional of ecological safety. The conceptual, theoretical and technological foundations of the theory of functional stability of ecological systems are offered. The conceptual framework focuses on a system of views to ensure the functional sustainability of the ecological system. In theory, this idea is comprehensively explored through scientifically sound approaches, methods, techniques, algorithms and mathematical models. As a result, a complex of theoretical developments on the analysis and synthesis of a functional sustainable ecological system appears. The technological foundations reflect the practical side of using basic ideas and theoretical results throughout the life cycle of an ecological system. Specific practical recommendations are offered to ensure functional stability at the stages of design, creation and operation of ecological systems. It is determined that the sign of functional stability of the ecological monitoring system is the solution of the problem of ecological observation in full with the given accuracy. The indicator of the functional stability of the environmental monitoring system is the probability of being in this state, which characterizes the existence of redundancy and the ability to implement a remanufacturing control to counteract the consequences of emergency situations. It is established that the strategy of ensuring the functional stability of the environmental monitoring system is a set of measures, combined with a common goal, aimed at solving the relevant problems at all stages of the system life cycle to form and maintain the property of functional stability. The general idea of a strategy for ensuring functional stability is to create the necessary redundancy and the ability to use it for further operation, as well as parrying the consequences of emergency (emergency, catastrophic) situations. For this purpose the tasks of optimization of redundancy in the system and parrying of consequences of emergency situations due to the introduced redundancy are solved; ensuring system restoration and maintaining environmental safety. *Key words:* anthropogenic and technogenic impact, ecological safety, ecological system, survivability, ecological sustainability reserve, environment, reliability, technologically dangerous objects, functional stability.

### Постановка проблеми

Активізація господарсько-виробничої діяльності людини в сучасних умовах природокористування та глобальні масштаби її антропогенного впливу на головні складові біосфери створюють гостру екологічну кризу, зумовлену деградацією об'єктів навколишнього середовища. У зв'язку з цим для ефективної взаємодії людини з природою потрібні всебічний аналіз навколишнього природного середовища, головними завданнями якого є комплексна оцінка екологічного резерву біосфери і її потенційних можливостей до самовідновлення і самоочищення, різних типів впливу на природні екосистеми і вивчення специфічних особливостей цих впливів. Лише деякі екосистеми на Землі виявляються сьогодні непорушеними активною господарською діяльністю людини. Інтенсивний розвиток науково-технічного прогресу і безконтрольне використання природних ресурсів призвели до того, що безліч природних екосистем у світі опинилося на межі катастрофи. Під впливом людини тут відбувається скорочення біорізноманіття тварин і рослин. І тому уряди країн змушені щорічно витратити мільярди доларів на відновлення природних ресурсів, які постраждали від антропогенного втручання [1, 2].

На сьогодні вирішення проблеми стійкості екосистем вимагає співвіднесення характеристик стабільної життєдіяльності екосистем з величиною антропогенного впливу (або ж негативного природного). При цьому властивістю екосистем, як регенерації є їх здатність до відновлення деформованих структур і функцій. Ця властивість проявляється через процес самоорганізації (самокоординація, саморегуляція, самовідновлення, самоочищення) екологічного потенціалу. Властивість регенерації може бути реалізована повною мірою лише в екосистемах, що мають певні структури і особливості матеріально-енергетичних взаємозв'язків із зовнішнім середовищем. Це складна взаємопов'язана структура каналів розподілу біогенної енергії, потоків інформації, її координуючих і регулюючих процесів, яка може бути порушена при експлуатації екосистем, що виходить за межі їх несучої ємності і зберігає життєздатність, продуктивність і властивості самовідновлення [14–16].

Визначення меж стійкості екосистем – найважливіша і одночасно дуже складна наукова задача, вирішення якої дає можливість встановити допустиму міру антропогенного втручання в природні системи і виробити імперативні обмеження цього втручання. Для біосфери в цілому суть проблеми стійкості полягає у визначенні допустимого співвідношення антропогенно освоєних експлуатованих територій і природних екосистем, здатних здійснювати функції стабілізації параметрів її відносного гомеостазу.

Антропогенний і техногенний вплив на екосистему може викликати деградацію її компонентів або їх сполук (руйнування або істотне порушення природних екологічних зв'язків, що зумовлюють обмін речовин та енергії у межах геоекосистеми). Деградація структури системи загалом – це крайній ступінь зміни, що виявляється у суцільній втраті здатності відповідної території виконувати відновні функції. Суцільна деградація починається з деградації одного компонента і поступово охоплює всі інші. Так, найчастіше негативні зміни ландшафту починаються з деградації ґрунтів унаслідок забруднення, потім за ланцюговою реакцією зазнає змін фітоценоз і залежні від нього консументи тощо. Саме тому, що все пов'язано з усім, зміни компонентів екосистеми внаслідок антропогенного впливу необхідно розглядати комплексно.

### Аналіз публікацій за проблематикою та визначення невирішених раніше частин загальної проблеми

В «Екологічному енциклопедичному словнику» стійкість визначається як здатність екосистеми і її окремих частин протистояти коливанням зовнішніх факторів і зберігати свою структуру і функціональні особливості. В іншому поширеному формулюванні під стійкістю розуміється допустима міра (без ризику порушення системи) відхилень заданих властивостей екосистеми від норми, викликана певним обуренням зовнішніх чинників (Федоров, Левич). Р. Риклефс (1979) констатує, що вона являє собою кульмінаційну точку всіх екологічних взаємозв'язків, суму всіх компонентів і взаємодій, синтез всіх властивостей, що виявляються на різних рівнях спільноти. У зв'язку з цим більшість авторів, що розглядають проблему стійкості систем, у тому числі й природних, сходяться на думці, що «стійкість» – надзвичайно широко трактується, що використовується в багатьох значеннях і сильно переобтяжене в смисловому плані поняття (Ешбі, Федоров, Соколова, Вільямсон, Левич, Крапівін, Арманд, Гродзинський, Бігон, Миркин і ін.). У зв'язку з цим пропонується використовувати ряд фрагментарних визначень, що стосуються лише деяких аспектів активних форм стійкості екосистем. Існує необхідність визначити загальні форми, в яких стійкість може проявлятися в екосистемі. В роботі М.Д. Гродзинського (1987) виділяються чотири основні загальні форми стійкості природної системи: 1) інертність – здатність системи при зовнішньому впливі зберігати незмінним свій стан протягом заданого тимчасового інтервалу; 2) відновлюваність – здатність системи набувати після обурення свій початковий стан; 3) пластичність – наявність у системи декількох станів і її здатність переходити в разі необхідності з одного стану в інший, зберігаючи за рахунок цього інваріантні риси структури; 4) зміна інваріантної

структури – стійкість розвитку, обумовлена трендом станів системи в певному напрямку [1]. Оскільки стійкість в екосистемах реалізується в різних формах, то оцінка по одній з цих форм може виявитися занадто малоінформативною і привести до одностороннього розуміння стану екосистеми. Для формування більш-менш об'єктивного судження необхідна комплексна оцінка стійкості системи у всіх її формах. Крім того, активні форми стійкості носять в основному структурний характер і в зв'язку з цим її аналіз повинен бути спрямований не тільки на розгляд окремих компонентів системи, але і зв'язків між ними (Флейшман). Змінні природних екосистем не залишаються всередині однієї області стійкості, змінюючись безперервно. Зсуваються і змінюються не тільки змінні, але й кордони між областями стійкості. Тому межі стійкості повинні періодично уточнюватися [10–12].

**Мета статті** – формалізація поняття «функціональної стійкості» екологічної системи як стійкості функціонала екологічної безпеки.

#### **Результати дослідження.**

Стійкість екосистем – це здатність зберігати структуру і нормальне функціонування при змінах екологічних факторів. Адаптації організмів до змін чинників довкілля певною мірою забезпечують стійкість екосистем, до складу яких вони входять, до зміни екологічних факторів середовища. Однак, як і будь-яка більш складна система, екосистема порівняно з окремими видами організмів має більш високу ступінь надійності функціонування в мінливому середовищі, оскільки на системному рівні формуються і розвиваються нові системні механізми забезпечення стійкості й живучості екосистем, які були відсутні у окремих видів.

Розвиток теорії «функціональної стійкості» екологічної системи передбачає нові підходи до екологічної безпеки і розробки сукупності логічно пов'язаних між собою концептуальних, теоретичних і технологічних основ. Для забезпечення «функціональної стійкості» необхідні розробка та використання системи екологічного моніторингу та прогнозування екологічних ризиків та загроз.

У концептуальних основах зосереджена система поглядів забезпечення функціональної стійкості екологічної системи. В теоретичних основах ця ідея всебічно досліджується за допомогою науково-обґрунтованих підходів, методів, методик, алгоритмів і математичних моделей. У результаті з'являється комплекс теоретичних розробок щодо аналізу і синтезу функціональної стійкої екологічної системи. Технологічні основи відображають практичну сторону використання основних ідей і теоретичних результатів на всьому життєвому циклі екологічної системи. Тому необхідні конкретні практичні рекомендації щодо забезпечення функціональної стійкості на

етапах проектування, створення та функціонування екологічної системи.

Концептуальні основи забезпечення функціональної стійкості екологічної системи включають поняття функціональної стійкості, стратегію її забезпечення, ознаки, показники, критерії, межі, область і запас стійкості. Функціональна стійкість екосистем забезпечується при антропогенно-техногенному впливі на екосистему.

За обсягом викидів в екосистему одне з перших місць посідають автотранспорт і теплоенергетика, які постачають в атмосферу продукти згорання вихопного палива (вугілля, нафти, газу) і їх похідних (мазуту, бензину та ін.). Основні забруднювачі – оксиди вуглецю й азоту, сірчистий ангідрид, пил, нафтопродукти, токсичні важкі метали (свинець, кадмій, ртуть, цинк та ін.) і поліциклічні ароматичні вуглеводні. Особливо високими є концентрації важких металів у викидах та осадах очисних споруд гальванічних виробництв, де концентрація кадмію, вісмуту, олова і срібла в тисячі, а свинцю, міді, хрому, цинку і нікелю – в сотні разів вища за кларки літосфери. Високими показниками концентрації характеризуються також підприємства з переробки кольорових металів, машинобудівні та металообробні заводи, інструментальні цехи, пил яких вирізняється найширшою асоціацією забруднювачів. До них належать вольфрам, сурма, кадмій, ртуть, свинець, вісмут, олово, мідь, срібло, цинк і миш'як. Окремі виробництва мають свої специфічні забруднювачі (зварювання і виплавлення спецсплавів – марганець; переробка брухту кольорових металів – миш'як; металообробка – ванадій; виробництво нікелевого концентрату – нікель, хром, кобальт; алюмінію – алюміній, берилій, фтор та ін.).

Нафтопереробна і нафтохімічна галузі промисловості викидають у довкілля переважно газоподібні сполуки (оксиди азоту, вуглецю, діоксид сірки, вуглеводні, сірководень, хлористі й фтористі сполуки, феноли та ін.), вміст яких іноді в десятки і сотні разів перевищує їх гранично допустимі концентрації (ГДК) в атмосфері. Деякі хімічні виробництва, крім газів, викидають у довкілля багато мікроелементів.

Будівництво відрізняється меншими концентраціями хімічних елементів у відходах. Серед підприємств будівельних матеріалів великим техногенним навантаженням на середовище вирізняються цементна промисловість, виробництво вогнетривкої цегли і теплоізоляційних виробів, у пилу яких є сурма, свинець, срібло, іноді ртуть.

За ступенем концентрації і комплексом хімічних елементів-забруднювачів комунально-побутові відходи (побутове сміття, каналізаційні осади, мули міських очисних споруд) не поступаються промисловим відходам.

Звалища також є вторинними джерелами забруднення довкілля. На деяких із них за багато років накопичуються великі маси різноманітних побутових, а іноді й промислових відходів. Грунти звалищ і фільтрати у десятки і сотні разів порівняно з фоновими ґрунтами збагачені цинком, міддю, оловом, сріблом, свинцем, хромом та іншими елементами. Розвіювання матеріалу звалищ і просочування стоків призводять до забруднення навколишніх ґрунтів, поверхневих і підземних вод. За законами техногенної міграції забруднення одного з компонентів ландшафту впливає на хімічний стан усіх інших, зумовлюючи їх забруднення [3, 13–16].

Стійкість екосистеми до антропогенно-техногенного впливу визначається її здатністю протистояти цьому впливу та зберігати нормальне функціонування (здатність до відновлення після припинення техногенного впливу та повернення зі зміненого стану до нормального режиму функціонування). Відновлення та самоочищення компонентів екосистем – початкова фаза відновлення біогенезу і природних ресурсів. Актуальність питань відновлення та самоочищення екосистем пов'язана із глобалізацією антропогенно-техногенного впливу на довкілля та потребою побудови науково обґрунтованих відносин з довкіллям. Це усвідомлення антропогенно-техногенної стійкості ландшафту порушує питання про її оптимізацію. Оптимізація цих процесів базується на результатах моніторингу та геоecологічному прогнозуванні стану довкілля.

Завдання ландшафтно-ecологічного прогнозування – це узагальнення інформації про рівень стійкості екосистем, умови та динаміку процесів самоочищення. Однак отримання саме цієї інформації є найскладнішою і недостатньо розробленою частиною прогнозування та оцінки ризиків.

Поняття стійкості ecологічної системи до антропогенно-техногенного навантаження будь-якого виду господарської діяльності стикається з визначенням межі ecологічного ризику ecологічної системи. Існує мінімальна величина зовнішнього впливу, що зумовлює відмову екосистеми. Це потенціал саморегуляції природно-територіального комплексу або ландшафту.

Екосистема – це сукупність живих організмів, що постійно обмінюються енергією, речовиною й інформацією один з одним і з навколишнім середовищем. Сучасні глобальні зміни є наслідком руйнування компенсаційних механізмів біоти, а не прямого впливу людини, яка забруднює довкілля. Руйнування компенсаційних механізмів відбувається внаслідок перевищення допустимих меж збурення біоти господарською діяльністю людини. Практика свідчить, що межу допустимого впливу людство вже перевищило, а біосферна концепція

стійкого розвитку передбачає поліпшення життя людей при збереженні природного середовища в такому обсязі, який забезпечує її стабільність, враховуючи і господарські системи.

**Антропогенний вплив на природні екосистеми** у взаємодії суспільства і природи розрізняють три види екосистем: природні, соціоприродні і антропогенні. Природні екосистеми, – це природні екосистеми, при вивченні яких не враховується антропогенний вплив. До антропогенних екосистем належать штучні екосистеми, які безпосередньо і цілеспрямовано створені людиною для задоволення своїх потреб. Їх поділяють на техногенні і агроecосистеми. Техногенні екосистеми, цілеспрямовано створені для вирішення певних завдань охорони навколишнього середовища і природокористування, наприклад, складні очисні споруди і комплекси біологічного очищення стічних вод в багатьох великих містах світу. Агроecосистеми створюються практично у всіх країнах і призначені для різкого підвищення родючості земель і збільшення врожайності сільськогосподарських культур на основі хімізації та застосування нових технологій сільськогосподарського виробництва [14–16].

Під соціоприродними розуміють екосистеми, які формуються не в результаті цілеспрямованої діяльності людини, а виникають опосередковано внаслідок взаємодії людської суспільства з природним середовищем. Неусвідомлена діяльність людини, яка пов'язана із задоволенням його постійно зростаючих потреб, призводить до того, що природні екосистеми в навколишньому середовищі трансформуються (перетворюються) в соціоприродні екосистеми, що складаються з живої і неживої природи і неприроди, тобто культури [3].

Особливістю розгляду соціоприродних екосистем є включення до складу екосистеми людини. Необхідність такого соціоприродного підходу до розгляду екосистем в сучасній ecології обумовлена тим, що людина в сучасних умовах стала геологічно перетворюючою силою, без урахування якої неможливо розробляти стратегії сталого розвитку цивілізації і раціонального природокористування.

Сучасний вплив людини на природні екосистеми незрівнянно більший, ніж раніше. Сумарна потужність антропогенних викидів і скидів у багатьох випадках є близькою, а часто і більшою ніж потужність природних джерел. Наприклад, антропогенні джерела викидають свинцю в десять разів більше ніж природні, оксидів азоту приблизно однаково кількість, а сірчастих газів промисловість викидає 30 млн. т проти 150 млн. т природних викидів. Гірничовидобувне виробництво вилучає за рік із земних надр близько 10 млрд. т корисних копалин і 100 млрд. т супутньої породи, а вулкани за той же час викидають на поверхню лише 3 млрд. т речовини. Нині майже 30 % суходолу

планети перетворено на пустелі і напівпустелі, 2 млрд. га ораних земель через нераціональну діяльність людей втратили родючість, щороку із використання вилучається 200-300 тис. га зрошувальних земель внаслідок підтоплення, засолення, виснаження та спустошення. Джерела антропогенного впливу розташовані локально і їх вплив деформує, перш за все, локальні природні екосистеми. Завдяки природним колообіговим процесам ця деформація поступово охоплює екосистеми вищого рівня до біосфери включно [15, 16].

Антропогенний вплив має різноманітний характер і, зазвичай, є наслідком споживацького ставлення людей до природи. Відповідь у вигляді бумерангової реакції стає все відчутнішою:

– по-перше, якість середовища існування людини погіршується;

– по-друге, повернення раніше переможених хвороб (віспа, туберкульоз тощо), а появу нових (СНІД та ін.) слід вважати захисною реакцією біосфери на агресивну поведінку одного з біологічних видів.

Люди починають розуміти нераціональність свого ставлення до природи. В останні роки все більше поширюється природозахисний напрям людської діяльності шляхом створення заповідних територій і акваторій. У зв'язку з тим що агроценози утворені невеликим числом видів, то саморегуляція в них здійснюється повільно. Це потребує активної турботи про них з боку людини. Для боротьби з бур'янами і шкідниками використовують хімічні засоби захисту (гербіциди, інсектициди). Проте хімікати впливають не лише на бур'яни і шкідників, а й на інші, корисні рослини і тварин. Не байдужі вони і для здоров'я людини. Інтенсивний обробіток ґрунту спричиняє руйнування його структури. В біогеоценозах відмерлі організми руйнуються на місці, а мінеральні та органічні речовини, що входять до їх складу, повертаються в ґрунт. В агроценозах урожай збирають, а ґрунт при цьому збіднюється. Для його збагачення використовують добрива, що не завжди безпечно для навколишнього середовища. Наприклад, добрива вимиваються атмосферними опадами, потрапляють у відкриті водойми і спричиняють інтенсивний розвиток синьо-зелених водоростей. Масове відмирання і руйнування (гниття) останніх робить воду отруйною, непридатною для існування в ній інших організмів.

У природних екологічних системах наявність людини чи об'єктів антропогенного походження (транспортний засіб, людське житло тощо) допускає лише короткочасно і тому в структурній схемі системи не враховується. Аналіз такої системи полягає в розгляді постійних зв'язків між природними складовими з урахуванням тимчасового впливу антропогенних факторів, які приймаються

за зовнішні. Отже, до природних екологічних систем належать не лише безлюдні ізольовані території (болота, гірські вершини, заповідні території тощо), а й ділянки суші та вод, на яких безпосередній людський вплив відчувається короткочасно (місця немасового тимчасового відпочинку, дослідні ділянки природних об'єктів тощо) [2].

Не останню роль у виникненні екологічних проблем, крім об'єктивних, відіграють суб'єктивні фактори. До них передусім слід віднести варварське ставлення людини до довкілля, нераціональне природокористування, безсистемні рубки лісу та грубе порушення технології лісозаготівель, відсутність спеціалістів достатньої кваліфікації та відповідної техніки для проведення лісозаготівель, недостатній догляд за станом дамб і берегових укріплень, захарачення гірських потоків, русел водотоків, особливо в населених пунктах. До суб'єктивних причин слід віднести вкрай вражаючу екологічну неосвіченість як пересічних громадян, так і відповідальних осіб.

#### **Поняття функціональної стійкості екологічної системи.**

Особливістю розвитку сучасних складних техногенних систем є оптимізація їх характеристик за критерієм ефективності, якій відображає ефект від створення і використання техногенної системи. Цей критерій повинен дозволяти оцінити і порівняти всі наслідки створення і використання техногенної системи, які виявляються в її еколого-техніко-економічних характеристиках. Вибір критерію оцінки оптимальності набуває особливої актуальності при дослідженні техногенних систем управління, оцінюванні їх ефективності. Техногенна система повинна оптимізуватися в цілому за єдиним критерієм або комплексом критеріїв, що характеризують і показують якість функціонування через виконання основних поставлених перед системою задач (екологічних, техніко-економічних, експлуатаційних вимог до неї). У процесі проектування складних технічних систем під час приймаються компромісні рішення, коли окремі її частини, елементи можуть бути і неоптимальними, а система в цілому оптимальною відповідно до встановлених вимог [4–9].

Показниками ефективності можуть служити розрізнені за характером величини. Вибір показника визначається пріоритетом цілей створення техногенної системи. При створенні такої системи потрібно враховувати за можливістю всі критерії ефективності.

Різновидність критеріїв може привести до суперечності їх один одному. У цьому випадку рішення, що задовольняє всім критеріям, є компромісним варіантом.

Для складних техногенних систем, чие функціонування пов'язано з певним ризиком для життя

людей, найбільш значними є показники критерію «максимальна безпека для життя людей». Наприклад, ймовірність функціонування техногенної системи без аварій і катастроф та ін. Це перша група показників.

До другої групи віднесено показники, які безпосередньо характеризують якість функціонування техногенної системи без урахування можливих нештатних ситуацій. Наприклад, забруднення атмосфери, ґрунтів, водного середовища, стан хвостосховищ, кількість відходів, енергетичні витрати тощо. Це так звані «еколого-технічні характеристики системи». Для екологічних систем – це і показники екологічної безпеки.

У третій групі виділено показники, що характеризують систему у процесі експлуатації під впливом потоку відмов. Йдеться про показники надійності. Заходи щодо покращення надійності системи зменшують кількість відмов, підвищують довговічність і оновлюваність системи.

Бажання зберегти техногенну систему функціонуючою, навіть з погіршенням деяких характеристик у результаті «локальних» відмов, призвело до формування четвертої групи показників – показників відмовостійкості.

Показники третьої і четвертої груп орієнтовані на відмови техногенної системи, які викликані конструктивно-виробничими недоліками, старінням і виходом за межі експлуатаційних режимів. Тобто причинами які не пов'язані з антропогенним впливом або іншими випадковими пошкодженнями системи. Щоб оцінити здатність складної системи функціонувати, навіть і з гіршою якістю в результаті пошкоджень, використовують показники живучості, які умовно віднесено до п'ятої групи.

До шостої групи показників ефективності відносять показники, що характеризують властивість функціональної стійкості системи.

Поняття функціональної стійкості динамічної системи розглядається «як властивості системи, що полягає у здатності виконувати хоча б встановлений мінімальний об'єм своїх функцій при відмовах в інформаційній, обчислювальній і енергетичній частинах системи, а також впливів зовнішнього середовища, які передбачені умовами». При цьому функціональна стійкість математично розглядається як стійкість математичного функціоналу якості функціонування складної системи, а не фазових координат системи. Це принципова відмова функціональної стійкості від динамічної стійкості по Ляпунову. Тому фактично функціональна стійкість техногенної системи, як її властивість, доповнює (об'єднує) властивості як надійності, відмовостійкості і живучості, так й динамічної стійкості [7–9].

– Фізично функціональна стійкість техногенної системи розглядається, як властивість системи екологічно безпечно виконувати завдання при

виникненні аварій та пошкоджень у самій системі та дії зовнішніх збурень. Реалізація функціональної стійкості досягається введенням в техногенну систему різних форм надмірності (апаратної та програмної) і формуванням алгоритмів використання надмірних ресурсів з метою парирування наслідків нештатних (аварійних, катастрофічних) ситуацій.

– Парирування (усунення) наслідків нештатних ситуацій функціонально-стійкою техногенною системою здійснюється за 4 етапи:

– виявлення порушення нормального функціонування системи або факту появи нештатної аварійної ситуації;

– ідентифікація (пізнання) причини появи порушення нормального функціонування;

– відключення в системі функціонального елемента (апаратного або програмного), який є причиною появи нештатної ситуації;

– переросподіл апаратних та/або програмних ресурсів у системі з метою збереження основних функційних можливостей системи.

– Виявлення екологічної загрози залежить в основному від ступеня вираженості так званого «привертаючого ефекту». При добре вираженому «привертаючому ефекті» ситуація відразу звертає на себе увагу (наприклад, перевищення нормативних екологічних показників).

Відмови зі середнім привертаючим ефектом виявляються, зазвичай, шляхом порівняння заданих параметрів (фазових координат), що характеризують динаміку техногенної системи у фазовому просторі, і поточних.

Відмови з низьким «привертаючим ефектом» можуть виявлятися, наприклад, шляхом моделювання та прогнозування фазового стану об'єкта керування, оцінки екологічних ризиків.

Процес ідентифікації екологічних нештатних ситуацій визначається наявністю або відсутністю конкретної інформації про їх виникнення.

Етап парирування наслідків екологічних нештатних ситуацій полягає у формуванні та впливі на систему так званого «відновлюючого» керуванні. Під відновлюючим екологічним керуванням розуміється керування, що парирує екологічні наслідки відмов, збоїв, руйнувань, а також впливів інших зовнішніх впливів, що дестабілізують роботу техногенної системи з метою збереження, хоча й з деяким погіршенням екологічних показників техногенної системи. Парирування екологічних наслідків нештатних ситуацій техногенної системи пропонується здійснювати шляхом перерозподілу надмірності техногенної системи.

Функціональна стійкість як властивість техногенної системи забезпечується шляхом введення (використання існуючої) деякої надмірності з метою парирування наслідків нештатних ситуацій.

Заходи, що спрямовані на забезпечення або підвищення функціональної стійкості, в першу чергу, забезпечують покращення характеристик відмовостійкості і живучості, але не обов'язково показників надійності окремих комплектуючих елементів і виробів техногенної системи, а також еколого-технічних характеристик системи [9].

Загалом під стійкістю функціонування мають на увазі збереження деякої властивості процесу функціонування відносно до збурення або невизначеності деяких параметрів системи або її математичної моделі. При цьому обов'язково повинен бути обумовлений допустимий клас збурень. На наш погляд, існує відмінність між функціональною стійкістю і стійкістю функціонування техногенної системи. Відмінність стійкості функціонування від функціональної стійкості полягає в тому, що стійкість функціонування техногенної системи характеризує поведінку координат незбуреного і збуреного руху системи:

$$\forall \theta > 0 \Rightarrow \delta > 0, \rho(z_0, z'_0) < \delta \Rightarrow \Rightarrow \rho[z(t, z_0), z(t, z'_0)] < \theta, \forall t \in [0, \infty), \quad (1)$$

де  $z_0 = z(0)$  – початкові умови – координати фазового простору  $z_0$  при незбуреному русі;  $z'_0 = z'(0)$  – координати фазового простору при збуреному русі;  $\rho$  – метрика простору  $Z$ ;  $\varepsilon, \theta$  – задані числа, що характеризують відхилення збуреного руху від незбуреного.

Функціональна стійкість техногенної системи характеризує відхилення основних функцій від координат при збуреному і незбуреному русі

$$\forall \theta > 0 \Rightarrow \delta > 0, \rho(f(z_0), f(z'_0)) < \delta \Rightarrow \Rightarrow \rho[f(z(t, z_0)), f(z(t, z'_0))] < \theta, \forall t \in [0, \infty), \quad (2)$$

де  $f(z)$  – функція від фазових координат техногенної системи, що характеризує основні екологічні вимоги, які висуваються до техногенної системи.

Важлива особливість стійкості полягає в тому, що це поняття відноситься не до даного фізичного об'єкту, як такому, а тільки до якої-небудь його властивості. Так, техногенна система може бути стійкою відносно деяких збурень у значенні одного екологічного показника і нестійка в значенні іншого. При цьому процедура дослідження стійкості може розглядатися з позицій системного підходу.

Якщо внутрішній стан  $z$  техногенної системи є елементом множини  $Z$ , (фазового простору) то процес функціонування визначається законом зміни внутрішнього стану в часі. Вважатимемо, що функціонування техногенної системи визначається деяким набором параметрів  $\alpha$ . Відповідно до цього

скажемо, що  $\alpha$  – елемент множини  $A$ , що називається у подальшому множиною або простором параметрів. Таким чином, зміна внутрішнього стану в часі  $z(t, \alpha)$  залежить від  $\alpha$ . При цьому  $t \in I$ , де  $I$  – сукупність даних моментів часу, що розглядаються (інтервал функціонування системи).

Загалом функція часу  $z(t, \alpha)$  є реалізацією деякого випадкового процесу. Якість роботи будь-якої системи оцінюється за допомогою функціоналів. Тому вважатимемо, що на реалізаціях  $z(t, \alpha)$  при будь-кому  $\alpha \in A$  задано однопараметричне сімейство дійсних функціоналів  $F_\tau = F_\tau \{z(t, \alpha), t \leq \tau, t, \tau \in I, \alpha \in A\}$ . Значення функціонала  $F_\tau$  при фіксованому  $\tau$  оцінює роботу системи до цього моменту. При фіксованому  $\alpha$  і фіксованій реалізації  $z(t, \alpha)$  функціонал  $F_\tau$  є дійсною функцією часу  $\tau \in I$ .

Розглянемо більшість  $D$  можливих дійсних функцій з областю визначення  $I$ . Нехай  $\beta$  – сукупність деяких підмножин цієї множини. Аналогічно, для кожної множини  $\beta \in B$  визначимо сукупність  $\beta\gamma(B)$  деяких підмножин  $B$ , що визначається параметром  $\gamma$ . Нехай  $B$  – деяка множина функцій. Позначатимемо через  $B'$  множину значень всіх функцій з  $B$ , що розглядаються в точці  $t$ . Для подальшого зручно вважати, що в інтервал  $I$  входить фіктивна точка  $\infty$ . Тоді, якщо деяка реалізація  $\{F_\tau, \tau \in I\}$  є елементом попередньо вибраної більшості  $B$ , тобто  $\{F_\tau, \tau \in I\} \in B$ , то припустимо за визначенням  $F_\infty \in B^\infty$ . Якщо ж  $\{F_\tau, \tau \in I\} \notin B$ , то  $F_\infty \notin B^\infty$ . Отже, можна стверджувати, що  $\{F_\tau, \tau \in I\} \in B$  тоді і тільки тоді, коли  $F_\infty \in B^\infty$ .

**Визначення.** Система функціонує стійко відносно  $(\beta, \{\beta_\gamma\}, A, \{A_\gamma\}, \varepsilon_0, F_\tau, T)$ , де  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  – деяке число,  $F_\tau$  – вибране однопараметричне сімейство функціоналів,  $T$  – деяка підмножина інтервалу функціонування  $I$ , якщо для будь-кого  $\varepsilon > \varepsilon_0$  і будь-якої множини  $B \in \beta$  можна знайти множину  $A \in A$  таку, що для кожного  $A_1 \in A_B(A)$  існує  $B_1 \in \beta_{A_1}(B)$  і задовольняє при всіх  $t \in T$  і  $\alpha \in A_1$  нерівності:

$$P \left\{ F_\tau [z(t, \alpha), t \leq \tau] \in B_{A_1}^\tau \right\} \geq 1 - \varepsilon. \quad (3)$$

Тут як параметр для набору сукупностей  $\{A_\gamma\}$  виступають множини  $B$  із  $\beta$ , а параметрами для  $\{\beta_\gamma\}$  є множини з  $A_B$ . Це визначення вимагає, щоб деяка властивість системи зберігалася в тому або іншому ймовірному значенні на попередньо вибраному інтервалі часу.

Множини з сукупності  $A$  вказують на характер допустимих збурень. Якщо ж параметри змінюються в одній із множин сукупності  $A_B(A)$ , то у поставленій задачі поведінка системи повинна змінюватися незначно. Підмножина  $T$ , що характеризує інтервал часу, на якому досліджується стійкість, і сімейство функціоналів  $F_\tau$  є неодмінними «атрибути» будь-якого окремого визначення.

Аналіз показав, що проблема визначення стійкості складних систем на сьогодні залишається відкритою. Тому актуальним є визначення стійкості функціонування (функціональної стійкості), розробка ознак і критеріїв функціональної стійкості даного класу систем, розробка понять запасу і областей функціональної стійкості.

**Функціональна екологічна стійкість як властивість екологічної безпеки екологічної системи.**

Залежно від ступеня складності екологічної системи і рівня аналізу властивість функціональної екологічної стійкості може виявлятися (кількісно оцінюватися) як стійкість до помилок, надійність, живучість, відмовостійкість, адаптивність, перешкодостійкість і т.д.

До теперішнього часу для різних систем і різних визначень розроблено досить багато методів аналізу стійкості. До основних з них можна віднести: методи Ляпунова, Вишнеградського, Гурвіца, Рауса, Михайлова, Найквіста, Ципкіна, Попова та ін. В класичній теорії стійкості розроблено критерії і ознаки, за якими можна встановити факт стійкості динамічної системи.

При вирішенні задач структурного і параметричного синтезу також широко використовується поняття стійкості. При цьому, окрім встановлення факту стійкості, визначається запас стійкості відповідно до конкретної ознаки, а також області стійкості у фазовому просторі параметрів системи. Однак аналіз різних понять стійкості, методів визначення стійкості показав, що класична теорія стійкості оперує в основному з динамічними системами, які описуються системою диференціальних рівнянь в різних математичних модифікаціях: лінійні, нелінійні, цифрові, стохастичні, адаптивні, оптимальні та інші системи. Однак проблема визначення стійкості складних організаційних систем на сьогодні залишається відкритою.

Відомо, що під надійністю системи йдеться про здатність зберігати в часі у встановлених межах значення ознак і параметрів, що характеризують ті властивості, які визначають її здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах.

Поняття надійності і стійкості внаслідок того, що вони виражають і характеризують якісну визначеність системи, співпадають у певному відношенні, і в той же час вони є різними рівнями абстракції (виражають різні критерії) у поясненні внутрішніх механізмів активності кібернетичних систем. Так, для біологічних систем із зростанням їх складності не спостерігається тенденція зниження «надійності», для існуючих технічних (штучних) систем картина зворотна, що пов'язано з недосконалістю їх організацій.

Основним проектним методом підвищення функціональної стійкості є використання різних видів надмірності – функціональної, алгоритмічної,

технічної (апаратної і програмної), топологічної, часової – і організація її у вигляді дублюючих або мажоритарних структур з голосуванням. Одним із напрямів теорії функціональної стійкості складних систем є резервування окремих частин і систем, боротьба з певними класами відмов.

А.Авіжієніс визначає властивість «відмовостійкості» як унікальну спроможність саме технічної системи, яка забезпечує їй як системі можливість продовжувати виконання заданих дій і після виникнення несправностей. Можна сказати, що відмовостійкість забезпечує життєздатність технічної системи, оскільки її задачею є повернення з помилкових станів до заданої поведінки, забезпечуючи можливість правильного функціонування. Задача відмовостійкості – реагувати на виникнення несправностей і захищати технічну систему від впливу відмов. Тому забезпечення функціональної стійкості вимагає надмірного апаратного і програмного забезпечення в системі.

Зазвичай, виділяють три типи відмов, стійкість до яких повинна бути забезпечена в складних системах – фізичні, проектні та інтерактивні. До фізичних причин виникнення відмов належать старіння елементів, невиявлені окремі дефекти, пошкодження, що викликаються діями людей. Причини проектних відмов пов'язані з помилками при розробці програмного і апаратного забезпечення. Інтерактивні відмови обумовлюються неправильними діями людини при взаємодії з системою.

Під «живучістю» системи розуміється властивість системи зберігати обмежену працездатність в умовах зовнішніх впливів, які призводять до відмов її складових частин. Тому живучість характеризує здатність системи протистояти розвитку критичних відмов за будь-яких умов експлуатації, зокрема попередньо не передбачених.

Ще однією суттєвою властивістю системи є «адаптивність», тобто можливість пристосовуватися до зовнішніх умов для оптимального досягнення загальної мети системи. Для організаційних (зокрема, і біологічних, соціальних) систем це означає здатність реагувати на навколишнє середовище так, щоб отримати в результаті сприятливі (в деякому розумінні) наслідки для діяльності системи. Системи подібного типу мають як би завчасно запланований «кінцевий стан» і поведінка систем така, що вони досягають цього стану, не дивлячись на несприятливі умови навколишнього середовища. Такий «кінцевий стан» може бути простим виживанням із втратою решти функцій. Еволюційна теорія заснована значною мірою на понятті адаптації до навколишнього середовища.

Адаптивні техногенні системи визначають як системи, які автоматично пристосовуються до непередбачених змін параметрів зовнішнього середовища і самої системи. Ці системи поділяють



на види: самонастроювальні, в яких адаптація забезпечується автоматичною зміною параметрів настройки або автоматичним пошуком настройки, оптимальної до будь-якого критерію; самонавчальні, в яких алгоритм функціонування створюється і удосконалюється у процесі роботи в результаті оцінки спроб і помилок; системи, що самоорганізуються, в яких адаптація здійснюється зміною їх структури.

Отже, розглянуті властивості характеризують поведінку техногенної системи в умовах дії деяких чинників зовнішнього середовища, здатних порушити задане функціонування системи:

– надійність системи характеризує її здатність до нормального функціонування в заданих режимах і умовах;

– стійкість – продовження того ж функціонування при дії збурень;

– живучість – здатність системи протидіяти зовнішнім впливам;

– адаптивність – збереження якоїсь частини системи при зміні більшості параметрів, що дозволяє оптимальним, в деякому розумінні, образом досягти тієї мети, яка була передбачена.

Одночасно окремо жодна з цих властивостей не відображає того, що розуміється під «функціональною стійкістю» системи, і у комплексі вони також не можуть її характеризувати, оскільки не відображають одночасно активний характер властивості функціональної стійкості при дії навіть невідомих збурень, «осмислений» відбір тих якостей, які повинні бути збережені і за рахунок чого це збереження може бути одержано (таблиця). Термін «функціональна стійкість» вимагає точного семантичного і математичного визначення, без якого ця властивість багатьма авторами постійно зводиться до однієї з перерахованих вище властивостей.

Здатність складної (екологічної, техногенної, соціальної) системи виконувати встановлений мінімальний об'єм своїх функцій при зовнішніх і внутрішніх впливах, не передбачених умовами нормальної експлуатації, здійснювати вибір оптимального режиму функціонування за рахунок власних внутрішніх ресурсів, перебудови структури. Зміни функцій окремих підсистем та їх поведінки характеризується властивістю функціональної стійкості, яка властива не тільки біологічним, але і складним технічним та соціальним системам.

Залежно від типу і призначення системи функціональна стійкість забезпечується різними засобами і видами надмірності, які закладаються в систему при проектуванні і використовуються у процесі експлуатації.

З погляду якісного виконання функцій системою функціональна стійкість складної системи характеризує її здатність виконувати задані функції з деяким допустимим зниженням якості. Причому

впливи на систему можуть мати як природний, так і навмисний характер.

Основною особливістю функціонально-стійких систем є їх здатність деградувати на структурному рівні до повної відмови системи, тобто виключати із структури елементи, що відмовили, перебудувувати структуру, настроювати параметри системи для пристосування (адаптації) до нових умов експлуатації.

Властивість функціональної стійкості доцільно застосовувати завдяки спостереженням за поведінкою біологічних систем, організмів з властивою їм властивістю виконувати задані цілі при фізичних пошкодженнях за рахунок біологічної надмірності: безлічі органів почуття, нервових волокон, пристосовуваності мозку як системи управління і переробки інформації, а також симетричності організму. Аналогічно слід синтезувати техногенні екологічні системи.

Отже, теорія функціональної стійкості висуває такі основні напрями досліджень: математична формалізація критеріальних визначень (функціональна стійкість, критерії стійкості, запаси стійкості), розробка методів підвищення функціональної стійкості; визначення найефективніших засобів підвищення їх функціональної стійкості.

Запропонований підхід доцільно використовувати при виборі напрямків розвитку, удосконалення існуючих, побудови перспективних складних систем. Це дозволить підвищити ефективність функціонування, відшукати найкращий компроміс між суперечливими показниками якості функціонування системи, обрати та обґрунтувати пріоритетні напрями розвитку складних систем.

#### **Забезпечення функціональної стійкості екологічної системи**

Системне забезпечення функціональної стійкості екологічної системи являє собою комплекс заходів поєднаних загальною метою, спрямованих на вирішення відповідних задач на всіх етапах життєвого циклу системи для формування і підтримання властивості функціональної стійкості. Системне забезпечення функціональної стійкості екологічної системи передбачає створення необхідної надмірності і забезпечення можливості її використання для подальшої в процесі експлуатації локалізації і парирования наслідків нештатних (аврійних, катастрофічних) ситуацій. Для цього необхідно вирішити основні групи задач: оптимізувати надмірність в системі; парировати наслідки нештатних ситуацій за рахунок введеної надмірності; забезпечити відновлення екологічної системи.

Функціональна стійкість як властивість екологічної системи закладається на етапі створення (проектування) і забезпечується своєчасним відновленням системи.

Таблиця

**Властивості складних (екологічних, техногенних, соціальних) систем**

Властивості	Сутність	Впливи	За рахунок чого забезпечується
Надійність (безвідмовність)	Збереження параметрів функціонування в заданих межах	Експлуатаційні відмови, обумовлені фізичним старінням і конструктивно-виробничими недоліками	Застосування високонадійної елементної бази і системи технічного обслуговування
Відмовостійкість	Збереження працездатності із заданою якістю при відмовах в елементах системи	Експлуатаційні відмови і збої елементів системи	Застосування усіх видів резерву, можливість деградації системи до заданого рівня
Живучість	Здатність протистояти зовнішнім впливам, зберігаючи обмежувальну працездатність	Пошкодження і впливи зовнішнього середовища	Захист від вогневого впливу противника і зовнішнього середовища; відновлювальний ремонт
Стійкість	Збереження координат руху під дією збурень	Збурення, що надходять на вхід системи	Нечутливість до збурень, реалізація принципів управління по відхиленню
Функціональна стійкість	Збереження виконання основних функцій (можливо з погіршенням якості) в умовах внутрішніх і зовнішніх впливів	Експлуатаційні відмови, збої, пошкодження, зовнішні впливи, помилки обслуговуючого персоналу	Застосування інформаційної, обчислювальної, енергетичної надмірності

На етапі створення (проектування) функціонально стійкої екологічної системи необхідно:

- обрати необхідний вид або види надмірності (структурна, апаратна, програмна);

- розробити і закласти алгоритм формування поновлюючого управління, що парирує наслідки нештатних (аварійних, катастрофічних) ситуацій. Для цього, в свою чергу, необхідно реалізувати можливість виявлення нештатної ситуації, ідентифікувати нештатної ситуації, локалізувати дію нештатної ситуації на систему, парирувати наслідки нештатної ситуації шляхом перерозподілу ресурсів.

На етапі функціонування екологічної системи стратегія забезпечення функціональної стійкості вимагає забезпечення своєчасного відновлення системи.

Отже, принцип забезпечення функціональної стійкості системи зводиться до цілеспрямованого управління надмірністю для парирування наслідків нештатних ситуацій в процесі функціонування системи. Для забезпечення функціональної стійкості екологічної системи потрібно застосування системи екологічного моніторингу та прогнозування екологічних ризиків та загроз. При цьому слід враховувати, що система екологічного моніторингу навколишнього середовища та техногенне небезпечних об'єктів є багатопозиційною складною системою.

Звідси витікають основні вимоги до забезпечення функціональної стійкості екологічної системи.

1. Забезпечити достатню кількість наземних і повітряних (космічних) систем екологічного спостереження (СЕС) за екологічною системою<sup>^</sup>

$$N_{vid(p)}^X > N_{vid(p)min}^X;$$

$$N_{vid(p)}^Y > N_{vid(p)min}^Y,$$

де  $N_{vid(p)}^X$  – кількість наземних СЕС за екологічною системою;

$N_{vid(p)min}^X$  – мінімальна кількість наземних СЕС за екологічною системою;

$N_{vid(p)}^Y$  – кількість повітряних (космічних) СЕС за екологічною системою;

$N_{vid(p)min}^Y$  – мінімальна кількість повітряних (космічних) СЕС за екологічною системою.

2. Забезпечити працездатність всіх СЕС

$$\forall x_{vid(i)} \in X_{vid} \Leftrightarrow \omega_i(\tau) = 1, \tau \in ]0, t[;$$

$$\forall y_{vid(j)} \in Y_{vid} \Leftrightarrow \vartheta_j(\tau) = 1, \tau \in ]0, t[;$$

де  $X_{vid} = \{x_i\}$  – безліч працездатних наземних СЕС за екологічною системою;

$Y_{vid} = \{y_j\}$  – безліч працездатних повітряних (космічних) СЕС за екологічною системою;

$\omega_i(\tau)$  – булева функція, що набуває значення 1, якщо наземна СЕС перебуває в працездатному стані і 0 – у непрацездатному стані;

$\mathcal{G}_i(t)$  – булева функція, що набуває значення 1, якщо повітряна (космічна) СЕС перебуває у працездатному стані і 0 – у непрацездатному стані;  
 $\tau, t$  – поточний час функціонування екологічної системи.

3. Забезпечити розміщення СЕС, що виключає перешкоди телекомунікаційним зв'язкам (вплив радіозавод, рельєфу та ін.)

$$\forall x_{vid(i)}^r \in X_{vid}^r \Leftrightarrow \omega_{i(\tau)}^r = 1, \tau \in [0, t];$$

$$\forall y_{vid(j)}^r \in X_{vid}^r \Leftrightarrow \mathcal{G}_{j(\tau)}^r = 1, \tau \in [0, t];$$

де  $X_{vid}^r = \{x_i^r\}$  – безліч працездатних телекомунікаційних мереж наземних СЕС за екологічною системою;

$Y_{vid} = \{y_j\}$  – безліч працездатних телекомунікаційних мереж СЕС за екологічною системою;

$\omega_i^r(\tau)$  – булева функція, що набуває значення 1, якщо телекомунікаційна мережа СЕС перебуває в працездатному стані і 0 – у непрацездатному стані;

$\mathcal{G}_j^r(\tau)$  – булева функція, що набуває значення 1, якщо телекомунікаційна мережа СЕС перебуває в працездатному стані і 0 – у непрацездатному стані.

4. Забезпечити працездатність апаратури спостереження за екологічною системою

$$\forall z_k \in Z \Leftrightarrow \mu_k(\tau) = 1, \tau \in [0, t],$$

де  $Z = \{z_k\}$  – безліч апаратури спостереження;

$\mu_k(t)$  – булева функція, що набуває значення 1, якщо навігаційна апаратура перебуває в працездатному стані і 0 – у непрацездатному стані.

5. Забезпечити оптимальну геометрію СЕС з метою підвищення точності визначення місцезоположення об'єкта спостереження

$$\forall x_{vid(i)} \in X_{vid} \Leftrightarrow \chi_i(\tau) = 1, \tau \in [0, t];$$

$$\forall y_{vid(j)} \in X_{vid} \Leftrightarrow \delta_j(\tau) = 1, \tau \in [0, t];$$

де  $\chi_i(\tau)$  – булева функція, що набуває значення 1, якщо наземна СЕС має оптимальну геометрію і 0 – в іншому випадку;

$\delta_j(t)$  – булева функція, що набуває значення 1, якщо повітряна (космічна) СЕС має оптимальну геометрію і 0 – в іншому випадку;

Ефективність функціонування системи екологічного моніторингу кількісно оцінюється точносними характеристиками приладів спостереження.

Виходячи з умов задачі, яку вирішує система екологічного моніторингу, висуваються вимоги до точності приладів спостереження.

Висувається вимога до значення ймовірності вирішення задачі екологічного моніторингу:

$$P_{II} > P_{II}^{\min}. \quad (4)$$

Умова (4) є необхідною, але недостатньою для функціональної стійкості системи екологічного моніторингу і є ознакою функціональної стійкості.

Дійсно, цілком можливий такий стан системи, за якого дотримання цієї умови задовольнятиме споживача за обсягом екологічної інформації, але лише до появи нештатної ситуації, оскільки не буде можливості парирувати її наслідки, тобто система буде функціонально працездатною, але не функціонально стійкою.

Отже, для кількісної оцінки функціональної стійкості екологічної системи ще необхідні показники, які характеризують здатність парирувати наслідки нештатних ситуацій, що, в свою чергу, визначається наявністю надмірності і можливістю нею управляти.

В умовах невизначеності це можна описати так.

Нехай  $A$  – подія, що полягає в тому, що СЕС має властивість парирувати наслідки нештатних ситуацій. Тоді ймовірність цієї події  $P(A) = P_{\text{пар}}$ .

Виходячи із попередніх міркувань можна записати, що

$$A = A_{II} \cap A_{\text{ynp}}; A \cap (\overline{A_{II}} \cup \overline{A_{\text{ynp}}}) = \emptyset, \quad (5)$$

де  $A_{II}$  – подія, яка полягає в наявності надмірності; а  $A_{\text{ynp}}$  – подія, яка полягає в тому, що є можливість керувати надмірністю. Тоді,  $P(A_{II}) = P_{II}$  – ймовірність наявності надмірності або резерву у системі;  $P(A_{\text{ynp}}/A_{II}) = P_{\text{ynp}}$  – ймовірність того, що є можливість керувати надмірністю, або ймовірність керувати надмірністю.

Наявність надмірності в системі залежить від багатьох факторів. Зупинимось на структурній надмірності, суть якої – додаткові (резервні) комплекси моніторингу, що знаходяться в «гарячому» або «холодному» резерві. Враховуємо, що

$$P_{II} = P_{II}(N_{vid(\rho)}^X, N_{vid(\rho)}^Y, P_i^X, P_j^Y, F_k), \quad (6)$$

$$i = 1, \overline{N_{vid(\rho)}^X}, j = 1, \overline{N_{vid(\rho)}^Y}$$

де  $N_{vid(\rho)}^X$  – кількість наземних СЕС за екологічною системою;  $N_{vid(\rho)}^Y$  – кількість повітряних СЕС за екологічною системою;  $P_i^X$  – ймовірність знаходження  $i$ -ої наземної СЕС у робочому стані;  $P_j^Y$  – ймовірність знаходження  $j$ -ої повітряної СЕС у робочому стані;  $F_k$  – інші чинники, що впливають на надмірність.

$$P_i^X = P_i^X(P_i, P_i^{\text{mc}}), \quad (7)$$

де  $P_i$  – ймовірність безвідмовної роботи  $i$ -ої наземної СЕС протягом часу  $t$ ;  $P_i^{\text{mc}}$  – ймовірність

знаходження і-ої наземної СЕС у живучому (функціональному) стані протягом часу  $t$ .

$$P_j^Y = P_j^Y(P_j, P_j^{жс}), \quad (8)$$

де  $P_j$  – ймовірність безвідмовної роботи  $j$ -ої повітряної СЕС протягом часу  $t$ ;  $P_j^{жс}$  – ймовірність знаходження  $j$ -ої повітряної СЕС у живучому (функціональному) стані протягом часу  $t$ .

Модель (6–8) враховує вплив на надмірність різних чинників: проходження радіосигналів, інші перешкоди, надійність комплектуючих виробів спостереження, їх живучість, відмовостійкість та ін.

$P_{упр}$  – характеризує здатність системи скористатися надмірністю з метою парирування наслідків нештатних ситуацій.

Алгоритм формування поновлюючого управління повинен враховувати не тільки інтереси забезпечення функціональної стійкості екологічної системи, але й вплив виконання додаткових телекомунікаційних функцій на якість рішення основних задач, безпосередньо пов'язаних з екологічним моніторингом.

У загальному вигляді

$$P_{упр} = P_{упр}(F_l), \quad (9)$$

де  $F_l$  – чинники, що впливають на поновлююче керування.

Отже, ймовірність парирування нештатної ситуації

$$P_{нар} = P_{И} P_{упр}. \quad (10)$$

При забезпеченні властивості функціональної стійкості висувається вимога

$$P_{нар} > P_{нар}^{min}. \quad (11)$$

де  $P_{нар}^{min}$  – мінімально допустиме для забезпечення функціональної стійкості значення ймовірності парирування наслідків нештатних екологічних ситуацій.

Характерно, що система, яка здатна парирувати наслідки нештатних екологічних ситуацій, але не забезпечує необхідні показники екологічної безпеки, не є функціонально стійкою. Отже, одночасне виконання (4) і (11) є необхідною і достатньою умовою функціональної стійкості екологічної системи.

Ймовірність знаходження екологічної системи в стані функціональної стійкості  $P_{фy}$  або ймовірність функціональної стійкості екологічної системи як показника функціональної стійкості запишемо:

$$P_{фy} = P_{И} P_{нар}. \quad (12)$$

Критерієм функціональної стійкості СЕС є виконання нерівності:

$$\forall \Theta \in Q^{\Theta} P_{фy} > P_{фy}^{зад}, \quad (13)$$

де  $P_{фy}^{зад}$  – межа функціональної стійкості екологічної системи.

Задача екологічного моніторингу може бути вирішена тільки за наявності в полі зору спостереження не менше  $m=m^{min}$  працездатних СЕС. Ймовірність вирішення задачі екологічного моніторингу можна представити як ймовірність події, що перебуває в одночасній видимості  $m$  спостерегачів із  $n$  можливих. Але із всієї більшості можливих комбінацій виявляємо тільки ті, в яких із  $n$  видимих псевдосупутників не менше ніж  $m$  знаходяться у працездатному стані. У такому випадку ймовірність вирішення задачі екологічного моніторингу дорівнюватиме:

$$R_{m,n(\rho)} \sum_{r=m}^n P_{r,n(\rho)}, \quad \rho = \overline{1, N^E}, \quad (14)$$

де  $P_{r,n(\rho)} = \sum_k P_k(\rho)$  – ймовірність одночасного функціонування  $r$  систем спостереження із  $n$  можливих, дорівнює сумі ймовірностей відповідних комбінацій.

При цьому помилка екологічного спостереження може бути як менше деякого встановленого значення  $\sigma^{max}$ , так і більше цього значення.

Сума ймовірностей комбінацій, в яких  $\sigma_i \leq \sigma^{max}$ ,  $i = \overline{1, v}$  де  $v = \sum_{r=m}^n C_r^n$  – кількість комбінацій, є ймовірністю навігації споживача із заданою точністю  $\sigma^{max}$ .

Показник функціональної стійкості екологічної системи може бути обчислений за формулою:

$$P(\Theta) = \sum_{i \in I} P_{k(i)}, \quad I = \left\{ i \left| \begin{array}{l} \sigma_{\rho,i} < \sigma^{max} \forall \rho \in \overline{1, N^E}, \\ N^E > 4, \quad i = \overline{1, v} \end{array} \right. \right\}. \quad (15)$$

Ймовірність перебування окремих елементів структури СЕС у певному стані є визначальною для обчислення показника функціональної стійкості екологічної системи.

Оскільки стан системи екологічного моніторингу визначається зовнішніми (середовище, завади) і внутрішніми (технічний стан апаратури спостереження) умовами, то логічно припустити, що ймовірність працездатного стану  $ij$ -го елемента  $\rho_{ij}$ , де  $i, j$  – тип та порядковий номер екологічного комплексу, у спрощеному вигляді може бути записана як добуток:

$$\rho_{ij} = \rho_{ij}^{жс} \rho_{ij}^H \xi_{ij}, \quad (16)$$

де  $\rho_{ij}^{жс}$  – ймовірність збереження екологічно безпечного стану при зовнішніх завадах та перешкодах;  $\rho_{ij}^H$  – ймовірність безвідмовної роботи

апаратури спостереження;  $\xi_{ii}$  - булева функція, що набуває значення 1, якщо алгоритм формування поновлюючого керування включив СЕС структуру, 0 – в іншому випадку.

Для наземних комплексів екологічного спостереження за умови їх включення в структуру величина  $\rho_{ij}$  визначається добутком показників живучості і надійності СЕС (16). Для повітряних комплексів спостереження за тих же умов ці ймовірності повинні бути помножені також на аналогічні показники живучості і надійності носія (літак або космічний апарат), а також на ймовірність вирішення задачі екологічного моніторингу повітряним (космічним) комплексом

$$\rho_{y_j} = \rho_{y_j}^{жс} \rho_{y_j}^{н} \rho_{y_j}^{жсп} \rho_{y_j}^{нп} P_{(y_j)}^{наб}, \quad (17)$$

де  $\rho_{y_j}^{жс}$ ,  $\rho_{y_j}^{нп}$  – живучість і надійність рухомого об'єкта (космічний апарат, літак, аеростат, дрон тощо);  $\rho_{(y_j)}^{наб}$  – ймовірність виконання задачі спостереження.

Функціональна стійкість як властивість екологічної системи, визначає її здатність забезпечувати екологічну безпеку при функціональному пошкодженні (відмові) деякої допустимої кількості елементів, що реалізуються шляхом резервування складових елементів структури. Якщо застосовується «гарячий» резерв (для усіх СЕС  $\xi_{ii} = 1$ ), то резервні елементи постійно включені в роботу і надають системі можливість продовжувати функціонування у разі нештатних ситуацій. Тобто, при необхідних для моніторингу  $T^{\min}$  комплексах, система проектується так, що в полі спостереження об'єкту моніторингу одночасно знаходиться  $m^{vid} = m^{\min} + \Delta m$  (де  $\Delta m$ - деякий надлишок екологічних комплексів).

Фазовий простір СЕС (рисунок) містить фазові координати: параметричний простір  $\Pi^{\Theta}$ , вихідні характеристики системи  $\sigma$  і множини моментів часу функціонування системи  $T$ .

Стан системи в параметричному просторі  $\Pi^{\Theta}$  описується вектором стану мереж  $\Theta$ . Між параметричним простором  $\Pi^{\Theta}$  і множиною  $\sigma$  існує функціональний зв'язок  $\sigma = \sigma(\Theta)$ . Фазові траєкторії системи  $\Theta(t, \Theta_0)$  є монотонними неубуваючими (відносно  $\sigma$ ) випадковими функціями часу  $t$  і початкового стану системи  $\Theta_0$ .

У межах параметричного простору  $\Pi^{\Theta}$  зафіксуємо деяку область  $D^{\Theta} = \{\Theta | \sigma(\Theta) \leq \sigma^{\max}\}$ , а в межах  $D^{\Theta}$  – деяку область  $Q^{\Theta} \subset D^{\Theta}$  і задамо деяке значення  $\beta \in (0, 1)$ .

Екологічна система називається функціонально стійкою щодо трійки  $(Q^{\Theta}, D^{\Theta}, \beta)$  в тому лише випадку, якщо при  $\Theta_0 \in Q^{\Theta}$  виконується умова

$$P[\Theta(t, \Theta_0) \in D^{\Theta} \forall t \in T] \geq \beta. \quad (18)$$

Відповідно до наданого визначення  $Q^{\Theta}$  є областю функціональної стійкості екологічної системи, яка визначається характером випадкової функції  $\Theta_0 \in Q^{\Theta}$  і заданим значенням  $\beta$ . У свою чергу,  $D^{\Theta}$  – це область допустимих значень параметрів екологічної системи, яка обмежується значеннями  $\sigma^{\max}$ .

Твердження про монотонність випадкових функцій  $\Theta(t, \Theta_0)$  базується на припущеннях щодо невідновлюваності втрачених елементів системи. Дійсно, що після того, як система починає втрачати свої елементи і, оскільки вони не відновлюються, то точність екологічного моніторингу може тільки погіршуватися.

Отже, задача забезпечення функціональної стійкості функціональної стійкості екологічної системи полягає у виборі такої точки  $\Theta_0 \in Q^{\Theta}$ , яка забезпечить попадання стохастичної фазової траєкторії системи в область  $D^{\Theta}$  з ймовірністю не меншою, ніж  $\beta$ . Відмінність варіантів вибору найкращої фазової траєкторії в області функціональної стійкості  $\Theta_0 \in Q^{\Theta}$  один від одного полягає лише в їх вартості, оскільки однакових значень функціональної стійкості просторової структури екологічної системи можна досягти вибором різного числа утворюючих елементів з різними значеннями показників живучості і надійності.

#### Запас функціональної стійкості екологічної системи

У науковій літературі в даний час вводиться поняття екологічної техноємкою територій, під якою розуміється узагальнена характеристика території, кількісно відповідна максимальній техногенного навантаження, яке може витримати і переносити протягом тривалого часу сукупність екологічних систем і реципієнтів території без порушення їх структурних і функціональних властивостей [1]. Екологічна техноємкою території відображає самовосстановительний потенціал природної системи і залежить як від властивостей самої природного середовища, так і від виду та інтенсивності техногенних навантажень. Сукупна техногенне навантаження не повинна перевищувати потенціал самовідновлення екосистем. У цьому виражається прояв принципу екологічного імперативу, який вимагає порівняння антропогенного пресингу з витривалістю природних систем.

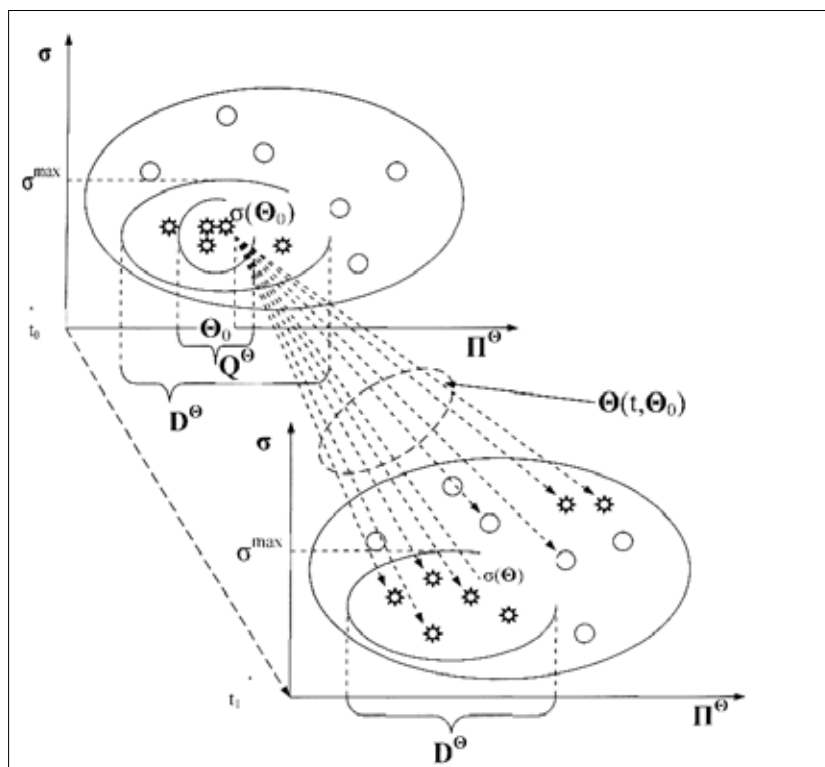


Рис. 1. Фазовий простор екологічної системи

Під запасом функціональної стійкості може розглядатися узагальнена характеристика, що кількісно відповідає максимальному техногенному навантаженню, яке можуть витримати і перенести протягом відповідного часу елементи екологічних систем без порушення їх структурних і функціональних властивостей. Запас функціональної стійкості відображає потенціал відновлення екологічної системи і залежить як від властивостей самого природного середовища, так і від виду та інтенсивності техногенних навантажень. Запас функціональної стійкості характеризує співвідношення сукупного техногенного навантаження та потенціалу самовідновлення екосистем. У цьому проявляється принцип екологічного імперативу, який вимагає порівняння антропогенного пресингу з витривалістю природних систем. Наявність науково обґрунтованих запасів функціональної стійкості екосистем є необхідною умовою для визначення екологічних ризиків та загроз.

#### Висновки та перспективи подальших досліджень.

Розроблені концептуальні основи забезпечення функціональної стійкості системи екологічного моніторингу, що включають поняття, стратегію забезпечення, показник, критерій, область, межу і запас функціональної стійкості, виражають основну ідею створення вискоєфективної системи екологічного моніторингу та погнозування екологічних ризиків та загроз. Визначено, що функціональна стійкість системи екологічного моніторингу – це її

властивість, що полягає в здатності виконувати хоча б установлений нормативними вимогами мінімальний об'єм своїх функцій по моніторингу навколишнього середовища в нештатних ситуаціях (при відмовах, збоях, руйнуваннях та інших пошкодженнях), передбачених умовами.

Ознакою функціональної стійкості системи екологічного моніторингу є вирішення задачі екологічного спорстереження в повному обсязі з заданою точністю. При цьому показником функціональної стійкості системи екологічного моніторингу є ймовірність перебування в цьому стані, що характеризує наявність надмірності і можливість реалізувати поновлююче керування з метою парирування наслідків нештатних ситуацій.

Стратегія забезпечення функціональної стійкості системи екологічного моніторингу являє собою комплекс заходів, поєднаних загальною метою і спрямованих на вирішення відповідних задач на всіх етапах життєвого циклу системи для формування і підтримки властивості функціональної стійкості. Загальна ідея стратегії забезпечення функціональної стійкості полягає у створенні необхідної надмірності і можливості використовувати її для подальшого функціонування, а також і парирування наслідків нештатних (аварійних, катастрофічних) ситуацій. Для цього розв'язуються задачі оптимізації надмірності в системі та парирування наслідків нештатних ситуацій за рахунок введеної надмірності; забезпечення відновлення системи та збереження екологічної безпеки.

## Література

1. Гродзинський М. Д. Ландшафтна екологія / М. Д. Гродзинський. Київ: Знання, 2014. 550 с.
2. Данилов-Данильян В.И. Об устойчивости экосистем / Экосистемы: экология и динамика, 2017, т. 2., № 1, С. 5–12.
3. Держстандарт 17.4.1.02-83 «Охрана природы. Грунты. Классификация химических веществ для контролю забруднення».
4. Машков О.А., Баранов Г.Л., Косенко В.Р. Критерії діагностування в функціонально стійких системах управління / Збірка наукових праць / Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2013, – Євпаторія, 2013, С. 61–65.
5. Машков О.А., Косенко В.Р. Задача синтезу оновлюючого керування при побудові функціонально-стійких бортових інформаційно-керуючих комплексів / Моделювання та інформаційні технології /Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 61, Київ, 2011, С. 202–229.
6. Машков О.А., Косенко В.Р. Прийняття управлінських рішень в складних організаційних системах з погляду системного підходу (частина 1) / Збірник наукових праць / Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України, Вип. 55, 2010., С. 131–148.
7. Машков О.А., Косенко В.Р. Проблеми створення функціонально стійкої автоматизованої системи управління рухомих об'єктів / Збірка наукових праць / Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2012, – Євпаторія, 2012, С. 497–508.
8. Машков О.А., Косенко В.Р. Розробка алгоритмів синтезу оновлюючого керування для інформаційно-керуючих комплексів рухомих об'єктів / Моделювання та інформаційні технології /Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 62, Київ, 2011, С. 208–225.
9. Машков О.А., Косенко В.Р. Синтез функціонально-стійкої системи керування рухомих об'єктом із заданими динамічними властивостями / Збірник наукових праць / Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України, вип. 60, Київ, 2011, С. 186–214.
10. Остроумов С. А. Новые варианты определений понятий и терминов «экосистема» и «биогеоценоз» // ДАН. – 2002. Т. 383 № 4. С. 571–573.
11. Федоров В.Д. Устойчивость экологических систем и ее измерение // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1974. № 3. С. 402–415.
12. Холинг К.С., Базыкин А.Д., Брунелл П., Кларк У.К., Галлопин Ж.К., Гросс Дж., Хилборн Р., Джонс Д.Д., Питерман Р.М., Рабинович Дж.Е., Стил Дж.Г., Уолтерс К.Дж. Экологические системы. Адаптивная оценка и управление. М.: Мир, 1981. 397 с.
13. Экологический энциклопедический словарь. Кишинев: Гл. ред. Молд. сов. энцикл., 1990. 408 с.
14. [https://pidruchniki.com/91278/ekologiya/stiykist\\_stabilnist\\_samoochischennya\\_ekosistem](https://pidruchniki.com/91278/ekologiya/stiykist_stabilnist_samoochischennya_ekosistem)
15. [http://www.desn.gov.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=17936%3A2016-10-12-10-45-50&catid=350%3A2012-03-22-08-11-41&Itemid=3172&lang=ua](http://www.desn.gov.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=17936%3A2016-10-12-10-45-50&catid=350%3A2012-03-22-08-11-41&Itemid=3172&lang=ua)
16. <https://studopedia.info/1-120101.html>