

Б.М. АНДРЕЄВ, д-р техн. наук, проф., Д.В. БРОВКО, д-р техн. наук, доц.,
В.В. ХВОРОСТ, В.В. КОНОНЕНКО, В.Я. КОЗАРІЗ, кандидати техн. наук, доценти,
К.А. ГАПОНЕНКО, аспірант, В.Д. БРОВКО, магістрант
Криворізький національний університет

РОЗРОБКА МОДЕЛІ МОНИТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД ПОВЕРХНЕВОГО КОМПЛЕКСУ ГІРНИЧОДОБУВНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ ЛАНЦЮГА МАРКОВА

Мета. Підвищення експлуатаційної надійності та безпеки об'єктів гірничорудної промисловості, шляхом удосконалення наявної та розроблення нових методик визначення залишкового ресурсу. Це можливо досягти шляхом аналізу причин виникнення найпоширеніших видів типових дефектів будівель і споруд гірничорудної промисловості та на основі отриманих результатів провести оцінку залишкового ресурсу використовуючи ймовірнісні методи, які базуються на ланцюгах Маркова.

Методи дослідження. Використання загальнонаукових методів дослідження: статистичних, теорії ймовірностей, теорії інформації, теорії ланцюгів Маркова, формалізації, аналізу (зокрема ретроспективного) - під час побудови рішення на рівні окремих конструктивних елементів; основних принципів організації систем і системного аналізу - під час побудови моделі діагностування.

Наукова новизна. Розроблена методика, яка базується на використанні ланцюгів Маркова, дозволяє не лише ретельно аналізувати історію дефектів та їх взаємозв'язки, але й враховувати ймовірність виникнення нових дефектів в конструктивних елементах на основі попередніх даних, що в свою чергу надає можливість управління технічним станом будівельних конструкцій.

Практична значимість. Запропонована методика аналізу та оцінки залишкового ресурсу, заснована на ланцюгах Маркова, відображає глибоке розуміння складних процесів, що відбуваються у будівлях та спорудах гірничорудної галузі. Вона не лише дозволяє покращити ефективність обстеження та діагностики об'єктів, але й спрощує цей процес, знижуючи трудові затрати та вартість робіт. Це може призвести до збільшення швидкості і точності прийняття рішень щодо технічного обслуговування та ремонту, а також зменшити ризик аварійних ситуацій.

Результати. Запропоновано нову методику визначення залишкового ресурсу та категорії технічного стану будівель та споруд на основі використання ланцюгів Маркова. Сформульовано пропозиції щодо систематизації взаємозв'язку підсистем, їх технічного стану та відносної надійності об'єкту в цілому.

Ключові слова: об'єкти поверхні шахт, надійність, цепі Маркова, системи елементів конструкції, залишковий ресурс, категорії технічного стану.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-3-7

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями. Переважну більшість будівель і споруд поверхневого комплексу гірничодобувних підприємств було зведено в період інтенсивного підйому промислових потужностей, тобто в 50-х - 60-х роках минулого століття. До теперішнього часу нормативний термін служби багатьох з будівель вже минув, і для безпечної роботи підприємств потрібне продовження терміну експлуатації цих будівель і споруд.

Наразі залишковий ресурс будівель та споруд проводиться за зовнішніми ознаками. Але цей підхід має значні недоліки, пов'язані із суб'єктивністю експерта, людським фактором та ігноруванням варіативності шляхів руйнування будівлі.

Аналіз досліджень і публікацій. Огляд і аналіз публікацій ряду авторів показує, що існує велика кількість методик та методів визначення характеристик випадкових процесів [4-5, 7-10]. Існують методи, які мають наукове обґрунтування і враховують стан будівельних конструкцій та сполучених елементів у будівлях і спорудах. Неодноразово запропонований метод заснований на використанні випадкових марковських процесів дає змогу розглянути різні стани роботи системи елементів конструкції під впливом випадкових зовнішніх факторів, застосовується при розрахунку надійності та довговічності системи елементів конструкції споруд. Враховувати зовнішні фактори протягом всього терміну експлуатації споруди є безсумнівною перевагою для методів прогнозування, як для загального стану системи елементів конструкції, так і особливих станів (аварійні випадки) [4-5, 7-10].

Здебільшого будівельні конструкції розраховують на міцність, стійкість, жорсткість і не беруть до відома ймовірнісні критерії, що враховують екстремальні ситуації, ризик, несприят-

ливі впливи, техногенні причини, катастрофи. Саме цей перелік становить випадковий характер, що утворює безліч несприятливих станів.

Ймовірнісний метод, що використовується для оцінки працездатності системи елементів конструкції, дозволяє аналізувати технічний стан конструкції в процесі експлуатації та встановлювати критерій її надійності. Основою для цього методу є математична модель, яка визначає перехід від одного небажаного стану системи елементів конструкції до іншого. Цей перехід моделюється виключно за допомогою ланцюга Маркова.

Постановка задачі. Для розв'язання задачі з підвищення експлуатаційної надійності та безпеки об'єктів гірничорудної промисловості вирішується шляхом удосконалення наявної та розроблення нових методик визначення залишкового ресурсу. Це можливо досягти шляхом аналізу причин виникнення найпоширеніших видів типових дефектів будівель і споруд гірничорудної промисловості та на основі отриманих результатів провести оцінку залишкового ресурсу використовуючи ймовірнісні методи, які базуються на ланцюгах Маркова.

Викладення матеріалу та результати. Останнім часом значного розвитку набула теорія ланцюгів Маркова, якою займалися також Чжун КайЛай, Дж. Кемені, Дж. Снелл та ін. Ця теорія призначена, головним чином, для повного опису як довготривалої, так і локальної поведінки процесу та дозволяє отримати множину можливих станів будівельних конструкцій, які формуються під дією прикладених навантажень.

Введемо основні поняття, в світлі теорії ланцюгів Маркова, для опису поведінки конструкцій будівель та споруд під дією прикладених навантажень: *подія* - це стан системи елементів будівельних конструкцій; *випробування* - це зміна стану системи будівельних конструкцій, яка відбувається в певні фіксовані моменти часу або в будь-які випадкові можливі моменти часу. Залежно від часового фактору математична модель виражається в одному випадку як ланцюг Маркова з дискретним часом, в іншому - як ланцюг Маркова з безперервним часом. Виходячи з цього вплив зовнішніх чинників на систему елементів конструкцій потрібно розглядати як визначений стан, а результати дії навантаження, які призвели до зміну, як випробування. Ці стани незалежні, і поява деякого випадкового стану не залежить від результату попереднього стану. Отже, результат у майбутньому не залежить від результату в минулому [1, 3, 6, 11].

Навантаження, що діють на систему будівельних конструкцій формують послідовність несумісних станів, які утворюють повну групу. Таким чином, можливі стани системи елементів конструкції утворюють послідовність k несумісних станів A_1, A_2, \dots, A_k повної групи. Умовна ймовірність $p_{ij}(s)$ того, що в s -ій зміні настане будь-який зі станів повної групи A_j ($j=1, 2, \dots, k$), не залежить від результатів попередніх станів, якщо в $(s-1)$ -ій зміні настав можливий стан із повної групи A_i ($i = 1, 2, \dots, k$).

Припустимо, що послідовність станів системи елементів споруди утворює ланцюг Маркова і повна група складається з чотирьох несумісних станів A_1, A_2, A_3, A_4 , також відомо, що при деяких змінах з'явився стан A_1 , то умовна ймовірність того, що в наступних випадкових змінах настане стан A_3 , не залежить від того, які стани з'явилися в минулих змінах.

Отже, основними параметрами математичної моделі є:

поточний стан системи елементів конструкції;

зміна стану системи елементів конструкції.

Експлуатаційний стан системи елементів конструкції перебуває в одному з k станів: s_1, s_2, \dots, s_k -м. Внаслідок навантаження стан окремих елементів конструкції може змінюватися, переміщуючись із i -го стану в j -й стан. Системи елементів конструкції може значний час знаходитись у визначеному стані або переходити в будь-який інший стан.

Отже, ланцюг Маркова описує послідовність змін станів системи елементів конструкції, яка переходить до одного з k станів у повній групі. Умовна ймовірність $p_{ij}(s)$ визначає, який j -й стан буде прийнято після $(s-1)$ -го кроку, якщо конструкція перебувала у i -му стані до цього.

Особливість математичної моделі ланцюга Маркова полягає в тому, що умовна ймовірність $p_{ij}(s)$ не змінюється в залежності від номера кроку зміни стану системи елементів конструкції, тобто $p_{ij}(s) = p_{ij}$. В системі елементів конструкції це явище спричинює випадкове коливання навантажень, і описується математичною моделлю однорідного ланцюга Маркова з дискретним часом.

Однією з основних числових характеристик математичної моделі є перехідна ймовірність - p_{ij} . Умовна ймовірність відображає, що система елементів конструкції з i -го стану в результаті зміни перейде в j -й стан. Причому майбутній стан системи елементів конструкції не залежить від стану в минулому. У позначенні p_{ij} перший індекс вказує номер попереднього стану, а другий - номер наступного стану.

Якщо число станів системи елементів конструкції скінченне і дорівнює k , то всі можливі перехідні ймовірності записують матрицею переходу.

Матриця переходу станів системи елементів конструкції - це матриця, що містить усі перехідні ймовірності, визначені на кінцевій множині потужністю k :

$$P_n = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{1k} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{k1} & p_{k2} & \dots & p_{kk} \end{pmatrix} \quad (1)$$

де P_n - матриця переходу станів за $n \in N$; p_{kk} ($k=i, k=j, i=j$) - ймовірність переходу з одного й того самого i -го стану в будь-який можливий j -й стан.

Кожен рядок матриці переходу P_n утворюється з елементарних перехідних ймовірностей p_{kk} , що утворюють повну групу станів системи елементів конструкції. Сума елементарних перехідних ймовірностей дорівнює одиниці: $\sum_{j=1}^k p_{ij} = 1 (i = 1, 2, \dots, k)$ [4-5, 7-10].

Розглянемо проміжний стан r між i -м і j -м станами. Припустимо, що з початкового стану i за n переходів будівельна конструкція перейде в проміжний стан r з ймовірністю $P_{ir}(n)$, тоді за решту $(n-m)$ переходів із проміжного стану r будівельна конструкція перейде в кінцевий стан j з ймовірністю $P_{rj}(n-m)$.

Нехай подія A - це стан системи елементів конструкції, що цікавить, тобто протягом n переходів будівельна конструкція перейде з початкового стану i в кінцевий стан j , отже, $P(A) = P_{ij}(n)$; тоді подія B_r ($r = 1, 2, \dots, k$) - це припущення, протягом яких будівельна конструкція перейде з початкового i -го стану в проміжний стан r за m переходів, отже, $P(B_r) = P_{ir}(m)$; $P_{B_r}(A)$ - це умовна ймовірність настання стану A , якщо припустити, що за $n-m$ переходів будівельна конструкція перейде з проміжного стану r у кінцевий стан j , отже,

$P_{B_r}(A) = P_{rj}(n-m)$. Тоді за формулою повної ймовірності $P_{ij}(n) = \sum_{r=1}^k P_{ir}(m) \cdot P_{rj}(n-m)$ запишемо

ймовірність стану системи елементів конструкції, тобто. $P(A) = \sum_{r=1}^k P(B_r) \cdot P_{B_r}(A)$. Таким чином, якщо відомі всі можливі та кінцеві перехідні ймовірності, то можна визначити ймовірності переходу системи елементів конструкції.

На основі вище розглянутого матеріалу та проведеного статистичного аналізу за результатами багаторічного обстеження гірничотехнічних будівель і споруд шахтних комплексів Криворізького залізрудного басейну, розроблено нову методику визначення залишкового ресурсу на основі ланцюгів Маркова, що дає змогу прогнозувати розвиток аварійного стану будівель і споруд [1, 3, 6, 11].

Під час проведеного статистичного аналізу було ідентифіковано 5 підсистем такі як:

- 1 - прилегла територія і вимощення;
- 2 - основи і фундаменти;
- 3 - несучі конструкції;
- 4 - огорожувальні конструкції;
- 5 - оздоблення.

Також розроблення методики визначення залишкового ресурсу і категорії технічного стану з використанням теорії графів було здійснено на основі мережевої моделі розвитку аварійного стану будівель та споруд гірничорудної промисловості, згідно якої виявлення взаємозв'язків між вершинами графів зроблено з використанням статистичної бази по об'єктах гірничорудної промисловості Криворізького залізрудного басейну (рис. 1).

Як вузли графа прийнято наступні підсистеми: 1 - справний стан об'єкта; 2 - руйнування комунікацій; 3 - руйнування, оздоблення; 4 - руйнування, прилеглої території; 5 - руйнування, огорожувальних конструкцій; 6 - руйнування, опорних конструкцій; 7 - руйнування, основ і фундаментів; 8 - руйнування, об'єкта загалом.

Ребра графа є лініями впливу підсистем одна на одну.

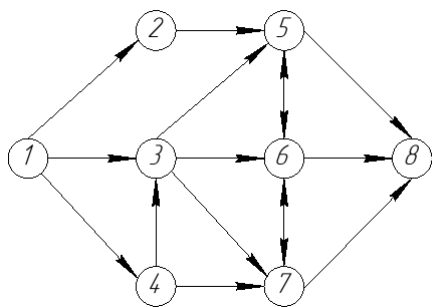


Рис.1. Сітьова модель для будівель та споруд різної поверховості

Після знаходження ймовірностей за станом у відповідні моменти часу і визначення ймовірності модельного аварійного стану об'єкта внаслідок руйнування i -того компонента системи з використанням узагальненої формули Байеса, розрахункова відносна пошкодженість будівлі визначається за формулою

$$\varepsilon_{\text{бвд}} = 0,1\varepsilon_1 + 0,26\varepsilon_2 + 0,33\varepsilon_3 + 0,19\varepsilon_4 + 0,12\varepsilon_5. \quad (2)$$

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз великої кількості результатів технічних обстежень об'єктів гірничорудної промисловості Криворізького залізничного басейну та наявної методики розрахунку залишкового ресурсу за зовнішніми ознаками виявив: причини виникнення і найпоширеніші види типових де-

фектів; значний вплив суб'єктивних експертних оцінок, великі відхилення і неможливість застосування наявної методики в окремих випадках.

Проведено удосконалення існуючої методики розрахунку залишкового ресурсу за зовнішніми ознаками: виключено вплив суб'єктивних експертних оцінок - розроблено пропозиції щодо визначення та уточнення величин відносної пошкодженості елементів будівельних конструкцій.

Розроблено нову методику визначення залишкового ресурсу та загального технічного стану будівель та споруд на основі ланцюгів Маркова.

Список літератури

1. Бровко Д. В. Построение моделей возможных дефектов объектов поверхности шахт в виде анализа статистических данных их технических осмотров / Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2018. – Вип. 47. – С. 32-38.
2. Бровко Д. В. Анализ статистических данных возможных дефектов объектов поверхности шахт / Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток промисловості та суспільства» Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2019. – С. 49.
3. Бровко Д. В. Построение системы мониторинга надежности элементов зданий и сооружений поверхностного комплекса шахт на базе оценки энтропии / Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". - 2020. - №107. - С. 73-83.
4. Tweedie R.L. Markov chains: Structure and applications / Tweedie R.L. // Handbook of Statistics. Volume 19, 2001, Pages 817-851. DOI: 10.1016/S0169-7161(01)19025-5
5. Jamie E. A Markov chain-based model for structural vulnerability assessment of corrosion-damaged reinforced concrete bridges / Ebrahim Afsar Dizaj, Jamie E. Padgett and Mohammad M. Kashani // The Royal Society. Collection. 2021. DOI: 10.1098/rsta.2020.0290
6. Бровко Д. В. Кваліметричне оцінювання в розрахунку рівня живучості об'єктів міної поверхні. / Д.В.Бровко, В. В.Хворост, В. Ю. Тищенко / Науковий вісник Національного гірничого університету // Науковий вісник Національного гірничого університету. - Дніпро, 2018 - No. 4, с. с. 66-71. doi: 10.29202/nvngu/2018-4/14
7. Karapetrou S. Time-building specific” seismic vulnerability assessment of a hospital RC building using field monitoring data / S. Karapetrou, M. Manakou, D. Bindi, B. Petrovic, K. Pitilakis // Engineering Structures, 2016. Volume 112. - pp. 114-132. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.01.009
8. Han K.K. Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics: An exploratory study / K.K. Han, M. Golparvar-Fard // Automation in Construction, 2017. Han, M. Golparvar-Fard // Automation in Construction, 2017. Том 73. - pp. 184-198. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.11.004
9. Fenton G.A. Reliability-based geotechnical design in 2014 Canadian Highway Bridge Design Code / G.A. Fenton, F. Naghibi, D. Dundas, R.J. Bathurst, D.V. Griffiths // Canadian Geotechnical Journal, 2016. Volume 53. - pp. 236-251. DOI: 10.1139/cgj-2015-0158
10. Yigit C.O. Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring / C.O. Yigit // Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016. Volume 7, Issue 1. - pp. 360-383. DOI: 10.1080/19475705.2014.9177248
11. Khvorost, V.V. A reliability indicator based on assessment entropy of mining building and structure elements / Brovko, D.V., Khvorost, V.V., Kononenko, V.V., Yu Tyshchenko, V. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled, 2022, Volume 1049(1), 012028. DOI:10.1088/1755-1315/1049/1/012028

Рукопис подано до редакції 15.03.24