

О. Б. Аніпко, д. техн. н., професор, В. Ю. Тюріна, канд. техн. наук,
О. М. Панкул, старший викладач

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРОКІВ ПОЧАТКУ ПРОВЕДЕННЯ ПРОФІЛАКТИЧНИХ РОБІТ ПРИ ЗМІНІ ІНТЕНСИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

Ключові слова: повітряні судна, технічний стан, експлуатація, профілактичні роботи, прогнозування, надійність, економічні показники, життєвий цикл, залишкова вартість, вартість експлуатації, амортизація.

Відомо, що фактичний технічний стан об'єкта, який перебуває на певному етапі експлуатації в межах його життєвого циклу, зазвичай відрізняється від прогнозованого на кожен конкретний момент часу. Це зумовлено тим, що для будь-якої технічної системи ще на етапі проєктування задається розрахунковий режим експлуатації, який у подальшому уточнюється за результатами випробувань. Унаслідок цього формується система показників, зокрема ресурсних критеріїв та параметрів технічного стану, за якими здійснюється оцінювання фактичного стану об'єкта. На підставі отриманих даних плануються організаційно-технічні заходи, спрямовані на забезпечення заданого рівня надійності, експлуатаційної придатності та прогнозованого залишкового ресурсу.

У процесі експлуатації ресурси об'єкта поступово вичерпуються, а його залишкова вартість безперервно зменшується. На певному етапі життєвого циклу це призводить до виникнення проблеми невідповідності між фактичним технічним станом системи та очікуваними параметрами на конкретний момент часу.

Ця проблема набула особливої актуальності в умовах загальної тенденції до скорочення експлуатаційних витрат на виробництво машинобудування загалом та транспортні засоби зокрема [1–3]. У зв'язку з цим виникла потреба у наявності чітких критеріїв, які дозволяють визначити фактичний технічний стан об'єкта та приймати обґрунтовані рішення щодо його відновлення, ремонту, заміни або подальшої експлуатації.

Слід особливо підкреслити, що під терміном «елемент» у цьому контексті може розумітися як окрема деталь, так і вузол, система або функціональний модуль технічного засобу [4–5].

Дослідження у цьому напрямі проводились і продовжують проводитися для більшості видів транспортних засобів та їх окремих складових. Зокрема, це стосується автомобільного, залізничного, водного та повітряного транспорту.

Аналіз наявних публікацій [6–7], а також удосконалених даних щодо ресурсних показників для різних транспортних об'єктів, засвідчує, що, попри досягнуті успіхи, на сьогодні не розроблено єдиного методичного підходу до вирішення цієї проблеми. Крім того, спостерігається розрив і відсутність узгодженості між оцінками технічного стану об'єкта та економічними показниками, зокрема залишковою вартістю, витратами на ремонт і загальними експлуатаційними витратами.

Відомо з теорії та практики концептуального проєктування виробів машинобудування, що під час техніко-економічного обґрунтування доцільності розробки пріори-

тет надається саме економічному аналізу. Це зумовлено тим, що саме економічне обґрунтування визначає принципову можливість забезпечення споживача доступними за вартістю виробами. У цьому контексті практично важливим є завдання розроблення єдиного (універсального) підходу до визначення технічного стану об'єкта, що перебуває в експлуатації, у фіксований момент часу, а також відповідних економічних показників.

Розв'язанню цього актуального завдання й присвячено дану статтю.

Усі спроектовані технічні об'єкти за своєю суттю є ненадійними, оскільки їхні характеристики змінюються з часом та інтенсивністю використання. Як наслідок, такі об'єкти в кінцевому підсумку вийдуть з ладу, якщо їхнє обслуговування не буде своєчасним та якісним. У контексті забезпечення справності, особливо в умовах інтенсивної експлуатації, ключовим завданням є не просто проведення профілактичних робіт, а їхнє виконання у раціональні терміни. Зміна інтенсивності використання повітряних суден (ПС) безпосередньо впливає на швидкість їхньої деградації та вичерпання ресурсу. Це вимагає розробки та впровадження ефективних методів прогнозування, які дозволять оптимізувати графіки технічного обслуговування, мінімізувати простой та, зрештою, підвищити надійність і доступність авіаційної техніки.

Розглянемо модель, в якій деяка технічна система знаходиться на етапі експлуатації життєвого циклу. Її технічний стан характеризується показником Π , котрий нормований на ступінним чином:

$$\Pi = \frac{\Pi(t)}{\Pi(\max)},$$

де $\Pi(t)$ – значення показника в момент часу t , а $\Pi_{\max}$ – найбільше можливе значення показника. Зрозуміло, що діапазон значень Π знаходиться в інтервалі $0 < \Pi \leq 1$. Існує певне значення t , після якого функціонування технічної системи має бути припинено з міркувань недоцільності чи небезпеки.

Показник, що визначає цей момент, назовемо критичним ($P_{кр}$) рис. 1.

Приймаємо також, що у випадку, коли система експлуатується в умовах, передбачених під час її створення, то в моменти часу t , коли $0 \leq t \leq \overline{t_{кр}}$, показник $\Pi(t)$ набуває очікуваних значень. Сукупність цих значень визначає функцію $\Pi = f(\overline{t})$, що відповідає розрахунковому режиму експлуатації (рис. 1).

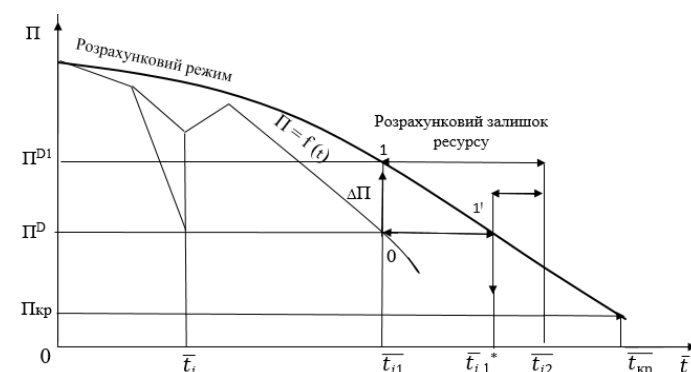


Рисунок 1 – Розрахунковий режим експлуатації

Усе різноманіття реальних процесів, що відбуваються на етапі експлуатації, можна розділити на дві групи: перша – ті, що знижують значення показника Π (наприклад, використання за призначенням), і друга група ті, що підвищують значення цього показника (наприклад, організаційно-технічні заходи).

Слід особливо підкреслити, що розрахунковий режим експлуатації в певному сенсі є ідеальним, оскільки відображає максимально можливі значення показників Π у кожен момент часу. Фактичні значення показника Π на практиці завжди нижчі за очікувані, проте знаходяться в межах допустимих відхилень. Це пов'язано з тим, що практично всі основні технічні відхилення взагалі, а транспортних засобів зокрема, є непередбачуваними [8]. Це означає, що вплив зовнішніх та внутрішніх факторів, а також їхніх властивостей, з часом змінюються (непостійно), але залишаються в допустимому для використання за призначенням діапазоні. Це обґрунтовується конструктивно, технологічно та виконанням вимог з експлуатації.

Під впливом різноманітних зовнішніх факторів (аналіз впливу яких виходить за рамки цієї статті і є окремим завданням) фактичне значення показника Π може відрізнитися від розрахункового режиму на величину, що перевищує допустиме відхилення:

$$|\Pi - \Pi^*| > \Delta \Pi^{\text{доп}}.$$

У цьому випадку виникає задача оцінки фактичного показника Π , що відповідає фактичному стану технічної системи.

Будемо вважати, що в момент часу t_{i1} певним чином встановлено значення показника Π^D , причому таке, що його значення перевищує допустиме відхилення від значення, яке відповідає розрахунковому режиму експлуатації (т.0, рис. 1). Тоді значення Π^{D1} відповідає очікуваному значенню, що відповідає розрахунковому режиму.

При цьому залишковий ресурс, що відповідає розрахунковому режиму експлуатації, буде визначатися різницею $(\overline{t_{i2}} - \overline{t_{i1}})$. Однак таким чином визначений залишковий ресурс не відповідає фактичному стану технічної системи, який визначається значенням Π^D у момент часу $\overline{t_{i1}}$. Для визначення дійсного залишкового ресурсу з т. 0 (рис. 1) потрібно провести горизонталь до перетину з лінією, що відповідає розрахунковому режиму (т.1'). Ця точка, у свою чергу, визначає ефективний час $\overline{t_{i1}^*}$ (рис. 1), яка і дозволяє визначити дійсний залишковий ресурс, що відповідає фактичному стану технічної системи:

$$\overline{t_{i2}} - \overline{t_{i1}^*}, \text{ як видно, } (\overline{t_{i2}} - \overline{t_{i1}}) > (\overline{t_{i2}} - \overline{t_{i1}^*}).$$

Тому визначення фактичного залишкового ресурсу є важливим, оскільки при будь-якій експлуатації технічних систем загалом, і транспортних засобів зокрема, період використання за призначенням не повинен перевищувати залишкового ресурсу.

У зв'язку з цим виникає інше практично важливе завдання щодо визначення раціональних термінів початку та проведення профілактичних робіт для підтримки показників, що характеризують технічний стан системи в допустимих межах.

Будемо вважати, що для технічної системи відома функція $\Pi = f(\bar{t})$ для розрахункового режиму експлуатації та функція $\Pi^* = \varphi(\bar{t})$, що відображає фактичне значення показників для даних умов експлуатації (рис. 2).

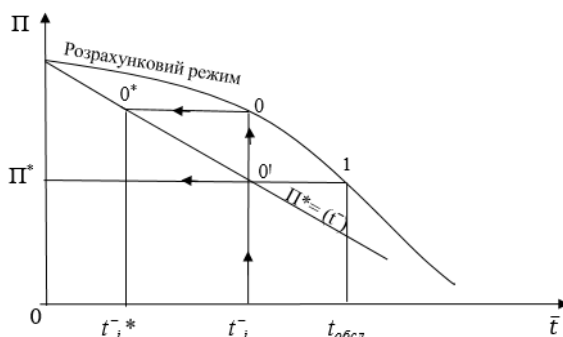


Рисунок 2 – Прогнозування часу початку профілактичних робіт

Ще раз підкреслимо, що обчислення закономірності $\Pi^* = (\bar{t})$ є окремим завданням. Тоді, наприклад, точка 1 (рис. 2) визначить ефективний час $t_{обсл}$, що відповідає технічному стану в розрахунковому режимі експлуатації. При цьому раціональний час початку профілактичних робіт (t_{i1}^*) визначатиметься за допомогою т. 0* (рис. 2), яка визначає фактичний стан технічної системи, що відповідає умовам експлуатації та описується функцією $\Pi^* = (\bar{t})$.

Таким чином, розроблений підхід дозволяє прогнозувати час початку профілактичних робіт не за часом експлуатації, а відповідно до технічного стану системи, зумовленого умовами експлуатації. Це, своєю чергою, забезпечує, щонайменше, не зниження контрольованого показника нижче допустимого значення.

Визначений таким чином ефективний строк експлуатації, тобто той, який визначено на основі технічного стану об'єкта та залишковий ресурс, дозволяють оцінити і економічні показники рис. 3.

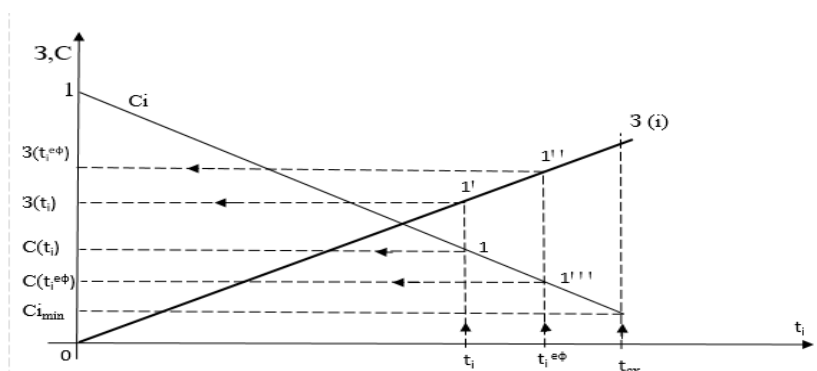


Рисунок 3 – Графік залежності вартості і відмов

Для визначення витрат на експлуатацію та залишкової вартості до фактичного стану об'єкта за значенням ефективного часу експлуатації.

Як видно з рисунку 3 за показником ефективного строку експлуатації визначаємо залишкову вартість об'єкта, а також очікуване значення експлуатаційних витрат.

Доцільно порівняти це значення із фактичними витратами на експлуатацію. Для об'єктів авіаційного транспорту це вартість однієї години льотної експлуатації. В тому випадку, якщо фактичні витрати суттєво перевищують спрогнозовані значення, то необхідний аналіз доцільності подальшої експлуатації.

Слід зауважити, що вид функції залишкової вартості від часу експлуатації визначається методом розрахунку амортизації (рівномірний, зменшення залишку тощо). Однак, незалежно від цього, це лінійна функція або крива другого порядку, підхід залишається постійним. На рис. 3 представлено лінійну функцію, для наочності загального підходу, який залишається незмінним і за іншої залежності залишкової вартості від часу експлуатації.

Висновки

Таким чином, розроблено узагальнений підхід методу прогнозування раціональних строків початку проведення профілактичних робіт при зміні інтенсивності експлуатації повітряних суден. Важливою перевагою розробленого методу є те, що він дозволяє визначати як технічний стан, так і відповідні економічні показники під час експлуатації об'єкта техніки, що вигідно відрізняє його від відомих підходів, які не передбачають таку взаємозалежність.

Слід особливо підкреслити важливість визначення залишкового ресурсу, що відповідає фактичному стану технічної системи, особливо для об'єктів транспорту, які характеризуються підвищеною небезпекою.

Література

1. Аніпко О. Б., Калкаманов С. А., Приймак А. В. Формули пріоритетів і хінсайд-аналіз при варіантних проробках на етапі концептуального проєктування транспортного літака. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. № 2. С. 11–19.
2. Anipko O., Loginov V. An “Integration index” for determining the degree of subsystem integration in passenger and transport aircraft designs. *Transactions on Aerospace Research*. 2024. Vol. 277, No. 4. P. 27–44. DOI: 10.2478/tar-2024-0021.
3. Аніпко О. Б., Білий М. Ф. Дистрибутивний підхід до аналізу готовності авіаційного парку з формалізацією прихованих відмов. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. № 2. С. 79–83. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.2.09.
4. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1994. 96 с.
5. ДСТУ 2498-94. Основні норми взаємозамінності. Допуски форми та розташування поверхонь. Терміни та визначення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1994. 59 с.
6. Аніпко О. Б., Приймак А. В. Комплексування показників досконалості транспортних систем. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 4. С. 43–50.
7. Аніпко О. Б., Приймак А. В., Миргород Ю. І. Перелік показників властивостей і база даних ТТХ транспортного літального апарата як складної технічної системи. *Інтегровані технології та енергозбереження*. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. № 1. С. 123–125.
8. Труханов В. М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов. Москва : Машиностроение, 2003. 320 с.

9. Максимов Н. А., Боборыкин С. А., Виноградов А. И., Кузьмин В. П. Инженерно-авиационная служба и эксплуатация летательных аппаратов. Киев : КВИАВУ ВВС, 1969. 467 с.
10. Мітрахович М. М. Складні технічні системи. Системне математичне забезпечення проектних рішень. Київ : Нічлава, 1998. 184 с.
11. Bar-Yam Y. General Features of Complex Systems. *Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford : EOLSS UNESCO Publishers, 2002. Retrieved 16 September 2014.
12. Виклюк Я. І., Камінський Р. М., Пасічник В. В. Моделювання складних систем : навч. посіб. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2024. 248 с.
13. Нові інформаційні технології, моделювання та автоматизація : кол. монографія / за ред. О. Д. Мороза. Київ : Техніка, 2023. 320 с.

Bibliography (transliterated)

1. Anipko O. B., Kalkamanov S. A., Pryimak A. V. Formuly priorytetiv i khin-said-analiz pry variantnykh prorobkakh na etapi kontseptualnoho proiektuvannia transportnoho litaka. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2020. № 2. P. 11–19.
2. Anipko O., Loginov V. An “Integration index” for determining the degree of subsystem integration in passenger and transport aircraft designs. *Transactions on Aerospace Research*. 2024. Vol. 277, No. 4. P. 27–44. DOI: 10.2478/tar-2024-0021.
3. Anipko O. B., Bilyi M. F. Dystrybutyvnyi pidkhid do analizu hotovnosti aviatsiinoho parku z formalizatsiieiu prykhovanykh vidmov. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2020. № 2. P. 79–83. DOI: 10.20998/2078-5364.2020.2.09.
4. DSTU 2860-94. Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 1994. 96 p.
5. DSTU 2498-94. Osnovni normy vzaiemozaminnosti. Dopusky formy ta roztashuvannia poverkhon. Terminy ta vyznachennia. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 1994. 59 p.
6. Anipko O. B., Pryimak A. V. Kompleksuvannia pokaznykiv doskonalosti transportnykh system. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2014. No. 4. P. 43–50.
7. Anipko O. B., Pryimak A. V., Myrhorod Yu. I. Perelik pokaznykiv vlastyvostei i baza danykh TTKh transportnoho litalnoho aparata yak skladnoi tekhnichnoi systemy. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. Kharkiv : NTU «KhPI», 2013. No. 1. P. 123–125.
8. Trukhanov V. M. Nadezhnost tekhnicheskikh system tipa podvyzhnykh ustanovok na etape proektyrovaniia y uspytaniia opytnykh obraztsov. Moskva : Mashynostroenye, 2003. 320 p.
9. Maksymov N. A., Boborykyn S. A., Vynohradov A. Y., Kuzmyn V. P. Ynzhenerno-avyatsyonnaia sluzhba y ekspluatatsiia letatelnykh apparatov. Kyiv : KVYAVU VVS, 1969. 467 p.
10. Mitrahovych M. M. Skladni tekhnichni systemy. Systemne matematychno zabezpechennia proektnykh rishen. Kyiv : Nichlava, 1998. 184 p.
11. Bar-Yam Y. General Features of Complex Systems. *Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford : EOLSS UNESCO Publishers, 2002. Retrieved 16 September 2014.
12. Vykliuk Ya. I., Kaminskyi R. M., Pasichnyk V. V. Modeliuvannia skladnykh system : navch. posib. Lviv : NU «Lvivska politekhnika», 2024. 248 p.
13. Novi informatsiini tekhnolohii, modeliuvannia ta avtomatyzatsiia : kol. monohrafiia za red. O. D. Moroza. Kyiv : Tekhnika, 2023. 320 p.

УДК 629.735:62-192(043.3)

О. Б. Аніпко, д. техн. н., професор, В. Ю. Тюріна, канд. техн. наук,
О. М. Панкул, старший викладач

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРОКІВ ПОЧАТКУ ПРОВЕДЕННЯ ПРОФІЛАКТИЧНИХ РОБІТ ПРИ ЗМІНІ ІНТЕНСИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

У статті розглянуто проблему зміни фактичного технічного стану та вичерпання ресурсу складних технічних систем, зокрема повітряних суден (ПС), що перебувають в активній експлуатації. Встановлено, що інтенсивність використання ПС постійно змінюється, що призводить до невідповідності між розрахунковими та фактичними даними щодо їхнього технічного стану та залишкового ресурсу. Це, у свою чергу, викликає непередбачене зростання експлуатаційних витрат. Традиційні методи обслуговування, які базуються на жорстко встановлених строках або розрахунковому терміні експлуатації, виявляються неефективними в умовах інтенсивної експлуатації. Вони часто призводять до передчасної заміни ще придатних компонентів або, навпаки, до виникнення критичних відмов, що значно підвищує ризики. Підґрунтям дослідження є встановлений факт невідповідності між прогнозованими та фактичними показниками технічного стану авіаційної техніки протягом усього життєвого циклу. Ця розбіжність зумовлює нагальну необхідність розробки адаптивного підходу до планування технічного обслуговування. Невідповідність між прогнозами та реальністю, у свою чергу, спричиняє неконтрольоване зростання експлуатаційних витрат та зниження залишкової вартості об'єкта.

Проаналізовано вплив зміни інтенсивності використання літальних апаратів на швидкість деградації конструкцій та вичерпання їх ресурсу. Запропоновано методику, в якій технічний стан описується нормованим показником, що інтегрує як розрахунковий режим експлуатації, визначений виробником, так і фактичні умови використання, що спостерігаються в реальному часі. Визначено критерій критичного стану, при досягненні якого подальша експлуатація стає недоцільною або небезпечною з огляду на ризики відмови.

Окремо обґрунтовано метод визначення фактичного залишкового ресурсу, що базується на порівнянні розрахункового та фактичного значень технічного стану з урахуванням допустимих відхилень, визначених технічними регламентами. Цей інноваційний підхід передбачає прогнозування моменту початку профілактичних робіт не за календарним часом або напрацюванням, як це зазвичай робиться, а відповідно до реального технічного стану системи, зумовленого інтенсивними умовами експлуатації.

Запропоновано комплексний алгоритм, який поєднує технічну оцінку з ключовими економічними показниками, зокрема динамікою зміни залишкової вартості та очікуваними експлуатаційними витратами. Такий підхід забезпечує комплексність та обґрунтованість прийняття рішень щодо доцільності подальшої експлуатації або проведення ремонту.

Показано, що застосування такого підходу дозволяє мінімізувати ризик передчасного або запізненого обслуговування, підвищити ефективність використання авіаційної техніки та істотно знизити сумарні витрати протягом її життєвого циклу. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем планування технічного обслуговування у цивільній та військовій авіації, а також адаптовані для інших видів складних технічних систем.

Ключові слова: повітряні судна, технічний стан, експлуатація, профілактичні роботи, прогнозування, надійність, економічні показники, життєвий цикл, залишкова вартість, вартість експлуатації, амортизація.

O. B. Anipko, V. Yu. Tiurina, O. M. Pankul

**METHODS FOR FORECASTING RATIONAL STARTING TIMES
FOR PREVENTIVE MAINTENANCE DURING CHANGES
IN AIRCRAFT OPERATIONAL INTENSITY**

The article addresses the problem of changes in the actual technical condition and resource depletion of complex technical systems, particularly aircraft (AC), which are in active operation. It has been established that the intensity of AC use constantly changes, leading to a discrepancy between calculated and actual data regarding their technical condition and residual resource. This, in turn, causes unforeseen increases in operational costs. Traditional maintenance methods, based on rigidly set deadlines or the calculated service life, prove ineffective under conditions of intensive operation. They often lead to premature replacement of still-serviceable components or, conversely, to the occurrence of critical failures, which significantly increases risks. The basis of the study is the established fact of a discrepancy between the predicted and actual indicators of the technical condition of aviation equipment throughout its entire life cycle. This discrepancy necessitates the urgent development of an adaptive approach to maintenance planning. The inconsistency between forecasts and reality, in turn, causes an uncontrolled increase in operational costs and a decrease in the object's residual value.

The influence of changes in the intensity of aircraft use on the speed of structural degradation and resource depletion has been analyzed. A methodology is proposed in which the technical condition is described by a normalized indicator that integrates both the calculated operating mode, determined by the manufacturer, and the actual conditions of use observed in real-time. A criterion for a critical state is defined, upon reaching which further operation becomes impractical or dangerous due to the risk of failure.

A separate method is substantiated for determining the actual residual resource, which is based on a comparison of the calculated and actual values of the technical condition, taking into account permissible deviations defined by technical regulations. This innovative approach involves forecasting the start of preventive maintenance work not by calendar time or operating hours, as is usually done, but according to the actual technical condition of the system, determined by intensive operating conditions.

A comprehensive algorithm is proposed that combines the technical assessment with key economic indicators, including the dynamics of residual value changes and expected operational costs. This approach ensures the comprehensiveness and validity of decisions regarding the expediency of further operation or repair.

It is shown that the application of such an approach allows for minimizing the risk of premature or delayed maintenance, increasing the efficiency of aviation equipment use, and significantly reducing total costs throughout its life cycle. The results obtained can be used to improve maintenance planning systems in civil and military aviation, as well as adapted for other types of complex technical systems that require adaptive management.

Keywords: aircraft, technical condition, operation, preventive maintenance, forecasting, reliability, economic indicators, life cycle, residual value, operating cost, depreciation.