

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/17>

Лисенко О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чумаченко С.М.

Національний університет харчових технологій

Явіся В.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Новіков В.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сушин І.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛІ ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ВІД МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ В АЛГОРИТМАХ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ УСКЛАДНЕНИХ ТЕХНОГЕННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Сформульовано новий підхід, який забезпечує представлення об'єктивної та комплексної кількісної й якісної інформації про рівень екологічної безпеки екосистем на контрольованих об'єктах, територіях і зонах у формі, придатній для використання в системах підтримки прийняття рішень. Запропонований підхід дозволяє найкращим чином використовувати унікальні інформаційні можливості мобільних безпроводових сенсорних мереж в інтересах моніторингу екологічного стану навколишнього природного середовища. Мобільна безпроводова сенсорна мережа може функціонувати на не підготовлених ландшафтах і проводити спостереження за зооценозом та мігруючими факторами техногенного впливу. Мобільна безпроводова сенсорна мережа розглядається як джерело первинної інформації про вектор стану екологічної системи регіону, математична модель якої описується звичайними лінійними нестационарними рівняннями, де в якості алгоритмічного спостерігача стану запропоновано використовувати спостерігач Льюїнбергера. За допомогою спостерігача Льюїнбергера можна покомпонентно оцінити стан екосистеми. В результаті доповнення алгоритму спостерігача Льюїнбергера блоками ідентифікації екологічних процесів, зовнішніх впливів та поширення забруднень отримано структуру імітаційної моделі, яку доцільно використовувати на етапі прогнозного моделювання техногенного впливу та реабілітаційних заходів на навколишнє природне середовище регіону. Запропоновано підхід, який зводить задачу про оцінювання стану екологічної системи, ускладненої техногенним навантаженням, до розв'язання математичної задачі про спостерігаємість системи. Розроблено пропозиції щодо розв'язання задачі побудови структурних схем моделей використанням мобільних безпроводових сенсорних мереж для інформаційного забезпечення алгоритмів оцінювання та прогнозування стану екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням. Запропонований підхід дозволяє застосувати розвинений математичний апарат системних досліджень, який широко використовується у сучасній теорії керування складними системами, в задачах математичної екології.

Ключові слова: безпроводова сенсорна мережа, мобільна безпроводова сенсорна мережа, спостерігач Льюїнбергера, оцінювання та прогнозування стану екологічної системи, інформаційна технологія.

Вступ

При розробці математичних моделей оцінки та прогнозування екологічного стану навколишнього природного середовища, що призначені для використання в експертно-моделюючих системах прийняття рішення стосовно екологічної безпеки територій, що перебувають під інтенсивним техногенним навантаженням, необхідно мати на увазі, що інформація про стан і якість екосистем (їх окремих компонентів), є різною за своєю природою, розмірностями, ступенем повноти і ступенем значимості. Ця інформація має просторово-часовий розподіл і в ієрархічному плані відноситься до різних рівнів вертикальної шкали систем екологічного моніторингу.

Математичні моделі, що застосовуються на теперішній час, базуються переважно на оцінці екологічного стану і якості головних природних компонентів (атмосферне повітря, вода, ґрунт), що засновані переважно на „забруднюючому-ресурсному” підході, який спирається на нормативні гранично допустимі концентрації (ГДК), гранично допустимі викиди (ГДВ), гранично допустимі скиди (ГДС) і використовують прості співвідношення між вимірним значенням концентрації будь-якої забруднюючої речовини та значеннями її ГДК, ГДВ, ГДС [1].

Цей підхід має свої обмеження і не дає можливості комплексно й об’єктивно оцінити екологічний стан і якість досліджуваних об’єктів, а значить і їхній рівень екологічної безпеки. Пояснюється це тим, що в рамках цього підходу розглядається і оцінюється стан об’єкта, який обумовлено, в основному, хімічною складовою забруднення, що недостатньо повно відображає стан навколишнього природного середовища (НПС) і практично не містить даних за напрямками оцінки та прогнозування властивостей, процесів і явищ.

У зв’язку з цим необхідно використовувати нові науково-методичні принципи організації контролю і оцінки рівня екологічної безпеки контрольованих територій, які засновані на новому екологічному світогляді, що спирається на синергетичний (системний) підхід і нові інфотелекомунікаційні технології (зокрема технології 5G та 6G у купі із технологіями туманних та хмарних обчислень і технологіями стаціонарних та мобільних безпроводових сенсорних мереж).

Новий підхід забезпечує представлення об’єктивної та комплексної кількісної й якісної інформації про рівень екологічної безпеки екосистем на контрольованих об’єктах, територіях і зонах у формі, придатній для використання в системах підтримки прийняття рішень.

Застосування нових способів і технологій підготовки інформації для систем підтримки прийняття рішень і нових форматів представлення екологічної інформації з використанням стаціонарних та мобільних безпроводових сенсорних мереж дозволить підвищити ефективність прийнятих рішень, знизити ризик помилкових фінансових витрат.

Враховуючи, що у зоні надзвичайної ситуації стаціонарні сенсорні мережі, за звичай, будуть пошкоджені, стає зрозумілим той факт, що найбільш доцільно отримувати оперативну первинну інформацію про стан екосистеми із використанням мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ)[1–8].

Таким чином постає задача вдосконалення інформаційної технології оцінювання та прогнозування стану наземних екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням, з точки зору формулювання моделі (концептуального підходу) до формування способу підключення МБСМ до алгоритмів оцінювання та прогнозування.

Постановка задачі дослідження

Математична постановка задачі оцінки та прогнозування стану екосистеми, що перебуває під впливом техногенного навантаження (екосистема ускладнена техногенним навантаженням) може бути зведена до задачі про спостережіємість як у неперервній, так в дискретній постановці [9].

На практиці доцільність використання неперервної або дискретної за часом моделі визначається в основному зручністю, наочністю та доступністю дослідження та перевагою якісних міркувань (неперервна модель) або кількісних оцінок (дискретна модель). Якщо інтервал моделювання T_M набагато перевищує інтервал дискретизації T_0 , тоді зручно використовувати при ідентифікації і при моделюванні неперервну модель (наприклад: а) – $T_0=1$ доба, $T_M>1$ рік; б) – $T_0\in[10,\dots,30]$ діб, $T_M>n\times 10$ років). У протилежному випадку, коли $T_0\approx n$ місяців, а $T_M\approx n$ років, зручно (і правомірно) використовувати дискретну у часі модель. Підкреслимо, що в окремі дискретні моменти часу, які співпадають із сезонними (наприклад, річними) циклами підвищення техногенного навантаження, значення вектору стану неперервної та дискретної моделей співпадають. При цьому в проміжках між дискретними відліками часу в неперервній моделі здійснюється плавна інтерполяція. Обґрунтованість плавної інтерполяції підтверджується практичними спостереженнями, в яких були зафіксовані лише

випадки плавного поступового самовідновлення складових вектору стану екосистеми [10].

Розв'язання задачі про спостерегаємість наземної екосистеми у термінах системних досліджень теорії автоматичного керування дозволяє з'ясувати наявність або відсутність можливості оцінити та спрогнозувати всі компоненти вектору стану наземної екосистеми, але не дає зручну процедуру для отримання такої оцінки та прогнозу.

Таким чином, постає задача пошуку моделі інформаційно-алгоритмічної структури, яка дозволяє побудувати процедуру оперативного оцінювання та прогнозування компонент вектору стану наземної екосистеми ускладненої техногенним навантаженням.

Метою даної статті є: розробка пропозицій щодо розв'язання задачі побудови структурних схем моделей використання МБСМ для інформаційного забезпечення алгоритмів оцінювання та прогнозування стану екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням.

Викладення основного матеріалу

Математичну модель екосистеми ускладненої техногенним навантаженням представимо у вигляді системи рівнянь у відхиленнях біомас продуцентів, субстратів та консументів $X(t)$, що відбуваються біля точки стійкої рівноваги екосистеми (тобто, поблизу того стану коли екосистема, ще не зазнала техногенного впливу) [11–14]:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + \Delta\Omega(t) + \Delta W(t) + \Delta U(t), \quad (1)$$

де $A(t)$ – квадратна матриця розміром $n \times n$, елементи якої залежать від змінного у часі рівня забруднення, викликаного техногенним впливом; $\Delta\Omega(t)$, $\Delta W(t)$, $\Delta U(t)$ – матриці-стовпці розміром $n \times 1$, що складені з відхилень відповідних елементів $\Delta\Omega(t)$, $\Delta W(t)$, $\Delta U(t)$, які характеризують вплив на відповідні компоненти математичної моделі екосистеми погоднокліматичних факторів, уражаючих факторів техногенного навантаження (моделюється імпульсним впливом, яке стрибкоподібно переводить систему до нового положення за відповідною координатою), відновлювальних (реабілітаційних) природоохоронних заходів (складається із суми природних (зовнішня міграція та сукцесія) та штучних відновлювальних заходів).

Вважаємо, що за станом екосистеми ведеться спостереження із використанням безпроводової сенсорної мережі [15; 16], яка дозволяє вимірювати інтенсивність забруднення та оцінювати (обраховувати) елементи матриці $A(t)$, а також вимірювати агреговані показники біомаси (наприклад, з використанням дистанційного зондування Землі (ДЗЗ)) у вигляді

$$Y = C(t) \cdot X, \quad (2)$$

де $C(t)$ – матриця спостережень розміром $m \times n$.

Зауважимо, якщо побудована неперервна лінійна математична модель у вигляді (1), (2) та задано період дискретизації за часом T_0 , то за допомогою відомих перетворень можна побудувати дискретну лінійну математичну модель [17]:

$$X(i+1) = A^*(i)X(i) + \Delta\Omega^*(i) + \Delta W^*(i) + \Delta U^*(i); \quad (3)$$

$$Y(i+1) = C^*(i)X(i); \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

де:

$$A^*(i) = \Phi(t_{i+1}, t_i),$$

$$\Delta\Omega^*(i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\Phi(t_{i+1}, \tau) \Delta\Omega(\tau)) d\tau;$$

$$\Delta W^*(i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\Phi(t_{i+1}, \tau) \Delta W(\tau)) d\tau;$$

$$\Delta U^*(i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\Phi(t_{i+1}, \tau) \Delta U(\tau)) d\tau;$$

$$C^*(i) = C(t'_i) \cdot \Phi(t'_i, t_i), \quad t'_i \in [t_i, t_{i+1}],$$

$t_i, i = 0, 1, 2, \dots$ – дискретні моменти часу;

$\Phi(t, t_0)$ – перехідна матриця, яка є рішенням матричного диференційного рівняння

$$\frac{d}{dt} \Phi(t, t_0) = A(t) \cdot \Phi(t, t_0), \quad t > t_0,$$

де $\Phi(t_0, t_0)$ – одинична матриця.

Для рішення задачі оцінювання та прогнозування кількісних значень усіх компонент вектору стану екосистеми пропонується використовувати алгоритм спостерігача Льюїнбергера [14].

За допомогою спостерігача Льюїнбергера (рис. 1) можна покомпонентно оцінити стан екосистеми. Якщо при побудові спостерігача враховувати неточності вимірювання (тобто шуми вимірювання), то спостерігач Льюїнбергера необхідно замінити оптимальним (квазіоптимальним) фільтром. Дану схему (див. рис. 1) доцільно застосовувати при оцінюванні вектору стану екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням.

Для реалізації схеми спостереження стану екосистеми, яка враховує нестационарність матриці A , необхідно провести додаткові дослідження щодо встановлення виду математичної залежності параметрів матриці A від компонент забруднення за всіма складовими вектора стану екосистеми. Після цього доповнити схему (див. рис. 1) блоком уточнення (ідентифікації) елементів матриці A . Для ідентифікації параметрів обраної математичної моделі підбирають найбільш зручний для розрахунку метод ідентифікації [18–21].

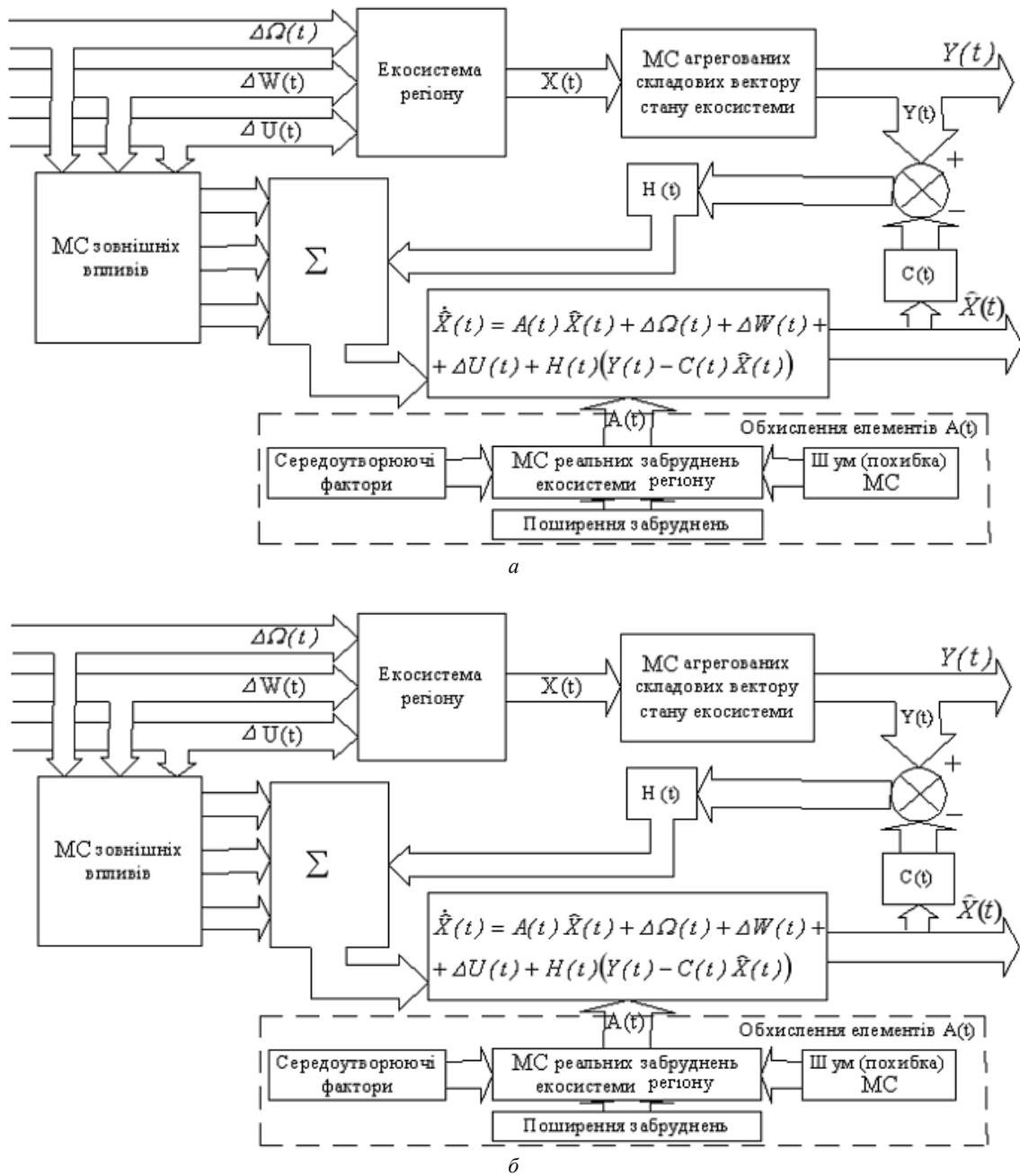


Рис. 1. Модель підключення мобільних сенсорів (МС) мобільної безпроводової сенсорної мережі (МБСМ) до алгоритму спостерігача Льюїнбергера в задачі оцінки стану екосистеми:
 а – неперервний спостерігач, б – дискретний спостерігач; $C(t)$, $C^*(i)$ – матриця спостережень; $Y(t)$, $Y(i)$ – вектор спостережень; $H(t)$, $H(i)$ – матриця зворотного зв'язку (матриця вагових коефіцієнтів)

Матрицю $H(t)$ або $H(i)$ (див. рис. 1), у відповідності з теорією спостерігача Льюїнбергера [22], потрібно обирати так, щоб помилка

$$\Delta X(t) = X(t) - \hat{X}(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty \quad (5)$$

$$\text{або } \Delta X(i) = X(i) - \hat{X}(i) \rightarrow 0 \text{ при } i \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Враховуючи той факт, що на практиці виміри біотичних параметрів зазвичай виконуються з точністю $\pm(10 \div 15) \%$ від абсолютних значень

вимірюваних величин, доцільно в спостерігачі Льюїнбергера при обчисленні H використовувати процедури обчислення матричного коефіцієнта підсилення оптимального фільтра в сталому режимі. При цьому припускаємо, що на вході формуючого фільтра теж діє збурюючий вінерівський процес. В якості безперервного або дискретного формуючих фільтрів розглядаються відповідно рівняння (1), (2) або (3), (4). Таким чином, запропонований в роботі спостерігач

Льюїнбергера є стійким і набуває фільтруючих властивостей, але не є оптимальним з точки зору фільтрації Калмана.

Загалом спостерігач Льюїнбергера використовується для відновлення детермінованих процесів. Але при вище поясненому визначені матричного коефіцієнта підсилення H його можна назвати фільтром Льюїнбергера для біотичних процесів, тобто розглядати як прикладну модифікацію квазіоптимального фільтру.

Підсумовуючи, робимо висновок, що розв'язання задачі оцінки стану екосистеми зводиться до виконання наступних дій:

1. Аналізу, пошуку та обґрунтування технічної реалізуємості такого вектору спостереження, який забезпечує спостерігаємість екосистеми у розумінні виконання критеріїв спостерігаємість у вигляді [14; 17; 23]:

$$\text{rank} [\Pi_0^T, \Pi_1^T, \dots, \Pi_k^T, \dots, \Pi_{n-1}^T] = n, \quad (7)$$

де $\Pi_0 = C(t)$, $\Pi_k = \dot{\Pi}_{k-1} + \Pi_{k-1} A(t)$, $k = \overline{1, n-1}$, для моделі (1), (2)

або

$$\text{rank} [M(i_0, i_1)] = n, \quad (8)$$

де $M(i_0; i_1) = \sum_{i=i_0+1}^{i_1} \Phi^{*T}(i, i_0+1) C^*(i)^T C(i) \Phi^*(i, i_0+1)$,

$\Phi^*(i, i_0)$ – перехідна матриця системи, яка є рішенням різницевого рівняння $\Phi^*(i+1, i_0) = A^*(i) \Phi^*(i, i_0)$, $i \geq i_0$, де $\Phi(i_0; i_0)$ – одинична матриця, для моделі (3), (4). (тобто необхідно розв'язати задачу спостерігаємість системи (1), (2) або (3), (4) з урахуванням технічних можливостей формування вектору спостережень $Y(t)$ або $Y(i)$).

2. Побудови такого алгоритму обробки вектору спостережень $Y(t)$ або $Y(i)$, що забезпечує отримання оцінки всього вектору стану екосистеми $X(t)$ або $X(i)$. Якщо для оцінки вектору стану використовувати алгоритм спостерігача Льюїнбергера, то з математичної точки зору задача оцінки вектору стану зводиться до вибору матриці зворотного зв'язку $H(t)$ або $H(i)$ такої, щоб виконувалась умова (5) або (6).

Якщо доповнити схеми (див. рис. 1) блоками імітації екопроцесів у досліджуваному регіоні, зовнішніх впливів та поширення забруднень, отримаємо структурну схему прогнозно-імітаційної моделі, яку пропонується використовувати на етапі екологічного прогнозування впливів техногенного навантаження на екосистему регіону (рис. 2), тобто для розв'язання задачі

прогнозування стану екосистеми, функціонування якої ускладнено техногенним навантаженням [10].

Балансові моделі екосистеми [11–13] зручно використовувати в якості базових узагальнюючих моделей. Але вони не враховують специфічні особливості зооценозу із складу наземної екосистеми [14]. Для врахування особливостей зооценозу наземної екосистеми доцільно побудувати модель взаємодії n -видів із чисельностями $N_i \geq N_0$, $i = \overline{1, n}$; N_i, N_0 – натуральні числа, яка дозволяє побудувати математичні моделі зооценозу у вигляді узагальненої моделі системи Лотки-Вольтерри [24]:

$$\frac{dN_i}{dt} = q_i(N_i) \left(\varepsilon_i - \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} f_j(N_j) \right) + \Omega_i(t) + W_i(t) + U_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

де ε_i – швидкість природного приросту або смертності;

$\gamma_{ij} (i \neq j)$ – коефіцієнти, що відображають характер взаємодії видів;

γ_{ii} – показники взаємодії всередині виду.

Прогнозуючи $\overline{\quad}$ вхідні впливи $\Omega_i(t), W_i(t), U_i(t), i = \overline{1, n}$ та вимірюючи початкові умови, за допомогою рівняння (9) знаходимо траєкторію переходу точки, що відображає у фазовому просторі прогнозоване положення зооценозу екосистеми. Виконавши поточну лінеаризацію (9) на цій траєкторії приходимо до рівнянь виду (1), (2), на базі яких виконуємо побудову спостерігача за схемою, що зображена на рис. 3.

Складність рішення задачі спостереження відхилень вектору стану системи (9) від прогнозованих значень полягає у тому, що вид функцій $q_i(N_i), f_j(N_j)$ невідомий.

Для подолання проблеми неточності знання залежностей $q_i(N_i)$ та $f_j(N_j)$ можна, наприклад, використовувати наступні три способи:

1. Побудова спрощених залежностей $q_i(N_i), f_j(N_j)$.
2. Застосування алгоритмів поточної ідентифікації параметрів матриць $A(t), C(t)$.
3. Використання комбінованої процедури, що складається із двох алгоритмів: алгоритм аналітичного спрощення, який базується на припущенні щодо структури і параметрів функцій $q_i(N_i), f_j(N_j)$; алгоритм поточної ідентифікації параметрів матриць $A(t), C(t)$.

Розглянемо перший спосіб – **спрощення**. Його суть полягає у тому, що узагальнена система Лотки-Вольтерри замінюється спрощеною системою Вольтерри

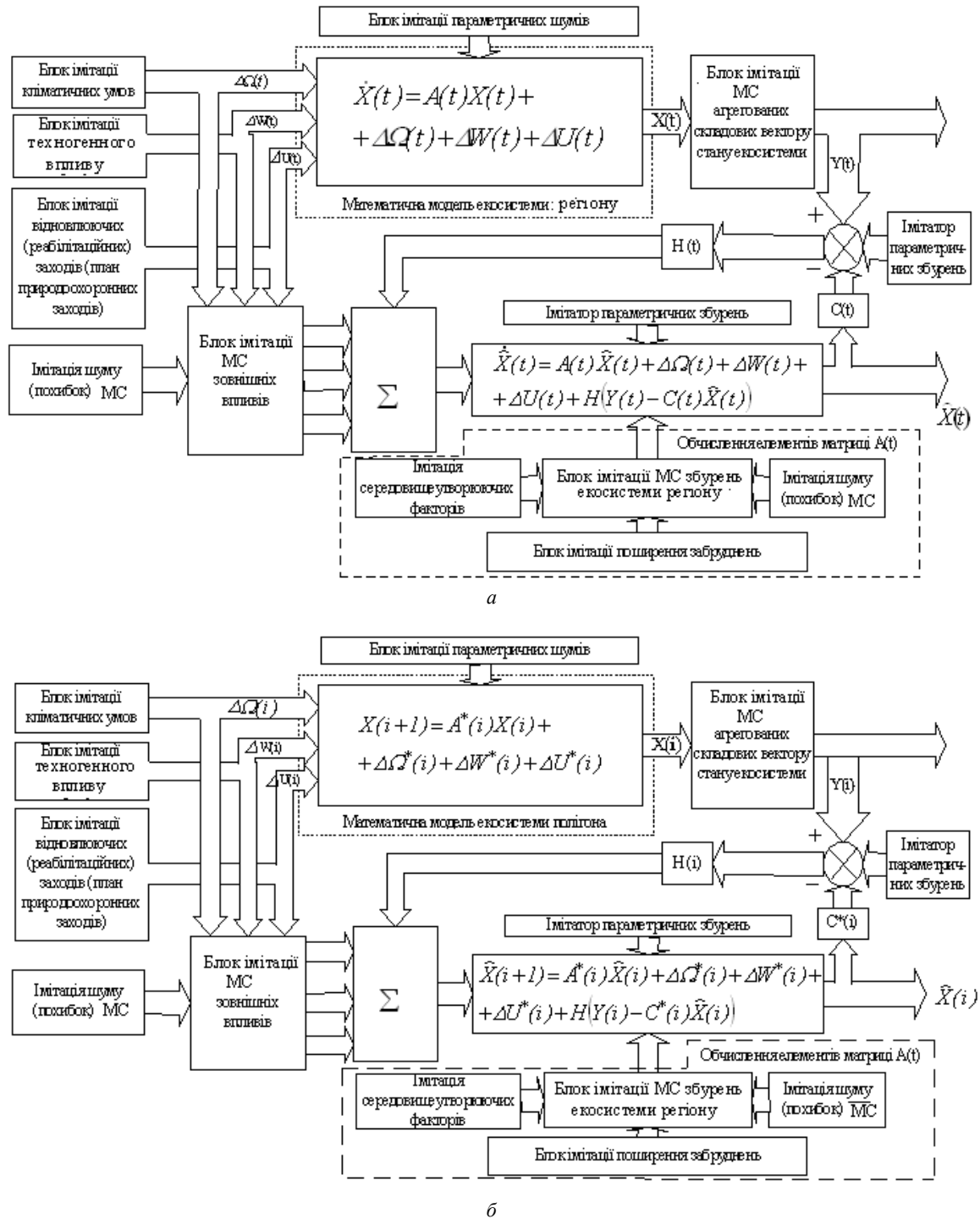


Рис. 2. Імітаційні моделі прогнозування стану екосистеми, ускладненої впливом техногенного навантаження
 а) – неперервна модель; б) – дискретна модель, $i \in \{0, 1, 2, \dots\}$; МС – мобільні сенсори із складу МБСМ

$$\frac{dN_i}{dt} = N_i \left(\varepsilon_i - \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} N_j \right) + \Omega_i(t) + W_i(t) + U_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

де зміст коефіцієнтів $\varepsilon_i, \gamma_{ij}$ залишається таким же, як і для системи (9), у якій покладено, що $q_i(N_i) = N_i, f_j(N_j) = N_j$.

Суть другого способу – ідентифікаційного – полягає у тому, що в інтервалі часу відносного сталого функціонування екосистеми (визначається планом розвитку регіону) та з врахуванням сезонно-кліматичних (погодних) змін здійснюється оцінка абсолютних (номінальних) значень складових вектору стану його екосистеми і далі в процесі функціонування оцінюються (вимі-

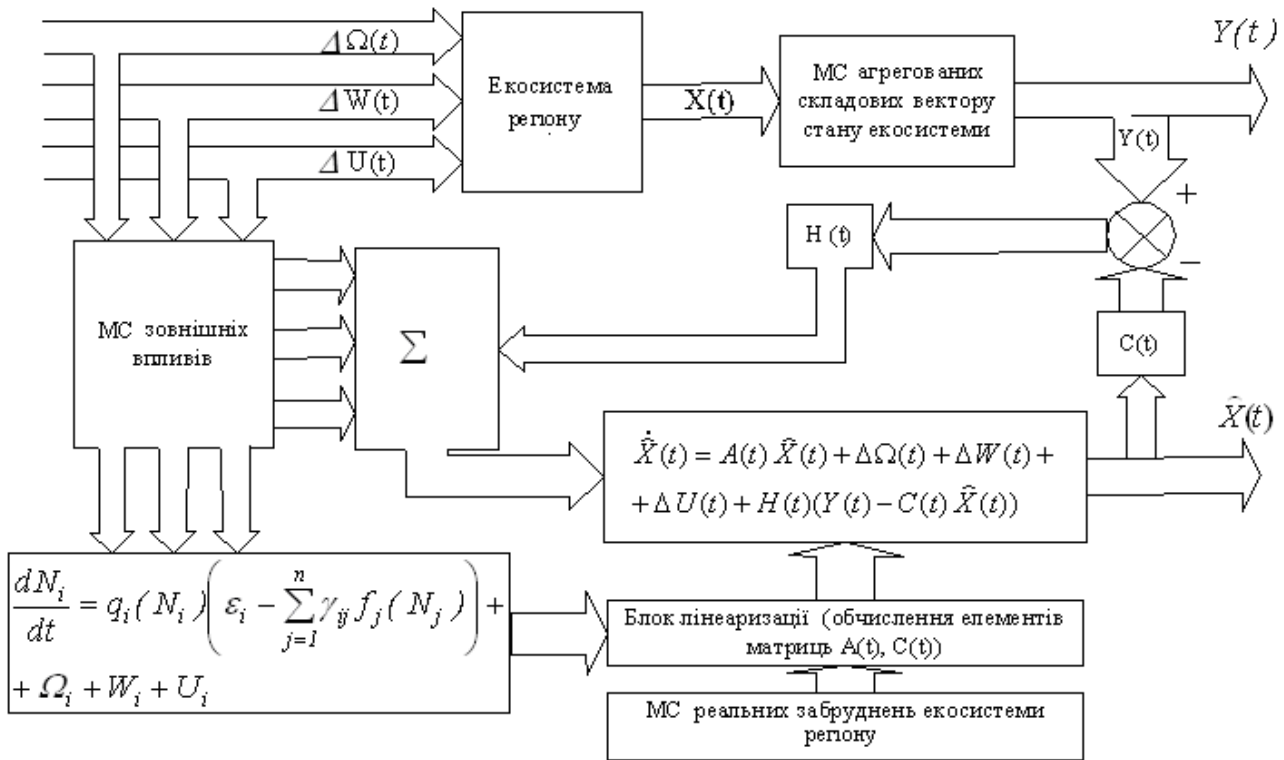


Рис. 3. Модель підключення мобільних сенсорів (МС) мобільної безпроводової сенсорної мережі (МБСМ) до алгоритму спостерігача Льюїсбергера з поточною лінеаризацією в задачі оцінки стану зооценозу екосистеми, ускладненої техногенним навантаженням

рюються) відхилення вектору стану екосистеми від абсолютних значень та реалізується алгоритм ідентифікації параметрів квазістаціонарної математичної моделі екосистем (приблизно сталі значення компонентів матриць A та C системи рівнянь (1), (2)). Структурна схема алгоритму спостереження за станом екосистеми доповнюється блоком ідентифікації параметрів матриці A екосистеми (рис. 4).

Для визначення номінальних вихідних значень (у першому наближенні) можна використовувати ДПІ агрегованих станів екосистеми

та допоміжну інформацію, що отримується за методиками обробки даних біоіндикаторів [15; 16].

Зміст третього – **комбінованого** – способу полягає у тому, що за відомими $q_i(N_i)$ і $f_j(N_j)$ аналітичним чином знаходиться структура матриці A , а потім за вимірами N_i у вихідному (номінальному) стані та даними ДПІ агрегованих станів визначаються (ідентифікуються) числові значення коефіцієнтів матриці A . Наприклад, для моделі Вольтерра (10) матриця A лінеаризованої системи набуває вигляду

$$A = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 - 2\gamma_{11}N_1 - \sum_{j=1}^n \gamma_{1j}N_j, & -\gamma_{12}N_1, & -\gamma_{13}N_1, & \dots & -\gamma_{1n}N_1 \\ -\gamma_{21}N_2, & \varepsilon_2 - \gamma_{21}N_2 - 2\gamma_{22}N_2 - \sum_{j=3}^n \gamma_{2j}N_j, & -\gamma_{23}N_2, & \dots & -\gamma_{2n}N_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\gamma_{n1}N_n, & -\gamma_{n2}N_n, & -\gamma_{n3}N_n, & \dots & \varepsilon_n - \sum_{j=1}^{n-1} \gamma_{nj}N_j - 2\gamma_{nn}N_n \end{bmatrix},$$

де вважається, що ε_i та γ_{ij} залежать від індексу забруднень I відповідно

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i0} + \varepsilon_{i1} \cdot \exp(\varepsilon_{i2} \cdot I); \quad \gamma_{ij} = \gamma_{ij0} + \gamma_{ij1} \cdot \exp(\gamma_{ij2} \cdot I).$$

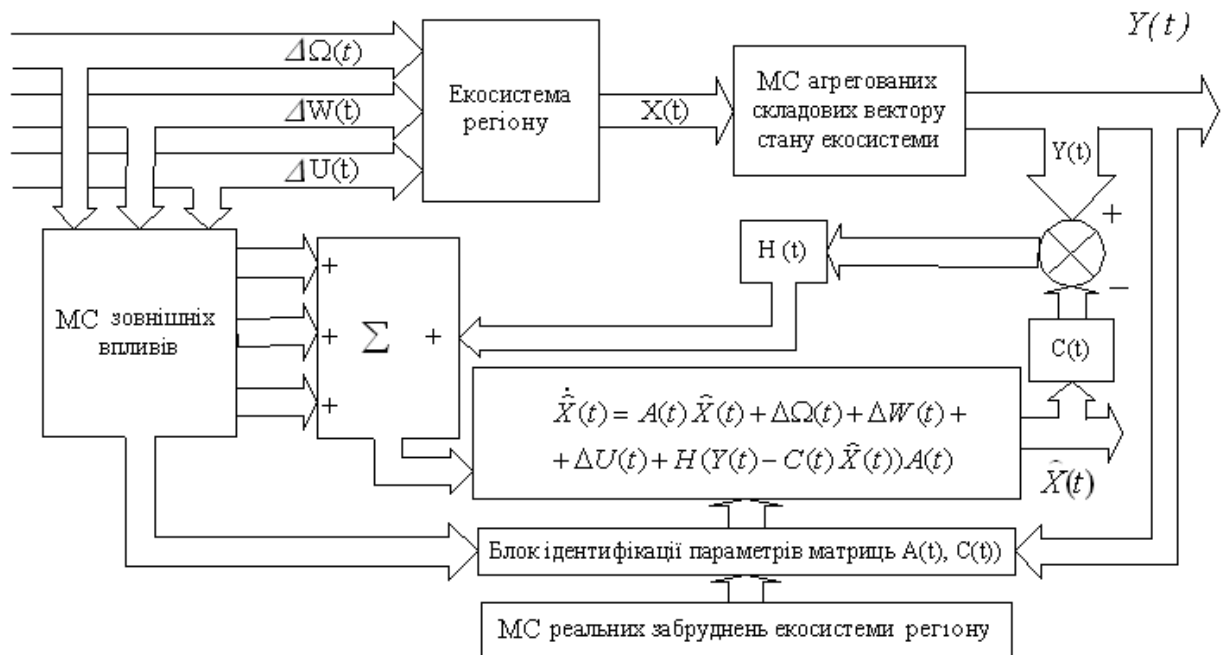


Рис. 4. Модель підключення мобільних сенсорів (МС) мобільної безпроводової сенсорної мережі (МБСМ) до алгоритму спостерігача Льюїнбергера з ідентифікацією параметрів спостерігача в задачі оцінки стану екосистеми, ускладненої техногенним навантаженням

Висновок

1. Сформульовано підхід, який дозволяє найкращим чином використовувати унікальні інформаційні можливості мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) в інтересах моніторингу стану навколишнього природного середовища: функціонування на не підготовлених ландшафтах, спостереження за зооценозом та мігруючими факторами техногенного впливу.

Розроблено пропозиції щодо розв'язання задачі побудови структурних схем моделей використанням МБСМ для інформаційного забезпечення алгоритмів оцінювання та прогнозування стану екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням.

2. Запропоновано використовувати МБСМ як джерело первинної інформації про вектор стану екологічної системи регіону, математична модель якої описується звичайними лінійними нестационарними рівняннями, де в якості алгоритмічного спостерігача стану запропоновано використовувати спостерігач Льюїнбергера.

Шляхом доповнення спостерігача Льюїнбергера блоками ідентифікації екологічних процесів, зовнішніх впливів та поширення забруднень отримано структуру імітаційної моделі, яку доцільно використовувати на етапі прогнозного моделювання техногенного впливу та реабілітаційних заходів на навколишнє природне середовище регіону.

3. Запропоновано підхід, який зводить задачу про оцінювання стану екологічної системи, ускладненої техногенним навантаженням, до розв'язання математичної задачі про спостерегаємість системи, тобто запропонований підхід дозволяє застосувати розвинений математичний апарат системних досліджень, який широко використовується у сучасній теорії керування складними системами, в задачах математичної екології.

Список літератури:

1. Романченко І.С., Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Данилюк С.Л., Новіков В.І., Тачиніна О.М., Кірчу П.І., Валуйський С.В. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях. К. : НАУ, 2016. 332 с.
2. Новіков В.І., Лисенко О.І., Валуйський С.В., Гуйда О.Г. Математичні моделі, методи та алгоритми оптимізації показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами й телекомунікаційними аероплатформами. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 31 (70) № 3, 2020. Частина 1. С. 54–64.
3. Uryvsky L., Lysenko O., Novikov V., Osypchuk S. Control Methods Research of Indicators for Intelligent Adaptive Flying Information-Telecommunication Platforms in Mobile Wireless Sensor Networks.

In: Klymash M., Beshley M., Luntovskyy A. (eds) Future Intent-Based Networking. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 831. P. 444–467. 2022. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5_25

4. V. Romaniuk, O. Lysenko, V. Novikov, I. Sushyn. Development of methods of positioning, localization and data collection from nodes of a free mobile sensor network using intelligent adaptive telecommunication aeroplatforms. Information and Telecommunication Sciences. № 2. 2021. Pp. 40–49. URL: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22021.40-49>

5. Olexander Lysenko, Olena Tachinina, Valeriy Novikov, Iryna Alekseeva, Serhii Chumachenko, Andrii Tureichuk: Expert-modeling decision support system for the deployment and management of a wireless sensor network with mobile sensors and telecommunication air platforms in the emergency zone. SECURITY FORUM 2021 14th Annual International Scientific Conference February 10 th, 2021 at Matej Bel University in Banská Bystrica, Slovakia Conference Proceedings Banská Bystrica, Slovakia 2021. Pp. 249–258. URL: <https://www.fpvmv.umb.sk/drive/2021-11-04/security-forum-2021.pdf>

6. Dan Popescu, Florin Stoican, Grigore Stamatescu, Oana Chenaru, Loretta Ichim. A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring Sensors, 2019, 19(21), 4690; URL: <https://doi.org/10.3390/s19214690>.

7. Zhen Qin, Aijing Li, Chao Dong, Haipeng Dai and Zhengqin Xu. Completion Time Minimization for Multi-UAV Information Collection via Trajectory Planning, Sensors, 2019, 19(18), 4032; URL: <https://doi.org/10.3390/s19184032>.

8. Bin Liu and Hongbo Zhu. Energy-Effective Data Gathering for UAV-Aided. Sensors (Basel). 2019; 19(11): 2506; URL: <https://doi.org/10.3390/s19112506>.

9. Напрямки вдосконалення природоохоронної діяльності в Збройних силах України / за редакцією О.І. Лисенка, С.М. Чумаченка. К. : ННДЦ ОТ і ВБ України, 2006. 424 с.

10. Лисенко О.І., Ісаєв О.М., Шевченко В.Л., Турейчук А.М. Імітаційна модель прогнозування екологічного стану полігона та якості агресивної техногенної діяльності / «Труди академії», № 64, 2005. С. 191–198.

11. Полуэктов Р.А., Пых Ю.А., Швытов И.А. Динамические модели экологических систем. Л. : 1980. 289 с.

12. Агробіорізноманіття України: теорія, методологія, індикатори, приклади / За ред. Созінова О.О., Придатко В.І. Книга 1. К. : ЗАТ «Нічлава», 2005. 384 с.

13. Свирижев Ю.М., Елизаров Е.Я. Математическое моделирование биологических систем. М. : 1972. 159 с.

14. Лысенко А.И., Чумаченко С.Н., Турейчук А.Н. Комплексная оценка и прогнозирование состояния экосистемы техногенно-нагружаемой территории с применением балансовых уравнений и наблюдателя Льюинбергера. Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(35). Дніпропетровськ, 2004. С. 139–147.

15. Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Новіков В.І., Гуйда О.Г., Турейчук А.М., Сушин І.О. Методика обґрунтування вимог до безпроводових сенсорних мереж інформаційного забезпечення систем оцінки та прогнозування стану природного середовища територій розподілених техногенних об'єктів. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71) № 6. 2021. С. 33–43. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/06>

16. Лисенко О.І., Турейчук А.М., Гуйда О.Г., Новіков В.І., Сушин І.О., Нідченко І.А. Методологія обґрунтування вимог до складу сенсорів безпроводової сенсорної мережі інформаційного забезпечення процедур та алгоритмів системи екологічного моніторингу розподіленого техногенного об'єкту. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 1 2022. С. 133–149. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/06>

17. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М. : Мир, 1977. 650 с.

18. Эйкхоф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 684 с.

19. Гроп Д. Методы идентификации систем. М. : Мир, 1979. 302 с.

20. Современные методы идентификации систем: Перевод с англ. / под редакцией П. Эйкхофа. М. : Мир, 1983. 400 с.

21. Войтенков И.Н. Методы и средства дифференциального оценивания и идентификации моделей. К. : Наук. думка, 1989. 288 с.

22. Изерман Р. Цифровые системы управления. М. : Мир, 1984. 541 с.

23. Справочник по теории автоматического управления / под редакцией А.А. Красовского. М. : Наука, 1987. 712 с.

24. Богобоящий В.В., Курбанов К.Р., Палій П.Б., Шмандій В.М. Принципи моделювання та прогнозування в екології. К. : Центр навчальної літератури, 2004. 216 с.

Lysenko O.I., Chumachenko S.M., Yavisya V.S., Guida O.G., Novikov V.I., Sushyn I.O.
MODELS USING MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR ALGORITHMS
EVALUATING AND FORECASTING THE STATE OF ECOLOGICAL SYSTEMS
COMPLICATED BY MAN-MADE LOADS

A new approach has been formulated that ensures the presentation of objective and complex quantitative and qualitative information about the level of ecological safety of ecosystems on controlled objects, territories and zones in a form suitable for use in decision support systems. The proposed approach makes it possible to best use the unique information capabilities of mobile wireless sensor networks in the interests of monitoring the ecological state of the natural environment. A mobile wireless sensor network can function on unprepared landscapes and monitor zoocenosis and migratory factors of man-made influence. The mobile wireless sensor network is considered as a source of primary information about the state vector of the ecological system of the region, the mathematical model of which is described by ordinary linear non-stationary equations, where it is proposed to use the Lewinberger observer as an algorithmic state observer. With the help of the Lewinberger observer, it is possible to assess the state of the ecosystem component by component. As a result of supplementing the algorithm of the Lewinberger observer with blocks for identifying ecological processes, external influences and the spread of pollution, the structure of the simulation model was obtained, which is expedient to use at the stage of predictive modeling of man-made impact and rehabilitation measures on the surrounding natural environment of the region. An approach is proposed that reduces the problem of assessing the state of the ecological system, complicated by man-made load, to the solution of the mathematical problem of the observability of the system. Proposals have been developed to solve the problem of building structural diagrams of models using mobile wireless sensor networks for information support of algorithms for evaluating and forecasting the state of ecological systems complicated by man-made loads. The proposed approach makes it possible to apply the developed mathematical apparatus of system research, which is widely used in the modern theory of control of complex systems, in the problems of mathematical ecology.

Key words: wireless sensor network, mobile wireless sensor network, Leuenberger observer, ecological system assessment and forecasting, information technology.