

---

# ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

---

УДК 504:7

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.13>

## АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ЕКОСИСТЕМ

Азаров С.І.<sup>1</sup>, Задунай О.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут ядерних досліджень  
Національної академії наук України  
пр. Науки, 47, 03680, м. Київ,  
azarov@kinr.kiev.ua

<sup>2</sup>Державний науково-дослідний інститут  
технологій кібербезпеки та захисту інформації  
вул. М. Залізняка, 6, 03142, м. Київ,  
a.zadunaj@gmail.com

В аспекті забезпечення переходу суспільства на засади сталого розвитку важливим завданням є оцінка ризиків втрати, знищення екосистем під дією антропогенного впливу, що тісно пов'язано з їхньою надійністю. На сьогодні надійність екосистем розглядається як здатність зберігати свою структуру і характер функціонування в просторі та часі за впливу змін умов зовнішнього середовища. Екосистеми здатні протистояти різним впливам і, в разі відновлення нормальних умов, повертатися в стан, близький до первісного. Щільність того чи іншого виду за несприятливих умов знижується, але в оптимальних умовах зростають плодючість, швидкість росту й розвитку, а щільність виду відновлюється. Трансформація поведінки екосистем зі зміною нестійкої рівноваги стабільним дисбалансом розглядається з позиції надійності. Завдання забезпечення надійності екосистем невід'ємне від пошуку класу допустимих збурень, які вона може витримати і не втратити при цьому стабільності свого стану. Отже однією з основних властивостей екосистем є їх надійність. З позиції екологічної безпеки завдання дослідження надійності екосистем полягає в тому, щоб побачити, яким чином її складові елементи функціонують у взаємодії з іншими частинами і з яких причин можуть статися зворотні або незворотні зміни, що загрожують негативними наслідками для навколишнього природного середовища. В статті обґрунтовується розширення методологічного апарату дослідження та підтримки надійності екосистем завдяки залученню традиційних системних підходів. Проводиться аналіз різноманітності станів екосистем, який супроводжується обґрунтуванням параметрів їх впорядкованості, що дозволяє сформулювати принцип достатності в екосистемах, ввести параметри неоднорідності й нерегулярності її станів для класифікації цих екосистем. *Ключові слова:* екосистема, надійність екосистем, зовнішні впливи.

### Assessment of stability of ecosystems Azarov S., Zadunaj O.

In terms of ensuring a society's transition to sustainable development, an important task is to assess the risks of loss, the destruction of ecosystems under anthropogenic influence, which is closely linked to their reliability. To date, the ecosystem can be sure that it retains its structure and characteristic functionality in space and time to be used in any event. Ecosystems are able to resist different influences and, in the case of normal conditions, return to their original state. The density of one species or another under adverse conditions decreases, but in optimal conditions fertility, growth and development rate increase, and the density of the species restores. The transformation of ecosystem behaviour with changing stable of unstable equilibrium is considered from the standpoint of reliability. The task of ensuring the reliability of ecosystems inseparable from the search admissible class of perturbations that it can withstand and not lose with the stability of their condition or movement. So one of the main characteristics of ecosystems is their reliability. From an ecological safety point of view, the task of ecosystem reliability research is to see how its constituents cooperate with other parts and for what reasons may occur reverse or irreversible changes, threatening negative consequences for the environment. The article substantiates the extension of the methodological apparatus of research and maintenance of ecosystems reliability, through the involvement of traditional mechanisms. The analysis of ecosystem diversity, accompanied by substantiation of ordering options that allows to formulate the principle of sufficiency in ecosystems, enter the parameters of heterogeneity and irregularity of states to classify these ecosystems. *Key words:* stability of ecosystems, ecosystem equilibrium, external influence.

**Постановка проблеми.** В аспекті забезпечення переходу суспільства на засади сталого розвитку важливого значення набуває оцінка ризиків втрати, знищення екосистем, що тісно пов'язано з їхньою надійністю. Надійність екосистем розглядається як здатність зберігати свою структуру і характер функціонування в просторі та часі під впливом змін умов зовнішнього середовища [1].

Надійність є фундаментальною властивістю природних екосистем. Це один з найбільш значущих показників стану навколишнього середовища. Вона являє собою здатність екосистем в цілому та її складових частин успішно протистояти негативним зовнішнім чинникам, водночас зберігаючи не тільки свою структуру, але й свої функції. Поняття надійності тісно пов'язане зі здатністю екосистем повер-

татися в стан рівноваги після припинення зовнішніх впливів, які вивели її зі стану рівноваги, а також з поняттям стабільності.

**Аналіз публікацій за проблематикою та визначення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Якщо про надійність технічної системи можна стверджувати однозначно, аналізуючи диференціальні рівняння, що характеризують її поведінку, то здебільшого скласти диференціальні рівняння надійного функціонування екосистеми досить важко. Тому висновки про надійність екосистеми можна робити тільки з певною імовірністю. Залежно від механізмів розвитку й типу втрати стабільності екосистеми можна виділити декілька типів кризових станів: критична ситуація, власна криза і природна катастрофа. Перший характеризується механізмами адаптивного розвитку екосистеми, другий – м'якою втратою стабільності екосистеми, третій – жорсткою втратою стабільності. Надійність екосистеми до негативних зовнішніх чинників визначається її здатністю протистояти цьому впливу та зберегти нормальне функціонування (здатність до відновлення після припинення негативного впливу та повернення зі зміненого стану до нормального режиму функціонування). Для аналізу надійності екосистем щодо природних криз та антропогенних порушень доцільно застосувати поняття надійного функціонування екосистеми. На жаль, методів оцінки надійності екосистем різного типу поки що немає. У багатьох випадках вірне функціонування екосистеми оцінюється інтуїтивно, «на око». Багато авторів [2; 3; 4] розглядають питання стійкості екосистем, але зовсім мало уваги приділяють проблемі надійності екосистем в умовах антропогенного навантаження. Тому наукові розробки в цьому напрямку є дуже актуальними.

**Метою статті** є формулювання концепції методу побудови оцінки показників надійного функціонування екосистеми та наукове обґрунтування ефективності запропонованої концепції.

**Результати дослідження.** Екологічна система (екосистема) – основна функціональна одиниця екології, що включає живі організми (біоценоз) і середовище проживання (екотопи), необхідні для підтримки життєдіяльності, причому кожна із цих частин впливає одна на одну [5]. Екосистемою можна назвати будь-який об'єкт біосфери, де живі та неживі компоненти функціонують як єдине ціле завдяки колообігу речовин, що відбувається з використанням зовнішнього джерела енергії і приводить до створення певної структури, або, іншими словами, – це система, елементами якої є біотичні та абіотичні компоненти, пов'язані речовинно-енергетичними та інформаційними потоками, відмежована від аналогічних утворень колообігом речовин певного ступеня замкненості.

Вирішення основних завдань надійності екосистем буде зводитися до оцінювання параметрів роз-

поділу шуканої величини (напрацювання на відмову, ресурс живучості й таке інше).

Найважливішим чинником, що сприяє вирішенню різноманітних завдань надійності екосистем з використанням дифузійних розподілів, є те, що параметр форми цих розподілів – коефіцієнт варіації – є узагальненою характеристикою процесів, що досліджуються (процесу деградації екосистем).

Коефіцієнт варіації як узагальнену характеристику з достатньою для інженерної практики точністю можна оцінити апіорі на підставі багаторічних досліджень як процесів деградації (надійності, стійкості та інших), так і статистичних даних про деградації в екосистемах та їх аналогів.

Саме завдяки конкретній фізичній інтерпретації параметрів дифузійних розподілів можна на їх основі вирішити таке завдання, як надійність екосистеми до антропогенних впливів.

Методи оцінювання надійності екосистеми, формально, виходячи зі способу отримання вихідної інформації екосистеми, можна поділити на апостеріорні (методи прогнозування стійкості), апіорні (методи моделювання та методи розрахунку живучості) та апіорно-апостеріорні (комбіновані), що являють собою поєднання ознак як апіорних, так і апостеріорних методів (розрахунково-експериментальні методи).

При цьому необхідно мати на увазі:

1) будь-який апостеріорний або комбінований метод, що дає змогу отримати оцінку радіаційної надійності екосистеми (живучості, безвідмовності, довговічності) за час, менший за ресурс існування екосистеми, є методом прискореного оцінювання надійності;

2) будь-який апостеріорний або комбінований метод, який використовує гіпотезу про теоретичні моделі надійності елементів, що входять до складу екосистеми, є методом прискореної оцінки надійності.

У теорії та практиці надійності найбільшого розвитку набув напрям, заснований на використанні тільки імовірнісних концепцій (строго імовірнісна теорія) [6]. В цьому випадку, наприклад, відмови в екосистемі слід розглядати як деякі абстрактні випадкові події, а різноманітні фізичні стани складових елементів зводяться до двох станів: справності й несправності.

Запропоновано концепцію отримання результатів щодо надійності екосистеми до антропогенних впливів згідно зі строго імовірнісною (статистичною) методикою. Послідовність розрахунку надійності екосистеми наведено на рис. 1.

Розглянемо основні етапи даної концепції. Передусім слід чітко сформулювати завдання розрахунку надійності екосистеми до антропогенних впливів, де необхідно вказати:

1) призначення екосистеми, її склад та основні відомості про функціонування;



Рис. 1. Алгоритм розрахунку надійності екосистеми

2) показники надійності та ознаки відмов, цільове призначення розрахунків;

3) умови, в яких функціонує екосистема;

4) вимоги до точності й достовірності розрахунків, до повноти обліку діючих антропогенних факторів.

У разі розрахунку функціональної надійності екосистеми здійснюється перехід до етапів 4–5–7. Під час розрахунку окремих елементів екосистеми – до етапів 3–6–7.

На підставі результатів досліджень поточного стану екосистеми отримують статистику раптових і поступових відмов. Від загальноприйнятого поділу відмов елементів екосистем на так звані «раптові» і «поступові», що призводять до неоднозначного вибору імовірнісних моделей відмов, останнім часом дедалі частіше відмовляються [7; 8].

Зазвичай відмова вважається «раптовою», якщо не встановлено причину відмови і мається на увазі, що вона з'явилася в результаті миттєвої зміни досліджуваних параметрів, тобто заперечується існування будь-яких фізичних процесів деградації – справжніх

причин, що передують появі відмови. Часто виявляється, що відмова видається «раптовою» лише тому, що неможливо проконтролювати зміни всіх визначальних параметрів, здатних викликати відмову [9].

Адже фізична природа «раптових» і «поступових» (з відомою природою) відмов однакова – це результат незворотних процесів деградації, що протікають у екосистемі. Тільки в першому випадку процес деградації в екосистемі протікає дуже швидко, що призводить до відмови й до стрибкоподібної зміни контрольованого параметра, і тому сам факт появи відмови видається несподіваним, «раптовим». У другому ж випадку визначений параметр, що викликає відмову в екосистемі, постійно контролюється і його наближення до граничного значення не є несподіваним.

Далі, використовуючи відомі статистичні критерії згоди [10], вибирається відповідна модель розподілу випадкових величин, розроблена в теорії імовірностей (експоненціальна, нормальна, Вейбулла, логарифмічно нормальна тощо), і береться як теоретична модель розподілу ймовірностей безвідмовного функціонування екосистеми (моделі надійності), на підставі якої визна-

чаються необхідні кількісні показники надійності екосистеми. Оцінювання (розрахунок) надійності екосистеми здійснюється шляхом обчислення імовірностей працездатних станів її елементів.

Відмови в екосистемах можуть виникати під впливом різноманітних антропогенних факторів. Оскільки кожен антропогенний чинник залежить від багатьох причин, то відмови елементів, що входять до складу екосистеми, належать, як правило, до випадкових подій, а час їх існування до виникнення відмов – до випадкових величин.

Відмови, що виникають в період нормального існування екосистеми, називають раптовими, оскільки вони з'являються у випадкові моменти часу, або, іншими словами, раптово, непередбачено.

Проаналізувавши концепцію надійності екосистеми, можна побачити, що об'єктом дослідження є випадкові події і величини, які відбуваються в екосистемах. Як теоретичні розподіли напрацювання на відмову можуть бути використані будь-які безперервні розподіли, що застосовуються в теорії імовірності [11]. Можна взяти будь-яку криву і використовувати її як криву розподілу випадкової величини. Тому, перш ніж приступити до методів розрахунку надійності екосистеми, слід розглянути закономірності, яким вона підпорядковується.

Випадкова подія – подія (факт, явище), яка з часом може відбутися або не відбутися. Випадкові події (відмови, процес деградації та інші) утворюють випадкові потоки й випадкові процеси. Потік подій – послідовність подій, що відбуваються одна за іншою в деякі відрізки часу. Наприклад, відмови екосистеми, яка не відновлюється, утворюють потік подій (потік відмов). Під дією потоку відмов екосистема може перебувати в різних станах (повної відмови або часткової відмови).

Перехід екосистеми з одного стану в інший є випадковим процесом. Випадкова величина – величина, яка в результаті дослідження екосистеми може набувати того чи іншого значення, причому невідомо задалегідь, якого саме. Випадкова величина може бути дискретною (число відмов за час  $t$ , число відмов елементів при напрацюванні заданого обсягу і таке інше) або безперервною (час напрацювання елемента екосистеми до відмови).

Закон розподілу випадкової величини – співвідношення, що встановлює зв'язок між значеннями випадкової величини та їх імовірностями. Його можна визначити формулою, таблицею, багатокутником розподілів та іншим.

Для характеристики випадкової величини (безперервної й дискретної) використовується імовірність того, що випадкова величина  $X$  менше деякої поточної змінної  $x$ . Функція розподілу випадкової величини  $X$  (інтегральний закон розподілу) – функція вигляду  $F(x) = P(X < x)$ . Щільність розподілу неперервної випадкової величини  $X$  (диференціальний закон розподілу) – похідна від функції розподілу [12]:

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x), \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1, \int_{-\infty}^x f(x) dx = F(x). \quad (1).$$

За випадкову величину будемо брати час функціонування екосистеми (час до виникнення відмови). За такої умови функція щільності розподілу  $f(t)$  буде слугувати повною характеристикою розсіювання термінів функціонування складових елементів екосистеми (рис. 2).

Вигляд цієї функції залежить від закономірностей процесу втрати елементом екосистеми стійкості. Крива розподілу  $f(t)$  – частота відмов – дає можливість підрахувати пострадіаційний стан будь-якого елемента екосистеми  $T_{cp}$  (математичне очікування  $M(t)$ ), розсіювання (дисперсію  $D$ ) щодо центру групування та інші числові параметри випадкової величини  $T$ .

Якщо взяти деякий період часу  $t$  існування елемента, то площа  $F(t)$  кривої розподілу  $f(t)$  буде характеризувати ймовірність відмови (виходу з ладу) елемента екосистеми за цей період часу (рис. 2б). Тому ліва гілка кривої розподілу  $f(t)$ , що належить до області малої імовірності відмов, використовується зазвичай для характеристики безвідмовності  $P$  екосистеми, а вся крива  $f(t)$  та її параметри необхідні для оцінювання її довговічності.

Ординати інтегральної функції розподілу  $F(t)$  (рис. 2в) характеризують імовірність відмови елемента екосистеми до даного моменту часу:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (2).$$

У багатьох випадках немає необхідності користуватися функціями  $F(t)$  або  $f(t)$ , досить знати числові характеристики цих кривих. Основною характеристикою положення кривої  $f(t)$  є математичне сподівання  $M(t)$ , яке за такої умови є середнім часом існування екосистеми  $T_{cp}$  (напрацюванням на відмову):

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt, \quad (3).$$

Основною характеристикою розсіювання випадкової величини є дисперсія  $D$  або середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad D(t) = \int_0^{\infty} (T_{cp} - t)^2 f(t) dt, \quad (4).$$

Чим більше значення  $D$  (або відповідно  $\sigma$ ), тим більше розсіювання термінів існування щодо їх середнього значення  $M(t)$ .

Для оцінювання надійності елементів екосистеми за основну випадкову величину будемо брати час до виникнення відмови. Також визначимо імовірність безвідмовного існування екосистеми  $P(t)$  у межах заданого періоду  $t$ . Для цього використаємо значення інтегральної функції:

$$P(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (5).$$

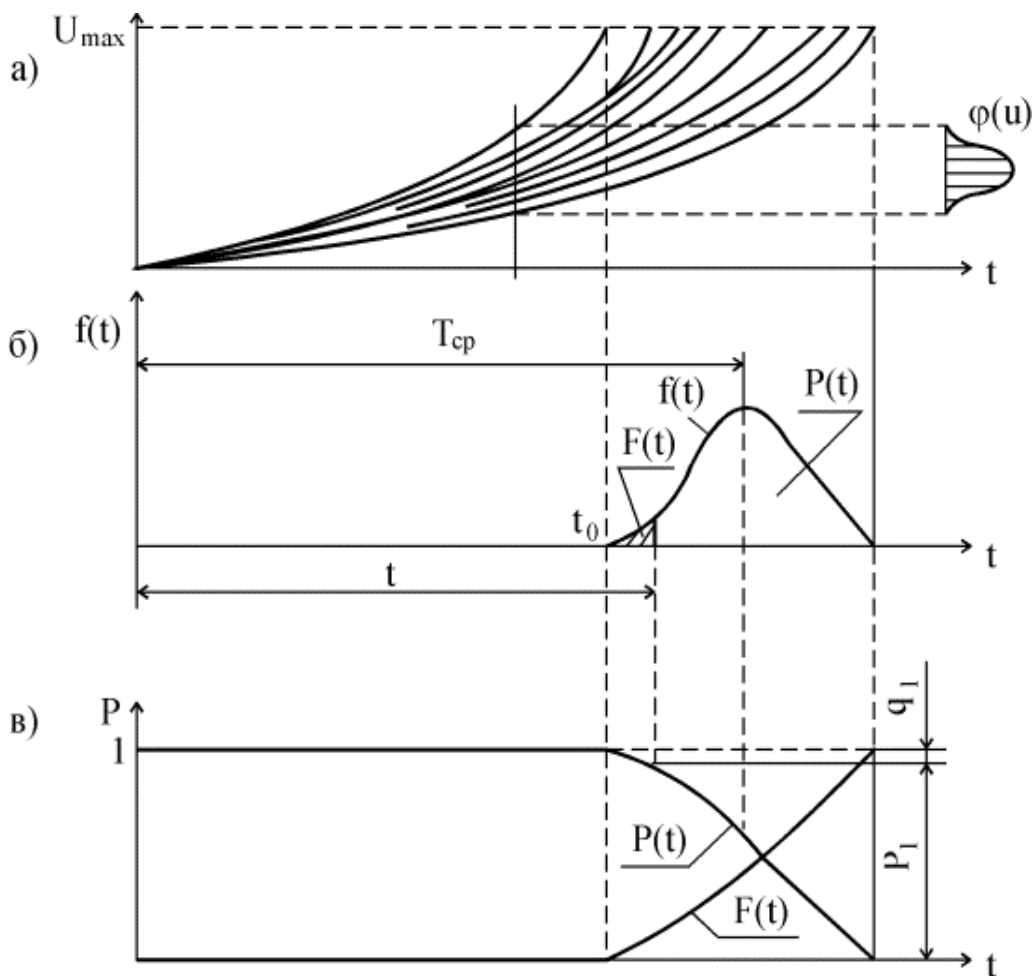


Рис. 2. Криві розподілу випадкової величини при поступових відмовах в екосистемі: а – реалізація функції деградації  $\varphi(U)$ ; б – щільність розподілу термінів існування екосистеми  $f(t)$ ; в – інтегральна функція розподілу  $F(t)$  та імовірність безвідмовного існування екосистеми  $P(t)$

Таблиця 1

**Формули для розрахунку показників надійності екосистеми**

Показник	Функція розподілу [12]			
	експоненційного	нормального	логнормального	Вейбулла
$p(t_i)$	$\exp\{-\lambda t_i\} \approx 1 - \lambda t_i$	$\Phi\left(\frac{t_i - \bar{t}}{\sigma_i}\right)$	$\Phi\left(\frac{\ln t_i - a_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}}\right)$	$\exp\left\{-\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^\beta\right\}$
$q(t_i)$	$1 - \exp\{-\lambda t_i\} \approx \lambda t_i$	$1 - \Phi\left(\frac{t_i - \bar{t}}{\sigma_i}\right)$	$1 - \Phi\left(\frac{\ln t_i - a_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}}\right)$	$1 - \exp\left\{-\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^\beta\right\}$
$\lambda(t_i)$	$\frac{n(\Delta t)}{[N(t_i - 0,5n(\Delta t))\Delta t]}$	$\frac{\phi\left(\frac{t_i - \bar{t}}{\sigma_i}\right)}{\sigma_i p(t_i)}$	$\frac{\phi\left(\frac{\ln t - a_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}}\right)}{t_i \sigma_{\ln t} p(t_i)}$	$\frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t_i}{\theta}\right)^{\beta-1}$
$f(t_i)$	$\lambda \exp\{-\lambda t_i\}$	$\phi\left(\frac{t_i - \bar{t}}{\sigma_i}\right)$	$\phi\left(\frac{\ln t - a_{\ln t}}{\sigma_{\ln t}}\right)$	$\frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t_i}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^\beta\right\}$
$T$	$1/\lambda$	$\bar{t}$	$\exp\{a_{\ln t} + 0,5\sigma_{\ln t}^2\}$	$\Theta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$

Імовірність безвідмовного існування екосистеми  $P(t)$  стосується події, протилежної появі відмови  $F(t)$ . Тому  $F(t) + P(t) = 1$ , або  $P(t) = 1 - F(t)$ .

У цьому випадку функція розподілу відмови

$F(t) = P(t < t_{300}) = Q(t)$ ; щільність розподілу  $f(t) = dQ(t)/dt$ ; імовірність безвідмовності екосистеми за час  $t$ :  $P(t) = 1 - Q(t)$ .

У таблиці 1 наведені формули для розрахунку показників надійності екосистем за функцією розподілу часу появи відмови  $t$ .

Щільність розподілу визначено за формулою:

$$f_n(t) = \frac{1}{n\sigma} \sum_{i=1}^n V\left(\frac{t - \xi_i}{\sigma}\right) = \frac{1}{n\sigma\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\left(\frac{t - \xi_i}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right], \quad (6)$$

Тут  $V(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$  – ядро Гауса;  $n$  – обсяг

вибірки;  $\sigma$  – параметр локальності (ширина оцінки, досліджуваний параметр).

Досліджуваною випадковою величиною в розглянутій задачі є час (напрацювання до відмови). Область визначення даного параметра  $[0, \infty)$ . Отже, априорі відомо, що аналізовані випадкові величини належать до класу невід’ємних величин.

Для позитивно визначених випадкових величин запропоновано використовувати розподіл Гауса:

$$\hat{f}(t, \sigma) = \frac{1}{n\sigma} \sum_{i=1}^n \left[ V\left(\frac{t - \xi_i}{\sigma}\right) + V\left(\frac{t + \xi_i}{\sigma}\right) \right], \quad (7)$$

Імовірність безвідмовного існування екосистеми – це імовірність того, що в межах заданого напрацювання  $t$  поступова відмова в екосистемах не виникне, тобто випадковий час напрацювання до відмови  $\xi$  виявиться не менше  $t$ :

$$P(t) = P(\xi \geq t) = \bar{Q}(t), \quad t \geq 0., \quad (8)$$

Якщо відома щільність розподілу напрацювання на відмову, можна розрахувати функцію розподілу, чисельно проінтегрувати щільність:

$$\begin{aligned} \hat{F}(t, \sigma) &= \int_0^t f(u, \sigma) du = \\ &= \frac{1}{n\sigma} \int_0^t f(u, \sigma) du = \frac{1}{n\sigma} \sum_{i=1}^n \left[ \int_0^t V\left(\frac{u - \xi_i}{\sigma}\right) du + \int_0^t V\left(\frac{u + \xi_i}{\sigma}\right) du \right] = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \Phi\left(\frac{t - \xi_i}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{t + \xi_i}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\xi_i}{\sigma}\right) - \Phi\left(-\frac{\xi_i}{\sigma}\right) \right] = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \Phi\left(\frac{t - \xi_i}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{t + \xi_i}{\sigma}\right) \right] - 1, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\Phi(u)$  – інтеграл помилок.

Далі ймовірність безвідмовної роботи екосистеми розраховано:

$$P(t) = 1 - F(t). \quad (10)$$

Середній прямий залишковий час стану екосистеми – це математичне очікування часу, що залишився для існування екосистеми до чергової від-

мови, починаючи з моменту часу  $t$ , коли екосистема була працездатна. Середній зворотній залишковий час – це математичне очікування часу існування екосистеми від початку функціонування або відновлення після останньої регенерації до моменту часу  $t$ , у який екосистема працездатна. Ці показники розраховуються тільки для відновлюваних елементів.

Визначимо процеси  $\{V_t, t \geq 0\}$  і  $\{R_t, t \geq 0\}$ , які відповідно названо процесами прямого і зворотного залишкового часу:

$$V_t = \tau_{N(t)+1} - 1; \quad (11)$$

$$R_t = t - \tau_{N(t)+1}, \quad (12)$$

де (11) – прямий залишковий час або вік, а (12) – зворотний залишковий час або залишкове напрацювання робочої системи до моменту часу  $t$ ;  $\tau_i$  – момент  $i$ -ї відмови. На рис. 3 показано процес функціонування відновлюваної екосистеми:  $\tau_i$  – моменти відмов (відновлень);  $\xi_i$  – напрацювання між відмовами;  $V_t$  – прямий залишковий час;  $R_t$  – зворотній залишковий час.

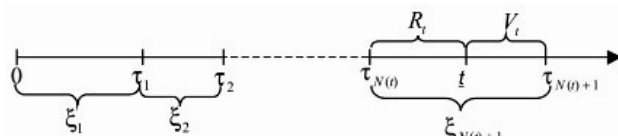


Рис. 3. Процес функціонування екосистеми, що відновлюється

$\{R_t\}$  і  $\{V_t\}$  є однорідними Марківськими процесами з безліччю станів на осі часу  $[0, \infty)$  [12].

У разі однорідного потоку вирази для визначення середнього прямого й зворотного залишкового часів є рівнянням Вольтера 2-го роду [12]:

$$V(t) = \int_t^\infty P(x) dx + \int_0^t V(\tau) f_\xi(t - \tau) d\tau, \quad (13)$$

$$R(t) = tP(t) + \int_0^t R(\tau) f_\xi(t - \tau) d\tau, \quad (14)$$

Інтенсивність відмов елементів в екосистемі – це відношення умовної імовірності того, що випадкове напрацювання до відмови буде набувати значень з інтервалу  $[t; t + \Delta t)$  нескінченно малої довжини  $\Delta t$  за умови, що відмови до моменту часу  $t$  не було, до довжини цього інтервалу  $\Delta t$ . Іншими словами, інтенсивність відмов в екосистемах – це відношення щільності розподілу напрацювання до відмови в залежності від імовірності безвідмовного її існування:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq \xi < t + \Delta t / t \leq \xi)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{1 - Q(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (15)$$

Інтенсивність відмов часто називають  $\lambda$ -характеристикою, вона показує, яка частина елементів екосистеми виходить з ладу в одиницю часу відносно середнього числа справно працюючих елементів екосистеми.

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що розроблений методичний підхід може бути складовим компонентом у проведенні екологічних досліджень і дає можливість органам, відповідальним за екологічну безпеку, підвищити ефективність попереджувального та поточного нагляду з метою про-

філактики забруднення навколишнього середовища. Перенесення розробленого підходу на програмне забезпечення в персональний комп'ютер може слугувати основою для створення системи підтримки прийняття рішень та відповідної інформаційної системи для керівників різного рівня.

#### Література

1. Азаров С.І. Визначення надійності екосистем до чинника антропогенного тиску. *Екологічна безпека та природокористування* : збірник наукових праць / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. № 3–4 (24), липень-грудень 2017 р. С. 50–57.
2. Гродзинський М.Д. Стійкість геосистем до антропогенних навантажень. Київ : Лікей, 1995. 233 с.
3. Матвеева І.В., Азаров С.І., Кутлахмедов Ю.О., Харламова О.В. Стійкість екосистем до радіаційних навантажень. Київ : НАУ, 2016. 396 с.
4. Азаров С.І., Задунай О.С. Моделювання стійкості екосистеми. *Екологічні науки*. 2018. № 4 (23). С. 5–9.
5. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Аналіз характеристик існуючих екосистем. *Екологічні науки*. 2017. Вип. 3/4 (18-19). С. 77–85.
6. Ушаков И.А. Надежность: прошлое, настоящее и будущее. *Математические методы в надежности* : пленарный доклад на открытии конференции (MMR-2000), Бордо, 2000. Reliability: Theory & Applications. No.1. January 2006.
7. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. Москва : Мир, 1984. 318с.
8. Сандлер Дж. Техника надежности систем / пер. с англ. А.Л. Райкина. Москва : Наука, 1966. 300 с.
9. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность / пер. с англ. Б.А. Чумаченко. Москва–Ленинград : Энергия, 1966. 232 с.
10. Ernest J. Henley and Hiromitsu Kumamoto. Reliability engineering and risk assessment. New Jersey : Prentice-Hall, 1981. 530 p.
11. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности / пер. с англ. под ред. Б.В. Гнеденко. Москва : Изд-во «Сов. радио», 1969. 488 с.
12. Математика. Большой энциклопедический словарь. / гл. ред. Ю.В. Прохоров. 2-е изд. Москва : БРЭ, 1998. 987 с.