



УДК 69:002; 69.059

INTEGRATED MODELS OF FORECASTING RELIABILITY OF DECISION MAKING OF THE SYSTEM OF DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF BUILDINGS

ІНТЕГРОВАНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬ

Terentyev O.O. / Терентьев О.О.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001-6995-1419

Gorbatyuk Ie.V. / Горбатьюк Є.В.*s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-8148-5323

Tyslenko O.B. / Тисленко О.Б.*Ph.D. degree / здобувач ступеня доктора філософії***Zubrij I.M. / Зубрій І.М.***Ph.D. degree / здобувач ступеня доктора філософії**Kyiv National University of Construction and Architecture,**Kyiv, Povitryanikh Sil Avenue, 31, 03037**Київський національний університет будівництва і архітектури,**Київ, Повітряних Сил, 31, 03037*

Анотація. Проведені дослідження дозволяють запропонувати підхід до вирішення завдання вибору тієї чи іншої моделі, що описує зміну динаміки вимірних даних внаслідок старіння та зносу конструкцій, дозволяє обґрунтовано вибирати ступінь складності моделі, що забезпечує найвищу точність прогнозу з моменту настання пошкодженого стану.

Ключові слова: інтегровані моделі, діагностика технічного стану, інформаційна технологія, прогнозування надійності прийняття рішень.

Вступ.

В даний час найбільш активно використовуються алгоритми прогнозування термінів настання експлуатаційної придатності будівель, що засновані на застосуванні методів математичної статистики, теорії розпізнавання образів і синергетики. Відмінною особливістю цих алгоритмів є виявлення часових характеристик показників надійності розрахункових параметрів.

Найбільш інформативними параметрами, що характеризують рівень технічного стану будівель є напружений стан елементів будівель. У загальному випадку, рівень складності апроксимуючої функції залежить не тільки від самого змінюваного параметра, але і від рівня шумової складової вимірювань і обсягу вибірки.



Вибір тієї чи іншої моделі, що описує зміни показників надійності функціонування технічного стану, є найбільш відповідальним та складним етапом прогностичної процедури.

Спрощення моделі призводить до зменшення точності прогнозу часу настання експлуатаційної придатності будівель. Зайве ускладнення моделі може привести до нестійкості алгоритму ідентифікації і позбавляє ідентифікаційні моделі пророчої сили. Крім того, необхідно враховувати, що ступінь складності моделі залежить не тільки від ідентифікованого параметра, але і від рівня похибки первинних вимірювань.

Представляється актуальна багатокритеріальна задача вибору оптимального ступеня складності моделей, що описують зміну показників надійності будівель.

При виборі методу вирішення поставленого завдання постає дві додаткові умови.

Перша модель повинна відповідати прогнозуючими властивостями, тобто при екстраполяції на деякий проміжок часу її значення не повинно «розбобтуватися». Ця умова накладає обмеження на ступінь складності функцій - для надто складної моделі малі помилки вимірювань, не помітні на інтервалі інтерполяції, на етапі прогнозу можуть радикально змінювати поведінку модельної функції.

По-друге, припускаємо, що обсяг вибірки даних, за якою будується модель, невелика. Це пов'язано з тим, що найбільш достовірна інформація зберігається в базах даних сучасних інформаційних системах, що охоплює часовий інтервал у 5-6 років.

Складність задачі оптимального вибору апроксимуючої функції, що описує ту чи іншу зміну показників експлуатації будівель, посилюється помилками вимірювань, які проявляються у вигляді накладення шуму на координати експериментальних точок.

Аналіз представлених емпіричних даних показує, що динаміка зміни даних перед різними типами пошкоджень відрізняється кардинальним чином.

Дійсно, використовуючи один або кілька класичних критеріїв (мінімум



величини дисперсії адекватності, критерій Тейла) і схему стандартного методу найменших квадратів (МНК), можна побудувати модель з бажаним ступенем точності, не порушуючи при цьому принципа Пуанкаре (точність моделі не може перевершувати точності первинної інформації). Однак це не дає вирішення прогностичності завдання - визначення моменту пошкоджень, так як найкраща на етапі навчання модель не завжди є і більш точною екстраполяцією майбутнього сценарію розвитку.

Приведемо це на прикладі прогнозу моменту настання пошкоджень. Попередня селекція елементарних функцій, що описують таку поведінку експериментальних кривих, показала, що найбільш точні (в сенсі дисперсії адекватності) поліноміальні залежності.

Аналіз отриманих результатів показує, що помилка прогнозу моменту настання пошкоджень лінійною моделлю становить 56%, поліномом 3-й ступеня 14%, поліномом 2-го ступеня 2%. У той же час величина дисперсії адекватності цих моделей на етапі навчання практично однакова. Таким чином, стає очевидною необхідність використання додаткових методів обробки даних, що в повній мірі реалізують інформаційні можливості систем.

Викладення основного матеріалу.

За динамікою даних напруги несучих конструкцій будівель за деякий період часу необхідно побудувати найкращу модель розвитку дефекту по двом критеріям-точність апроксимації плюс точність прогнозу.

Найбільш ефективним інструментом вирішення подібного роду завдань є метод структурної мінімізації середнього ризику. Адаптуємо цей метод до умов нашої задачі.

В інформаційній базі системи зберігається безліч локальних баз даних, $\{x_i\}$, кожна з яких представляє собою ретроспективний часовий ряд зміни показника експлуатації в часі $i=1,2,\dots,L$, де L визначається частотою опитування первинних датчиків.

Припустимо, що на підставі аналізу цих масивів даних будуються моделі виду $y=U(x)$ (у розглянутому випадку $Q=Q(t)$, де $Q(t)$ – зміна напруженого стану



внаслідок зносу конструкцій, t – час). В такому разі, у розпорядженні є вибірка $\{x_i, y_j\}$, де y_j y_j – модельне значення функції, що відповідає експериментально виміряному значенню параметра x_i .

Враховуючи, що експериментальні дані завжди вимірюються з деякою похибкою, введемо в розгляд перешкоду вимірювання ε_i . Тоді шукана модель прийме остаточний вигляд:

$$y = F(t_i) + \varepsilon_i. \quad (1)$$

Припускаючи, що клас функцій, у якому шукається регресія $\mu(x)$, є параметричним з параметрами a , задачу можна звести до мінімізації функціоналу емпіричного ризику:

$$I_o(a) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (y_i - F(x_i, a))^2, \quad (2)$$

де y_i – модельне значення параметра з урахуванням перешкоди виміру; $F(x_i, a)$ – моделююча функція; L – обсяг вибірки вимірювань, визначається частотою опитування первинних датчиків.

В роботі показано, що для критерію (2) можуть бути отримані верхні оцінки виду:

$$I(a) \leq I_m(a) = I_o(a) \Omega\left(\frac{1}{h}, \frac{l_{m\eta}}{L}\right), \quad (3)$$

справедливі з імовірністю $1-\eta$. Величина h являє собою ємність класу функцій $F(x, a)$ і визначає складність ідентифікованої моделі. Зокрема, якщо розглядається клас лінійних за параметрами функцій:

$$F(x, a) = \sum_{i=1}^n a_i \psi(x), \quad (4)$$

де $h=n$, тобто ємність класу функцій (складність моделі) дорівнює числу шуканих параметрів n .

Величина $1/\eta$ визначає відносний обсяг вибірки. Структура другого множника (3) така, що з ростом $1/h$ величина зменшується, прагнучи до одиниці.

Функціонал (2) зі збільшенням $1/h$, як правило, збільшується. Тому існує деяке оптимальне значення $1/h$, при якому верхня оцінка середнього ризику



(його гарантоване значення) досягає мінімуму. Це значення $1/\Omega$ і визначає оптимальну складність шуканої функції.

У відповідності з рекомендаціями при відновленні регресії в класі функцій (4) в якості критерію Ω використовуємо величину:

$$\Omega = \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{n(l_n \frac{1}{n} - l_{m\eta})}{L}}}; \quad (5)$$

$$[Z]_{\infty} = \begin{cases} z, z \geq 0 \\ \infty, z \leq 0 \end{cases}. \quad (6)$$

В роботі відмічено, що вирішення поставленої двоїстої задачі вдається отримати у разі використання досить великих вибірок експериментальних даних (обсяг $L > 20$ вимірювань). У разі подальшого розвитку дефектів і при побудові відповідних моделей ця вимога не виконується, і метод СМСП стає надто грубим, що свідомо віддають перевагу більш простим моделям. Найбільш ефективні результати для подолання подібного роду труднощів у ряді випадків можуть бути досягнуті шляхом залучення методів теорії нечітких множин.

Стосовно до задачі під поняттям приналежності до того або іншого об'єкту будемо розуміти значення $\{y_i\}$, обчислені за допомогою різних моделей (i – кількість розглянутих моделей).

Нечіткими множинами A в U називається сукупність пар виду $(u, \mu_A(u))$, де $u \in U, \mu_A(u)$ функція належності нечіткої множини A . Близькість функції $\mu_A(u)$ до 1 є кількісною мірою впевненості в тому, що елемент належить множині A .

Використання понять теорії нечітких множин дозволяє звести пошук сталого вирішення багатокритеріальної задачі до задачі пошуку екстремуму функції належності, яка визначається як:

$$\mu(a, n) = (\mu_o(I_o(a, n))\mu_o(n))^{0,5}, \quad (7)$$



де $\mu_o(I_o)$ і $\mu_o(n)$ – функції належності нечітких множин «малі значення емпіричного ризику» та «мала складність моделі». Ці функції можуть бути визначені наступним чином:

$$\mu_o(I_o) = \psi\left(\frac{I_o}{L_i}, m_1\right), \quad (8)$$

$$\mu_o(n) = \psi\left(\frac{n}{0,5L}, m_2\right), \quad (9)$$

$$\psi(t, m) = \begin{cases} 1 - t^m, & 0 \leq t \leq 1 \\ 0, & t > 1 \end{cases}, \quad (10)$$

де L_i – значення функціоналу емпіричного ризику, що відповідає числу параметрів m_1 і m_2 - показники ступеня, що визначають ставлення алгоритму до зменшення емпіричного ризику і збільшення складності моделі.

В якості інформаційного масиву для побудови найкращої моделі прогнозу моменту настання пошкодження, будемо використовувати 30-ти добове вимірювання даних, а в якості конкуруючих гіпотез розглядаються поліноми. Результати проведених розрахунків представлені в табл. 1.

МНК рекомендує максимальну ступінь складності апроксимуючої функції. Це цілком зрозуміло, оскільки МНК прагне мінімізувати відхилення експериментальних точок від апроксимуючої залежності, а це реалізується тільки при максимальній складності полінома. Метод СМСП допускає застосування інтерполюючого полінома зі ступенями $n=1$ та $n=2$, тоді як методи теорії нечітких множин однозначно вказують, що оптимальною є ступінь полінома $n=2$, що повністю підтверджує достовірність результатів.

Чисельна оцінка «прогнозуючої здатності» розглянутих моделей проводилася на підставі визначення величин середньоквадратичних відхилень (СКВ) експериментальних точок від відповідних модельних функцій, що і визначає точність прогнозу. У нашому випадку величини СКВ рівні 1,24, 0,26 та 2,31 для поліномів 1-ої, 2-ої і 3-го ступеня відповідно. Тому очевидно, що здатність до прогнозу найбільш висока у полінома другого ступеня, що збігається з висновком, отриманим на основі теорії нечітких множин 100.



Таблиця 1 Обґрунтування вибору найбільш прийнятної прогностичної моделі визначення моменту настання пошкодженого стану

Складність моделі	Критерій вибору моделі оптимальної складності		
	I_0	I_m	$\mu \cdot 10^4$
$n=1$	0,024	0,0124	3,44
$n=2$	0,020	0,0124	2,48
$n=3$	0,014	0,0126	2,63

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що запропонований метод визначення оптимальної складності моделі дозволяє отримувати найбільш високу точність прогнозу моменту настання пошкоджень. У всіх розглянутих випадках збільшення точності прогнозу становить 20–30%.

При цьому слід зауважити, що різниця у виборі моделі, рекомендованої методом СМСР і методами теорії нечітких множин, збільшується зі зменшенням обсягу вибірки вимірювань даних. При досить великих вибірках (як правило, $L > 20$) результати розрахунків за обома методами практично збігаються.

Висновки.

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок про те, що запропонований підхід до вирішення завдання вибору тієї чи іншої моделі, що описує зміну динаміки вимірюваних даних внаслідок старіння та зносу конструкцій, дозволяє обґрунтовано вибирати ступінь складності моделі, що забезпечує найвищу точність прогнозу з моменту настання пошкодженого стану.

Література:

1. Terentyev O.O., Gorbatyuk Ie.V., Lototskyi A.V. Research of Canvas technology in web-applications. Modern engineering and innovative technologies. Issue №27. Part 1. June 2023. P. 96-100. DOI: 10.30890/2567-5273.2023-27-01-004.
2. Gorbatyuk Ie. V., Rusan I. V., Terentyev O. O. Mathematical equations for determining the working element of the ripper. Modern problems of science, education and society. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference.



SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2023. Pp. 204-209.

3. Gorbatyuk I.V., Terentyev O.O., Rusan I.V., Dolya O.V., Balina O.I. Development of pulsed drives of end working organs of earthmoving machines. Chapter 5. The level of development of science and technology in the XXI century: Innovative technology, Computer science, Architecture, Physics and mathematics, Medicine, Biology and ecology, Agriculture. Monographic series «European Science». Book 22. Part 1. Karlsruhe, 2023. 63-71.

4. Терентьев О.О., Горбатюк Є.В., Тисленко О.Б., Зубрій І.М. Підвищення ефективності інформаційної системи комплексної безпеки захисту будівель. Modern engineering and innovative technologies. Issue №29. Part 1. October 2023. P. 102-111. DOI: 10.30890/2567-5273.2023-29-01-022.

5. Комп'ютерна графіка: підручник / О.О. Терентьев, Є.В. Бородавка. Київ: Компрінт, 2023. 132 с.

6. Моделі та методи інформаційної системи діагностики технічного стану об'єктів будівництва: підручник / О.О. Терентьев, І.В. Русан, Є.В. Горбатюк, Є.В. Бородавка, О.І. Баліна, О.В. Доля, О.Б. Тисленко. Київ: Компрінт, 2023. 240 с.

7. Gorbatyuk Yevgenii, Terentyev Olexander. Creation of an information system for assessing the quality of design solutions during building construction. Modern problems of science, education and society. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2024. Pp. 292-296. ISBN 978-966-8219-87-0.

8. Terentyev O., Gorbatyuk Ie. Calculation of building foundations using a mathematical apparatus. Modern research in science and education. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Chicago, USA. 2024. Pp. 250-257. ISBN 978-1-73981-123-5.

9. Modeling of reliability of foundation structures / Gorbatyuk Ie., Terentyev O., Tyslenko O., Zubrij I. Importance of Soft Skills for Life and Scientific Success: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference, FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, March 7-8, 2024. Pp. 7-8. ISBN 978-617-8293-21-5.



10. Терентьев О.О., Горбатюк Є.В., Тисленко О.Б., Зубрій І.М. (2024). Методика розробки підвищення ефективності інформаційної системи безпечної експлуатації будівель. Modern engineering and innovative technologies. Issue №31. Part 1. February 2024. P. 62-71. DOI: 10.30890/2567-5273.2024-31-00-014.

11. Терентьев О.О., Горбатюк Є.В., Левкович О.М. Експертна інформаційна система підтримки прийняття рішень для задачі діагностики технічного стану будівель. Наукові тренди постіндустріального суспільства: збірник наукових праць з матеріалами VI Міжнародної наукової конференції, м. Івано-Франківськ, 26 квітня, 2024 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. С.166-168. ISBN 978-617-8312-26-8.

12. Архітектура інформаційної системи діагностики технічного стану фундаментів будівель / Терентьев О.О., Горбатюк Є.В., Тисленко О.Б., Зубрій І.М., Макаруч О.В. SWorldJournal. Issue No24 Part 1 March 2024. P. 135-143. DOI: 10.30888/2663-5712.2024-24-00-073.

13. Горбатюк Є.В., Тисленко О.Б., Зубрій І.М. Функціонування інженерних комплексів при створенні цільових об'єктів будіндустрії. International scientific conference "Organization of scientific research in modern conditions '2024" No 23 on March 21, 2024. Seattle, Washington, USA. Pp. 46-51.

14. Multi-Stage Classification of Construction Site Modeling Objects Using Artificial Intelligence Based on BIM Technology Dolhopolov, S., Honcharenko, T., Terentyev, O., ...Bodnar, N., Alzidi, E. Conference of Open Innovation Association, FRUCT, 2024, Pp. 179–185.

***Abstract.** The conducted research allows to propose an approach to solving the problem of choosing a model describing the change in the dynamics of the measured data due to the ageing and deterioration of structures, allow to choose the degree of complexity of the model that provides the highest accuracy of the forecast since the onset of the corrupted state.*

***Key words:** integrated model, diagnostics of the technical condition, information technology, forecasting the reliability of decision-making.*

Стаття відправлена: 13/09/2024

© Терентьев О.О., Горбатюк Є.В., Тисленко О.Б., Зубрій І.М.