

Шифр **НОРМА**

**ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО НОРМОВАНОГО РЕСУРСУ
ЗРАЗКІВ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
Загальні поняття та визначення залишкового ресурсу.....	4
Норми напрацювання ВАТ до ремонту та списання.....	4
Завдання управління ресурсом і оновленням транспортних засобів.....	5
Побудова моделі процесу зменшення залишкового ресурсу протягом експлуатації.....	6
Основні методи прогнозування динаміки розвитку технічних процесів.....	6
Оптимальна оцінка параметрів прогнозного тренду методом максимальної правдоподібності.....	11
Визначення дисперсії оцінок параметрів прогнозного тренду.....	17
Обґрунтування завдання прогнозування ресурсу транспортних засобів.....	22
ВИСНОВКИ.....	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	27

ВСТУП

Об'єктивне прогнозування динаміки зміни рівня показника залишкового нормованого ресурсу зразка (за пробігом) до капітального ремонту або списання військової автомобільної техніки (ВАТ) за наслідками спостереження фактичної зміни цього параметра у ретроспективному інтервалі часу є важливим для забезпечення готовності до виконання завдання за призначенням.

Метою роботи є побудова адекватної моделі зменшення ресурсу до капітального ремонту ВАТ протягом її експлуатації, прогнозування показника залишкового нормованого ресурсу за пробігом, коефіцієнта готовності кожного зразка автомобілів парку. Підвищення надійності ВАТ є одним з пріоритетних напрямків розвитку техніки на найближче десятиріччя. Найважливіша якість, яка характеризує надійність ВАТ – довговічність – визначається терміном служби і ресурсом.

Існує велика кількість публікацій, де розглядають питання пошуку адекватної моделі процесу зменшення залишкового нормованого ресурсу військової автомобільної техніки протягом її експлуатації. Проте більшість моделей є занадто складними та недостатньо адекватно відображує протидію факторів, які суттєво впливають на характер розвитку реального процесу (зменшення або збільшення) показників технічного стану ВАТ.

Загальні поняття та визначення залишкового ресурсу

Нормативний ресурс – це сумарне напрацювання автомобіля від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу у граничний стан.

Використаний ресурс – це сумарне напрацювання автомобіля від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан.

Залишковий ресурс – це різниця між нормативним ресурсом та використаним ресурсом.

Залишковий нормований ресурс – відношення залишкового ресурсу до нормативного ресурсу.

Призначений ресурс – це сумарне напрацювання, у разі досягнення якого експлуатацію автомобіля належить припинити незалежно від його технічного стану.

Норми напрацювання ВАТ до ремонту та списання

Норми напрацювання (строки служби) ВАТ до ремонту та списання визначаються на мирний час інструкцією про порядок встановлення та визначення норм напрацювання (строків служби) до ремонту автомобільної техніки та автомобільного майна.

Встановлені норми напрацювання (строки служби) є мінімальними. Машини, які відпрацювали встановлену норму напрацювання (строк служби) до ремонту або списання, але за своїм технічним станом придатні до експлуатації, підлягають подальшому використанню до граничного їх стану.

Норма напрацювання до списання автомобілів визначається загальним пробігом з початку експлуатації до другого капітального ремонту (КР) з урахуванням їх технічного стану та вироблення встановлених норм напрацювання для машин, які пройшли КР. Напрацювання до КР та списання різних модифікацій машин розраховується за нормами, встановленими для

відповідних базових машин. Автомобілі, автобуси, спеціалізовані колісні шасі та тягачі підлягають КР 1раз.

Завдання управління ресурсом і оновленням транспортних засобів

Аналіз результатів експлуатації різних зразків спеціалізованих військових автомобілів протягом останніх десятиліть показує систематичне зниження рівня показника технічного стану автомобільних засобів через відсутність найважливіших умов для експлуатації, і, перш за все, через відсутність системи планового оновлення автомобільної техніки у військових частинах.

Досвід бойового застосування озброєння і військової автомобільної техніки як базових шасі вогневої підтримки частин і бойових підрозділів збройних сил, стале збільшення динаміки бойового протистояння свідчать про зростання вимог до технічного стану цих засобів, що, у свою чергу, потребує своєчасних заходів для систематичного аналізу технічного стану цих автомобілів, їх зберігання на потрібному рівні та об'єктивного прогнозування динаміки зменшення їх залишкового нормованого ресурсу і своєчасного оновлення парку на основі результатів об'єктивного прогнозу.

Відомо, що вирішення завдання об'єктивного прогнозування рівня цього показника залишкового ресурсу залежить від великої кількості факторів. Таке завдання відноситься до класу погано визначених завдань через його залежність від випадкової невизначеності.

Щорічний рівень показника залишкового нормованого ресурсу конкретних зразків автомобільної техніки, який визначає начальник служби, – це є лише сукупністю реальних випадкових вихідних даних для розв'язання відомої військово-технічної задачі. Методики її розв'язання, тобто науково обґрунтованого використання вихідних статистичних даних, зараз існують, але невизначеності випадкового характеру потребують побудови моделі, що адекватно описує процес зміни цього показника.

Саме тому необхідно:

- запропонувати адекватну модель динаміки зменшення залишкового ресурсу зразків ВАТ за часом під впливом протидіючих факторів, одні з яких сприяють зберіганню, а інші сприяють витраті ресурсу зразків ВАТ;

- визначити метод прогнозування показника залишкового нормованого ресурсу зразків ВАТ на перспективному інтервалі часу за результатами спостереження показника на ретроспективному інтервалі часу їх експлуатації;

- розробити метод визначення оптимальних оцінок (тобто з найменшими помилками оцінок) параметрів прогнозного тренду (нелінійного типу) змін залишкового ресурсу за часом;

- обґрунтувати вибір і доцільність застосування критерію для прийняття рішення начальником автомобільної служби щодо поновлення парку спеціалізованих ВАТ шляхом капітального ремонту або списання зразків, з урахуванням деякого критичного значення залишкового нормованого їх ресурсу, наприклад, у випадку, коли він досягне рівня, який дорівнює 0,1.

Побудова моделі процесу зменшення залишкового ресурсу ВАТ протягом експлуатації

Кінцевою метою дослідження є побудова адекватної моделі зменшення ресурсу до капітального ремонту зразка військової автомобільної техніки протягом її експлуатації або до її списання.

Розв'язання задачі об'єктивного прогнозування динаміки зміни рівня показника ресурсу зразка (за пробігом) до капітального ремонту або списання автомобільної техніки за наслідками спостереження фактичної зміни цього параметра в дискретні моменти ретроспективного інтервалу часу є необхідним для забезпечення готовності цього зразка до здійснення маршу частини і підрозділів на значні відстані.

Експериментальні оцінки вказаної динаміки вважаються проблемними через непередбаченість адекватного відтворення ситуації з оцінкою нормованої витрати ресурсу (пробігу) зразка до капітального ремонту або до списання, в ситуації, що є близькою до реальної.

Основні методи прогнозування динаміки розвитку технічних процесів

1. Метод експертних оцінок. Суть даного методу полягає в тому, що в основі прогнозу лежить думка одного спеціаліста або групи фахівців, яка засноване на професійному і науковому досвіді. Розрізняють колективні та індивідуальні експертні оцінки, часто використовується при оцінці персоналу. Прикладом використання колективних експертних оцінок є метод узгодженого ранжирування за важливістю завдань технічного забезпечення операції.

2. Метод екстраполяції. Основна ідея екстраполяції – вивчення сформованих, як минулого, так і сьогодення, стійких тенденцій розвитку процесу та перенесення їх на майбутнє. Методи екстраполяції звичайно застосовують, щоб виявити тенденції зміни показників. Точність метода сильно залежить від постійності механізму, який спричиняє процес та від плавності зміни кривої тренда процесу за часом.

3. Метод моделювання – це конструювання моделі на підставі попереднього вивчення об'єкта і процесів, виділення їх істотних ознак і характеристик. Прогнозування з використанням моделей включає в себе її розробку, експериментальний аналіз, зіставлення результатів попередніх прогнозних розрахунків з фактичними даними стану процесу або об'єкта, уточнення і коректування моделі.

3.1 Статичні моделі характеризують конкретний стан об'єкта у заданий момент часу. Як правило, їх застосовують для подання стійких рівноважних чи стаціонарних станів систем, або таких нерівноважних й нестаціонарних станів, змінюванням яких з часом при дослідженні або роботі системи можна знехтувати. Прикладами статичних математичних моделей систем є відомі з курсу фізики рівняння стану ідеального газу, закон Кулона тощо;

3.2 Детерміновані (жорсткі) моделі передбачають, що зв'язок між входами та виходами системи може бути описаний за допомогою відомих детермінованих функцій, а вхідні значення є точно визначеними;

3.3. Стохастичні (статистичні) моделі будують, якщо параметри об'єкта дослідження піддаються впливу неконтрольованих випадкових факторів, або він характеризується власною невизначеністю поведінки.

Метод статистичного прогнозування динаміки зменшення (за часом експлуатації зразка) рівня залишкового ресурсу зразків військових автомобілів заснований, по-перше, на побудові імовірнісної моделі, яка враховує узагальнені чинники, які сприяють або перешкоджають збільшенню показника витрати ресурсу зразка до його капітального ремонту або списання.

По-друге, метод передбачає отримання експериментальних даних про фактичне значення цього показника зразка, наприклад, за наслідками річних звітів по експлуатації техніки в частині, тобто на ретроспективному інтервалі часу. На цьому етапі виявляється експериментально закономірність зміни показника витрати ресурсу зразка за обмеженою кількістю реальних даних.

По-третє, метод містить обчислення оцінок параметрів результуючого тренду залежності рівня показника залишкового ресурсу від часу експлуатації на перспективному інтервалі часу і обчислення дисперсії й оцінок параметрів цього тренду по сукупності дискретних експериментальних даних також на ретроспективному інтервалі часу.

Показник залишкового нормованого ресурсу визначається, згідно його сенсу, відношенням

$$B(t) = \frac{L - C(t)}{L}, \quad (1)$$

де L – нормативний ресурс, $C(t)$ – витрачений ресурс. Для побудови моделі врахуємо, що процес зміни рівня показника залишкового нормованого ресурсу $B(t)$ за часом відображається залежністю швидкості dB/dt зміни $B(t)$ протягом часу t . Показник B , по-суті, є ймовірністю перебування зразка в стані готовності до застосування. Вказана швидкість зміни $B(t)$ безпосередньо залежить від добутку $B \cdot (1 - B)$ ймовірності B та ймовірності $(1 - B)$ протилежних подій.

В якості математичної моделі, яка дозволяє надійно, з високою точністю описати вказану сукупності експериментальних даних, доцільно обрати ймовірнісну модель процесу деградації систем, що адекватно враховує процес одночасного протиборства чинників фізичного старіння об'єкту, в порівнянні з іншими моделями.

Фактори, що впливають на рівень коефіцієнта готовності у протилежних напрямках, діють одночасно, тому відповідні ймовірності перемножуються. Коефіцієнт пропорційності при цьому доцільно взяти у вигляді деякої довільної, поки що невідомої, різниці інтенсивностей протидії чинників, що вказані вище. Розв'язання такого диференціального рівняння дає ймовірнісну модель (тренд) залежності ймовірності $B(t)$, тобто показника коефіцієнта готовності зразка від часу його експлуатації, рівного t років.

Статистична оцінка параметрів прогнозного тренду з урахуванням помилок заснована на множині дискретних початкових даних відліку за наслідками спостережень по роках вказаної ймовірності (частоті), з урахуванням випадкових відхилень цього відліку від обраного тренду зміни ймовірності (показника коефіцієнта готовності).

Отже, метою першого етапу розв'язання задачі побудови моделі є експериментальне виявлення закономірності зміни рівня показника технічного стану (показника коефіцієнта готовності) B зразка озброєнь на попередніх ділянках часу його експлуатації t . Отже знаходимо спочатку значення $B(t) = B_k$ ($k = 1, 2, \dots, m$) по обмеженій кількості (на практиці, як правило, $m \leq 10$) даних реальної експлуатації зразка. Особливість побудови ймовірнісної моделі полягає в тому, що вона враховує одночасний вплив чинників, що протидіють, адекватніше, ніж інші моделі, і це відображається залежністю швидкості зміни коефіцієнта готовності від добутку ймовірностей протилежних подій.

Коефіцієнтом пропорційності при цьому доцільно взяти так званий коефіцієнт $\gamma \geq 0$ протидії чинників, що має сенс різниці інтенсивностей їх протидії. В результаті отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{dB(t)}{dt} = \gamma \cdot B(t) \cdot [1 - B(t)]. \quad (2)$$

Інтегрування (1) за довільних початкових умов, наприклад, у вигляді $B(t = \tau_{0.5}) = 0.5$, де $\tau_{0.5}$ – момент часу, при якому досягнутий рівень коефіцієнта готовності дорівнює половини його максимально можливого значення, дає на даному етапі імовірнісну модель (тренд) залежності ймовірності $B(t)$, тобто коефіцієнта готовності зразка від часу t , у вигляді

$$B(t) = \frac{1}{1 + \exp[\gamma(t - \tau_{0.5})]}. \quad (3)$$

Параметри γ й $\tau_{0.5}$ цієї кривої доцільно далі оцінювати для побудови результуючого прогнозного тренда процесу за даними спостережень, які відображені на рис. 1 пунктиром.

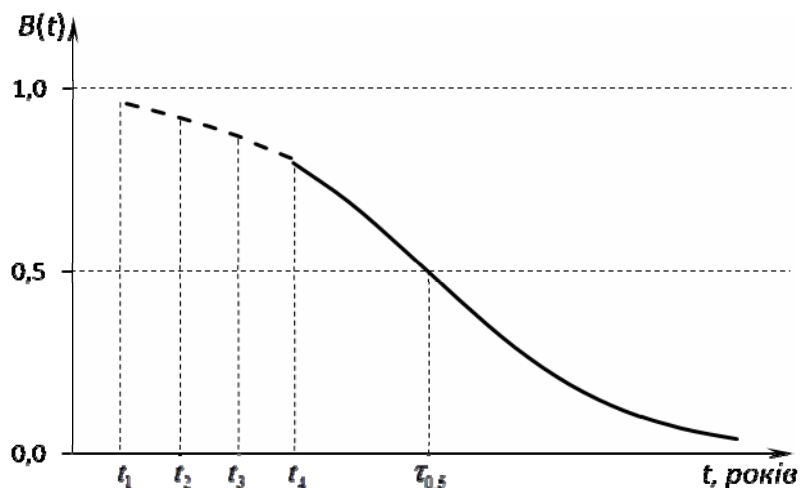


Рис. 1 – Залежність показника залишкового нормованого ресурсу зразка ВАТ від часу t його експлуатації

Наступним кроком розв'язання задачі прогнозування є побудова кривої розвитку процесу зменшення залишкового нормованого ресурсу на перспективному інтервалі часу, тобто на інтервалі $t \in [t_m, \infty)$. Для цього необхідно вирішити завдання отримання оптимальних оцінок параметрів апроксимуючої функції $B(t)$, а саме, γ та $\tau_{0.5}$ за результатами спостережень

закону зменшення коефіцієнта готовності $B(t)$ на ретроспективному інтервалі часу, тобто на інтервалі $t \in [0, t_m]$.

Підкреслимо наступне.

1. Аналіз відомих методів прогнозування підтверджує, що, виходячи з критерію мінімальних помилок визначення параметрів прогнозного тренда і довірчих інтервалів в оточенні цього тренду процесу зменшення коефіцієнта готовності $B(t)$ озброєння, доцільним є застосування методу максимальної правдоподібності.

2. Одержання оптимальних результатів прогнозування параметрів прогнозного тренду і його довірчих інтервалів сприятимуть більш об'єктивному визначенню рівня коефіцієнта готовності, а також (після вибору мінімально допустимого рівня порогу цього коефіцієнта готовності) зроблять можливим визначення часу відправки зразка озброєння в капітальний ремонт або часу його списання.

3. Вибір імовірнісної адекватної моделі у виді так званої кривої деградації пов'язаний з додатковими математичними труднощами застосування методу максимального правдоподібності для оцінки параметрів нелінійної функції. Але проблему можна вирішити застосуванням прийомів лінеаризації опорного тренду коефіцієнта готовності.

Оптимальна оцінка параметрів прогнозного тренду методом максимальної правдоподібності.

Тренд коефіцієнта готовності військового автомобіля містить лише два параметра, що визначають його форму і положення в площі координат $(B; t)$, а саме: параметр γ визначає крутизну кривої $B(t)$, параметр $\tau_{0.5}$ визначає положення цей кривої на площині $(B; t)$.

Нехай далі завдання полягає в знаходженні методом максимальної правдоподібності оптимальних оцінок параметрів γ й $\tau_{0.5}$ і похибок цих оцінок по обмеженій сукупності m значень функції (1), які розташовані на

початковому інтервалі значень часу t експлуатації автомобіля, тобто за дискретними експериментальними даними.

Саме цей метод, як показує аналіз, забезпечує використання всієї інформації, що отримана на ретроспективному інтервалі спостереження змін показника технічного стану зразка озброєння протягом його експлуатації.

Вважаємо, що для функції (1) одержані експериментально її дискретні значення для значень часу $t = t_k$ ($k = 1, 2, \dots, m$). Оптимальні оцінки максимальної правдоподібності параметрів γ й $\tau_{0.5}$ отримаємо методом найменших квадратів. Для цього спочатку приведемо функцію (3) до вигляду, де залежність від часу t буде лінійною (лінеаризуємо задачу). Після деяких нескладних перетворень одержимо:

$$\ln\left(\frac{1}{B} - 1\right) = \gamma t - \gamma \tau_{0.5}$$

або

$$y = at + b, \quad (4)$$

де $y = \ln\left(\frac{1}{B} - 1\right)$, $a = \gamma$, $b = -\gamma \tau_{0.5}$.

Для практичної реалізації метода найменших квадратів обчислимо всі необхідні допоміжні дані (табл. 1).

Таблиця 1

k	t_k	y_k	$t_k y_k$	t_k^2	y_k^2
1	t_1	y_1	$t_1 y_1$	t_1^2	y_1^2
2	t_2	y_2	$t_2 y_2$	t_2^2	y_2^2
...
m	t_m	y_m	$t_m y_m$	t_m^2	y_m^2
Σ	$\sum_{k=1}^m t_k$	$\sum_{k=1}^m y_k$	$\sum_{k=1}^m t_k y_k$	$\sum_{k=1}^m t_k^2$	$\sum_{k=1}^m y_k^2$

Оптимальні значення параметрів a і b лінійної функції (4) знаходяться як розв'язок системи двох лінійних рівнянь з двома невідомими:

$$\begin{cases} b \cdot m + a \cdot \sum_{k=1}^m t_k = \sum_{k=1}^m y_k, \\ b \cdot \sum_{k=1}^m t_k + a \cdot \sum_{k=1}^m t_k^2 = \sum_{k=1}^m t_k y_k. \end{cases}$$

Результат розв'язання має наступний вигляд:

$$a = \frac{m \cdot \sum_{k=1}^m t_k y_k - \sum_{k=1}^m t_k \cdot \sum_{k=1}^m y_k}{m \cdot \sum_{k=1}^m t_k^2 - \left(\sum_{k=1}^m t_k \right)^2}, \quad \gamma = a; \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{k=1}^m t_k^2 \cdot \sum_{k=1}^m y_k - \sum_{k=1}^m t_k \cdot \sum_{k=1}^m t_k y_k}{m \cdot \sum_{k=1}^m t_k^2 - \left(\sum_{k=1}^m t_k \right)^2}, \quad \tau_{0.5} = -\frac{b}{\gamma}. \quad (5)$$

Крім значень параметрів γ та $\tau_{0.5}$ рівняння (2) з даних табл. 1 можна знайти так званий *коефіцієнт лінійної кореляції* r , який вказує, наскільки припущення про лінійність залежності $y = y(t)$ відповідає дійсності: чим ближче r до одиниці, тим наше припущення ближче до істини. Обчислюється коефіцієнт лінійної кореляції за співвідношенням

$$r = \frac{m \cdot \sum_{k=1}^m t_k y_k - \sum_{k=1}^m t_k \cdot \sum_{k=1}^m y_k}{\sqrt{\left[m \cdot \sum_{k=1}^m t_k^2 - \left(\sum_{k=1}^m t_k \right)^2 \right] \cdot \left[m \cdot \sum_{k=1}^m y_k^2 - \left(\sum_{k=1}^m y_k \right)^2 \right]}}. \quad (6)$$

Для знаходження оцінок параметрів γ та $\tau_{0.5}$ методом максимальної правдоподібності з урахуванням їх опорних значень та всіх значень $B(t)$ на проміжку $t \in [t_1; t_m]$, які визначені з похибками $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$, і які неважко обчислити, враховуючи відхилення кожного значення від опорної кривої тренду, позначимо початкові оцінки параметрів γ та $\tau_{0.5}$, обчислені за формулами (4), (5), через γ_0 та $(\tau_{0.5})_0$, а їх оцінки, уточнені за методом

максимальної правдоподібності – через γ та $\tau_{0.5}$. Тоді похибки значень цих параметрів дорівнюють:

$$\Delta\tau_{0.5} = \tau_{0.5} - (\tau_{0.5})_0, \quad \Delta\gamma = \gamma - \gamma_0. \quad (7)$$

Розкладемо функцію $B(t)$ у ряд Тейлора по параметрах γ та $\tau_{0.5}$ в околі точки $((\tau_{0.5})_0; \gamma_0)$, обмежуючись першими членами розкладу. При цьому для дискретних значень аргументу $t = t_k$ ($k = 1, 2, \dots, m$) матимемо:

$$B(t_k) = B_0(t_k) + B_\tau(t_k) \cdot \Delta\tau_{0.5} + B_\gamma(t_k) \cdot \Delta\gamma, \quad (8)$$

де:

$$\begin{aligned} B_0(t_k) &= \frac{1}{1 + \exp[\gamma_0(t_k - (\tau_{0.5})_0)]}, & B(t_k) &= \frac{1}{1 + \exp[\gamma(t_k - \tau_{0.5})]}; \\ B_\tau(t_k) &= \frac{\partial B_0(t_k)}{\partial \tau_{0.5}} = \gamma_0 \exp[\gamma_0(t_k - (\tau_{0.5})_0)] B_0^2(t_k); & & \\ B_\gamma(t_k) &= \frac{\partial B_0(t_k)}{\partial \gamma} = -(t_k - (\tau_{0.5})_0) \exp[\gamma_0(t_k - (\tau_{0.5})_0)] B_0^2(t_k). \end{aligned}$$

Представимо для $t = t_k$ ($k = 1, 2, \dots, m$) сукупність рівностей (5.8) у вигляді одного матричного рівняння

$$\mathbf{B} \cdot \Delta\mathbf{b} = \mathbf{C}, \quad (9)$$

де

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_\tau(t_1) & B_\gamma(t_1) \\ B_\tau(t_2) & B_\gamma(t_2) \\ \dots & \dots \\ B_\tau(t_m) & B_\gamma(t_m) \end{pmatrix}, \quad \Delta\mathbf{b} = \begin{pmatrix} \Delta\tau_{0.5} \\ \Delta\gamma \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} B(t_1) - B_0(t_1) \\ B(t_2) - B_0(t_2) \\ \dots \\ B(t_m) - B_0(t_m) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Перш ніж перейти до відшукування вектору оцінок $\Delta\mathbf{b}$, знайдемо визначник інформаційної матриці Фішера, який згідно до (9), (10) дорівнює

$$|\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{B}| = \sum_{k=1}^m B_\tau^2(t_k) \cdot \sum_{k=1}^m B_\gamma^2(t_k) - \left(\sum_{k=1}^m B_\tau(t_k) \cdot B_\gamma(t_k) \right)^2. \quad (11)$$

З (8), маючи на увазі (11), можна зробити висновок про те, що визначник матриці $|\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{V}|$ не дорівнює нулю, отже, при розв'язанні рівняння (9) можна отримати оцінки, які мають скінченну дисперсію. Врахуємо неточний опис процесу $B(t)$ на інтервалі часу експериментальних вимірювань. Значення елементів вектору \mathbf{C} в матриці (9) містять похибку δ , тому випадковий результуючий вектор дорівнює

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} + \delta',$$

де δ' – вектор оцінки цієї похибки.

Якщо помилки опису даного процесу розподілені нормально (це припущення не суперечить граничній теоремі Ляпунова, оскільки процес зміни рівня коефіцієнта технічної готовності зразка розвивається під впливом багатьох незалежних випадкових чинників з нульовим середнім значенням, то їх щільність ймовірності має вигляд

$$\varphi(\delta') = (2\pi)^{-m/2} |\mathbf{\Pi}|^{-1/2} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \delta'^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \delta'\right\}, \quad (12)$$

де $\mathbf{\Pi}$ – матриця коваріацій похибок опису процесу змін коефіцієнта готовності, що спостерігають на ретроспективному інтервалі часу на дискретній множині точок.

Функція правдоподібності параметрів $\Delta \mathbf{b}$, які підлягають оцінюванню, згідно (7) – (9) і (12) дорівнює:

$$\psi(\Delta \mathbf{b}; \mathbf{y}) = (2\pi)^{-m/2} |\mathbf{\Pi}|^{-1/2} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} (\mathbf{y} - \mathbf{V} \cdot \Delta \mathbf{b})^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{V} \cdot \Delta \mathbf{b})\right\}, \quad (13)$$

де

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}((\tau_{0.5})_0; \gamma_0), \quad \mathbf{y} = \mathbf{y}(\Delta \tau_{0.5}; \Delta \gamma; \delta').$$

Для незалежних похибок нерівноточного опису процесу $B(t)$ матриця коваріацій і обернена їй є діагональними і мають вигляд:

$$\mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_m^2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{\Pi}^{-1} = \begin{pmatrix} w_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & w_m \end{pmatrix}, \quad w_k = \sigma_k^{-2}, \quad (14)$$

де σ_k^2 – дисперсія похибки k -го відліку B_k , яка у загальному випадку визначається як $\sigma_k^2 = M[\delta^2]$. Для подальшого доцільно зробити обґрунтоване припущення, що дисперсія похибки k -го значення функції $B(t_k)$ дорівнює її абсолютній похибці, тобто модулю різниці опорного експериментального значення B_k та розрахованого по отриманій методом найменших квадратів апроксимаційній залежності $B_0(t_k)$ з початковими значеннями параметрів $(\tau_{0.5})_0$ та γ_0 :

$$\sigma_k = \frac{1}{1 + \exp[\gamma_0(t_k - (\tau_{0.5})_0)]} - B_k. \quad (15)$$

Рівняння правдоподібності ми одержуємо шляхом диференціювання логарифма функції правдоподібності ψ згідно до (13). Це рівняння правдоподібності має вигляд

$$(\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{B}) \cdot \Delta \mathbf{b} = (\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{y}),$$

звідки

$$\Delta \mathbf{b} = (\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{y}),$$

Матриці $(\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{B})$ та $(\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{B})^{-1}$ згідно з (7) і (10) дорівнюють

$$\begin{aligned} (\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{B}) &= \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^m w_k B_\tau^2(t_k) & \sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) \\ \sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) & \sum_{k=1}^m w_k B_\gamma^2(t_k) \end{pmatrix}, \\ (\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{B})^{-1} &= \frac{1}{D_B} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^m w_k B_\gamma^2(t_k) & -\sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) \\ -\sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) & \sum_{k=1}^m w_k B_\tau^2(t_k) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (16)$$

де

$$D_B = \sum_{k=1}^m w_k B_\tau^2(t_k) \sum_{k=1}^m w_k B_\gamma^2(t_k) - \left(\sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) \right)^2$$

– визначник матриці $(\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{B})$.

Відповідно до (8), (9), (14), (16) в результаті отримаємо оптимальні оцінки параметрів $\tau_{0.5}$ та γ очікуваних темпів зменшення рівня технічного стану, тобто коефіцієнта готовності зразка озброєння або військової техніки, в залежності від часу t .

Нові оцінки параметрів прогнозного тренду $\tau_{0.5}$ та γ , отримані в результаті корекції, а саме, тренду зменшення величини коефіцієнта готовності зразка військової автомобільної техніки, повністю залежного від цих двох параметрів $\tau_{0.5}$ та γ , отримаємо у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{0.5} = (\tau_{0.5})_0 + \frac{\sum_{k=1}^m w_k B_\gamma^2(t_k) \cdot \sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) y_k - \sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) \cdot \sum_{k=1}^m w_k B_\gamma(t_k) y_k}{\sum_{k=1}^m w_k B_\tau^2(t_k) \sum_{k=1}^m w_k B_\gamma^2(t_k) - \left(\sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) \right)^2}, \\ \gamma = \gamma_0 + \frac{\sum_{k=1}^m w_k B_\tau^2(t_k) \cdot \sum_{k=1}^m w_k B_\gamma(t_k) y_k - \sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) \cdot \sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) y_k}{\sum_{k=1}^m w_k B_\tau^2(t_k) \sum_{k=1}^m w_k B_\gamma^2(t_k) - \left(\sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) \right)^2}. \end{array} \right. \quad (17)$$

Визначення дисперсії оцінок параметрів прогнозного тренду.

Дисперсії оцінок шуканих прогнозних параметрів тренду (2) визначаються рівністю (16) $\sigma^2 = (\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{\Pi}^{-1} \cdot \mathbf{B})^{-1}$, тому її діагональні елементи і є дисперсіями параметрів рівняння (2) σ_τ^2 та σ_γ^2 :

$$\sigma_\tau^2 = \frac{\sum_{k=1}^m w_k B_\gamma^2(t_k)}{\sum_{k=1}^m w_k B_\tau^2(t_k) \sum_{k=1}^m w_k B_\gamma^2(t_k) - \left(\sum_{k=1}^m w_k B_\tau(t_k) B_\gamma(t_k) \right)^2}, \quad (18)$$

$$\sigma_{\gamma}^2 = \frac{\sum_{k=1}^m w_k B_{\tau}^2(t_k)}{\sum_{k=1}^m w_k B_{\tau}^2(t_k) \sum_{k=1}^m w_k B_{\gamma}^2(t_k) - \left(\sum_{k=1}^m w_k B_{\tau}(t_k) B_{\gamma}(t_k) \right)^2}. \quad (19)$$

Точність оцінок параметрів тренду (2) зростає при збільшенні числа дискретних даних етапу спостережень технічного стану зразка озброєння, а також вона зростає при збільшенні точності значень $B(t_k)$ та їх відхилень від опорного тренду.

Підставляючи оцінки прогнозних параметрів у вираз (2) тренду, отримаємо шукану результуючу функцію показника зміни технічного стану конкретного зразка, тобто *динаміку зменшення* коефіцієнта готовності зразка, яка очікується за часом його експлуатації на перспективному інтервалі часу.

Зрозуміло, що поточне прогнозне значення рівня коефіцієнта готовності зразка доцільно визначати по величині значення ординати результуючої функції $B(t_k)$ для заданого моменту часу t , тобто абсциси отриманої результуючої функції.

За допомогою формул (17) – (19) можна знайти довірчі інтервали змін за часом тренду нормованого залишкового ресурсу зразка озброєння за допомогою оцінок параметрів верхньої і нижньої межі прогнозного тренду цього ресурсу.

Параметри для побудови центрального прогнозного тренду необхідно обрати у виді оцінок згідно до (17) у вигляді

$$(\tau_{0.5})_c = \tau_{0.5}, \quad \gamma_c = \gamma,$$

параметри для побудови верхньої межі прогнозного тренду необхідно обрати у вигляді

$$(\tau_{0.5})_B = \tau_{0.5} - 3\sigma_{\tau}, \quad \gamma_B = \gamma + 3\sigma_{\gamma},$$

а параметри для побудови нижньої межі прогнозного тренду необхідно обрати, згідно до (17) – (19), у вигляді

$$(\tau_{0.5})_H = \tau_{0.5} + 3\sigma_\tau, \quad \gamma_H = \gamma - 3\sigma_\gamma.$$

Використовуючи ці значення параметрів рівняння (2), можна побудувати три криві залежності залишкового нормованого ресурсу зразка озброєння від часу. Як відомо з теорії, ймовірність того, що при нормальному розподілі похибок знайдені оцінки значень параметрів рівняння не відхиляються від фактичних на величину більшу ніж 3σ , становить 0,99, тобто є, по суті, достовірною подією. Знайшовши абсциси точок перетину побудованих кривих з горизонтальною прямою $B(t) = B_M$, де B_M – межове прийнятне значення залишкового нормованого ресурсу (наприклад, $B_M = 0.1$), одержимо відповідні оцінки значення часу, при якому залишковий нормований ресурс зразка озброєння досягне критичного значення, і буде необхідно приймати рішення щодо списання зразка або відправки його на капітальний ремонт.

Розглянемо конкретний числовий приклад. Нехай нормативний ресурс пробігу деякого зразка збройної техніки дорівнює $L = 150000$ км. Згідно документів, отримані наступні величини щорічного пробігу s_k за останні шість років (табл.2):

Таблиця 2

№ з/п	Рік	Річний пробіг, км	Втрата ресурсу, км	ЗНР B
1	2013	6 100	6 100	0,9593
2	2014	6 400	12 500	0,9167
3	2015	6 800	19 300	0,8713
4	2016	7 400	26 700	0,8220
5	2017	8 100	34 800	0,7680
6	2018	8 900	43 700	0,7087

Складаємо та заповнюємо для застосування методу найменших квадратів допоміжну таблицю (табл. 3).

Таблиця 3

k	t_k	y_k	$t_k y_k$	t_k^2	y_k^2
1	1	-3,1608	-3,1608	1	9,9908

2	2	-2,3978	-4,7957	4	5,7499
3	3	-1,9127	-5,7383	9	3,6588
4	4	-1,5299	-6,1198	16	2,3407
5	5	-1,1970	-5,9852	25	1,4329
6	6	-0,8889	-5,3335	36	0,7901
$\sum_{k=1}^6$	21	-11,0874	-31,1336	91	23,9634

Застосовуючи формули (4) – (6), знаходимо початкові оцінки параметрів рівняння (5.2) та коефіцієнт лінійної кореляції:

$$(\tau_{0.5})_0 = 7,7149, \quad \gamma_0 = 0,4384, \quad r = 0,9839. \quad (20)$$

Близькість коефіцієнту лінійної кореляції r до одиниці вказує, що припущення про лінійну залежність величини y (4) від часу t є обґрунтованим, а тим самим підтверджується і статистична модель процесу зменшення коефіцієнту готовності зразка $B(t)$ озброєння за законом (2). На рис. 2 показані опорні значення величини $y_k = \ln\left(\frac{1}{B_k} - 1\right)$, знайдені по величинах щорічного пробігу, та значення $y(t_k)$, розраховані по формулі (3) з параметрами (20).

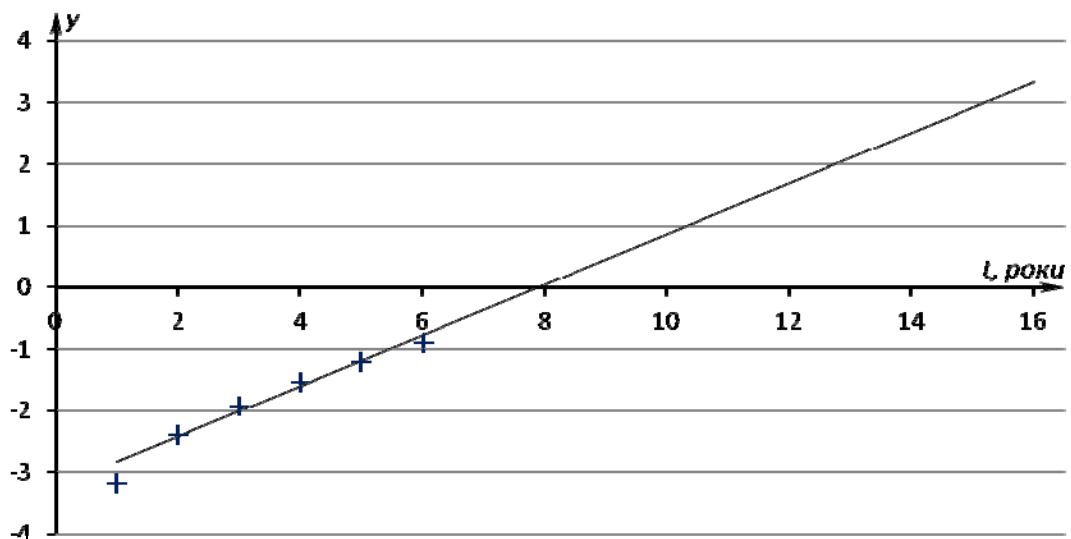


Рис. 2. Залежність величини $y = \ln\left(\frac{1}{B} - 1\right) = \gamma t - \gamma \tau_{0.5}$ від часу t .

+ експериментальні результати; — розрахунок.

Далі обчислимо значення залишкового нормованого ресурсу $B(t_k)$ ($k = 1, 2, \dots, 6$) та похибки цих значень σ_k як різниці $\sigma_k = B_k - B(t_k)$ і занесемо результати до таблиці (табл. 4).

Таблиця 4

k	t_k	B_k	$B(t_k)$	σ_k	σ_k^2	w_k
1	1	0,9593	0,9500	0,0093	$0,8649 \cdot 10^{-4}$	$1,1562 \cdot 10^4$
2	2	0,9167	0,9245	-0,0078	$0,6084 \cdot 10^{-4}$	$1,6437 \cdot 10^4$
3	3	0,8713	0,8877	-0,0164	$2,6896 \cdot 10^{-4}$	$3,7180 \cdot 10^3$
4	4	0,8220	0,8360	-0,0140	$1,9600 \cdot 10^{-4}$	$5,1020 \cdot 10^3$
5	5	0,7680	0,7668	0,0012	$0,0144 \cdot 10^{-4}$	$6,9444 \cdot 10^5$
6	6	0,7087	0,6796	0,0291	$8,4681 \cdot 10^{-4}$	$1,1809 \cdot 10^3$

Можна зробити обґрунтоване припущення, що квадрати цих різниць можна прийняти як дисперсії експериментальних значень залишкового нормованого ресурсу, які утворюють матрицю коваріації. Таким чином, ми маємо діагональні елементи σ_k^2 матриці коваріації $\mathbf{\Pi}$ та елементи w_k оберненої їй матриці $\mathbf{\Pi}^{-1}$ (табл.4).

Після цього, обчисливши всі суми, що входять до виразів (17) – (19), отримаємо наступні результати:

$$\begin{aligned} \tau_{0.5} &= (\tau_{0.5})_0 + \Delta\tau = 7.7149 + 0.1842 = 7.8991; & \sigma_\tau &= 0.1667; \\ \gamma &= \gamma_0 + \Delta\gamma = 0.4384 - 0.0272 = 0.4112; & \sigma_\gamma &= 0.0266. \end{aligned}$$

Знаходимо значення параметрів для побудови верхньої та нижньої меж прогнозного тренду:

$$\begin{aligned} (\tau_{0.5})_B &= \tau_{0.5} - 3\sigma_\tau = 7.8991 - 3 \cdot 0.1667 = 7.3991, \\ \gamma_B &= \gamma + 3\sigma_\gamma = 0.4111 + 3 \cdot 0.0266 = 0.4909; \\ (\tau_{0.5})_H &= \tau_{0.5} + 3\sigma_\tau = 7.8991 + 3 \cdot 0.1667 = 8.3992, \\ \gamma_H &= \gamma - 3\sigma_\gamma = 0.4111 - 3 \cdot 0.0266 = 0.3313. \end{aligned}$$

Побудувавши три криві на одному графіку, знаходимо абсиси точок перетину нижньої $B_H(t)$, середньої $B_C(t)$ та верхньої $B_B(t)$ кривих тренду з горизонтальною прямою $B_M = 0.1$ (рис. 3):

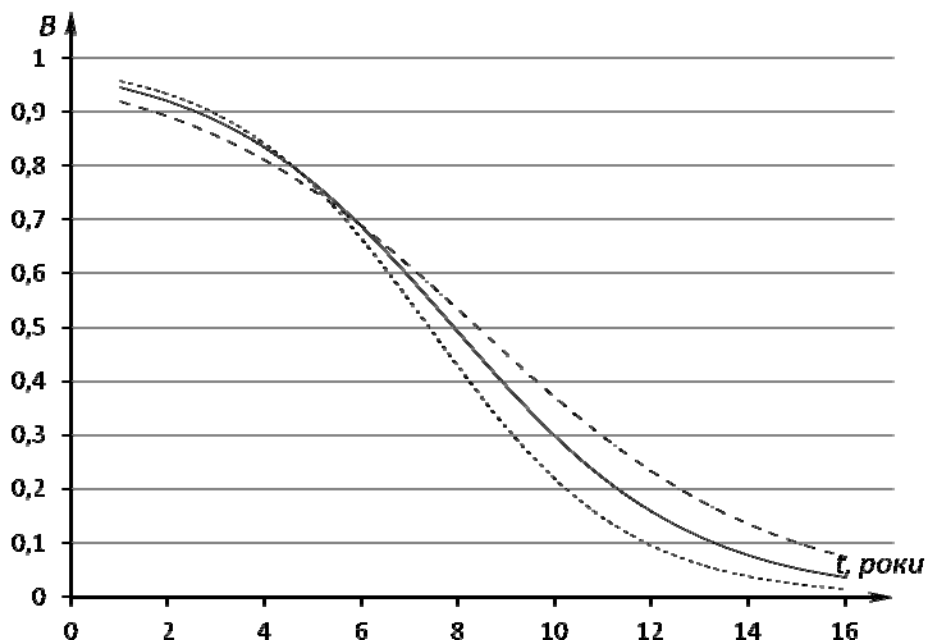


Рис. 3 Криві тренду залишкового нормованого ресурсу

— $B_C(t)$; - · - · $B_H(t)$; ····· $B_B(t)$.

Обчислення дають наступні оцінки часу досягнення критичного значення залишкового нормованого ресурсу:

1) для центральної кривої

$$t_c = \tau_{0.5} + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{1}{B_m} - 1 \right) = 7.8991 + \frac{1}{0.4111} \ln \left(\frac{1}{0.1} - 1 \right) = 13.24;$$

2) для нижньої кривої

$$t_H = (\tau_{0.5})_H + \frac{1}{\gamma_H} \ln \left(\frac{1}{B_M} - 1 \right) = 7.3991 + \frac{1}{0.4909} \ln \left(\frac{1}{0.1} - 1 \right) = 11.87;$$

3) для верхньої кривої

$$t_B = (\tau_{0.5})_B + \frac{1}{\gamma_B} \ln \left(\frac{1}{B_M} - 1 \right) = 8.3992 + \frac{1}{0.3313} \ln \left(\frac{1}{0.1} - 1 \right) = 15.03.$$

Обґрунтування завдання прогнозування ресурсу транспортних засобів

Зниження рівня показника технічного стану автомобільних засобів суттєво спричиняє відсутність необхідної уваги командування до створення умов для технічного обслуговування транспортних засобів, недооцінка потреб нормальної та ефективної експлуатації, і, перш за все, через відсутність підсистеми планового оновлення автомобільної техніки у військових частинах.

Досвід бойового застосування озброєння і військової автомобільної техніки як базових шасі для озброєння вогневої підтримки частин і бойових підрозділів збройних сил, збільшення інтенсивності бойового протиборства потребують зростання вимог до технічного стану транспортних засобів, які безпосередньо впливають на бойову ефективність озброєння у кожному сучасному бою, що, у свою чергу, потребує своєчасних заходів для систематичного удосконалення технічного стану, а, перш за все, ресурсу за пробігом цих засобів.

Потрібно прогнозування динаміки зменшення їх залишкового нормованого ресурсу і своєчасного оновлення парку на основі результатів об'єктивного прогнозу.

Відомо, що вирішення завдання об'єктивного прогнозування тренду процесу зниження рівня показника моторесурсу кожного зразка, перш за все, результат прогнозування рівня цього показника на будь-який час залежить від великої кількості факторів.

Ця задача відноситься до класу погано визначених, тому що результат її вирішення залежність від невизначеності випадкового типу.

Щорічний рівень показника залишкового нормованого ресурсу конкретних зразків автомобільної техніки, який визначає начальник служби, – це є лише сукупністю реальних випадкових вихідних даних для розв'язання відомої військово-технічної задачі. Методики її ефективного розв'язання, тобто науково обґрунтованого використання цих статистичних даних, що необхідно використовувати на практиці, невизначеності випадкового характеру, які під впливом протидіючих факторів спричиняють нестационарний характер зменшення показника залишкового нормованого ресурсу (за пробігом) кожного

автомобіля військової частини – все це потребує побудови моделі, що адекватно описує процес зміни цього показника, і подальшого застосування прийнятного апарата статистично прогнозування тренду цього процесу, а також потребує прийомів з метою вирішення відомого науково-технічного завдання прогнозування в умовах суттєво нелінійного характеру залежності вказаного тренду від часу експлуатації транспортного зразка.

Саме тому, для розв'язання задачі прогнозування динаміки змін за часом залишкового нормованого ресурсу за часом, необхідно:

- застосувати адекватну модель динаміки зменшення залишкового ресурсу зразків ВАТ за часом під впливом одночасно протидіючих факторів, деякі з них сприяють зберіганню, а інші сприяють витраті ресурсу зразків ВАТ;

- визначити метод прогнозування показника залишкового нормованого ресурсу зразків ВАТ на перспективному інтервалі часу за результатами спостереження показника на ретроспективному інтервалі часу їх експлуатації;

- розробити метод визначення оцінок (з прийнятними помилками оцінок) параметрів прогнозного тренду (нелінійного типу) змін залишкового ресурсу за часом; справа в тому, що застосування ефективного в даному випадку метода максимальної правдоподібності для оцінок параметрів нелінійного тренду завжди відрізняється суттєвою математичною складністю;

- обґрунтувати вибір і доцільність застосування критерію для прийняття рішення начальником автомобільної служби щодо поновлення парку ВАТ після капітального ремонту або списання зразків, з урахуванням деякого критичного рівня залишкового нормованого їх ресурсу, наприклад, у випадку, коли він досягне рівня, який встановлено на рівні, що, наприклад, дорівнює 0,1.

Особливості вирішення завдання прогнозування динаміки змін за часом ресурсу транспортних засобів є наступними:

Рішення завдання прогнозування. Дозволяє для конкретного технічного об'єкта:

-виявити вузли об'єкта, працездатність яких значно зміниться в найближчий відрізок часу, і своєчасно підготувати запасні або резервні вузли для заміни;

-обґрунтувати кількість запасних деталей або вузлів і обсяг запасних частин на весь період використання об'єкта;

-визначити терміни профілактичних робіт, спрямованих на підвищення працездатності об'єкта.

Методи математичної екстраполяції дозволяють кількісно охарактеризувати прогнозовані процеси. Він заснований на вивченні закономірностей розвитку досліджуваних явищ, що склалися в минулому і поширені на майбутнє. Метод виходить з того, що в розвитку економічних і технічних процесів діє принцип інерції, тобто спостережувані закономірності досить стійкі протягом значного періоду часу.

Для застосування даного методу необхідно мати тривалий ряд показників за минулий період. Дана інформація вивчається і обробляється.

Фактичний часовий ряд вирівнюється шляхом графоаналітичного або статистичного підбору апроксимуючої функції.

Далі розробляють гіпотези зміни об'єкта в прогнозний період (період попередження) і формалізують їх у вигляді кількісних показників (тенденцій). При цьому значення показників можна прогнозувати не тільки на кінець прогнозного терміну, але і на проміжних етапах.

Застосування метода статистичного прогнозування процесів і метода максимальної правдоподібності під час визначення оптимальних оцінок параметрів прогнозного нелінійного тренду процесу зміни показника залишкового нормованого ресурсу зразків озброєнь дозволяє (в умовах невизначеності випадкового характеру) отримувати достовірні прогнозні оцінки показника, а також визначати доцільні напрями і шляхи удосконалення стану готовності озброєння військової частини.

ВИСНОВКИ

На правильність прогнозу надійності військового автомобіля вирішальний вплив здійснює :

- Достовірність інформації про закономірності зміни технічного стану в процесі експлуатації;
- Можливість визначення технічного стану систем військового автомобіля забезпечує підтримку заданого рівня надійності завдяки запобіганню відмов шляхом визначення залишкового ресурсу безвідмовної роботи систем автомобіля, оптимальної періодичності додаткових робіт;
- Розроблення методики визначення технічного стану військового автомобіля дасть змогу зменшити кількість поточних ремонтів і експлуатаційні витрати.

Враховуючи закономірності розподілу відмов та умови експлуатації, можна зробити висновок, що ретельний аналіз основних видів відмов, причин їх усунення та оптимізація процесу їх технічного обслуговування, попередження цим самим ймовірності виходу з ладу – шлях до підвищення та максимального забезпечення надійності зразків військових автомобілів.

Розглядаючи сучасний стан цієї проблеми, розуміємо, що необхідно продовжувати роботу у цьому напрямку:

- розробити моделі поступових і раптових відмов;
- дослідити надійність складних систем ВАТ;
- провести розрахунок схемної і параметричної надійності складних систем і, як кінцевий результат, – прогнозування надійності.

Отримані дані потребують подальшого удосконалення з використанням результатів експериментальних досліджень, що сприятиме підвищенню надійності ВАТ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/2324/1/Osnovu%20tekhn%20diagnostikuavt.o.pdf>
2. https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/19.67/1/UP_Tehn_diagn_20141.pdf.
3. <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-rascheta-ostatochnogo-resursa-avtomobilya>
4. Дем'янчук Б. О. Основи автотехнічного забезпечення. Моделювання процесів: навчальний посібник / Б. О. Дем'янчук, С. М. Верпівський, В. М. Меленчук – Одеса: Військова академія, 2015. – 330 с.