

**О. Б. Аніпко**  
**В. Ю. Тюріна**  
**О. М. Панкул**

## ПРО ОДИН ПІДХІД ДО ОДНОРІДНОСТІ СТАТИСТИЧНОЇ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

*У статті розглянуто проблему забезпечення статистичної однорідності емпіричних даних при аналізі надійності та готовності складних технічних систем. Автори виходять із тези, що статистика як наука про однорідні події вимагає суворого виділення ознак спільності об'єктів дослідження, оскільки ігнорування цього фактору веде до отримання грубих та малоінформативних результатів. У роботі проведено паралель між методами стратифікації в медицині (зокрема в геронтології) та процесами технічної експлуатації авіаційного і транспортного парку. Відомо, що в медицині статистика враховує вікові зміни організму (діти, підлітки, люди старшого віку), технічна оцінка повинна базуватися на динамічній стратифікації життєвого циклу об'єкта для врахування незворотних структурних змін матеріалів, втому металу та накопиченого зносу.*

*Методологічним фундаментом дослідження виступає подальший розвиток дистрибутивного підходу, що передбачає класифікацію відмов відповідно до конкретних фізичних процесів, що приведе до змін в технічних системах, таких як корозія, вібрація, тертя та температурне навантаження. На основі аналізу стратифікації життєвого циклу, де наочно демонструється зростання базового рівня інтенсивності виділено окремі інтервали часу, які характеризуються відповідною інтенсивністю відмов, що зумовлено ремонтом. Особливу увагу приділено етапу подовженої експлуатації, де вирішального значення набувають приховані відмови, що не виявляються штатними методами діагностування.*

*Наукова новизна роботи полягає у розробці та обґрунтуванні критеріїв, щодо розподілу масиву даних про відмови за типами технічних систем, що в свою чергу забезпечує однорідність отриманої інформації. Розроблено показник, який дозволяє прогнозувати наявність прихованих дефектів, що вимагає виключення таких подій із загального розрахунку показників надійності.*

*У заключній частині статті запропоновано використовувати показники технічного використання  $K_{тв}$  та готовності  $K_g$  як інструменти кількісної оцінки ефективності на чотирьох інтервалах: до першого капітального ремонту, між ремонтними циклами, до моменту списання та на етапі «продовження життя» після завершення призначеного терміну служби. Запропонований підхід дозволяє реалізувати однорідність подій на відповідних часових періодах життєвого циклу технічних систем.*

**Ключові слова:** надійність технічних систем, статистична однорідність, стратифікація життєвого циклу, дистрибутивний підхід, приховані відмови, коефіцієнт технічного використання, коефіцієнт готовності, аномальні значення, час відновлення, геронтологічні зміни в техніці, авіаційний транспорт, надійність, діагностика, життєвий цикл, технічний стан, експлуатація, призначений ресурс, обмеження ресурсів, прогнозування, функція надійності, прихована відмова, профілактичні роботи, складна технічна система, амортизація.

### Вступ

Відомо, що статистика – це наука про однорідні події, методи та результати якої знаходять широке застосування в демографії, медицині, техніці, управлінні та економіці. Однак щоразу, застосовуючи статистичний підхід, необхідно насамперед виділити ознаку спільності подій [1], [2].

У демографії при визначенні зміни чисельності населення аналізують дані про смертність і народжуваність. Причому, якщо розглядати проблему летальності від захворювань серцево-судинної системи (ССС), то тут недостатньо розглядати тільки кількість летальних випадків. У цьому разі доцільно застосовувати стратифікацію всієї сукупності інформації за віковим критерієм: діти, підлітки, середній та старший вік. Такого роду інформація є більш корисною, оскільки дозволяє враховувати геронтологічні зміни [3]. Далі така градація може бути ще більш розгалуженою за статевою ознакою (чоловік, жінка), зовнішніми умовами (куріння, алкоголь, шкідливі звички тощо). Кожне таке уточнення відображає мету розв'язуваної задачі із застосуванням статистичних методів.

Слід зазначити, що статистичний аналіз однорідності подій набуває фундаментального значення при дослідженні надійності авіаційного транспорту. Сучасний стан парку авіаційної техніки характеризується вимушеною тривалою експлуатацією, під час якої значна частина технічних систем (ТС) перебуває на етапах граничного  $\tau_y$  та подовженого  $\tau_{пе}$  (ресурсів) періоду експлуатації [5], [10]. У таких умовах класичні методи, що базуються на усереднених показниках надійності (зокрема, на

середньому напрацюванні до відмови), втрачають свою прогностичну валідність [1], [4]. Це зумовлено тим, що статичні моделі не здатні коректно відобразити кумулятивний ефект нелінійних деградаційних процесів. Ключовим чинником для ТС з великим накопиченим напрацюванням стає втома конструкційних матеріалів та приховані структурні зміни у вузлах та деталях, що виникають внаслідок циклічних навантажень [7], [12]. Застосування єдиного нормативного підходу до всієї сукупності ТС призводить до суттєвих похибок - підвищення ризику критичних відмов, передчасного виведення з експлуатації та необґрунтованого списання техніки - через недооцінку індивідуального зносу [6], [8].

Відтак, перехід до динамічної стратифікації життєвого циклу (ЖЦ) є необхідною умовою забезпечення безпеки експлуатації у післягарантійний період. Такий підхід дозволяє враховувати не лише календарний строк експлуатації ТС, а й фактичну «фізичну втому» конструкції, що відповідає врахуванню геронтологічних змін [3].

У техніці однією з привабливих сторін використання статистичних методів є пасивний експеримент. У цьому разі збирають наявну інформацію про клас технічних систем (ТС), їх типи, умови експлуатації тощо. Однак, збираючи таку інформацію, зазвичай припускають, що за досліджуваним показником умови його фіксованого значення однакові для всіх аналізованих систем. Але, порівнюючи збіг з оригіналом таке припущення може давати суттєво грубі результати, хоча при відповідній постановці завдання може бути досить інформативним. Для подолання цієї проблеми у даній роботі набув подальшого розвитку загальний підхід [4], у якому обґрунтовано фундаментальний дистрибутивний підхід до аналізу готовності авіаційного парку. Наукова новизна даного підходу полягає у вимозі не зводити всі відмови на одну часову вісь, а класифікувати їх відповідно до фізичних процесів, що призвели до відповідних наслідків (корозії, вібрації, тертя та зносу, температурного навантаження тощо). Оскільки швидкість протікання цих процесів різна, то і їхня інтенсивність буде неоднаковою.

Для формування однорідних ознак розглянуто етап експлуатації за призначенням ЖЦ який в свою чергу розподілено на часові періоди [5], [6], [8], [10], [12].

Такий підхід дозволяє відстежити динамічну стратифікацію об'єктів авіаційного парку залежно від накопиченого напрацювання  $\tau$ . Оскільки капітальні ремонти та регламентні роботи вибірково впливають на різні фізичні процеси зміни стану об'єкта, кожна стадія ЖЦ характеризується «дистрибутивним профілем» відмов [7]. Зокрема, на початкових етапах домінують процеси припрацювання та випадкові відмови, тоді як на етапі граничного ресурсу  $\tau_{\text{пе}}$  вирішального значення набувають приховані відмови. Це призводить до трансформації закону розподілу напрацювання на відмову, що робить неможливим використання єдиної статичної оцінки для всього періоду експлуатації ТС.

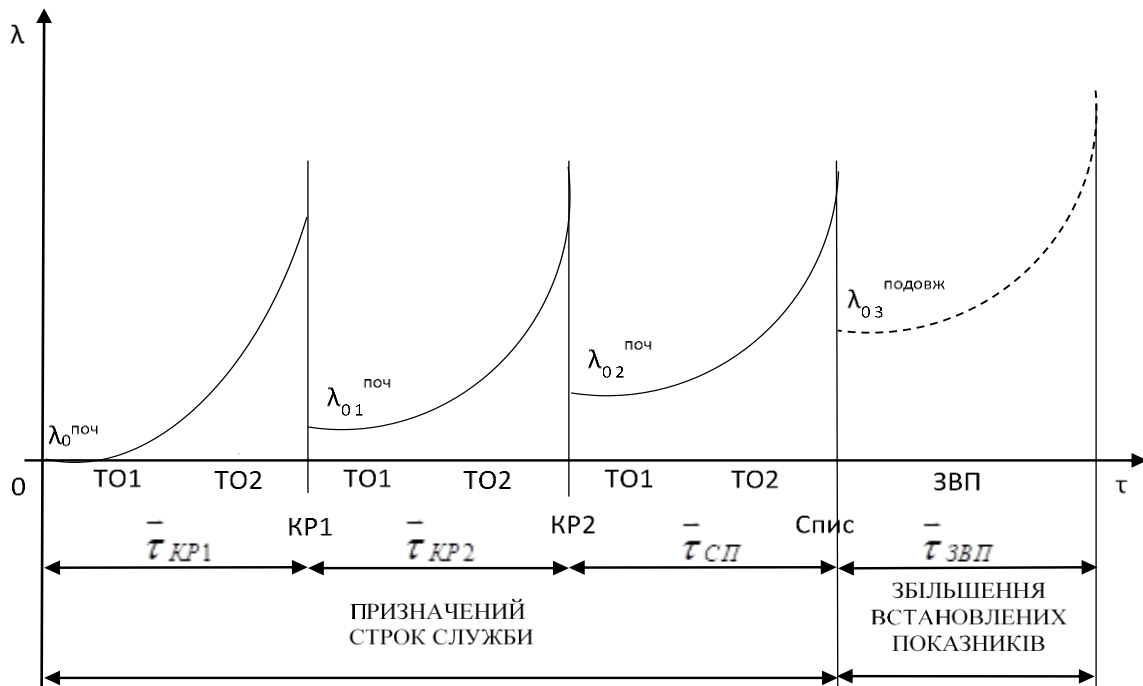


Рис. 1. До розподілу етапу експлуатації на періоди ( $\lambda_0^{поч}, \lambda_{01}^{поч}, \lambda_{02}^{поч}$  - інтенсивності відмов на початку кожного міжремонтного циклу; КР1, КР2 – проведення капітальних ремонтів; ТО1, ТО2 – проведення планового технічного обслуговування; Спис – закінчення призначеного терміну служби (списання); ЗВП – заходи щодо продовження ресурсу (збільшення встановлених показників);  $\lambda_{03}^{подовж}$  – інтенсивність відмов на етапі «продовження»)

На рис.1 відображено стратифікацію ЖЦ експлуатації ТС. На відміну від класичного підходу, що розглядає надійність як усереднений показник для всього парку, даний графік демонструє фізично обґрунтований розділ часу експлуатації на самостійні інтервали напрацювання  $t_i$ .

На першому етапі необхідно забезпечити статистичну однорідність даних шляхом розбиття загального напрацювання системи на якісно відмінні часові інтервали. Це важливо, оскільки на різних стадіях експлуатації фізичні процеси деградації мають різну природу та інтенсивність.

Життєвий цикл розбивається на інтервали  $\tau_1$  (до КР1),  $\tau_2$  (між КР1 та КР2) та  $\tau_y$ :

– інтервал,  $\tau_{np1}$ : на цьому етапі система працює в умовах, близьких до розрахункових значень, а статистика відмов відображає якість виробничої збірки та припрацювання вузлів. Це період «фаза раннього життєвого циклу», де домінують випадкові відмови;

– інтервал  $\tau_{np2}$ : етап на якому починають проявлятися закономірні процеси втоми металу та зносу, а рівень надійності значною мірою залежить від повноти відновлення під час ремонту;

– інтервал  $\tau_y$ : етап граничної експлуатації, на якому накопичені «незворотні» зміни матеріалів роблять систему найбільш вразливою до відмов, що вимагає підвищеної уваги до діагностування та ремонту;

– інтервал  $\tau_{ne}$ : етап подовженої експлуатації «подовження життєвого циклу» понад призначений термін служби. Характеризується експоненціальним зростанням ризику відмов через критичну втому матеріалів. На цьому етапі перехід до індивідуального контролю технічного стану є оптимальним методом безпечного використання кожної одиниці техніки.

Структура повного життєвого циклу  $T$  описується як послідовна сукупність етапів експлуатації, що дозволяє диференціювати сумарний ресурс ТС на функціонально завершені часові відрізки:

$$T = \bar{\tau}_{np1} + \bar{\tau}_{np2} + \bar{\tau}_y + (\bar{\tau}_{ne}), \quad (1)$$

де  $T$  - загальний час експлуатації;  $\bar{\tau}_{np1}$  – середня тривалість першого етапу експлуатації (КР1);  $\bar{\tau}_{np2}$  – середня тривалість міжремонтного періоду (між КР1 та КР2), де починають проявлятися закономірності зносу;  $\bar{\tau}_y$  – середня тривалість етапу експлуатації від останнього капітального ремонту до досягнення граничного стану;  $\bar{\tau}_{ne}$  – середня тривалість етапу подовженої експлуатації понад призначений термін служби.

Крива  $\lambda(\bar{\tau})$  наочно демонструє, що після кожного ремонту інтенсивність відмов падає, але базовий рівень цього показника неминує зростає.

Розбиття ЖЦ на ці інтервали сприяє сформуванню об'єктивної дистрибутивної характеристики для кожної стадії, що дає змогу врахувати геронтологічні зміни системи, подібні до вікових змін у медицині. Використання аналогії з геронтологічними змінами, закладеної у методологію дослідження, дозволяє реалізувати концептуальний перехід від статичних оцінок до індивідуального супроводження кожної одиниці авіаційного парку. У цьому контексті розрахунок показників надійності та готовності перестає бути суто формальною статистичною процедурою, а стає основою для прийняття обґрунтованих індивідуальних рішень щодо кожної одиниці транспортного парку. Це дозволяє не лише продовжити «безпечну» експлуатацію техніки на етапі  $\tau_{ne}$ , а й оптимізувати витрати на її технічне обслуговування шляхом виключення надлишкових робіт.

При цьому слід враховувати, що запропонована стратифікація є динамічною, оскільки вона базується не лише на жорстко встановлених часових інтервалах, а й на безперервній зміні властивостей конструкційних матеріалів [4], [7], [12]. Динамізм підходу полягає у здатності моделі адаптуватися до реальних процесів деградації, які можуть прискорюватися або сповільнюватися залежно від інтенсивності навантажень та специфіки експлуатаційного середовища у місцях базування ТС [9], [11], [13]. Це дозволяє оперативно коригувати прогноз стану ТС, переходячи від статичних «нормативних» даних до моніторингу фактичного технічного стану в реальному часі [6], [8], [10].

Згідно з дистрибутивним підходом [4], [5], [9], це зумовлено процесами, які ремонт не здатний нівелювати - втомою металу, структурними змінами матеріалів та інше. На етапі продовження експлуатації  $\tau_{ne}$  цей рівень стає настільки високим, що система постійно перебуває в зоні підвищеного ризику і є найбільш складним для статистичного аналізу. Саме тут починають домінувати латентні відмови, які не виявляються штатними методами контролю (ТО1, ТО2 та інші). У зв'язку з цим, проведення динамічної стратифікації життєвого циклу стає не просто допоміжним методом, а необхідною умовою для отримання достовірних даних.

Як можна бачити з рис. 1, періоди етапу експлуатації за виглядом функції ймовірності відмов мають подібний характер. Відмінність полягає у двох параметрах.

Перший – це показник, що характеризує надійність системи на початку періоду, другий -показник ступеня у функції  $\lambda_0 = f(\bar{\tau}_i)$ .

З огляду на це, доцільно розглядати весь етап експлуатації як сукупність таких періодів із відповідними значеннями наведених вище параметрів. Такий підхід дозволяє використовувати універсальну модель періоду, яка представляється наступним чином (рис.2):

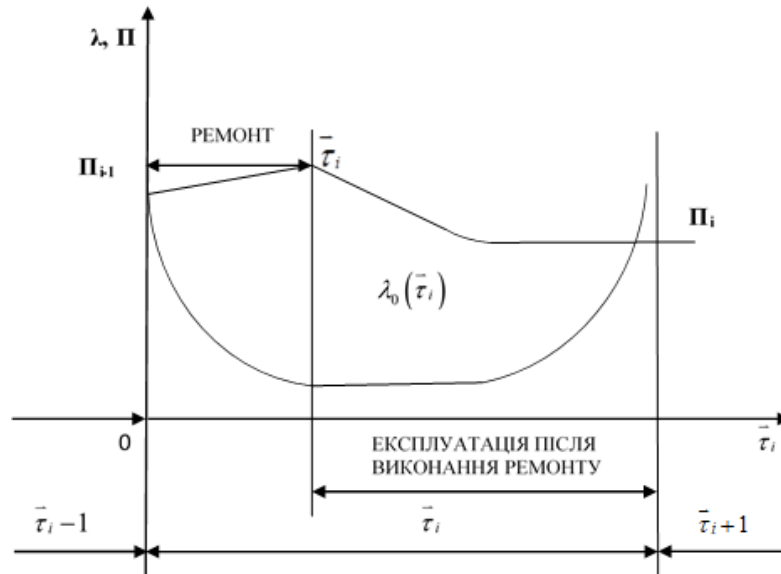


Рис. 2. До визначення універсального періоду ( $\Pi$  - показник надійності системи;  $\lambda$  - інтенсивність відмов;  $\tau_i$  - середнє напрацювання технічної системи в межах досліджуваного  $i$ -го періоду;  $\Pi_{i-1}$  - рівень інтенсивності відмов наприкінці попереднього періоду експлуатації;  $\lambda_0(\bar{\tau}_i)$  - функція зміни інтенсивності відмов під час експлуатації після виконання ремонту;  $\bar{\tau}_i - 1$  - стан технічної системи безпосередньо перед початком ремонтних робіт;  $\bar{\tau}_i + 1$  - початок наступного кроку в життєвому циклі технічної системи;  $\bar{\tau}_i$  - поточний цикл (активний етап) протягом цього інтервалу технічна система використовується за призначенням)

Графічна модель (рис. 2) наочно демонструє, що процес експлуатації ТС не є лінійним або безперервним у контексті надійності. Це послідовність циклічних змін (зниження надійності) внаслідок накопичення дефектів  $\Pi_{i-1}$  та відновлення під час ремонту до актуального стартового рівня  $\Pi_i$ , який відображає незворотні зміни властивостей та рівень фізичного старіння ТС, що не нівелюється ремонтом.

Формалізація динаміки деградації ТС (рис. 2) базується на застосуванні закону розподілу Вейбулла [17], [18], що дозволяє описати процес накопичення пошкоджень через функцію інтенсивності відмов:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}, \quad (2)$$

де  $\lambda(t)$  – інтенсивність відмов у момент часу  $t$ ;  $t$  – поточне напрацювання;  $\eta$  – параметр масштабу (характеристичне напрацювання);  $\beta$  – параметр форми, що характеризує швидкість зміни інтенсивності відмов.

При значенні  $\beta < 1$ , що є характерним для етапу вичерпання ресурсу, функція  $\lambda(t)$  демонструє нелінійне зростання. Це підтверджує незворотність процесів фізичного старіння, після виконання капітального ремонту (КР) рівень інтенсивності відмов не повертається до початкових значень, а має тенденцію до підвищення через накопичення прихованих дефектів [8]. Такий підхід забезпечує об'єктивну базу для кількісної оцінки швидкості деградації на кожному інтервалі  $\bar{\tau}_i$ , що є підґрунтям для прийняття рішень про подальшу експлуатацію конкретної одиниці техніки.

Така динаміка обґрунтовує перехід до стратегії індивідуального контролю технічного стану кожної одиниці авіаційно-транспортного парку. Оскільки кожен новий етап  $t_i$  починається з вищого порогу інтенсивності відмов, розрахунок показників технічного використання  $k_{ТВ}$  [13] та показники

готовності  $k_T$ , має базуватися на реальних параметрах поточної вибірки, а не на усереднених проектних нормативах.

Застосування даної моделі в комплексі з методами варіантних проробок [15] та аналізом інтеграції підсистем [16] дозволяє значно підвищити точність прогнозування стану на етапах подовження ресурсу [19].

Слід особливо підкреслити, що під терміном «вибірка» у цьому контексті слід розуміти обмежену статистичну сукупність емпіричних даних (напрацювання до відмови, час відновлення, кількість дефектів), що отримана від групи однотипних ТС протягом конкретного інтервалу напрацювання  $t$  [10].

Важливим фактором «очищення» вибірки [10] є врахування умов зберігання об'єкта під час експлуатації. Відповідно до емпіричних спостережень, термін зберігання при обслуговуванні не повинен перевищувати  $\tau_{зб} \leq 2$  роки. Перевищення цього терміну призводить до викривлення статистичних даних через незворотні процеси природної деградації матеріалів, що робить такі дані непридатними для формування однорідної сукупності.

Для практичної реалізації предиктивної моделі та забезпечення високої достовірності аналізу авторами впроваджено механізм фільтрації вхідних даних. Особливо це стосується етапів старіння конструкції ( $\tau_y, \tau_{пе}$ ), де статистична вибірка переважана аномальними значеннями через латентні дефекти.

Застосування критерію відношення фактичного часу ремонту до нормативного для "очищення" вибірки є необхідною умовою забезпечення її статистичної стійкості. Усунення аномальних значень, спричинених латентними відмовами, дозволяє уникнути зміщення оцінок математичного сподівання напрацювання до відмови, що є критичним при роботі з обмеженими вибірками на етапах граничного  $\tau_y$  та подовженого  $\tau_{пе}$  ресурсів. Відсутність такої фільтрації призводить до систематичної похибки оцінки надійності, внаслідок якої показники безвідмовності стають завищеними, не враховуючи наявність прихованих деградаційних процесів у конструкційних матеріалах.

Для відсіювання аномальних значень у вибірці використовується критерій часу відновлення, що базується на відношенні фактичних витрат (фактичний час ремонту) до нормативних (гранично допустимий час ремонту):

$$\tau_{факт} \leq \tau_{норм}, \quad (3)$$

де  $\tau_{факт}$  – фактичний час ремонту;  $\tau_{норм}$  – нормативний (гранично допустимий) час ремонту.

Якщо  $\tau_{факт} > \tau_{норм}$ , подія вважається аномальною і виключається з вибірки. Такий підхід дозволяє відокремити типові операції з технічного обслуговування від випадків, коли деградація структури матеріалу або латентні дефекти призвели до непередбачуваного зростання трудомісткості робіт.

Суть методу полягає в тому, що ми порівнюємо фактичний час ремонту із нормативним. Якщо ремонт триває довше встановленої норми – це свідчить про латентні відмови [6], [8], [10], [11] або критичний стан системи. Подібні події виключаються з вибірки – це дозволяє отримати об'єктивний показник надійності, базуючись лише на штатних і прогнозованих процесах. Коли розсіювання перевищує допустимі межі, статистична однорідність групи остаточно руйнується, що вимагає переходу від серійного оцінювання до індивідуального контролю технічного стану.

Практично, аналізуючи відмови, слід брати до уваги не лише фізичний процес, що призвів до них, а й відносити цю відмову до відповідного періоду етапу експлуатації. Це тим більш важливо, що стохастичні (імовірнісні) показники надійності мають сенс лише в тому випадку, якщо відомо, на якому часовому інтервалі вони отримані. Розроблений підхід поділяє етап експлуатації на періоди, що будь-який з періодів менший, ніж увесь етап експлуатації. Тобто для будь-якого  $i$ -го періоду:

$$\bar{\tau}_i < \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i, \quad (4)$$

де  $\tau_i$  тривалість конкретного ( $i$ -го) досліджуваного періоду експлуатації (інтервал між ремонтами або етап подовженого ресурсу);  $n$  – загальна кількість усіх періодів, на які розділено повний життєвий цикл технічної системи;  $i$  – порядковий номер поточного періоду ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i$  – повна тривалість експлуатації ТС, що дорівнює сумі всіх окремих часових інтервалів.

Це, в свою чергу, дозволяє отримати відповідні оцінки показників надійності, близькі до фактичних. Крім цього, показники, що спираються на середні значення (перший момент випадкової величини), будуть краще характеризувати відповідні вибірки.

Для забезпечення «чистоти» вибірки на всіх етапах пропонується використовувати показник технічного використання  $k_{TB}$  [10], [12] та показники готовності  $k_G$ , що враховують час напрацювання  $T$  та час відновлення  $\tau_p$ .

Для кількісної оцінки ефективності використання ТС на кожному стратифікованому етапі доцільно використовувати коефіцієнт технічного використання  $k_{TB}$  [10], [12] у вигляді:

$$k_{TB} = \frac{T}{T + \tau_p}, \quad (5)$$

де  $T$  – сумарне напрацювання об'єкта в годинах (або циклах) за досліджуваний період;  $\tau_p$  – середній час, витрачений на всі види ТО та КР протягом цього ж періоду.

Для більш детального аналізу з урахуванням часу зберігання та транспортування  $\tau_{зб.тр}$  використовується коефіцієнт готовності  $k_G$  [13], [14] у вигляді:

$$k_G = \frac{T}{T + \tau_p + \tau_{зб.тр}}, \quad (6)$$

де  $T$  – напрацювання системи;  $\tau_p$  – середній час відновлення (ремонт);  $\tau_{зб.тр}$  – сумарний час, що витрачається на зберігання та транспортування.

Використання цієї пари показників дозволяє диференціювати вплив планових відновлювальних робіт  $k_{TB}$  та випадкових відмов  $k_G$ , що є важливим для коректної оцінки технічного стану на етапах подовження ресурсу [13], [14].

На кожному з виділених інтервалів ЖЦ (див. рис. 1) проводиться диференційований аналіз відмов, що дозволяє сформувати об'єктивну дистрибутивну характеристику для кожної стадії, враховуючи специфіку фізичних процесів деградації

Розроблений підхід передбачає оцінку статистичних даних про відмови за типами технічних систем для відповідних інтервалів часу, а саме:

I етап: до першого капітального ремонту КР1;

II етап: експлуатація після першого КР1 до КР2;

III етап: період після КР2 і до моменту зняття технічної системи з експлуатації;

IV етап: період «збільшення встановлених показників» системи після завершення призначеного терміну служби.

Така деталізація за етапами дозволяє сформувати об'єктивну дистрибутивну характеристику для кожної стадії ЖЦ об'єкта. Це забезпечує перехід до високоефективної стратегії обслуговування, де розрахунок показників  $k_{TB}$  та  $k_G$  перестає бути загально статистичним.

Стратифікація ЖЦ на інтервали  $\tau_i$  дозволяє сформувати для кожного з них власний профіль ефективності, що базується на динаміці коефіцієнтів  $k_{TB}$  та  $k_G$ :

– на I та II етапах показники  $k_{TB}$  та  $k_G$  слугують для підтвердження проектної надійності об'єкта. Вони використовуються для верифікації закладених виробником ресурсів та оптимізації (планування) ТО. Будь-яке суттєве відхилення на цих етапах свідчить про системні недоліки серії або порушення на етапі експлуатації.

– на III та IV етапах ці коефіцієнти стають інструментом індивідуальної діагностики. Якщо для конкретної одиниці ТС значення  $k_G$  починає стрімко знижуватися порівняно з середнім по етапу (через зростання  $\tau_p$  у формулі 5), це є прямим сигналом про вичерпання «генетичного» ресурсу матеріалів. Такий стан є підставою для прийняття рішення про виведення конкретного об'єкта з експлуатації, навіть якщо його календарний термін служби ще не вичерпано.

Запропонована методологія реалізує перехід від детермінованих моделей «експлуатації до відмови» або нормативно-регламентної парадигми до стратегії проактивного управління фактичною надійністю. Впровадження такого підходу забезпечує досягнення синергетичного ефекту: верифікацію максимального рівня безпеки польотів при одночасному нормованому вичерпанні міжремонтного та призначеного ресурсу кожної технічної одиниці. Це, у свою чергу, дозволяє своєчасно ідентифікувати латентні процеси фізичного старіння та накопиченого зносу матеріалів, що дозволяє оптимізувати

експлуатаційні показники технічного використання та готовності протягом усього життєвого циклу ТС.

### Висновки

Обґрунтовано застосування динамічної стратифікації життєвого циклу ТС за чотирма етапами, що дозволяє врахувати природну деградацію матеріалів, яка не нівелюється ремонтами, та забезпечити статистичну однорідність вибірки [6], [8]. Впроваджено модель «очищення» вибірки від аномалій за терміном зберігання понад 2 роки та показником  $\tau_{факт} / \tau_{норм} > 1$ , що усуває похибки оцінки показників  $k_{ТВ}$  та  $k_{Г}$ , спричинені прихованими відмовами. Це обумовлює перехід від серійних нормативів до стратегії індивідуального контролю технічного стану кожної одиниці авіаційно-транспортного парку.

У статті вдосконалено підхід до аналізу етапу експлуатації життєвого циклу транспортного засобу. На додаток до раніше розробленого у [4] шляхом впровадження методики глибокої стратифікації відмов з урахуванням часових інтервалів їх виникнення. Використання термінів проведення капітальних ремонтів як реперних точок дозволяє мінімізувати вплив випадкових чинників на статистичну модель та забезпечити ідентифікацію саме ресурсних характеристик системи.

Надалі видається доцільним використовувати розроблений підхід для отримання кількісних показників на відповідних періодах у моделях процесу ремонту, що має підвищити достовірність результатів моделювання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРА

- [1] Грабовецький Б. Є. Загальна теорія статистики. Вінниця: ВДТУ. 2001. 312 с.
- [2] Кулинич О. І., Кулинич Р. О. Теорія статистики. Київ: Знання. 2006. 452 с.
- [3] Уманець Т. В. Загальна теорія статистики. Київ: Знання. 2018. 239 с.
- [4] 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.
- [5] Аніпко О.Б., Приймак А.В. Комплексування показників досконалості транспортних систем. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. №4. С. 43–50.
- [6] ДСТУ 2498-94. Основні норми взаємозамінності. Допуски форми та розташування поверхонь. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994.
- [7] Мітрахович М. Складні технічні системи. Системне математичне забезпечення проектних рішень. Київ. 1998.
- [8] ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994.
- [9] Аніпко О.Б., Приймак А.В., Миргород Ю.В. Перелік показників властивостей та база даних ТТХ транспортного літального апарата як складної технічної системи. *Збірник наукових праць ХНУПС*. 2012. Вип. 1 (30). С. 41–46.
- [10] ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності: Київ. 1994. 32 с.
- [11] Вихлюк Я.І., Камінський Р.М., Пасічник В.В. Моделювання складних систем: навчальний посібник. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2024. 248 с.
- [12] Костогриз С.Г. Надійність технічних систем. Хмельницький. ХНУ. 2002. 324 с.
- [13] Вишнівський В.В. та ін. Основи надійності та діагностики інформаційних систем. Київ. 2020. 382 с.
- [14] Мороз О.Д. Нові інформаційні технології, моделювання та автоматизація: колективна монографія. Київ: Техніка, 2023. 320 с.
- [15] Аніпко О.Б., Калкманов С.А., Приймак А. В. Формули пріоритетів і хінсайд-аналіз при варіантних проробках на етапі концептуального проектування транспортного літака. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. №2. С. 11-19.
- [16] Anipko O., Loginov V. An 'Intergation index' for determining the degree of subsystem integration in passenger and transport aircraft designs. *Transactions on Aerospace Research*. 2024. Vol. 277, №4. P. 27-44. DOI 10.2478/tar2024-0021.
- [17] Іванов В. П. Стратегічне управління життєвим циклом авіаційних технічних систем. Київ: НАУ. 2023. 185 с.
- [18] Сміт Дж., Браун А. Моделювання нелінійної деградації старіючих авіаційних активів. *Міжнародний журнал надійності*. 2024. Т. 12. № 3. С. 45–58.
- [19] Петренко І. В. Проблематика експлуатації технічних систем понад призначений ресурс. Харків: ХАІ. *Авіаційна техніка і технології*. 2025. № 2. С. 112–118.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2025 р.

Прийнята до друку після рецензування 10.01.2026 р.

Опублікована 30.03.2026

**Аніпко Олег Борисович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри інженерно-авіаційного забезпечення, <https://orcid.org/0000-0003-3678-2529>, e-mail: [o.m.pankul@gmail.com](mailto:o.m.pankul@gmail.com)

**Тюріна Валерія Юрївна** – канд. техн. наук, кафедра інженерно-авіаційного забезпечення, <https://orcid.org/0000-0003-3444-143X>, e-mail: [valery.kharkiv@gmail.com](mailto:valery.kharkiv@gmail.com)

**Панкул Олександр Миколайович** – старший викладач кафедри інженерно-авіаційного забезпечення, <https://orcid.org/0000-0003-3005-0730>, e-mail: [o.m.pankul@gmail.com](mailto:o.m.pankul@gmail.com)

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків

O. Anipko  
V. Tyurina  
O. Pankul

## On one approach to the homogeneity of the statistical estimation of technical systems

Kozhedub Kharkiv National Air Force University

*The article addresses the problem of ensuring the statistical homogeneity of empirical data in the reliability and availability analysis of complex technical systems (CTS). The author proceeds from the thesis that statistics, as the science of homogeneous events, requires a strict identification of common characteristics among research objects, as ignoring this factor leads to coarse and uninformative results. The work draws a parallel between stratification methods in medicine (specifically in gerontology) and the processes of technical operation of aviation and transport fleets. It is substantiated that just as medical statistics account for age-related changes in the body (children, adolescents, elderly), technical evaluation must be based on the dynamic stratification of an object's life cycle to account for irreversible structural changes in materials, metal fatigue, and accumulated wear.*

*The methodological foundation of the study is the distributive approach, which involves classifying failures according to specific physical degradation processes such as corrosion, vibration, friction, and thermal loading. The author details a graphical model of life cycle stratification, clearly demonstrating the increase in the baseline failure rate even after major overhauls, caused by processes that repair cannot neutralize. Special attention is paid to the extended operation stage where latent failures that are not detected by routine maintenance methods (MS-1, MS-2) become critically important.*

*The scientific novelty of the work lies in the development and substantiation of a criterion for filtering out anomalous values in a statistical sample to maintain its homogeneity. It is established that exceeding the standard indicates the presence of hidden defects, requiring the exclusion of such events from the general calculation of reliability indicators.*

*In the final part of the article, the author proposes using the availability factor  $k_{TB}$  and the coefficient of technical utilization  $k_e$  as tools for quantitative efficiency assessment across four intervals: before the first overhaul, between repair cycles, until decommissioning, and at the "life extension" stage after the expiration of the designated service life. The proposed approach enables a transition from averaged reliability estimates of the entire fleet to individual technical condition monitoring for each unit of the CTS, ensuring high predictive accuracy.*

**Keywords:** reliability of technical systems, statistical homogeneity, life cycle stratification, distributive approach, latent failures, coefficient of technical utilization, availability factor, anomalous values, restoration time, gerontological changes in technology, aviation transport, diagnostics, technical condition, operation, resource constraints, forecasting, reliability function, preventive maintenance, complex technical system (CTS), depreciation.

*Anipko Oleh* – Dr. Sc. (Eng.), Professor, professor of the department of aviation engineering support, <https://orcid.org/0000-0003-3678-2529>, e-mail: [o.m.pankul@gmail.com](mailto:o.m.pankul@gmail.com)

*Tiurina Valeriia* – Cand. Sc. (Eng.), department of aviation engineering support, <https://orcid.org/0000-0003-3444-143X>, e-mail: [valery.kharkiv@gmail.com](mailto:valery.kharkiv@gmail.com)

*Pankul Oleksandr* – senior lecturer of the department of aviation engineering support, <https://orcid.org/0000-0003-3005-0730>, e-mail: [o.m.pankul@gmail.com](mailto:o.m.pankul@gmail.com)