

2. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин. – Київ : Наукова думка, 2002. – 660 с.

3. Кіницький Я. Т., Харжевський В. О., Марченко М. В. Теорія механізмів і машин в системі Mathcad. – Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2014. – 295 с.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАНЦЮГІВ МАРКОВА

Баліна О. І.<sup>1</sup>, Безклубенко І. С.<sup>2</sup>, Буценко Ю. П.<sup>3</sup>, Гетун Г. В.<sup>4</sup>, Лесько В. І.<sup>5</sup>

<sup>1,2,4,5</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
03680, Київ, Повітрофлотський пр.-т, 31

<sup>3</sup>м. Київ, НТУ України «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського

E-mail: <sup>1</sup>*elena.i.balina@gmail.com*, <sup>2</sup>*i.bezklubenko@gmail.com*,

<sup>3</sup>*armchairdoc@ukr.net*, <sup>4</sup>*galinagetun@ukr.net*, <sup>5</sup>*Vitaless1@i.ua*

Методика моделювання природно-технічних систем, призначена для прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій за допомогою систем екологічного моніторингу.

Важливим та актуальним є підхід для моделювання поведінки екосистем, який ґрунтується на стохастичному моделюванні. Стохастичне моделювання використовує не строгі співвідношення, а експертну й емпіричну оцінки та універсальний математичний апарат. Запропоноване в роботі стохастичне моделювання, що ґрунтується на теорії скінченних ланцюгів Маркова [1], успішно застосовують в різних галузях промисловості [2]. При цьому переходи системи з одного стану в інший означають переміщення точки, що зображає поточний стан системи з однієї множини фазового простору до іншої, причому відповідну систему множин  $A_j$ ,  $j = \overline{1..m}$  фазового простору будують на основі екологічних нормативів. Побудована на основі статистичної інформації матриця перехідних ймовірностей:

$$P_{ij} = P\left\{\xi_{k+1} \in A_j / \xi_k \in A_i\right\},$$

де  $\xi_k$  – вектор стану системи в момент часу  $t_k$ ,  $\xi_{k+1}$  – той самий вектор в момент часу  $t_{k+1}$ .

Такий опис дозволяє розв'язувати, принаймні, три задачі:

1. Визначати ймовірності  $P_{ij}^{(n)}$  переходу системи зі стану  $A_i$  до стану  $A_j$  за  $n$  кроків.

2. Знаходити вектор  $P^{(n)}(B)$  ймовірностей знаходження системи у всіх можливих станах множини  $B$  через  $n$  кроків, якщо відомий стан системи у початковий момент.

3. Для специфічних станів системи визначати ймовірності потрапляння до них не більше ніж за  $n$  кроків та стаціонарні ймовірності, які дозволяють визначати частку часу, який система перебуває в цих станах.

Основним недоліком існуючих методів прогнозування є неможливість оцінки середнього часу перебування системи у тій чи іншій множині станів та відсутність врахування економічного ефекту від її еволюції. Моделям, які ґрунтуються на скінченних ланцюгах Маркова, притаманні наступні характерні риси:

- простота змісту;
- врахування природним чином існуючих екологічних нормативів, оскільки фазовий простір будують на основі діючого екологічного законодавства;
- можливість зведення множини оцінюваних параметрів до елементів перехідної матриці.

Практичне застосування таких моделей завдяки наявній розвинутій теорії ланцюгів Маркова дозволяє використовувати наступні критерії оптимальності:

- мінімізувати ймовірності станів системи, які є надзвичайними ситуаціями, у стаціонарному розподілі відповідного ланцюга;
- максимізувати середній час досягнення відповідного стану;
- мінімізувати шкоду від перебування системи в «екологічно несприятливих» станах;
- максимізувати економічний ефект від функціонування системи з врахуванням як прибутку від промислових об'єктів та позитивних соціальних зрушень, так і збитків екологічного походження.
- на основі статистичних досліджень створити банк сценаріїв, які можуть виникнути в кожній зоні;
- для кожного сценарію розрахувати часові лаги міжрегіональних ефектів;
- оперативне управління здійснювати шляхом використання стандартних сценаріїв з одночасним контролем їх адекватності реальній обстановці.

Нехай система здійснює управління територіями, що являють собою об'єднання зон (регіонів), які надалі вважатимуться такими, що не перетинаються. Фазовий простір  $\Omega$  екосистеми є прямим добутком  $\Omega_1$ , де  $\Omega_1$  є множиною всіх можливих упорядкованих наборів значень

концентрацій шкідливих речовин у повітряному та водному середовищах  $l$ -го регіону контрольованої території.

Відзначимо, що форми взаємозалежності між перехідними матрицями для суміжних зон можуть розраховуватись двома способами:

- виходячи з наявних статистичних даних;
- на основі моделі кореспонденцій, що спирається на наявну інформацію про повітряні течії, динаміку водойм тощо.

Виникнення надзвичайної ситуації навіть в одному регіоні (або навпаки, нормалізація екологічної обстановки в ньому) вимагає послідовного перерахунку матриць перехідних ймовірностей для всієї контрольованої території. Слід зауважити, що подібні перерахунки часто приводять до отримання контрверсійних результатів (для одного й того ж регіону отримуємо різні перехідні матриці). Для усунення вказаних протиріч пропонується:

- на основі статистичних досліджень створити банк сценаріїв, які можуть виникнути в кожній зоні;
- для кожного сценарію розрахувати часові лаги міжрегіональних ефектів;
- оперативне управління здійснювати шляхом використання стандартних сценаріїв із одночасним контролем їх адекватності реальній обстановці.

Етапи реалізації методики управління екологічною ситуацією, яка розроблена у даній роботі, суть наступні:

1. За допомогою наявних перехідних матриць для ланцюгів, що описують екологічну обстановку у зонах, виокремлюють такі режими роботи технологічних систем, які можуть за наперед встановлений термін (не більше  $N$  переходів) призвести до ситуацій, які віднесено до категорії вкрай небезпечних, хоча б в одному з регіонів.

2. Для ситуацій, які вважають несприятливими, вибирається режим роботи, при якому мінімізується зважена сума ймовірностей їх досягнення не більше ніж за  $M$  переходів або стаціонарних для конкретного ланцюга ймовірностей цих станів. Коефіцієнти в такій зваженій сумі вибирають, виходячи з необхідності забезпечити належне обмеження очікуваного середнього рівня забруднення по кожній з його компонент:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot p_1 + \dots + a_{1l} \cdot p_l \leq s_1 \\ \dots \\ a_{k1} \cdot p_1 + \dots + a_{kl} \cdot p_l \leq s_k \end{cases}$$

3. Після виконання попередніх дій для кожної з зон виконують оптимізацію за критерієм максимальної віддаленості системи від небезпечного рівня забруднення, тобто вибору такого режиму її функціонування, при якому  $T = ET(f_1, \dots, f_n) \rightarrow \max$ , де  $T(f_1, \dots, f_n)$  – час досягнення величиною  $A_1 f_1 + \dots + A_n f_n$  критичного рівня  $F$ ,  $f_1, \dots, f_n$  – характеристики промислового забруднення зон,  $A_1, \dots, A_n$  – вагові коефіцієнти.

4. Якщо попередня задача розв'язана, але в наявності є ряд стратегій, результати застосування яких практично мало відрізняються від оптимального, то для таких стратегій розраховують: а) середню величину шкоди від перебування у екологічно небезпечних станах; б) середній економічний ефект від функціонування системи, що враховує як прибутки від функціонування промисловості і позитивні соціально-економічні зрушення, так і описані вище збитки. Зрозуміло, що порівняння результатів вибору однієї з стратегій в такому випадку є необхідним для прийняття рішення на державному рівні.

Керування системою може здійснюватись як шляхом зміни фазового простору (перегляд норм та рівнів забруднення), так і зміною матриці перехідних ймовірностей, причому обидва ці методи можуть послідовно комбінуватись. Зазначимо, що зміна матриці перехідних ймовірностей може вимагати істотних капіталовкладень (наприклад, підвищення надійності промислових установок, зменшення рівнів викидів тощо), що має бути враховано при прийнятті відповідних оптимізуючих управлінських рішень.

## Література

1. Ли Ц. Оценивание параметров марковских моделей по агрегированным временным рядам / Ц. Ли, Д. Джадж, А. Зельнер ; пер. с англ. – М. : Статистика, 1977. – 221 с.
2. Приймак М. В. Періодичні ланцюги Маркова в задачах статистичного аналізу і прогнозу енергонавантажень / М. В. Приймак // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 2. – С. 3–7.
3. Адмаев О. В. Использование марковских процессов для оценки экологической безопасности воздушного пространства города / О. В. Адмаев, Т. В. Гавриленко // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23, № 12. – С. 1087–1090.