

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД
ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІН ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ БАЗОВИХ ШАСІ ОЗБРОЄННЯ**

Шифр: ПРОГНОЗУВАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. Аналіз змісту відомих показників готовності базових шасі озброєння	4
2. Вибір адекватної моделі тренду процесу змін за часом показника оперативної готовності шасі до застосування	8
3. Визначення оптимальних параметрів прогнозного тренду змін показника оперативної готовності шасі	12
4. Визначення довірчих інтервалів прогнозного тренду змін коефіцієнта оперативної готовності шасі до застосування	15
5. Визначення оцінок параметрів прогнозного тренду показника залишкового нормованого ресурсу шасі методом екстраполяції	17
5.1 Визначення дисперсії оцінок параметрів залишкового нормованого ресурсу шасі	20
5.2 Алгоритм визначення довірчих інтервалів тренду залишкового ресурсу базового шасі і рішень про його ремонт або списання	23
ВИСНОВКИ	25
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	26

ВСТУП

Актуальність теми визначення динаміки зменшення рівня готовності зразків шасі озброєння на перспективному інтервалі експлуатації підкреслюють наступні фактори:

- по-перше, необхідність високого рівня надійності транспортного засобу протягом завданого часу оперативного застосування озброєння;
- по-друге, необхідність достатнього рівня запасу ресурсу за пробігом, з метою збереження маневрених можливостей озброєння в сучасних умовах;
- по-третє, обмеженість публікацій і методичних рекомендацій для достовірного вирішення технічної задачі статистичного прогнозування, через типові складності організаційного, методичного та інформаційного забезпечення цього вирішення [1, с. 209; 2, с. 280].

Метою роботи є методичне узагальнення вирішення завдання статистичного прогнозування, за умов попереднього порівняння відомих моделей показників готовності технічних об'єктів у вигляді базових шасі озброєння, вибору більш адекватної моделі та використання більш прийняттого апарата за його складністю і точністю результатів.

Завдання роботи, які сприяють досягненню мети роботи:

- визначення і обговорення властивостей відомих показників готовності базових шасі озброєння;
- вибір важливіших показників оперативної готовності базових шасі озброєння та вибір адекватної моделі для описання змін їх тренду;
- визначення експериментальних дискретних рівнів показника готовності базових шасі озброєння на ретроспективному інтервалі експлуатації;
- визначення параметрів прогнозного тренду змін за часом показника оперативної готовності базових шасі озброєння на перспективному інтервалі експлуатації;
- визначення довірчих інтервалів прогнозного тренду змін за часом показника оперативної готовності базових шасі озброєння.

1. Аналіз змісту відомих показників готовності базових шасі озброєння

Показниками готовності зразків техніки до застосування, а саме, показниками технічного стану, що розповсюджені на практиці, є наступні: по-перше, коефіцієнт готовності; по-друге, нормований залишковий ресурс.

Першим з них, загальним *показником готовності будь-якого технічного об'єкта* до застосування, який визначено Державним стандартом України № 2860 – 94, є відношення

$$K_r = T_0 / (T_0 + T_1), \quad (1)$$

де T_0 – середній час напрацювання на відмову зразка об'єкту;

T_1 – середня витрата часу на ремонт цього об'єкту, у разі його відмови.

В нашому випадку, цей показник є результатом аналізу процесу функціонування зразка базового шасі протягом його експлуатації, у разі представлення цього процесу у виді графа станів і переходів.

В цьому графі переходи здійснюються з ймовірностями Y та Z та інтенсивностями переходів y та z . В даному разі завдання полягає у визначенні імовірностей P_{00} та P_{01} перебування зразка бази в типових умовах у станах: готовому та неготовому (рис.1).

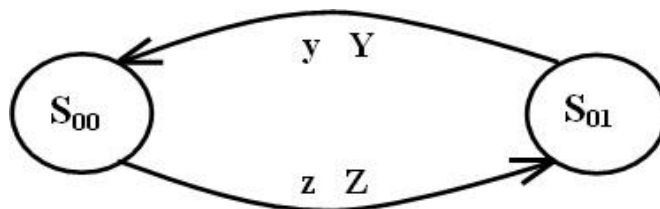


Рис.1 – Представлення процесу функціонування зразка базового шасі озброєння протягом його експлуатації у виді графа переходів з інтенсивністю y або z і з ймовірностями переходів Y та Z

На рисунку 1 представлені стани: S_{00} – перебування зразка базового шасі у стані «готовності до застосування»; S_{01} – перебування зразка у стані «неготовності до застосування».

Завданням аналізу є: визначення узагальненого показника ефективності функціонування системи підготовки зразка базового шасі до застосування за призначенням, наприклад, у вигляді:

$$E_{\phi} = P_{00} / P_{01} \quad (2)$$

Для визначення ймовірностей перебування зразку у кожному стані, готовності або неготовності, згідно до *правила контурів*, доцільно створити систему диференціальних рівнянь, що описують процес переходів зразка із стану в стан, у вигляді:

$$\frac{dP_{00}(t)}{dt} = yY P_{10} - (zZ) P_{00} \quad (3)$$

$$\frac{dP_{10}(t)}{dt} = zZ P_{00} - (yY).$$

Далі доцільно отримати рішення диференціальних рівнянь (3) відносно ймовірностей P_{00} і P_{01} у наступному вигляді:

$$P_{00}(t) = [yY P_{01}] \frac{\{1 - \exp[-zZt]\}}{zZ} \quad (4)$$

$$P_{01}(t) = [zZ P_{00}] \frac{\{1 - \exp[-yYt]\}}{yY}$$

Рівняння системи (4) є лінійно залежними, тому для вирішення системи відносно ймовірностей P_{00} і P_{00} , необхідно використати також умови нормування ймовірностей перебування зразка з урахуванням повній групі станів зразка бази у вигляді

$$P_{00}(t) + P_{01}(t) = 1, \quad (5)$$

В результаті перетворень системи (4) рівнянь, з урахуванням (5), отримаємо ймовірності перебування зразка шасі озброєння у відповідних станах: «готовності»; «неготовності», а саме:

$$P_{00}(t) = \frac{\alpha y Y}{zZ + yY \alpha}; \quad P_{01}(t) = \frac{zZ}{zZ + yY \alpha}; \quad (6)$$

де позначено $\alpha = 1 - \exp(-zZt)$

Приклад. Ураховуємо, що y – це інтенсивність переходу, яка дорівнює $1/T_1$, а z – інтенсивність переходу, яка дорівнює $1/T_0$; ймовірності безумовних переходів зразка шасі в різні стани, природне, дорівнюють: $Y = 1$; $Z = 1$; а під час великого протягу застосування за призначенням, тобто t – великого, додатковий параметр α дорівнює: $\alpha \approx 1$.

За цих умов, отримаємо рівні ймовірностей, що кількісно характеризують складові ефективності функціонування зразка (див. (1)), які доцільно назвати відповідно *коефіцієнтом готовності* та *коефіцієнтом неготовності* зразка шасі. Це однозначно не суперечить Держстандарту № 2860–94 у вигляді:

$$P_{00} = T_0 / (T_0 + T_1) = K_{\Gamma}; \quad (6)$$

$$P_{01} = T_1 / (T_0 + T_1) = K_{\text{нг}}; \quad (7)$$

Підкреслимо, що на практиці часто використовують і коефіцієнт готовності (6), і його складові, а саме, величину середнього часу T_0 на відмову для кількісного визначення показника, а саме, *коефіцієнта оперативної готовності* шасі озброєння протягом заданого часу використання зразка у вигляді

$$K_{ог}(t) = [T_0 / (T_0 + T_1)] \cdot \exp(-t / T_0) \quad (8)$$

Зміни за часом цього показника, що призначений для надійного сприяння маневреності озброєння, показано на рисунку 2.

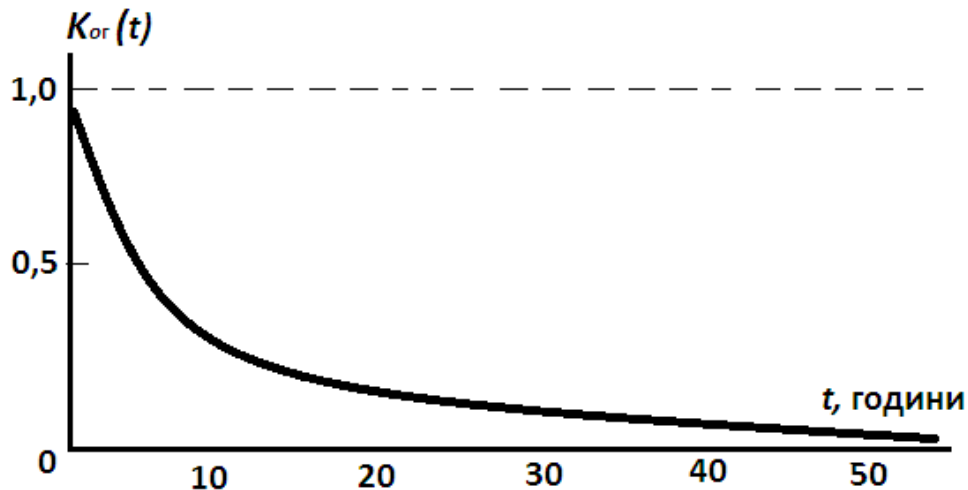


Рис. 2 – Відоме відображення динаміки зміни за часом тренда *показника оперативної готовності базових шасі озброєння*

Нажаль, цей показник оперативної готовності автомобільних базових шасі, як правило, не є адекватним процесу, що спостерігається на практиці.

В якості більш адекватного, мабуть, доцільно застосовувати *тренд*, згідно до процесу, розвиток якого за часом експлуатації здійснюється під впливом двох протидіючих сукупностей факторів. Мова йде про безліч факторів, які не сприяють збереженню технічного стану шасі, та факторів, які сприяють його збереженню.

Важливо підкреслити, що саме такий, по суті, показник деградації технічного стану об'єкту, що обговорюється, тренд, сприяв би більш об'єктивному віддзеркаленню двох не зовсім рівноцінних складових технічного стану об'єкту: і показника *оперативної готовності* зразка, і *нормованого залишкового ресурсу* цього зразка. Обґрунтованість цього підходу до моделювання процесів різної природи витікає з однакової передумови про

розвиток двох різних процесів, але завжди під впливом саме протидіючих факторів.

Вирішення завдання побудови та обґрунтування адекватності моделі тренду процесу змін за часом *показника оперативної готовності базового шасі* здійснюється в наступному розділі.

2. Вибір адекватної моделі тренду процесу змін за часом показника оперативної готовності до застосування

Розв'язання задачі об'єктивного прогнозування динаміки зміни коефіцієнта готовності зразка озброєння або військової техніки за наслідками спостереження фактичної зміни цього параметра в дискретні моменти ретроспективного інтервалу часу зазвичай пов'язане з відомими труднощами.

Через невизначеності випадкового і антагоністичного характеру, що пов'язані з важко передбачуваним набором причин і чинників, які сприяють збереженню коефіцієнта готовності зразка озброєння (військової техніки) в часі експлуатації, і чинників, які перешкоджають цьому.

Експериментальні ж оцінки вказаної динаміки вважаються проблемними через недоцільність адекватного відтворення ситуації з оцінкою середнього часу напрацювання на відмову і середнього часу відновлення зразка, що відмовив, в ситуації, близькій до реальної.

У відомій літературі найчастіше це завдання вирішується за допомогою імітаційного моделювання. Проте, відсутність перевірених реальним досвідом початкових даних про розподіл параметрів випадкових процесів, що стосуються варіантів відмов і ремонту зразку озброєння або військової техніки – все це знижує цінність результатів такого моделювання.

Метод статистичного прогнозування динаміки зменшення (за часом експлуатації зразка) коефіцієнта його готовності заснований на наступних етапах вирішення завдання прогнозування показників технічного стану зразка як функції часу.

По-перше, метод доцільно заснувати на побудові ймовірнісної моделі, що є адекватною реальній ситуації, якщо діють узагальнені чинники, які сприяють, і чинники, які перешкоджають успішному збереженню технічного стану, наприклад, коефіцієнта оперативної готовності зразка шасі до бойового застосування.

По-друге, метод повинен передбачати попередньо отримання експериментальних даних про фактичне значення коефіцієнта готовності зразка в дискретні моменти часу, наприклад, за наслідками річних звітів по експлуатації озброєння в частині. На цьому етапі виявляється експериментально закономірність зміни коефіцієнта готовності зразка по обмеженій кількості реальних даних.

По-третє, метод повинен містити обчислення точних оцінок параметрів результуючого тренда залежності коефіцієнта готовності від часу застосування його на перспективному інтервалі часу і обчислення дисперсій оцінок параметрів цього тренда по сукупності всіх дискретних експериментальних даних на ретроспективному інтервалі часу спостереження за процесом зміни технічного стану шасі.

Ймовірнісна модель, яка пропонується в роботі для використання під час статистичного прогнозування змін показників технічного стану базових шасі озброєння, враховує процес одночасного протиборства чинників адекватніше, ніж відомі моделі, і це відображається залежністю швидкості зміни dB/dt коефіцієнта $B(t)$ готовності.

Коефіцієнт по суті є ймовірністю перебування зразка в готовому стані до бойового застосування від добутку у вигляді $B \cdot (1 - B)$, тобто ймовірностей B і $(1 - B)$ протилежних подій готовності та неготовності зразка.

Цей добуток ймовірностей протилежних явищ, по суті, віддзеркалює факт розвитку процесу змін (деградації) готовності шасі під одночасним впливом реальних протидіючих факторів.

В якості коефіцієнта пропорційності γ в диференційному рівнянні, яке описує процес деградації зразка шасі, доцільно взяти різницю величин

інтенсивності протидії чинників, вказаних вище. Тому маємо рівняння [2. с. 192]

$$dB(v)/dv = \gamma B(v) \cdot [1-B(v)]. \quad (9)$$

Розв'язання такого диференційного рівняння дає імовірнісну модель (тренд) залежності ймовірності B , тобто *коефіцієнта оперативної готовності зразка від часу його застосування*, рівного $t = v$ років.

Статистична оцінка параметрів прогнозного тренда з урахуванням помилок заснована на початкових відліках за наслідками спостережень по роках вказаної ймовірності (частостей), тобто *коефіцієнта оперативної готовності* як функції часу застосування зразка, з урахуванням випадкових відхилень цих відліків, що спостерігалися раніше, від *опорного тренда* зміни цього коефіцієнта.

Таким чином, метою першого етапу розв'язання задачі прогнозування є експериментальне виявлення закономірності зміни коефіцієнта готовності (ймовірність готового стану зразка) B на попередніх ділянках часу його експлуатації $v_1, \dots, v_m$.

Особливість побудови імовірнісної моделі в тому, що коефіцієнтом пропорційності в диференційному рівнянні (9), яке віддзеркалює протидію факторів, при цьому доцільно взяти так званий коефіцієнт $\gamma \leq 0$ *інтенсивності деградації технічного стану* зразка, що має сенс різниці величин (позитивних та негативних) інтенсивності протидії, в умовах, коли фактори, що викликають деградацію зразка, завжди мають перевагу, а результуючий рівень інтенсивності деградації дорівнює

$$\gamma = (\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{н}}) \leq 0,$$

де $\gamma_{\text{п}}$ – інтенсивність дії *позитивних* факторів на процес збереження технічного стану; $\gamma_{\text{н}}$ – інтенсивність дії *негативних* факторів на процес збереження технічного стану шасі.

Інтегруючи (9) за довільних початкових умов, наприклад, у вигляді $B(v = v_{0,5}) = 0,5$, де $v_{0,5}$ – момент часу, при якому рівень коефіцієнта оперативної готовності досягає половини його максимально можливого значення, отримаємо на даному етапі імовірнісну модель (тренд) залежності ймовірності $B(v)$, тобто коефіцієнта оперативної готовності зразка від часу v у вигляді (рис. 3)

$$B(v) = \{1 + \exp[-\gamma(v - v_{0,5})]\}^{-1}. \quad (10)$$

Параметри γ й v цієї кривої повинні далі оцінюватися, наприклад, методом найменших квадратів для побудови результуючого тренда за даними спостережень, які відображені на рис. 3,а пунктиром, а результати прогнозування відображені сполушною кривою. На рисунку 3,б надано тренд процесу деградації в умовах меншого впливу негативних факторів, γ_n .

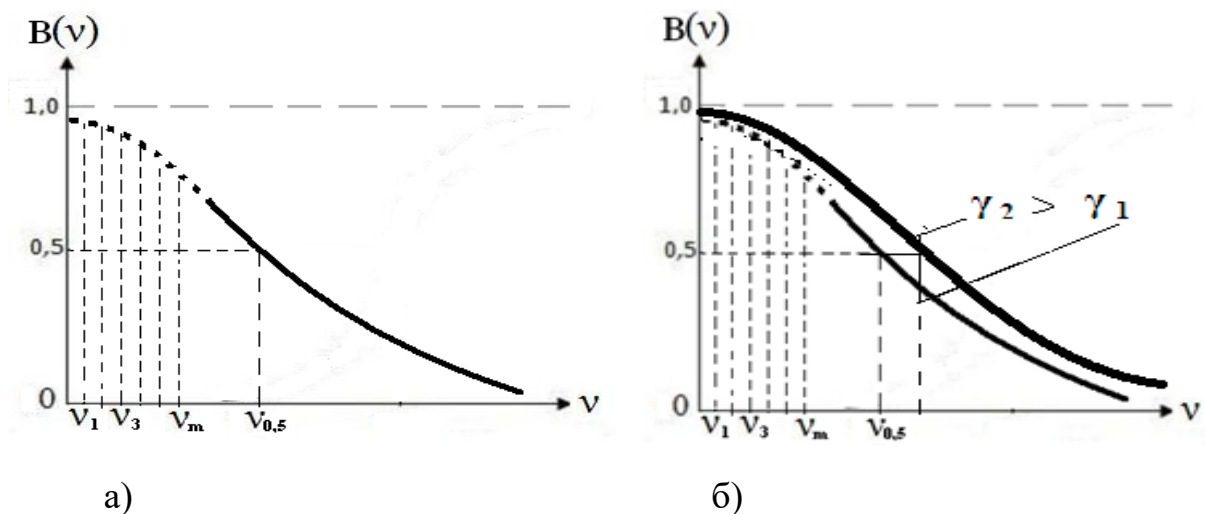


Рис. 3 Залежність ймовірності готовності зразка базового шасі (коефіцієнта його оперативної готовності) від часу його застосування

Важливо урахувати, що можливо представлення диференційного рівняння, яке подібне (9), наприклад, у вигляді

$$dP(t)/dt = \alpha P(t)[1 - P(t)], \alpha < 0, \quad (11)$$

де P – коефіцієнт оперативної готовності базового шасі;

α – коефіцієнт деградації зразка, який дорівнює різниці величин інтенсивності протидії факторів, що сприяють збереженню готовності зразка і факторів, які перешкоджають цьому збереженню.

Крім того, вирішення диференційного рівняння (11) можливо і під час застосування інших початкових умов, наприклад, у вигляді $P(t = 0) = P_0$.

Тоді результат рішення рівняння (11) набуває інший, мабуть, більш простий, вигляд

$$P(t) = \{1 + (P_0^{-1} - 1) \exp[-\alpha t]\}^{-1} \quad (12)$$

Саме цей, більш простий для розрахунків, варіант моделі тренду доцільно використовувати далі для вирішення конкретного завдання оцінки прогнозних параметрів тренду змін за часом *коефіцієнта оперативної готовності* до застосування базового шасі озброєння методом найменших квадратів.

3. Визначення оптимальних параметрів прогнозного тренду змін показника оперативної готовності

Залежність (12) доцільно застосовувати в якості апроксимуючої (опорної) функції часу, шляхом використання декількох дискретних досвідних значень показника $P_k = P(t_k)$, $\forall k = 1 \dots m$ готовності шасі, які отримані експериментально у військовій частині за результатами експлуатації конкретного зразка транспортного засобу, з метою визначення його оптимальних параметрів P_0^* та α^* прогновної залежності, методом найменших квадратів.

Алгоритм визначення оптимальних параметрів P_0^* та α^* залежності (12) прогнозного тренду *показника оперативної готовності* зразку транспортного засобу, побудови оптимального прогнозного тренду і його довірчих інтервалів

містить декілька етапів. Спочатку доцільно визначити оптимальні оцінки параметрів тренду і їх дисперсії. Розглянемо наступні етапи.

1. Етап побудови суми квадратів відхилень дискретних величин P_k від $P(t_k)$ у виді цільової функції β , яку необхідно мінімізувати і яка повинна дорівнювати

$$\beta = \sum_{k=1}^m \{P_k - [1 + (P_0^{-1} - 1) \exp(-\alpha t)]^{-1}\}^2 = \min. \quad (13)$$

2. Етап вирівнювання цільової функції β , шляхом введення нової функції, яка дорівнює

$$f(t) = \ln [P^{-1}(t) - 1]. \quad (14)$$

3. Етап лінеаризації цільової функції (13), шляхом підстановки у вираз (13) нової функції (14). Отримаємо

$$\beta = \sum_{k=1}^m \{P_k - [\ln(P_0^{-1} - 1) - \alpha t]\}^2. \quad (15)$$

4. Етап визначення екстремуму (мінімуму) цільової функції двох змінних (15), шляхом визначення часткових похідних цільової функції (15) за аргументами P_0 і α та прирівнювання похідних до нуля. Отримання рівнянь, що відповідають екстремуму цільової функції, дає систему:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial P_0} \sum_{k=1}^m \{P_k - [\ln((P_0^*)^{-1} - 1) - \alpha^* t_k]\}^2 &= 0 ; \\ \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \sum_{k=1}^m \{P_k - [\ln((P_0^*)^{-1} - 1) - \alpha^* t_k]\}^2 &= 0 . \end{aligned} \quad (16)$$

5. Етап визначення із системи (16) оптимальних оцінок P_0^* та α^* параметрів прогнозного тренду з урахуванням (14) і (15), які дорівнюють:

$$P_0^* = \left\{ 1 + \exp \left[\frac{\sum_{k=1}^m f_k \sum_{k=1}^m t_k^2 - \sum_{k=1}^m t_k \sum_{k=1}^m f_k t_k}{m \sum_{k=1}^m t_k^2 - (\sum_{k=1}^m t_k)^2} \right] \right\}^{-1}; \quad (17)$$

$$\alpha^* = \frac{\sum_{k=1}^m f_k \sum_{k=1}^m t_k - m \sum_{k=1}^m f_k t_k}{m \sum_{k=1}^m t_k^2 - (\sum_{k=1}^m t_k)^2}. \quad (18)$$

6. Етап отримання прогнозного тренду, який, згідно до (12), (17), (18), має наступний загальний вигляд

$$P(t) = \{1 + [(P_0^*)^{-1} - 1] \exp[-\alpha^*(t)]\}^{-1}. \quad (19)$$

7. Етап визначення величин $P_k = P(t_k)$, $\forall k = m + 1, \dots$ для *перспективного часу* за обмеженою сукупністю досвідних значень узагальненого показника технічного стану транспортного засобу, тобто показника, що дорівнює добутку поточних (щорічних) часткових показників, а саме, значень показника $P(t)$, тобто коефіцієнта оперативної готовності цих зразків.

8. Етап визначення дисперсії оптимальних оцінок P_0^* та α^* , шляхом підстановки оптимальних оцінок (17), (18) в (13) – формулу мінімізованої суми квадратів відхилень дискретних величин досвідних даних P_k від даних прогнозного тренду $P(P_0^*, \alpha^*, t_k)$ і обчислення дисперсії за загальною формулою у вигляді

$$\sigma^2 = \sum_{k=1}^m \{P_k - [1 + (P_0^{-1} - 1) \exp(-\alpha t)]^{-1}\}^2 / (m - 1). \quad (20)$$

Зрозуміло, що величини цих дисперсій однозначно зменшуються і шляхом збільшення інтервалу досвідного спостереження дискретних величин коефіцієнта готовності зразка шасі, і шляхом збільшення точності вимірювань цього коефіцієнта, і точності вимірювання відхилень дискретних величин коефіцієнта від опорної кривої для прогнозування, а також суттєво залежать від точності визначення параметрів опорної кривої.

Доцільно ураховувати, що дисперсії σ_p^2 і σ_α^2 окремого оцінювання P_0^* і α^* за допомогою рівнянь (16) є сумірними і пов'язані з загальним рівнем дисперсії. Помилки прогнозування доцільно характеризувати однаковими середньоквадратичними величинами.

$$\sigma^2 = \sigma_p^2 + \sigma_\alpha^2 = 0,5\sigma^2 + 0,5\sigma^2 ; \quad \sigma_p = \sigma/\sqrt{2} ; \quad \sigma_\alpha = \sigma/\sqrt{2} . \quad (21)$$

9. Етап здійснення побудови оптимального прогнозного тренду (19) і його довірчих інтервалів, шляхом використання цього тренду, за умов різних рівнів оптимальних оцінок його параметрів і сумірних помилок оцінювання цих параметрів, згідно до (21).

4. Визначення довірчих інтервалів прогнозного тренду змін коефіцієнта оперативної готовності до застосування

Визначення довірчих інтервалів прогнозного тренду доцільно здійснити з урахуванням рівня дисперсій (21) оцінок параметрів прогнозованої функції (19) зменшення за часом цього коефіцієнта оперативної готовності.

Метою є збільшення до рівня 0,97 достовірності прогнозування, шляхом побудови полоси гарантованих коливань можливих випадкових відхилень оптимального прогнозного тренду процесу змін коефіцієнта оперативної готовності зразка шасі, в результаті точного обчислення цих інтервалів для кожного часу застосування цього зразка за призначенням.

Підкреслимо, що, для практичного визначення вихідних даних для прогнозування, доцільно *щорічно* обчислювати і будувати в системі координат P, t рівні коефіцієнта готовності зразка шасі, шляхом визначення середнього часу напрацювання його на відмову і середнього часу витрат часу на його ремонт після відмов.

Величини помилок (21) оптимального оцінювання параметрів прогнозного тренду (19) повністю впливають на *ширину смуги довірчих*

інтервалів результатів прогнозування змін коефіцієнта оперативної готовності шасі за часом до застосування зразка за призначенням.

Довірчу смугу рівня указанного показника технічного стану зразка в конкретні моменти часу доцільно побудувати, шляхом визначення трьох трендів: оптимального тренда і двох довірчих границь його можливого положення в площі координат P, t за допомогою двох параметрів оптимального тренду і трьох середньоквадратичних значень помилок оптимального оцінювання, які доцільно взяти з різними знаками, у виді:

$$\begin{aligned} \text{а) } P_0 &= P_0^* ; \alpha = \alpha^* ; \\ \text{б) } P_0 &= P_0^* + 3\sigma_p ; \alpha^* - 3\sigma_\alpha ; \\ \text{в) } P_0 &= P_0^* - 3\sigma_p ; \alpha^* + 3\sigma_\alpha . \end{aligned} \quad (22)$$

Умови (22) для побудови довірчої смуги прийняті з урахуванням знаку оптимальних параметрів, з метою отримання смуги максимальної ширини, тобто з метою одержання найбільш гарантованого прогнозного результату дослідження динаміки змін за часом *коефіцієнта оперативної готовності базового шасі* за часом застосування зразка шасі. Результати прогнозування і побудови довірчої смуги цього показника надані на рисунку 4.

Отримані *результати* показують наступне.

По-перше, негативні фактори, що заважають збереженню коефіцієнта оперативної готовності базового шасі на потрібному рівні, впливають на динаміку змін цього показника найбільшим чином.

По-друге, метод визначення оптимальних параметрів тренда процесу змін за часом коефіцієнта оперативної готовності базового шасі дозволяє визначати прогнозну величину цього коефіцієнта на заданий час застосування зразка бази за призначенням, а також визначати час, коли рівень цього коефіцієнта стає незадовільним.

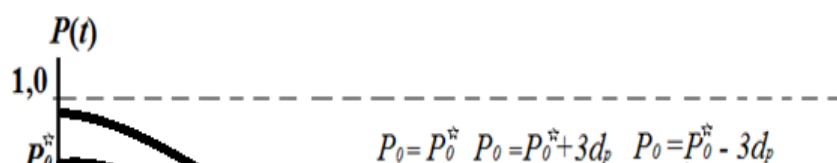


Рис. 4 – Результати прогнозування і побудови довірчої смуги *коефіцієнта оперативної готовності базового шасі озброєння*

Важливо підкреслити, що, з метою економії часу на чисельні розрахунки, доцільним є визначення оптимальних прогнозних параметрів, визначення довірчих інтервалів тренда процесу змін за часом коефіцієнта оперативної готовності базового шасі озброєння, – все це є доцільним здійснювати за допомогою комп'ютерного програмного продукту.

Крім того, принципово необхідно здійснення додаткових більш ефективних заходів, що спрямовані на збереження не тільки надійності озброєння і військової техніки, але, перш за все, на збереження маневреності кожного зразка озброєння.

5. Визначення оцінок параметрів прогнозного тренду показника залишкового нормованого ресурсу шасі методом екстраполяції

Поточний рівень залишкового нормованого ресурсу типового зразка військової техніки має вигляд:

$$B(t) = \frac{[B_0 - B_B(t)]}{B_0}, \quad (23)$$

де B_0 - ресурс (за часом напрацювання або за пробігом) до капітального

ремонту або списанню;

$B(t)$ - поточні витрати ресурсу базового шасі озброєння.

Диференційне рівняння, яке описує похідну зміни залишкового нормованого ресурсу, під час його монотонних витрат (деградації технічного стану), доцільно описати диференційованою антилогістичною залежністю від часу, що має вигляд

$$\frac{d}{dt}B(t) = -\gamma B(1-B); \gamma > 0, \quad (24)$$

де γ - коефіцієнт, що дорівнює різниці величин інтенсивності протидії факторів, які впливають на процес зменшення залишкового нормованого ресурсу $B(t)$ за часом експлуатації.

Дія факторів з інтенсивністю протидії, яка протягом експлуатації завжди має перевагу в порівнянні з інтенсивністю протидії факторів, які сприяють збереженню ресурсу, тому коефіцієнт $\gamma > 0$, тобто завжди є позитивною величиною.

Фактори, які сприяють явищу зменшення ресурсу і сприяють явищу його збереження, діють одночасно, тому ймовірності цих явищ B і $(1-B)$, згідно до правила алгебри явищ, перемножуються та визначають (разом з коефіцієнтом пропорційності γ рівень швидкості $\frac{d}{dt}B(t)$ змін за часом показника залишкового нормованого ресурсу зразку базових шасі озброєння.

Перевага факторів деградації над факторами збереження ресурсу зразка спричиняє негативну похідну $\frac{d}{dt}B(t)$, тому в правій частині рівняння (23) необхідно поставити знак мінус, але лише за умов, що різниця величин інтенсивності протидії відповідає формулі

$$\gamma = \gamma_n - \gamma_p ; \quad \gamma_n > \gamma_p . \quad (25)$$

Рішення (24) за початковими умовами $B(t = \tau_{0,5}) = 0,5$ дає тренд (криву, яка є опорною для розрахунків параметрів кривої деградації $B(t)$ та описує процес зміни за часом *залишкового нормованого ресурсу* зразка шасі, згідно довіднику з математики для інженерів [4], у вигляді (26), (рис. 5)

$$B(t) = \{1 + \exp[\gamma (t - \tau_{0,5})]\}^{-1}; \quad \gamma > 0, \quad (26)$$

де $\tau_{0,5}$ – час, який відповідає величині залишкового нормованого ресурсу зразка, що дорівнює 0,5, тобто половині від його максимального значення, одиниці.

Конкретні параметри γ й $\tau_{0,5}$ кривої $B(t)$ повністю характеризують її хід для зразка шасі. Вони повинні далі оцінюватися для побудови прогностного тренду за даними досвідних спостережень (протягом експлуатації зразка шасі шляхом декількох етапів, а саме, наступних етапів:

1) *щорічного визначення і накопичування* сукупності величин залишкового нормованого ресурсу для зразку;

2) *визначення параметрів і побудови* кривої опорного тренду цього показника;

3) *використання відхилів* величини показника залишкового нормованого ресурсу (на ретроспективному інтервалі спостереження) від опорної кривої цього показника;

4) *визначення параметрів прогностного тренду* обраним методом прогнозування, а саме параметрів γ й $\tau_{0,5}$;

5) *побудови кривої показника зменшення* за часом залишкового нормованого ресурсу $B(t)$ зразка шасі на перспективному інтервалі часу;

6) *аналізу прогностного тренду* протягом подальшої експлуатації зразка шасі, для визначення часу експлуатації, який відповідає *критичному рівню* його нормованого залишкового ресурсу, тобто часу для прийняття рішення про списання або капітальний ремонт шасі (див. рис. 5).

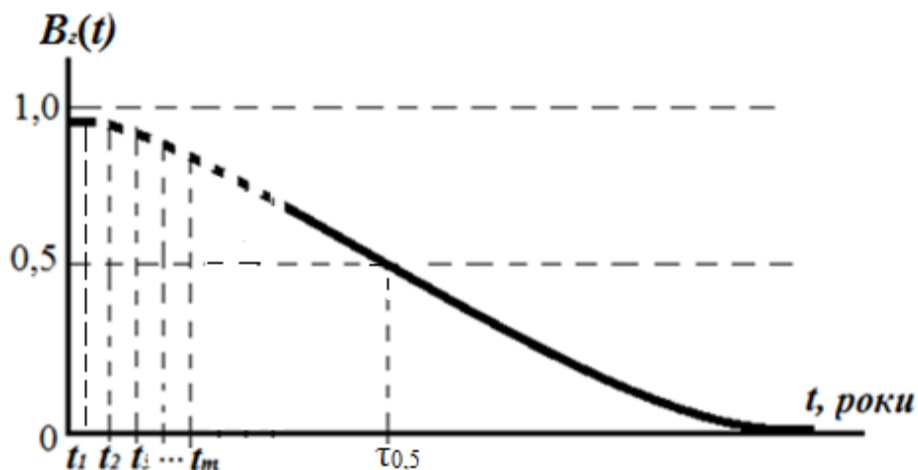


Рис. 5 – Модель тренда процесу змін залишкового нормованого ресурсу зразка базового шасі озброєння за часом його експлуатації

Вирішенню завдання прогнозування сприяють різні методи, наприклад, метод екстраполяції, метод найменших квадратів (середньо квадратичних помилок прогнозу), метод максимальної правдоподібності, які відрізняються складністю і рівнем точності визначення прогнозних параметрів.

Оцінки параметрів кожним із (указаних останніми) методів по точності мало відрізняються.

Більш того, метод максимальної правдоподібності, який відрізняється найбільшою складністю під час розрахунків, тому що потребує використання всієї інформації, що отримана на ретроспективному інтервалі часу спостереження. Тому застосуємо далі метод екстраполяції.

5.1 Визначення дисперсії оцінок параметрів залишкового нормованого ресурсу шасі

Для визначення оцінок параметрів тренду доцільно використовувати реальні досвідні дані спостереження на ретроспективному інтервалі часу та накопичення поточних щорічних величин рівнів нормованого залишкового ресурсу конкретного зразка базового шасі потужного озброєння сухопутних військ, наприклад, установки «Град».

За допомогою двох відомих крайніх значень залишкового нормованого ресурсу на ретроспективному інтервалі часу створимо, згідно до (26), систему рівнянь відносно до $B = B(t_1)$ та $B = B(t_m)$, тобто використовуємо рівняння (26) у випадках, коли величини B приймають відмінні значення в різних моментах (роках) часу t :

$$\begin{aligned} B_1 &= \{1 + \exp[\gamma_0(t_1 - t_{0,5})]\}^{-1} \\ B_m &= \{1 + \exp[\gamma_0(t_m - t_{0,5})]\}^{-1} . \end{aligned} \quad (27)$$

Розв'язання системи цих рівнянь з двома невідомими γ й $t_{0,5}$, які повинно визначити для побудови тренду процесу, дає початкові параметри тренду (шукані на даному етапі параметри прогнозової функції) у вигляді:

$$\begin{aligned} \gamma_{01} &= [\ln(1/B_1 - 1) - \ln(1/B_m - 1)] / (t_m - t_1); \\ (t_{0,5})_{01} &= [t_m \ln(1/B_1 - 1) - t_1 \ln(1/B_m - 1)] / [\ln(1/B_1 - 1) - \ln(1/B_m - 1)]. \end{aligned} \quad (28)$$

За допомогою двох інших відомих, які доцільно взяти у середині ретроспективного інтервалу часу експлуатації, доцільно записати ще одну систему рівнянь, а саме:

$$\begin{aligned} B_2 &= \{1 + \exp[\gamma_0(t_2 - t_{0,5})]\}^{-1} \\ B_{m2} &= \{1 + \exp[\gamma_0(t_{m2} - t_{0,5})]\}^{-1} \end{aligned} \quad (29)$$

Розв'язання цієї системи рівнянь дає інші шукані на даному етапі параметри прогнозової функції показника залишкового нормованого ресурсу за іншими даними ретроспективного інтервалу часу у вигляді:

$$\begin{aligned} \gamma_{02} &= [\ln(1/B_2 - 1) - \ln(1/B_{m2} - 1)] / (t_{m2} - t_2); \\ (t_{0,5})_{02} &= [t_{m2} \ln(1/B_2 - 1) - t_2 \ln(1/B_{m2} - 1)] / [\ln(1/B_2 - 1) - \ln(1/B_{m2} - 1)]. \end{aligned} \quad (30)$$

Визначимо далі (для підвищення більш точних параметрів прогнозного тренду за даними ретроспективного інтервалу часу) осереднені значення параметрів прогнозного тренду для його опорних значень $(t_{0,5})_o$ й γ_o відповідно до виразів (29) і (30) у вигляді:

$$\gamma_o = [\gamma_{o1} + \gamma_{o2}] / 2 = \{[ln(1/B_1 - 1) - ln(1/B_m - 1)] / (t_m - t_1) + [ln(1/B_2 - 1) - ln(1/B_{m2} - 1)] / (t_{m2} - t_2)\} / 2; \quad (31)$$

$$(t_{0,5})_o = [(t_{0,5})_{o1} + (t_{0,5})_{o2}] / 2 = \{[t_m ln(1/B_1 - 1) - t_1 ln(1/B_m - 1)] / [ln(1/B_1 - 1) - ln(1/B_m - 1)] + [t_{m2} ln(1/B_2 - 1) - t_2 ln(1/B_{m2} - 1)] / [ln(1/B_2 - 1) - ln(1/B_{m2} - 1)]\} / 2. \quad (32)$$

Підставляючи ці оцінки параметрів показника залишкового ресурсу у вираз (26) інтегральної моделі процесу (замість параметрів γ і $t_{0,5}$), отримаємо шукану результуючу прогнозну функцію (тренд) динаміки зменшення залишкового нормованого ресурсу зразка базового шасі озброєння.

Цей тренд очікується за часом експлуатації зразку на перспективному інтервалі часу, тобто маємо прогнозний тренд процесу у вигляді

$$B(t) = \{1 + \exp [\gamma_o(t - (t_{0,5})_o)]\}^{-1}. \quad (33)$$

Тобто за даними спостереження щорічних величин рівня залишкового нормованого ресурсу зразка шасі на ретроспективному інтервалі часу отримано тренд його ймовірної зміни за часом в майбутньому, на перспективному інтервалі часу.

Далі необхідно оцінити помилки дисперсії та середньоквадратичні величини помилок прогнозування динаміки змін цього тренду процесу змін *прогнозного показника залишкового ресурсу зразка*.

Дисперсії оцінок параметрів показника залишкового нормованого ресурсу, згідно до правил приблизного її визначення під час застосування метода екстраполяції, дорівнюють:

$$\begin{aligned}(\sigma_{\gamma})^2 &= \{[(\gamma_o - \gamma_{ol})^2 + (\gamma_o - \gamma_{o2})^2]/2\}; \\ (\sigma_{\tau_{0,5}})^2 &= \{[((t_{0,5})_o - (t_{0,5})_{ol})^2 + ((t_{0,5})_o - (t_{0,5})_{o2})^2]/2\}.\end{aligned}\quad (34)$$

А середньоквадратичні помилки оцінок параметрів функції (26) доцільно визначити за формулами:

$$\sigma_{\gamma} = \{[(\gamma_o - \gamma_{ol})^2 + (\gamma_o - \gamma_{o2})^2]/2\}^{0,5}; \quad (35)$$

$$\sigma_{\tau_{0,5}} = \{[((t_{0,5})_o - (t_{0,5})_{ol})^2 + ((t_{0,5})_o - (t_{0,5})_{o2})^2]/2\}^{0,5}. \quad (36)$$

Ці середньоквадратичні помилки прогнозу змін *залишкового нормованого ресурсу* за часом (за роками) необхідні для визначення довірчих інтервалів прогнозного тренду процесу змін ресурсу базового шасі озброєння, що є гарантованими з ймовірністю, $P \cong 0,97$.

5.2 Алгоритм визначення довірчих інтервалів тренду залишкового ресурсу базового шасі і рішень про його ремонт або списання

Для отримання гарантованої смуги прогнозного тренду залишкового нормованого тренду процесу змін нормованого залишкового ресурсу базового шасі (БШ), доцільно здійснити наступні операції:

- визначити граничний рівень залишкового нормованого ресурсу зразка, наприклад, на рівні 0,1;
- побудувати прогнозний тренд процесу змін залишкового нормованого ресурсу зразка БШ;
- побудувати прогнозний тренд процесу змін залишкового нормованого ресурсу зразка БШ, за умов: параметр γ_0 прогнозного тренду БШ зменшується

на $3\sigma_\gamma$, а параметр $t_{0,5}$ тренду БШ збільшується на $3\sigma_{t_{0,5}}$ для визначення верхнього рівня можливих змін тренду залишкового нормованого ресурсу;

– побудувати прогностичний тренд процесу змін залишкового нормованого ресурсу зразка БШ, за умов: параметр γ_0 збільшується на $3\sigma_\gamma$, а $t_{0,5}$ зменшується на $3\sigma_{t_{0,5}}$ для визначення нижнього рівня змін тренду залишкового нормованого ресурсу зразка;

– визначити ближній, середній і дальній час за величинами проєкцій перетинів кривих трендів з граничним рівнем залишкового нормованого ресурсу зразка БШ на абсцису системи координат B, t .

Розрахунки кожного з трьох прогностичних трендів процесу змін за роками залишкового нормованого ресурсу і побудова цих результатів розрахунків, які дозволять більш обґрунтовано (з достовірністю, близькою до одиниці) планувати заходи, що спрямовані на оновлення кожного із зразків парку БШ, надані на рисунку 6.

На горизонтальній вісі координат цього рисунку отримані, таким чином, критичні величини часу для аналізу доцільності прийняття рішень про подальшу експлуатацію, ремонт або списання БШ, з метою оновлення парку БШ озброєння.

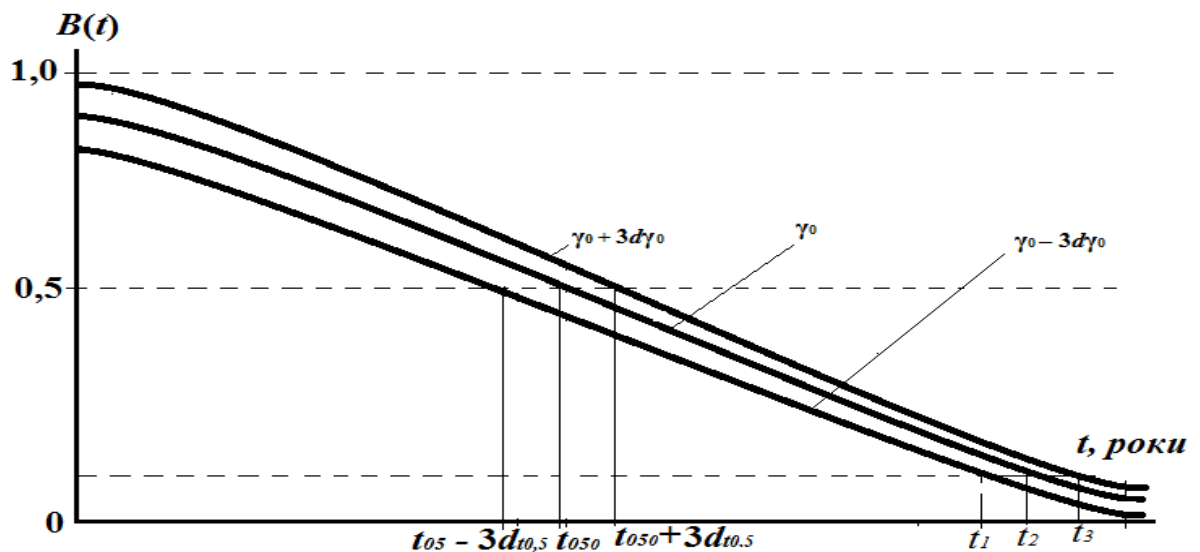


Рис. 6 – Тренд, довірчі інтервали і критичні роки для прийняття рішень про капітальний ремонт або списання зразка базового шасі озброєння у процесі змін залишкового нормованого ресурсу бази протягом її експлуатації

ВИСНОВКИ

Експериментально-розрахунковий метод прогнозування процесу змін показників технічного стану базових шасі озброєння засновано на застосуванні більш адекватних, в порівнянні з відомими, антилогістичних моделях деградації технічного стану кожного зразка за часом його експлуатації,

Одержані в роботі результати спрямовані на удосконалення достатньо нескладного, ефективного апарата для прогнозування очікуваних змін станів важливих зразків спеціальних транспортних засобів через їх фізичний знос.

Відомо, що прогнозування за даними змін технічного стану базових шасі техніки сприяє визначенню часу критичного рівня показника їх готовності. Метою є визначення заходів для своєчасного збільшення цього показника. [3]

Підсумки розглянутого методу прогнозування процесів на основі досвідних даних для практичного отримання прогнозного тренду і результатів визначення моменту часу під час прийняття рішень про подальшу експлуатацію або списання зразка бази і оновлення парку цих баз, після узагальнення одержаної інформації, є наступними:

1. Метод дозволяє прогнозувати динаміку зменшення за часом рівня показників технічного стану зразків базових шасі в довільний заданий час їх експлуатації, а також дозволяє визначати момент часу, при якому цей показник технічного стану досягає деякого заданого або критичного рівня;

2. Пропонований метод прогнозування враховує об'єктивне протидію чинників процесу, які одночасно і сприяють, і перешкоджають реалізації ефекту збереження і коефіцієнтів оперативної готовності, і показників залишкового нормованого ресурсу базових шасі озброєння. Саме ці данні нескладно узагальнити для більш обґрунтованого планування оновлення парку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи військової логістики. Прогнозні моделі забезпечення. Під ред. Гуляк О.В./ О. В. Гуляк, Б. О. Дем'янчук, О. М. Маслій, Д. В. Лисовенко, В. А. Маханьков, В. Ф. Обертас – Одеса: 2019. – 262 с.
2. Основи автотехнічного забезпечення. Моделювання процесів: навчальний посібник / Б. О. Дем'янчук, С. М. Верпівський, В. М. Меленчук – Одеса: Видавництво Військова академія (м. Одеса), 2015. – 330 с.
3. LXXVII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету . –К.: НТУ, 2021.
4. Турбулент Петрова: пат. 139997 Україна : F02B 23/02 (2006.01) / Л.М. Петров, О.В. Лисий, І.В. Кішнянус, М.С. Суханюк. - № и 2019 05108 ; заявл. 14.05.2019 ; опубл. 10.02.2020, Бюл. №3. – 6 с.
5. Національна безпека України. Збірник наукових праць курсантів і студентів – Одеса: ВА, 2018. – Вип. 1. – 180 с.