

УДК 002;69.059

Терентьев Александр Александрович

Доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних технологій, *orcid.org/0000-0001-6995-1419*
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Шабала Євгенія Євгенівна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетичної безпеки та комп'ютерної інженерії,
orcid.org/0000-0002-0428-9273
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Саченко Ілля Александрович

Співробітник, *orcid.org/0000-0001-6995-1419*
Корпорація «Альтіс-Холдінг», Київ

**ІНТЕГРОВАНІ МОДЕЛІ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ПРОГНОЗУВАННЯ
НАДІЙНОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАДАЧІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬ**

Анотація. Проведені дослідження дозволяють запропонувати підхід до вирішення завдання вибору тієї чи іншої моделі, що описує зміну динаміки вимірних даних внаслідок старіння та зношення конструкцій, обґрунтовано вибрати ступінь складності моделі, що забезпечує найвищу точність прогнозу з моменту настання пошкодженого стану. Основними параметрами, що характеризують рівень технічного стану будівель, є напружений стан елементів будівель. 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 складним етапом прогностичної процедури. Використання понять теорії нечітких множин дозволяє звести пошук сталого вирішення багатокритеріальної задачі до задачі пошуку екстремуму функції належності.

Ключові слова: інтегровані моделі; діагностика технічного стану; інформаційна технологія; прогнозування надійності прийняття рішень; клас функцій; регресія

Актуальність та аналіз проблеми

На сьогодні 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 призвести 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.

Мета статті

Пропонується 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 має володіти прогностичними властивостями, тобто при екстраполяції на деякий проміжок часу її значення не повинно «розбובтуватися». Ця умова накладає обмеження на ступінь складності функцій – для надто складної моделі малі помилки вимірювань, непомітні на інтервалі інтерполяції, на етапі прогнозування 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 достовірною інформацією 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 виявляються 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 принципу Пуанкаре (точність моделі не може перевершувати точності первинної інформації). Однак це не дає вирішення прогностичності завдання – визначення моменту пошкоджень, оскільки найкраща на етапі навчання модель не завжди є і більш точною екстраполяцією майбутнього сценарію розвитку.

Покажемо 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-го 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 повною мірою реалізують інформаційні можливості систем.

Виклад основного матеріалу

За динамікою даних напруги несучих конструкцій будівель за деякий період часу необхідно побудувати найкращу модель розвитку дефекту за двома критеріями – точність апроксимації плюс точність прогнозу.

Найбільш ефективним інструментом вирішення подібних завдань є метод структурної мінімізації середнього ризику. Адапуємо цей метод до умов нашої задачі.

В інформаційній базі системи зберігається безліч локальних баз даних, $\{x_i\}$, кожна з яких являє 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 $y=y(x)$ (у розглянутому випадку $Q = Q(t)$, де $Q(t)$ – зміна напруженого стану внаслідок зношення конструкцій; t – час). В такому разі, у розпорядженні є вибірка $\{x_i, y_i\}$, де y_i – модельне значення функції, що відповідає експериментально вимірюваному значенню параметра x_i .

Враховуючи, що експериментальні дані завжди вимірюються з деякою похибкою, введемо в розгляд перешкоду вимірювання ε_i . Тоді шукана модель набуде остаточного вигляду:

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

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

$$I_0(a) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (y_i - F(x_i, a))^2, \quad (2)$$

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:

$$I(a) \leq I_m(a) = I_0(a) \Omega \left(\frac{1}{h}, \frac{1}{n\eta} \right), \quad (3)$$

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 $\frac{1}{\eta}$ 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 $1/h$, за якого верхня оцінка середнього ризику (його гарантоване значення) досягає мінімуму. Це значення $1/\Omega$ і визначає оптимальну складність шуканої функції.

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

$$\Omega = \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{n(1 - \frac{1}{n\eta})}{L}}}. \quad (5)$$

$$[Z]_{\infty} = \begin{cases} z, z \geq 0 \\ \infty, z \leq 0 \end{cases}$$

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. Метод СМСП стає надто грубим, отже свідомо віддають перевагу простішим моделям. Найбільш ефективні результати для подолання таких труднощів у ряді випадків можуть бути досягнуті шляхом залучення методів теорії нечітких множин.

Відповідно до задачі під поняттям приналежності до того або іншого об'єкта 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 так:

$$\mu(a, n) = (\mu_o(I_o(a, n))\mu_o(n))^{0.5}, \quad (6)$$

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 таким чином:

$$\begin{aligned} \mu_o(I_o) &= \psi\left(\frac{I_o}{I_i}, m_1\right), \\ \mu_o(n) &= \psi\left(\frac{n}{0,5L}, m_2\right), \end{aligned} \quad (7)$$

.....

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

де L_i – значення функціоналу емпіричного ризику, що відповідає числу параметрів; m_1 і m_2 – показники степеня, 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 наведено в таблиці.

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

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

МНК рекомендує максимальний степінь 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 припускає застосування інтерполюючого полінома зі степенями $n=1$ та $n=2$, тоді як методи теорії нечітких множин однозначно вказують, що оптимальним є степінь 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 дорівнюють 1.24, 0.26 та 2.31 для поліномів 1-го, 2-го і 3-го степеня відповідно. Тому очевидно, що здатність до прогнозу найбільш висока у полінома другого степеня, що збігається з висновком, отриманим на основі теорії нечітких множин 100.

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 СМСП і методами теорії нечітких множин, збільшується зі зменшенням обсягу вибірки вимірювань даних. Для доволі великих вибірок (як правило, $L > 20$) результати розрахунків за обома методами практично збігаються.

Висновок

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

Список літератури

1. Терентьев О.О. Модели визначення фізичного зношення конструктивних елементів будівлі для задач діагностики технічного стану / О.І. Баліна, С.Є. Шабала. – К.: Управління розвитком складних систем, збірник наукових праць, випуск 26/2016, КНУБА, 2016. – С. 153-157.
2. Михайленко В.М. Обробка експериментальних результатів роботи експертної системи для задачі діагностики технічного стану будівель [Текст] // О.О. Терентьев, Б.М. Єременко. – Д.: Строительство, материаловедение, машиностроение, сб. науч. трудов Под общей редакцией профессора В.И. Большакова выпуск. – Дніпропетровськ, 2014. – №78. – С. 190 – 195.
3. Терентьев О.О. Основы організації нечіткого виведення для задачі діагностики технічного стану будівель та споруд [Текст] // О.О. Терентьев, С.Є. Шабала, Б.С. Малина. – К.: Управління розвитком складних систем, збірник наукових праць. – КНУБА, 2015. – № 22. – С. 138 – 143.
4. Терентьев О.О. Інформаційна технологія системи діагностики технічного стану будівель на основі дослідження мікросейсмічних коливань / С.Є. Шабала, Б.С. Малина. – К.: Управління розвитком складних систем, збірник наукових праць, випуск 23/2015, КНУБА, 2015. – С.133 – 139.
5. Olexander Terentyev Development of models and methods for determining the physical deterioration of items for the task of diagnostics of technical condition of buildings and structures /Olexander Poltorak// – Scientific Journal «ScienceRise» №8/2(25), August 2016. – P. 14-19.
6. Olexander Terentyev The Method of Direct Grading and the Generalized Method of Assessment of Buildings Technical Condition [Text] // Olexander Terentyev, Mykola Tsiutsiura. – International Journal of Science and Research (IJSR), Volume 4 Issue 7, July 2015. – P. 827-829.
7. Olexander Terentyev Risk assessment of delayed damage diagnostics of technical condition of building structures / Olexander Poltorak. – Scientific Journal «ScienceRise» №2 (31), February 2017. – P. 42-45.
8. Михайленко В.М. Аналіз сучасних інформаційних методів системи діагностики технічного стану будівель / О.О. Терентьев, С.Є. Шабала. – К.: Управління розвитком складних систем, збірник наукових праць, випуск 29/2017, КНУБА, 2017. – С. 136-143.
9. Інтегровані моделі і методи автоматизованої системи діагностики технічного стану об'єктів будівництва [Текст]: монографія / В.М. Михайленко, П.Є. Григоровський, І.В. Русан, О.О. Терентьев. – К: ЦП «Компринт», 2017. – 229 с.
10. Михайленко, В. М. Експериментальні дослідження та реалізація інформаційної системи тестування нейронної мережі для задачі діагностики технічного стану будівель [Текст] / В.М. Михайленко, О.О. Терентьев, С.Є. Шабала, О.С. Турушев // Управління розвитком складних систем. – 2016. – № 27. – С. 139 – 144.
11. ГОСТ 8829-84 (ДСТУ Б.В.2.6-7-95) Изделия строительные бетонные и железобетонные сборные. Методы испытания нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. Госстрой СССР, Издательство стандартов [Текст]. – Москва, 1982. – 20 с.

Стаття надійшла до редколегії 17.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Михайленко, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.

Терентьев Александр Александрович

Доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий проектирования и прикладной математики, orcid.org/0000-0002-2928-8459

Київський національний університет строительства и архитектуры, Киев

Шабала Евгения Евгеньевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, orcid.org/0000-0002-0428-9273

Київський національний університет строительства и архитектуры, Киев

Саченко Илья Александрович

Сотрудник корпорации «Альтис-Холдинг», Киев, orcid.org/0000-0001-6995-1419

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ

Аннотация. Проведенные исследования позволяют предложить подход к решению задачи выбора той или иной модели, описывающей изменение динамики измеренных данных вследствие старения и износа конструкций, обоснованно выбирать степень сложности модели, обеспечивающую высочайшую точность прогноза с момента наступления поврежденного состояния. Основными параметрами, характеризующими уровень технического состояния зданий, является напряженное состояние элементов зданий. Уровень сложности аппроксимирующей функции зависит не только от самого изменяемого параметра, но и от уровня шумовой составляющей измерений и объема выборки. Выбор той или иной модели, описывающей изменения показателей надежности функционирования технического состояния, является наиболее сложным этапом прогнозичной процедуры. Использование понятий теории нечетких множеств позволяет свести поиск устойчивого решения многокритериальной задачи к задаче поиска экстремуму функции принадлежности.

Ключевые слова: интегрированные модели; диагностика технического состояния; информационная технология; прогнозирование надежности принятия решений; класс функций; регрессия

Terentyev Oleksander Oleksandrovich

Ph.D., professor, Department of Information Technology and applied mathematics, orcid.org/0000-0002-2928-8459
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Shabala Yevheniia

Ph.D., associate professor, Department of cyber security and Computer Engineering, orcid.org/0000-0002-0428-9273
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Sachenko Iliya

Employee corporation Altis-Holding, Kiev, orcid.org/0000-0001-6995-1419

INTEGRATED MODELS THAT PROVIDE PREDICTION OF RELIABILITY OF DECISION-MAKING FOR THE PROBLEM OF THE SYSTEM OF DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL STATE OF BUILDINGS

Abstract. The conducted researches allow to propose an approach to the decision of the problem of choice of a particular model, which describes the change in the dynamics of measured data due to aging and wear structures, allows reasonably to choose the degree of complexity of the model, which provides the highest accuracy of the forecast from the moment of the onset of the damaged condition. The main parameters characterizing the level of technical condition of buildings are the tense state of building elements. The level of complexity of the approximating function depends not only on the most variable parameter, but also on the level of the noise component of the measurements and the sample size. The choice of a model that describes changes in the reliability of the operation of the technical condition is the most difficult stage of the prognostic procedure. The use of the concepts of the fuzzy set theory allows us to reduce the search for a stable solution of a multi-objective problem to the task of searching for the ex-third membership function.

Keywords: *Integrated models, diagnostics of technical condition, information technology, prediction of reliability of decision-making, class of functions, regression*

References

1. Terentyev, A.A., Balina, O.I. & Shabala, E.E. (2016). Models wear determining physical structural elements of the building for problems diagnostics of technical state. Kyiv, Ukraine: Management of development of complex systems, 26, 153-157.
2. Mihaylenko, V.M., Terentev, O.O. & Eremenko, B.M. (2014). Processing of experimental results of work of the expert system for the problem of diagnostics of technical condition of buildings. Construction, material science, engineering, Sat. sci. works under the general editorship of Professor V.I. Bolshakov. Dnipropetrovsk, 78, 190–195.
3. Terentyev, O.O., Shabala, Ye.E., Malina, B.S. (2015). Fundamentals of the organization of fuzzy output for the task of diagnosing the technical condition of buildings and structures. Management of development of complex systems. Kyiv, Ukraine: 22, 138–143.
4. Terent'ev, Alexandr, Shabala, Yevgeniya & Malina, Bogdan. (2015). Information technology of buildings of technical diagnostic based research microseismic vibrations. Management of Development of Complex Systems, 23 (1), 133-139.
5. Olexander, Terentyev & Olexander, Poltorak. (2016). Development of models and methods for determining the physical deterioration of items for the task of diagnostics of technical condition of buildings and structures. Scientific Journal «Science Rise», 8/2 (25), 14-19.
6. Terentyev, Olexander & Tsiutsiura, Mykola. (2015). The Method of Direct Grading and the Generalized Method of Assessment of Buildings Technical Condition. International Journal of Science and Research (IJSR), Volume 4 Issue 7, 827-829.
7. Terentyev, Olexander & Poltorak, Olexander. (2017). Risk assessment of delayed damage diagnostics of technical condition of building structures. Scientific Journal «Science Rise», 2 (31), 42-45.
8. Mikhailenko, V.M., Terentyev, O.O. & Shabala, Ye.E. (2017). Analysis of modern information methods of the system of diagnostics of the technical condition of buildings. Kyiv, Ukraine: Management of development of complex systems, 29, 136-143.
9. Mikhailenko, V.M., Grigorovsky, P.E., Rusan I.V. & Terentyev O.O. (2017). Integrated models and methods of the automated system of diagnostics of technical condition of construction objects: monograph. Kiev: CP "Komprint", 229.
10. GOST 8829-84 (State Standard B.V.2.6-7-95) products for construction, concrete and reinforced concrete prefabricated. Methods searched of-load. Rules evaluate the strength, hardness and fracture toughness. USSR State Building, Publisher Standards. Moscow, Russia, 20.
11. Catalog of instruments for non-destructive quality control of concrete. NIISK Gosstroy USSR. Kyiv, 24.

Посилання на публікацію

- APA Terent'ev, O., Shabala, Ye. & Sachenko, I. (2017). Integrated models that provide prediction of reliability of decision-making for the problem of the system of diagnostics of the technical state of buildings. Management of Development of Complex Systems, 32, 76 – 80 [in Ukrainian].
- ДСТУ Терент'єв, О.О. Інтегровані моделі, які забезпечують прогнозування надійності прийняття рішень для задачі системи діагностики технічного стану будівель [Текст] / О.О. Терент'єв, Є.Є. Шабала, І.А. Саченко // Управління розвитком складних систем. – 2017. – № 32. – С. 76 – 80.