

## МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 043.5

<https://doi.org/10.31713/vt2201825>

**Кузьмич Л. В.**, к.т.н., докторант (Національний авіаційний університет, м. Київ), **Кузьмич А. А.**, студентка (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

### МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ РЕСУРСУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**Запропоновано методику оцінювання ресурсу складних технічних об'єктів, що включає побудову математичної моделі функціонування об'єкта для визначення його фактичного технічного стану та залишкового ресурсу.**

**Ключові слова:** ресурс, залишковий ресурс, пошкодження, граничний стан, навантаження, деформація.

#### **Постановка проблеми**

Впродовж експлуатації будь-яких технічних об'єктів відбувається старіння їхніх елементів в результаті механічних, теплових, електричних та інших фізико-хімічних процесів або під дією різного роду зовнішніх і внутрішніх навантажень. Ці процеси і фактори викликають накопичення пошкоджень, розвиток дефектів, незворотні зміни властивостей конструкційних матеріалів і параметрів елементів технічних об'єктів і, як наслідок, поступове зниження їхньої функціональності, що згодом призводить до відмов і до настання граничного стану, після чого подальша експлуатація такого об'єкта є неможливою.

Ефективність експлуатації технічного об'єкта, в першу чергу, пов'язана з його використанням за призначенням, тому основне завдання управління процесом технічного використання полягає в подовженні часу використання об'єкту при прийнятних витратах на технічне обслуговування і ремонт [1].

Сучасний рівень науково-технічного прогресу дозволяє створювати об'єкти, які наділені високою надійністю. Основою для цього служить комплекс заходів, що застосовуються на стадіях проектування, виготовлення, монтажу та експлуатації. Найбільш актуальною є проблема прогнозування та забезпечення технічного ресурсу об'єкта.

#### **Аналіз останніх досліджень**

Рішення цього завдання передбачає встановлення якісних і кі-

лькісних закономірностей, що визначають ресурс об'єкта, розробку методів оцінки впливу різних факторів на середній ресурс і розкид ресурсу об'єкта, що експлуатується, у часі [1-4].

Підконтрольними параметрами можуть бути як безпосередньо вимірювані величини пошкоджень (глибина корозії або зношування деталі), так і вихідні параметри обладнання (продуктивність, коефіцієнт корисної дії, ступінь зношення тощо) та інші кількісні показники якості. Контроль зміни цих параметрів у міру наближення їх значень до гранично допустимих дозволяє прогнозувати момент настання відмови [5; 6]. Оцінка надійності в даному випадку здійснюється шляхом проведення періодичних обстежень, вимірювання значень визначаючого параметра, статистичної обробки результатів вимірювань і подальшого розрахунку показників надійності.

### **Формулювання мети**

Удосконалення методів розрахунків вимагає, зокрема, обліку стохастичною мінливості властивостей і структури системи, а також мінливості інших випадкових факторів. Необхідним етапом розвитку статистичного підходу повинна стати розробка в рамках існуючих детермінованих схем розрахунку методики оцінювання надійності з урахуванням мінливості властивостей матеріалу і значної невизначеності вихідних даних.

Результати чисельного експерименту можуть бути використані для оцінки фізичного стану та безпеки досліджуваного об'єкта або прогнозування залишкового ресурсу. Проблеми обґрунтування безпеки в експлуатації, міцності і ресурсу складних технічних об'єктів на основі чисельного моделювання являє собою дуже розширений клас математичних задач.

### **Виклад основного матеріалу**

Одним з основних аспектів вирішення проблем безпечної експлуатації складних технічних об'єктів, що відпрацювали повністю або значну частину проектного терміну експлуатації, є подальше вдосконалення методології оцінки залишкового ресурсу. Однак проблема ускладнюється тим, що формування теорії безпеки промислових об'єктів характеризується переходом від домінуючої раніше концепції «нульового ризику», що базується на нормативних коефіцієнтах надійності і безпеки, до концепції «прийнятного ризику», згідно з якою управління безпекою, по суті справи, є управлінням ризиками.

Слід зазначити, що ресурс, розрахований при проектуванні, можна трактувати як поточну величину, яка може уточнюватися в ході експлуатації в міру отримання додаткової інформації про досвід

фактичного навантаження на об'єкт.

Основне питання полягає в перепризначенні термінів служби на основі аналізу технічного стану об'єкта, додаткових перевірочних розрахунків і оцінки залишкового ресурсу з урахуванням сучасних вимог безпеки. Базою для призначення нового (продовженого) терміну служби повинні служити докази на стадії експлуатації (тобто з урахуванням уточнених даних) і порівнянні з оцінками, виконаними на основі моделей і характеристик на стадії проектування.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення великого обсягу досліджень, пов'язаних з вивченням умов утворення граничних станів відмов об'єктів за критеріями міцності, ресурсу та надійності на різних стадіях експлуатації. Найбільш ефективним науковим підходом для вивчення нелінійної за своєю суттю поведінки таких об'єктів є математичне моделювання.

Математичне моделювання не тільки ефективно доповнює традиційні методи, що застосовуються в розрахунково-експериментальних дослідженнях, а й все частіше виявляється єдиним підходом до прогнозування можливості і наслідків експлуатації складних технічних об'єктів (машин, конструкцій) в екстремальних і аварійних умовах, коли інші методи або непридатні, або не можуть бути використані з економічних, екологічних чи інших міркувань.

Основу такого підходу складають математичні моделі процесів, що спостерігаються, ефективні чисельні алгоритми і пакети програм. При цьому фізичне наближення досліджуваних об'єктів, що включає в себе опис (параметризацію) конструктивних форм, поведінки матеріалів і середовищ, а також різноманітних впливів, є ключовим моментом моделювання. Особливо це стосується вибору, обґрунтування і, якщо необхідно, послідовного уточнення моделей поведінки матеріалів і середовищ на підставі даних фізичного лабораторного експерименту і доступних натурних вимірювань.

Для успішного проведення обчислювального експеримента потрібна розробка спеціальних баз і банків даних, що включають в себе фізико-механічні властивості деформованих середовищ, характеристик опору деформації і руйнування конструкційних матеріалів, параметрів рівнянь стану і рівнянь їх еволюції, в тому числі для моделей континуальної механіки пошкоджень, опису типових деталей і вузлів об'єктів з можливими випадками навантаження та ін.

Разом з тим слід зазначити, що самі навантаження, що діють на деформоване тверде тіло, часто заздалегідь невідомі. Вони виникають як результат взаємодії з іншими тілами, оточуючими середовищами або фізичними полями (тепловими, радіаційними, електромаг-

нітними та ін.). Це призводить до необхідності постановки і вирішення завдань, складність яких збільшується за рахунок нелінійного характеру походження.

Тоді математична модель системи оцінки фактичного стану технічного об'єкта будується і працює, виходячи з умов і пропозицій [5; 6].

Наявна на даний момент сукупність технічних параметрів об'єкта залежить від того, якими ці параметри були на початку експлуатації, від режиму функціонування об'єкта, умов експлуатації та режимів роботи.

Під умовами експлуатації в даному випадку слід розуміти робочі навантаження, систематичні і випадкові фактори корозії тощо, які можна назвати сукупністю руйнівних впливів.

Під режимом роботи об'єкта мається на увазі розгортка в часі набору технічних процесів, кожен з яких характеризується сукупністю робочих параметрів.

Зміна технічних параметрів об'єктивним описується наступним чином:

$$x(t) = F(x(t_0), u_{[t_0, t]}, K), \quad (1)$$

де  $x(t)$  – вектор технічних параметрів;  $u_{[t_0, t]}$  – умова експлуатації об'єкта в конкретний проміжок часу  $[t_0, t]$ ;  $K$  – вектор, що характеризує режим роботи об'єкта.

Про сукупності технічних параметрів об'єкта судять за результатами прямих або непрямих вимірювань фізичних параметрів. Сукупність результатів вимірювань залежить від відповідних технічних параметрів об'єкта на момент вимірювань і умов, в яких проводилися вимірювання. Дана стадія описується рівнянням:

$$y(t) = G(x(t), u(t)), \quad (2)$$

де  $y(t)$  – вимірювання при здійсненні контролю (випадкова величина);  $u(t)$  – умова експлуатації об'єкта в поточний момент часу.

За отриманою сукупністю вимірювань будується оцінка істинних значень технічних параметрів об'єкта. Даний процес описується рівнянням оцінок:

$$\hat{x}(t) = H(y(t)), \quad (3)$$

де  $\hat{x}(t)$  – оцінка вектора технічного стану.

Далі оцінюється фактичний стан об'єкта, про який судять за сукупність оцінок істинних значень технічних параметрів об'єкта, отриманих в конкретних умовах [6]:

$$\Phi(t) = \Psi(\hat{x}(t), u(t)), \quad (4)$$

де  $\Phi(t)$  – оцінка фактичного стану об'єкта на момент часу  $t$ .

Залишковий ресурс об'єкта розраховується за побудованою математичною моделлю і визначається сукупністю оцінок технічних параметрів об'єкта, рівнянням стану, умовами експлуатації, фактичним станом об'єкта і сукупністю граничних технічних параметрів:

$$R(t) = W(t, \hat{x}(t), u(t), \bar{x}, \Phi(t)), \quad (5)$$

де  $R(t)$  – оцінка остаточного ресурсу на момент часу  $t$ ;  $\bar{x}$  – граничні значення технічних параметрів.

Тоді математична модель системи оцінки фактичного стану остаточного ресурсу матиме вигляд:

$$\begin{cases} x(t) = F(x(t_0), u_{[t_0, t]}, K) \\ y(t) = G(x(t), u(t)) \\ \hat{x}(t) = H(y(t)) \\ \Phi(t) = \Psi(\hat{x}(t), u(t)) \end{cases}, \quad (6)$$

$$R(t) = W(t, \hat{x}(t), u(t), \bar{x}, \Phi(t), K), \quad (7)$$

де (1) – рівняння стану (може здаватися еволюційним або диференціальним рівнянням – детермінованим або стохастичним в залежності від вхідних в праву частину величин); (2) – рівняння вимірювань (стохастичне); (3) – рівняння оцінок (детерміноване); (4) – рівняння оцінки фактичного стану об'єкта (передбачає алгоритм віднесення об'єкта до певного класу, побудований на основі імовірнісних методів); (7) – рівняння оцінки залишкового ресурсу (передбачає алгоритм прогнозування з використанням рівняння (1)).

При цьому за  $t_0$  в рівнянні (1) при побудові математичної моделі приймається момент початку експлуатації об'єкта, а при визначенні залишкового ресурсу – момент оцінки технічного стану об'єкта. Для оцінки залишкового ресурсу необхідно в рівняння (1) в якості початкових умов вказати оцінку  $\hat{x}(t)$  з рівняння (3), в якості експлуатаційних навантажень – заплановані навантаження, розрахувати траєкторії зміни технічних параметрів і, відповідно, проміжок часу, впродовж якого ні один із технічних параметрів не досягне свого граничного значення або вектор фізичного стану не вийде за межі допустимого стану.

Дана модель будується для кожного компонента об'єкта. Залишковий ресурс всієї конструкції оцінюється по компоненту в найгір-

шому стані.

Оскільки вимірювання при проведенні контролю є випадковими величинами, то описану модель не можна вважати повністю детермінованою, тому необхідним є математичний опис статистичних закономірностей вимірів і їх зв'язків з показниками стану об'єкта контролю для оцінки фактичного стану цього об'єкта.

Необхідно зауважити, що, підбираючи функцію  $u(t)$  (умови експлуатації) і вектор  $K$  (параметри функціонування) в рівнянні (1), можна керувати зміною технічних параметрів, а отже, залишковим ресурсом.

При побудові системи оцінки залишкового ресурсу при проектуванні нового (особливо складного) об'єкта в нього необхідно ввести засоби моніторингу поточного стану в найбільш критичних точках (в розрахункових місцях концентрації напружень, відомих вже об'єктів, що знаходяться в експлуатації та ймовірних центрах виникнення корозії тощо).

### **Висновки**

Описаний підхід до побудови системи визначення фактичного стану і оцінки залишкового ресурсу передбачає ведення історії експлуатації об'єкта, вимір і моніторинг досить більшої кількості діагностичних параметрів, передачу отриманих даних, їх обробку і інтерпретацію.

Для визначення фактичного стану і оцінки залишкового ресурсу конструкцій пропонується одночасно оцінювати кілька характеристик матеріалу об'єкта: характерні параметри структури матеріалу, інтегральні параметри матеріалу, пов'язані з міцністю (наприклад, твердість), наявність і характер макродефектів, ступінь корозійного зносу металу.

Граничні значення обраних діагностичних параметрів визначаються існуючими стандартах або технічними умовами.

Динаміку зміни діагностичних параметрів можна відстежувати і моделювати на основі даних періодичних обстежень об'єкта контролю.

1. Wu, S., Clements-Croome, D., Fairey, V., et al.: Reliability in the whole life cycle of building systems. Eng. Constr. Architectural Manage. 13(2), 136–153 (2006).
2. Chybowski, L., Żołątkowski, S.: Basic Reliability Structures of Complex Technical Systems. Springer International Publishing Switzerland (2015).
3. L. V. Kuzmich, Y. S. Tsekhmaystruk. Modern state of mechanical

deformation measurement of complex technical systems [electronic resource] / Materials of the XIII international scientific and technical conference «AVIA – 2017». Mode of access to the site: URL: <http://avia.nau.edu.ua/avia2017/>. (дата звернення: 15.01.2019). **4.** L. Kuzmych; O. Kobylanskyi; M. Duk. Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems. Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085J (1 October 2018); doi: [10.1117/12.2501661](https://doi.org/10.1117/12.2501661) **5.** L. Kuzmych, V. Kvasnikov. Study of the durability of reinforced concrete structures of engineering buildings. Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 543, 2017, Pages 659-663. International Conference on Systems, Control and Information Technologies, SCIT 2016; Warsaw; Poland; 20 May 2016 through 21 May 2016; Code 187699. **6.** Надежность и эффективность в технике. Т. 8 / под ред. В. И. Кузнецова, Е. Ю. Барзеловича. М. : Машиностроение, 1990.

## REFERENCES:

**1.** Wu, S., Clements-Croome, D., Fairey, V., et al.: Reliability in the whole life cycle of building systems. Eng. Constr. Architectural Manage. 13(2), 136–153 (2006). **2.** Chybowski, L., Żotkiewski, S.: Basic Reliability Structures of Complex Technical Systems. Springer International Publishing Switzerland (2015). **3.** L. V. Kuzmich, Y. S. Tsekhmaystruk. Modern state of mechanical deformation measurement of complex technical systems [electronic resource] / Materials of the XIII international scientific and technical conference «AVIA – 2017». Mode of access to the site: URL: <http://avia.nau.edu.ua/avia2017/>. (data zver-nennia: 15.01.2019). **4.** L. Kuzmych; O. Kobylanskyi; M. Duk. Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems. Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085J (1 October 2018); doi: [10.1117/12.2501661](https://doi.org/10.1117/12.2501661) **5.** L. Kuzmych, V. Kvasnikov. Study of the durability of reinforced concrete structures of engineering buildings. Advances in Intelligent Systems and Computing. Volume 543, 2017, Pages 659-663. International Conference on Systems, Control and Information Technologies, SCIT 2016; Warsaw; Poland; 20 May 2016 through 21 May 2016; Code 187699. **6.** Nadezhnost i effektivnost v tekhnike. Т. 8 / pod red. V. I. Kuznetsova, E. Yu. Barzelovicha. М. : Mashinostroenie, 1990.

Рецензент: д.т.н., професор Древецький В. В. (НУВГП)

---

**Kuzmych L. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Postdoctoral Fellow**  
(National Aviation University, Kyiv), **Kuzmych A. A., Senior Student**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **THE METHOD OF EVALUATION OF THE RESOURCE OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS**

**During the operation of any technical objects the aging of their elements occurs as a result of mechanical, thermal, electrical and other physical and chemical processes or under the influence of various kinds of external and internal loads. These processes and factors cause accumulation of damages, the development of defects, irreversible changes in the properties of structural materials and the parameters of elements of technical objects and, consequently, the gradual decrease in their functionality, which subsequently leads to failures and the onset of the limited state, after which further exploitation of such object is impossible.**

**The described approach to constructing a system for determining the actual state and assessing the residual resource involves maintaining the history of the operation of the object, measuring and monitoring a sufficiently larger number of diagnostic parameters, transmission of received data, their processing and interpretation.**

**To determine the actual state and estimate the residual life of structures, it is proposed to simultaneously evaluate several characteristics of the material of the object: the characteristic parameters of the structure of the material, integral parameters of the material, related to strength (for example, hardness), the presence and nature of macrodefects, the degree of corrosion wear of the metal.**

**Limit values of the selected diagnostic parameters are determined by available standards or technical conditions.**

**The dynamics of changes in diagnostic parameters can be monitored and modeled on the basis of the data of periodic inspections of the control object.**

**The space of the diagnostic parameters is broken down into the area, taking into account the rate of change of each of the parameters, while critical areas are determined. The state of the control object is connected to a point in the parameter space. The change in the state of an object is characterized by a trajectory that shows its movement in**



**the parameter space. Getting a trajectory in a critical area indicates an emergency state of the control object.**

**Keywords:** resource, residual resource, damage, limited state, load, deformation

---

**Кузьмич Л. В., к.т.н., докторант** (Национальный авиационный университет, Киев), **Кузьмич А. А., студентка** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

## **МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ РЕСУРСА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

**Предложено методику оценивания ресурса сложных технических объектов, включая построение математической модели функционирования объекта для определения его фактического технического состояния и остаточного ресурса.**

**Ключевые слова:** ресурс, остаточный ресурс, повреждения, предельное состояние, нагрузки, деформация.

---