

С.В. Пащенко, А.А. Шульгін, В.О. Харченко

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ЩОДО МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ З УРАХУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ТА БОЙОВИХ ПОШКОДЖЕНЬ

Стаття присвячена розробці методичного підходу щодо вдосконалення методів підтримання справності авіаційної техніки в умовах ведення бойових дій з урахуванням експлуатаційних та бойових пошкоджень. Запропоновано комплексний підхід, що базується на застосуванні методу критичних елементів (КЕ) та інноваційних технологій, таких як 3D-сканування, фізико-математичне моделювання в CAD/CAE-системах та алгоритми машинного навчання. Методичний підхід охоплює етапи визначення критичних елементів, побудову їх статистичних, фізико-математичних та нейронних моделей, а також інтеграцію отриманих результатів для забезпечення ефективного моніторингу та прогнозування технічного стану. Впровадження даного підходу дозволить оптимізувати обслуговування авіатехніки, знизити витрати на її відновлення та максимально використовувати її ресурсний потенціал.

Ключові слова: авіаційна техніка, технічний стан, ресурс, моніторинг, прогнозування, критичний елемент, метод, модель, база даних, база знань.

Ступ

Постановка проблеми. В умовах ведення повномасштабних бойових дій відбулося суттєве зростання інтенсивності та складності завдань, що виконуються авіацією Збройних Сил України. Це призвело до актуалізації існуючих та появи нових викликів, а саме (рис. 1) [1, с. 28...35; 2, с. 6...13]:

зростання кількості різних типів авіаційної техніки без авторського нагляду;

вичерпання залишку встановленого ресурсу деталей та ускладнення процесу їх імпортозаміщення;

збільшення експлуатаційного навантаження та кількості бойових пошкоджень;

трудомісткість, низька оперативність та недостатня деталізація процесів обміну даними.

Це суттєво впливає на процеси підтримання справності парку авіаційної техніки (АТ), її готовність до виконання завдань за призначенням та актуалізує потребу у вирішенні низки наукових задач щодо оперативного визначення фактичного технічного стану АТ, його подальшого моніторингу та прогнозування.



Рис. 1. Актуальні виклики та перспективи існуючої системи підтримання справності авіаційної техніки

Джерело: розроблено авторами

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що традиційні методи та засоби моніторингу та прогнозування технічного стану авіаційної техніки на сьогодні не дозволяють у повній мірі реалізувати зазначені вимоги [3, с. 25...31; 4, с. 156...161; 5, с. 57...60], а це, у свою чергу, обумовлює необхідність розробки нових наукових засад та інноваційних підходів до вирішення зазначених питань.

З одного боку, з появою таких інноваційних технологічних рішень [6, с. 75...95], як 3D-сканування зовнішніх та внутрішніх властивостей фізичних об'єктів [7, с. 25...38; 8, с. 150...155], міждисциплінарне мультифізичне математичне моделювання в програмних середовищах інформаційних CAD/CAE-систем [9, с. 145...153], різноманітні прикладні моделі штучного інтелекту на основі алгоритмів машинного самонавчання [10, с. 79...91], які можуть бути інтегровані при розробці інформаційних систем підтримки прийняття рішень, відкриваються нові можливості для вдосконалення процесів визначення та прогнозування технічного стану АТ.

Але, з іншого боку, аналіз існуючих робіт [6, с. 75...95; 8, с. 150...155; 11, с. 11...33], які присвячені розробці нових методик щодо підтримання справності складних авіаційних технічних об'єктів, свідчить про відсутність комплексного підходу щодо впровадження вищезазначених технологій у складі єдиної системи та оптимізації їх застосування. Тому, **метою статті** є оприлюднення розробленого авторами методичного підходу щодо вдосконалення існуючих методів підтримання справності АТ, який засновано на об'єктивному аналізі вихідних даних щодо поточного стану визначених об'єктів АТ і ґрунтується на застосуванні сучасних технологій із використанням методу критичних елементів.

Виклад основного матеріалу

Критичні елементи — це основні (у тому числі особливо відповідальні) деталі, руйнування яких внаслідок їхньої недостатньої довговічності або наслідки руйнування яких можуть привести до аварійної або катастрофічної ситуації для літального апарату [12, с. 97...100]. Тому, на сьогодні, основною умовою подальшої безпечної експлуатації АТ Збройних Сил України, строки служби якої практично вдвічі перевищують попередньо встановлені значення, є виявлення, постійний моніторинг і актуалізація технічного стану таких елементів [1, с. 28...35; 2, с. 6...13].

Запропонований авторами в [12, с. 97...100] *метод критичних елементів* дозволяє виконати ранжування деталей авіаційних конструкцій за ступенем критичності відмов, навантаженості та

складності об'єктивного контролю. Впровадження цього методу дозволить оптимізувати моніторинг та прогнозування технічного стану об'єктів авіаційної техніки, оперативно приймати рішення щодо їхнього ремонту та визначати пріоритетність технічного обслуговування.

В якості основного отриманого результату запропонованого методичного підходу представлено синтез структурно-логічної схеми узагальненого алгоритму (рис. 2), результатом реалізації якого є можливість розробки автоматизованої інформаційної системи моніторингу та прогнозування технічного стану критичних елементів, а також підтримки прийняття управлінських рішень щодо подальшої експлуатації авіаційної техніки та можливості продовження її встановленого ресурсу.

Визначення фактичного технічного стану авіаційної техніки може бути здійснено на основі даних щодо встановлених строків служби, ресурсних показників, характеру напруження, отриманих експлуатаційних та бойових пошкоджень.

Під час формування вимог (*критеріїв*) для ідентифікації критичного елемента ключовими вихідними даними можуть стати результати обробки формулярів конкретного критичного елемента (наприклад, дані про накопичену циклічну пошкодженість), аналіз звітів надійності, досвіду експлуатації та класифікації експлуатаційних та бойових пошкоджень на основі експертної оцінки та теорії розпізнавання образів.

Декомпозиція авіаційної техніки на критичні елементи та їх ранжування за пріоритетністю виконується відповідно до наступних параметрів: ступінь впливу на рівень безпеки польоту (Failure Modes and Effects Analysis [13, с. 1...21]), ризик аварійного виходу елемента з ладу (Risk Assessment [14]), вплив на функціональність авіаційної техніки (Fault Tree Analysis [15]), експлуатаційні витрати та час відновлення працездатності (Life Cycle Analysis [16]).

Після формування переліку критичних елементів відбувається їх дослідження за трьома напрямками:

побудова статистичної моделі критичного елемента на основі даних щодо його напруження, отриманих експлуатаційних та бойових пошкоджень, кількості та складності виконаних ремонтів, а також аналіз із застосуванням методів теорії ймовірності [17];

побудова фізико-математичної 3D-моделі критичного елемента у вигляді “цифрового двійника” та її дослідження (випробування) шляхом проведення віртуального експерименту методом кінцевих елементів у програмному середовищі CAE-системи [18];

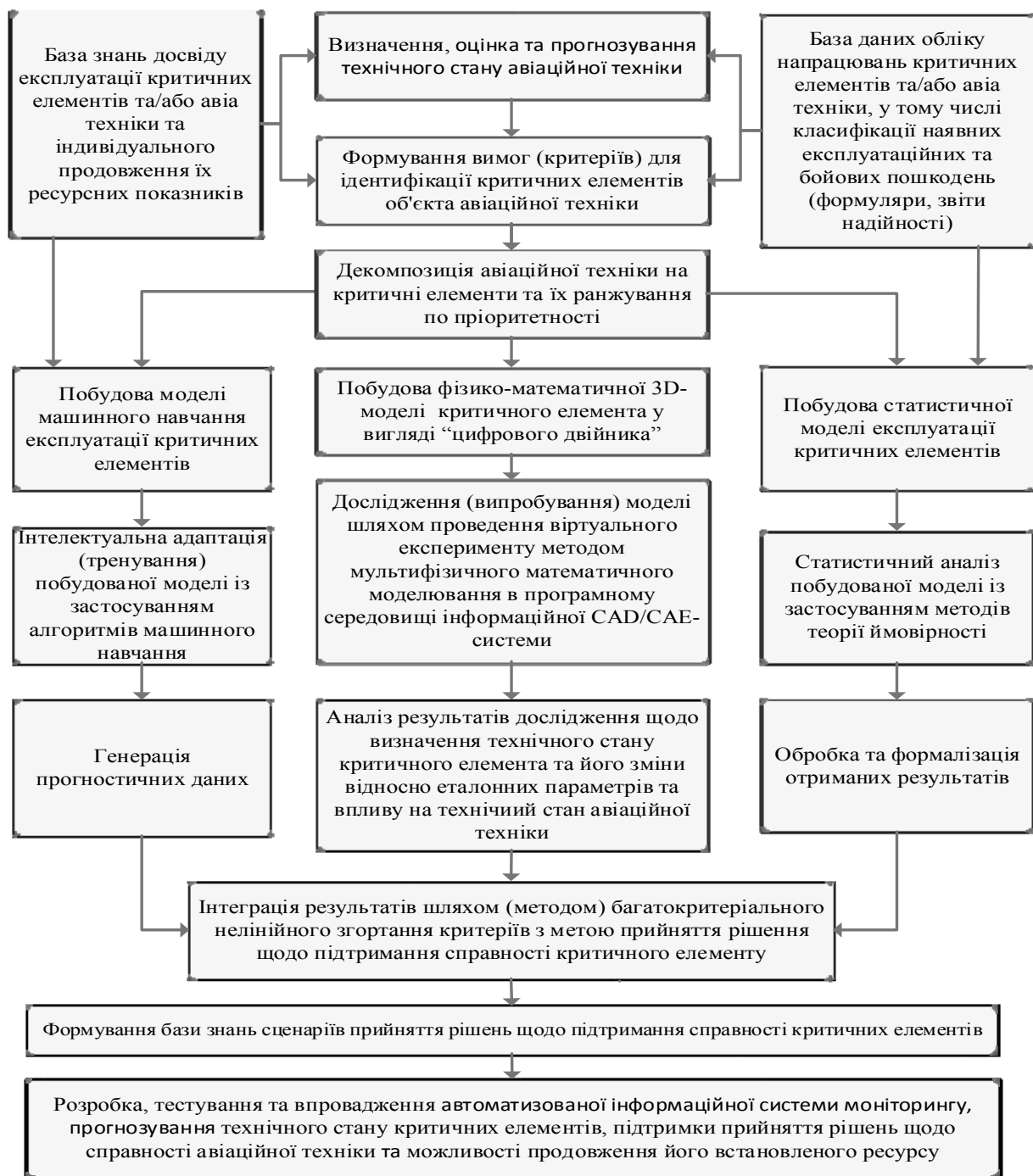


Рис. 2. Структурно-логічна схема алгоритму реалізації розробленої методики проектування інформаційної системи
Джерело: розроблено авторами

побудова моделі нейронної мережі та її “тренування” на історії прийнятих рішень щодо експлуатації критичних елементів із застосуванням алгоритмів машинного навчання з метою подальшої генерації прогностичних даних про технічний стан критичного елемента [19].

На завершальному етапі виконуються обробка, формалізація та інтеграція отриманих результатів із застосуванням методу багатокритеріальної нелінійної згортки даних із метою прийняття управлінських рішень щодо подальшої експлуатації критичних

елементів. На основі реалізованих сценаріїв прийнятих рішень формується база знань, яка буде використана під час розробки автоматизованої інформаційної системи моніторингу, прогнозування технічного стану визначених об'єктів та підтримки прийняття рішень щодо можливості продовження їх встановленого ресурсу з урахуванням отриманих експлуатаційних та бойових пошкоджень.

Слід зазначити, що виконання представленого алгоритму неможливе без відповідних структур даних наступного характеру (рис. 3):

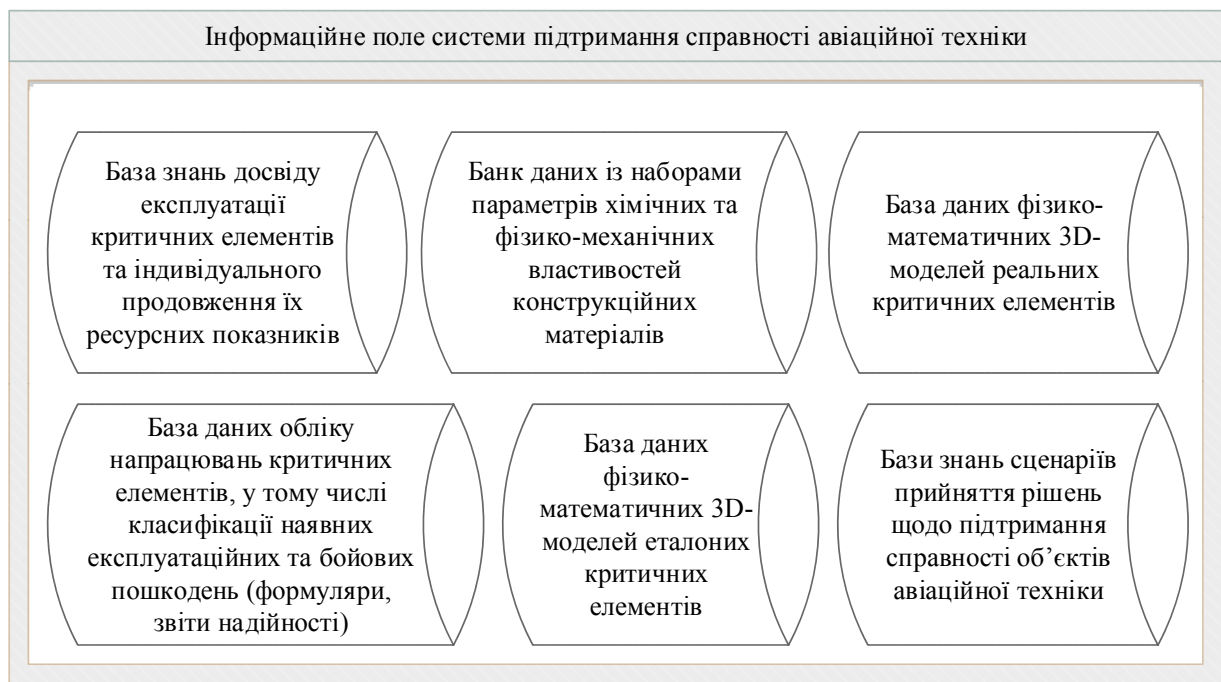


Рис. 3. Складові інформаційного поля системи підтримання справності авіаційної техніки
Джерело: розроблено авторами

база знань досвіду експлуатації критичних елементів – містить дані про попередню історію експлуатації визначених об'єктів, включаючи регламентні технічні обслуговування, виконані ремонти, допуски до експлуатації, показники надійності та тривалості їх служби;

база даних обліку напрацювань критичних елементів – фіксує дані про їх актуальний технічний стан, ресурсні показники, отримані експлуатаційні та бойові пошкодження та їх класифікацію;

банк даних із наборами параметрів хімічних та фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів – зберігає інформацію про матеріали, з яких виготовлено критичні елементи, зокрема хімічні та фізико-механічні характеристики, які необхідні для побудови та аналізу фізико-математичної 3D-моделі;

база даних фізико-математичних 3D-моделей реальних критичних елементів – містить «цифрові двійники» реальних критичних елементів, які необхідні для проведення віртуальних експериментів;

база даних фізико-математичних 3D-моделей еталонних критичних елементів – містить «цифрові двійники» еталонних зразків критичних елементів, що служать для порівняння з реальними елементами та оцінки відхилень у технічному стані.

база знань сценаріїв прийняття рішень щодо підтримання справності об'єктів авіаційної техніки – зберігає впроваджені управлінські рішення щодо оцінки та прогнозування їх технічного стану, що

допомагає в управлінні життєвим циклом та прогнозуванні можливих відмов.

Висновки

Розробка та впровадження автоматизованої інформаційної системи згідно із запропонованим методичним підходом із використанням інноваційних технологічних рішень та методу критичних елементів дозволить:

об'єктивно та швидко визначати фактичний технічний стан авіаційної техніки, з урахуванням отриманих експлуатаційних та бойових пошкоджень;

контролювати динаміку зміни технічного стану авіаційної техніки у порівнянні з його попередніми або еталонними значеннями;

суттєво зменшити вартість відновлення справності авіаційної техніки та максимально використати встановлені ресурсні показники шляхом їх безперервного моніторингу та прогнозування залишку;

своєчасно приймати науково-обґрунтовані рішення щодо продовження встановленого ресурсу авіаційної техніки.

Зазначені вище переваги дозволять на практиці реалізувати стратегію експлуатації парку авіаційної техніки Збройних Сил України до граничних значень з метою забезпечення повного використання її ресурсного потенціалу, закладеного на стадіях розробки та виробництва.

Напрями подальших досліджень. Подальші наукові дослідження доцільно проводити за такими напрямками.

1. Розробка підсистеми автоматизованого збору й обробки даних із датчиків та інших джерел у режимі реального часу. Це дозволить швидше отримувати оновлену інформацію про технічний стан критичних елементів та зменшить ризик людських помилок. Зокрема це можна зробити шляхом інтегрування системи інтернету речей (IoT) для моніторингу технічного стану в реальному часі, що дасть змогу оперативно отримувати дані про стан кожного компонента.

2. Розробка алгоритму оцінки економічної доцільності продовження ресурсу критичних елементів на довгострокову перспективу. Це дозволить приймати більш обґрунтовані рішення щодо можливих ремонтів або замінів.

3. Оптимізація запропонованої структури даних інформаційної системи, а саме – інтеграція окремих баз даних в єдину централізовану систему збереження. Це спростить доступ до даних, пришвидшить їх пошук та зменшить вірогідність дублювання інформації.

4. Інтеграція з іншими інформаційними системами, наприклад логістичними.

Список літератури

1. Олещук М. М., Шамко В. Є., Жарик О. М. (2021). Аналіз сучасного стану та завдань Повітряних Сил Збройних Сил України. Наука і оборона. Науково-теоретичний та науково-практичний журнал. – К.: НУОУ, 2021. – Вип. № 16(3). – С. 28-35.
2. Олещук, М. М., Коршець, О. А., Горбенко, В. М. Погляди щодо напрямків розвитку Повітряних Сил Збройних Сил України з урахуванням досвіду російсько-української війни. Повітряна міць України. Науково-практичний журнал. – К.: НУОУ, 2022. – Вип. №1(2). – С. 6–13.
3. Воронов А. О. Сучасні методи моніторингу технічного стану авіаційної техніки. Вісник Національного авіаційного університету. – К.: НАУ, 2020. – Вип. № 3. – С. 25–31.
4. V. Kotsyuruba, I. Datsenko, A. Bolohin. Modern methods for forecasting the technical condition of aviation equipment. Social Development and Security. Vol. 11(3). 2021. – P. 156–161.
5. Хижняк В.В., Литовченко А.О., Дмитрієв А.Г. Аналіз методів прогнозування технічного стану складних систем та особливості їх застосування при формуванні програм експлуатації державних еталонів. Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХНУПС, 2016. – Вип. №4(48). – С. 57–60.
6. J. Yao, Y. Yang. Systematic Review of Digital Twin Technology and Applications. Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art. Vol. 6, no. 10. 2023. – P. 75–95.
7. S. Koeberle, M. Thiele. Application of 3D-scanning for structural and geometric assessment of aerospace structures. CEAS Aeronautical Journal, Vol. 14(2). 2023. – P. 25–38.
8. Пашенко С. В., Шульгін А. А., Харченко В. О. Концептуальні основи застосування інноваційних технологій 3D-сканування в контексті підтримання льотної придатності авіаційної техніки державної авіації. Зб. наук. праць. – К.: ДНДІА, 2023. – Вип. № 19(26). – С. 150-155. DOI: <https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-21>.
9. Карасьов О.Г., Шульгін А.А., Чемерис Є.І., Башинський К.В., Холодний Р.В. Особливості застосування CAD/CAE систем у контексті продовження ресурсу жарових труб основних камер згоряння ТРДД літаків тактичної авіації. Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2022. Вип. 3(13). С. 145-153.
10. Голубовський, М. П., & Ясній, В. П. (2024). Огляд застосування штучного інтелекту та машинного навчання у прикладній механіці. Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. – І.: ІФНТУНГ, 2024. Вип. №1(56). – С. 79–91. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-79-91](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-79-91)
11. Подвойський, О. І. Засіб моніторингу технічного стану авіаційного обладнання. Кваліфікаційна робота. – К.: НАУ, 2023. – 112 с.
12. Шульгін, А.А. Буліч, І.О. Харченко, В.О. Удосконалення процесу експлуатації авіаційних двигунів шляхом застосування методу критичних елементів. Проблеми оборонного менеджменту: теорія і практика. Збірник тез доповідей. – К.: НУОУ, 2024. – Вип. №1(2). – С. 97-100.
13. R. Bakhat, C. Bentahar, S. Aharouay. Failure Mode Effects and Criticality Risk Analysis: Review & Application within the Scope of the Wind Turbine. Journal of Integrated Studies in economics, law, technical sciences & communication. Vol. 1 No. 1. 2021. – P. 1-21 DOI: 10.13140/RG.2.2.11577.02404.
14. Y. Haimes. Risk Modeling, Assessment, and Management. John Wiley & Sons. 2015. – 720 p.
15. A Brief Guide to Fault Tree Analysis (FTA) – URL. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://safetyculture.com/topics/fault-tree-analysis/>
16. ISO/IEC/IEEE 15288:2023 Systems and Software Engineering - System Life Cycle Processes. International Organization for Standardization. 2015. 116 p.
17. Найко Д.А., Шевчук О. Ф. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб. – В.: ВНАУ, 2020. – 382 с.
18. Шостак В. Г., Пашенко С. В., Шульгін А. А., Харченко В. О. Методичний підхід щодо визначення фактичного технічного стану об'єктів авіаційної техніки із використанням інноваційних технологічних рішень. Прикладна механіка. Праці І Міжнародної науково-технічної конференції. – Т.: ТНТУ, 2024. – С. 267-270.

19. K. Coleman. Use Case: Machine Learning for Predictive Maintenance in Aviation. – URL. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.odysight.ai/articles/aviation/machine-learning-use-cases-for-condition-based-monitoring-and-predictive-maintenance-in-aviation/>

Надійшла до редколегії 30.10.2024

Схвалена до друку 22.11.2024

Відомості про авторів:

Пашенко Сергій Валерійович

кандидат технічних наук
доцент
заступник начальника Державного науково-дослідного інституту авіації з наукової роботи,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8513-2488>

Шульгін Артем Анатолійович

кандидат технічних наук
старший дослідник
начальник науково-дослідного відділу
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2403-7348>

Харченко Володимир Олександрович

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8153-7306>

Information about the authors:

Serhii Pashchenko

Candidate of Technical Sciences
Associate Professor
Deputy Chief
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8513-2488>

Artem Shulhin

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Head of Research Department
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2403-7348>

Volodymyr Kharchenko

Research Associate
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8153-7306>

METHODOLOGICAL APPROACH TO MONITORING AND FORECASTING THE TECHNICAL CONDITION OF AIRCRAFT WITH REGARD TO OPERATIONAL AND COMBAT DAMAGE

S. Pashchenko, A. Shulhin, V. Kharchenko

The article presents a comprehensive approach to monitoring and predicting the technical condition of military aircraft, with a focus on maintaining operational reliability in the face of increased combat and operational stress. The proposed methodology is based on the critical elements method (CEM) and integrates advanced technologies, including 3D scanning, CAD/CAE physical and mathematical modeling, and machine learning algorithms.

The article outlines the importance of addressing technical challenges that have emerged due to the heightened intensity and complexity of military aviation tasks. Traditional monitoring methods are deemed insufficient for the current demands, prompting the need for new data-driven approaches. CEM enables the identification and prioritization of essential components whose failure could critically impact aircraft performance and safety. The methodology involves constructing statistical and digital models for these components, which helps in generating predictive insights into their degradation and failure risks.

Key stages include data collection on wear and damage, virtual testing using digital twins, and predictive analysis through neural networks trained on historical data. This methodical approach ensures that real-time data on critical elements is processed to assess their actual condition, allowing for effective and timely maintenance decisions. The authors propose the development of an automated information system to streamline the monitoring and forecasting processes, ultimately optimizing resource allocation and maintenance operations while extending the life of key components.

Future research areas highlighted in the article include creating real-time data acquisition subsystems, incorporating IoT sensors, and evaluating the cost-benefit of extending service life for critical components. These innovations are expected to contribute significantly to the sustainable use of military aviation resources under conditions of limited availability and high operational demand.

Keywords: information system, aviation equipment, technical condition monitoring, digital twin, predictive maintenance, critical element, machine learning, life cycle, statistical modeling, failure risk.