

О.Є. Мавренков, В.І. Улізько

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ В ХОДІ БОЙОВИХ ДІЙ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті представлено результати досліджень щодо використання методів математичного моделювання процесу відновлення (ремонт) авіаційної техніки як основи постановки та вирішення задачі оптимального управління процесом її відновлення в ході бойових дій. Як критерії оцінювання ефективності функціонування системи відновлення авіаційної техніки розглядаються показники справності та боєготовності бойових літаків тактичної авіації, а також питомі витрати на їх відновлення. Для опису процесу технічного забезпечення авіації використовується математичний апарат теорії масового обслуговування з розривними імпульсними функціями інтенсивностей потоків заявок і диференціальні вирази “динаміки середніх”. У статті наведені приклади, що демонструють працездатність розробленої математичної моделі залежно від тривалості й періодичності повітряних боїв, а також інтенсивності відновлення літаків тактичного авіаційного угруповання (на прикладі авіаційної ескадрильї).

Ключові слова: авіаційна техніка, літальний апарат, логістичне забезпечення, технічне забезпечення, відновлення, математична модель, теорія масового обслуговування, метод динаміки середніх.

Вступ

Постановка проблеми. Повномасштабна війна, розв'язана російським агресором проти України, супроводжується систематичним і масштабним застосуванням засобів повітряного нападу, а також активним використанням тактичної авіації у бойових діях. У таких умовах надзвичайно зростає роль своєчасного відновлення боєздатності авіаційної техніки (АТ), що зазнає пошкоджень унаслідок вогневого впливу противника, інтенсивних бойових вильотів та експлуатаційних навантажень. Забезпечення високого рівня справності та боєготовності літальних апаратів (ЛА) є одним із ключових чинників, що визначає ефективність дій тактичних авіаційних підрозділів, а отже – і загальну стійкість оборонної системи держави.

Сучасна війна характеризується швидкоплинністю операцій, високою інтенсивністю застосування авіації та суттєвим дефіцитом часу на проведення ремонтно-відновлювальних заходів. У зв'язку з цим особливого значення набуває створення науково обґрунтованих підходів до організації процесу відновлення АТ в умовах війни, які дають змогу забезпечити раціональне використання ресурсів, мінімізувати втрати часу та гарантувати необхідний рівень боєготовності авіаційних частин.

Актуальність зазначених досліджень визначається потребою в підвищенні ефективності системи технічного забезпечення авіації, яка має функціонувати в умовах постійного вогневого

впливу противника, порушень логістики та обмежених можливостей евакуації пошкоджених літаків у тилі ремонтні органи. У таких обставинах особливої цінності набуває застосування математичних моделей, здатних формалізувати процес відновлення авіаційної техніки та створювати підґрунтя для розроблення дієвої систем підтримки прийняття рішень у сфері управління ремонтно-відновлювальними роботами.

Оцінювання ефективності процесу відновлення літаків тактичної авіації на основі математичних моделей відкриває можливості для визначення оптимальних стратегій управління, балансування між рівнем боєготовності авіаційних підрозділів і затратами на їх відновлення, а також для прогнозування наслідків прийнятих рішень у динамічних і ризикованих умовах війни. Це дає змогу не лише підвищити надійність функціонування системи логістичного (технічного) забезпечення, а й сприяє підвищенню загальної бойової стійкості тактичної авіації Збройних Сил (ЗС) України.

Так, дослідження, спрямовані на впровадження методів математичного моделювання процесів логістичного забезпечення авіації ЗС України (зокрема, відновлення АТ) в ході бойових дій, мають суттєве наукове та практичне значення. Їх спрямовано на удосконалення підходів до управління логістичним (технічним) забезпеченням авіації та формування надійного інструментарію для прийняття рішень у складних умовах війни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тематика наукових досліджень, пов'язаних з

оцінюванням і забезпеченням ефективності функціонування системи логістичного забезпечення збройних сил у цілому та технічного забезпечення авіації, як її складової, досить широко висвітлюється у фахових іноземних, зокрема [1, 2], і вітчизняних, зокрема [3...9] публікаціях.

Результати досліджень з побудови елементів систем підтримки прийняття рішень (СППР) на основі математичного моделювання процесів логістичного забезпечення, зокрема в частині відновлення АТ, знайшли своє відображення у низці наукових публікацій, зокрема [10...16].

Аналіз зазначених наукових праць показує, що представлені теоретичні напрацювання не знайшли потрібного практичного впровадження в органах військового управління та в діяльності осіб, що приймають рішення (ОПР). Запропоновані методичні підходи до оцінювання та забезпечення ефективності функціонування системи відновлення АТ потребують адаптації до сучасних викликів і загроз, породжених російсько-українською війною. Питання організації процесів відновлення АТ в умовах бойових дій на сьогодні продовжують вирішуватися на основі традиційних методів, що, як правило, ґрунтуються на досвіді та інтуїції ОПР з використанням вербальних (експертних) процедур, що не виключає прийняття помилкових рішень. Як показує практика, традиційні підходи до оптимізації технічного забезпечення часто є недостатніми через непередбачуваність потоків пошкоджень, обмежені ресурси та часові обмеження. Тому розроблення адекватних і достовірних математичних моделей (ММ), які б склали основу СППР у системі відновлення АТ, залишається вкрай актуальним, насамперед, в умовах повномасштабної війни.

Мета статті – представлення результатів наукових досліджень щодо розроблення та аналізу ММ процесу відновлення АТ в ході бойових дій тактичного військового формування на прикладі авіаційної ескадрильї, що дає змогу формалізувати процеси технічного забезпечення авіації, зокрема, оцінити ефективність функціонування системи відновлення ЛА та закласти основи оптимальної стратегії управління з урахуванням показників справності, боєготовності та витрат ресурсів на проведення ремонтно-відновлювальних робіт.

Виклад основного матеріалу

В основу запропонованої ММ покладено фундаментальні положення теорії масового обслуговування та математичного моделювання, викладені, зокрема в [17...24], з використанням математичного методу “динаміки середніх”. Це зумовлено, з одного боку, відносною простотою аналітичного опису процесів функціонування складних систем, а з іншого – можливістю

отримання узагальнених імовірнісних показників ефективності функціонування цих систем. Незважаючи на те, що метод дає наближені результати, він має певну перевагу: що більше система має елементів (у нашому випадку – зразків АТ/ЛА) і станів, то точніше результати математичного моделювання [17, с. 291... 300].

Відмінністю запропонованої ММ є те, що в умовах бойових дій потік виходу з ладу зразків ЛА не є стаціонарним, а його функція інтенсивності є розривною і являє собою імпульсну функцію. Це дає змогу уникнути наближення такої функції постійною величиною, що може супроводжуватися значними помилками щодо оцінки ефективності системи відновлення АТ. Крім того, у ММ враховуються різні рівні сил і засобів технічного забезпечення АТ.

У постановці задачі дослідження розглядався такий сценарій: однорідне тактичне авіаційне угруповання, на прикладі авіаційної ескадрильї (а.е.) бойових тактичних літаків, на озброєнні якого знаходяться N однорідних ЛА, веде бойові дії, що включають послідовність бойових вильотів на ураження повітряних і наземних (надводних) цілей з періодичністю ψ при середній тривалості бою τ . При веденні бою літаки виходять із ладу та ремонтуються з певними інтенсивностями λ . Відновлення (ремонт) ЛА здійснюється силами технічного забезпечення авіаційної бригади (а.бр.) або силами авіаційних ремонтних підприємств (АРП) залежно від ступеня пошкодження.

Обмежувальні умови застосування ММ сформовано на основі положень роботи [25, с. 65...77]: бойові дії відбуваються на випадковому інтервалі часу $[0; T]$; зміна технічного стану ЛА здійснюється під дією пуасонівських потоків пошкоджень з відходом у різні види ремонту та безповоротні втрати; ЛА, що зазнали бойових пошкоджень і потребують відновлення в обсязі військового та середнього ремонтів, відновлюються силами а.бр., а в обсязі капітального ремонту – силами бригад АРП; усі сили та засоби а.бр. для відновлення ЛА, що отримали бойові пошкодження, зосереджені на виконанні військового ремонту; відновлені ЛА знову надходять у розпорядження а.е.; ЛА, що не підлягають відновленню, залишаються в підрозділах технічного забезпечення а.бр.

При цьому на даному етапі досліджень події виходу з ладу ЛА між бойовими вильотами, а також виходу з ладу справних, але небоєготових ЛА, які знаходяться в підрозділі, приймаються в завдання, що розглядається як малоймовірні події, імовірності настання яких не враховуються. Однак, зважаючи на технічний стан переважної більшості зразків АТ, що стоять на озброєнні авіації ЗС України, який характеризується критичним наближенням ресурсних показників до граничних

значень, врахування ймовірностей зазначених подій повинно стати пріоритетом подальших досліджень.

Будь-який ЛА, що знаходиться в а.е., може мати такі несумісні стани:

A_0 – справний (працездатний), але небоєготовий стан;

A_1 – справний і боєготовий стан;

A_2 – несправний стан, який потребує ремонту силами технічного забезпечення а.бр.;

A_3 – несправний стан ЛА, що потребує ремонту силами АРП.

На рис. 1 представлено граф можливих станів ЛА. Утримання ЛА у певному стані потребує витрат матеріальних і трудових ресурсів, які можуть бути виражені в єдиній вартісній шкалі витрат.

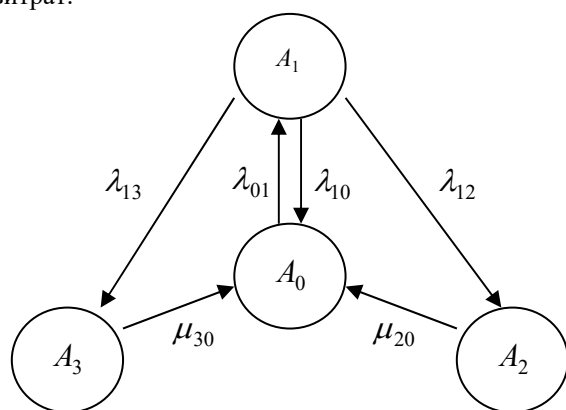


Рис. 1. Граф станів ЛА
Джерело: розроблено авторами

У представлений ММ переходи з одного стану в інший здійснюються з інтенсивностями, які залежать від впливу зовнішнього середовища й керуючих впливів з боку системи управління.

На графі позначені:

λ_{01} – інтенсивність переходу ЛА у боєготовий стан; λ_{10} – інтенсивність переведення ЛА у стан постійної готовності; λ_{12} – інтенсивність відмов ЛА, що перебувають у стані бойової готовності (в умовах бою), ремонт яких здійснюється силами технічного забезпечення батальйону. При цьому, боєготовим вважається працездатний ЛА, який має необхідний запас ресурсу (строку служби), приведений у вихідне, встановлене експлуатаційною документацією положення чи стан, і підготовлений до виконання поставленого бойового завдання на використання за призначенням [26]; λ_{13} – інтенсивність відмов ЛА, що у стані бойової готовності (в умовах бою), ремонт яких здійснюється силами технічного забезпечення вищого військового формування (бригади, полку); μ_{20} – інтенсивність відновлення ЛА силами технічного забезпечення а.бр.; μ_{30} – інтенсивність відновлення ЛА силами АРП.

Відповідно до умов завдання вихід ЛА з ладу здійснюється тільки в періоди бойових вильотів, тому функція інтенсивності виходу з ладу являє собою періодичну імпульсну функцію, яка залежить від тривалості вильотів. Так, інтенсивність відмов ЛА, що перебувають у стані бойової готовності (в умовах бою), ремонт яких здійснюється силами технічного забезпечення а.бр., $\lambda_{12}(t)$ представляється у вигляді:

$$\lambda_{12}(t) = \begin{cases} \lambda_{12}, t \in [t_{2k-2}; t_{2k-1}] \\ 0, t \in [t_{2k-1}; t_{2k}] \end{cases}; k=1,2,\dots \quad (1)$$

де $t_{2k-2} = t_{2k} - T$; $t_{2k} = k(\tau + T)$; $t_{2k+1} = t_{2k} + \tau$ – моменти розривів функції інтенсивностей; τ – періодичність бойових вильотів (виходу ЛА із ладу).

Так само визначається інтенсивність $\lambda_{13}(t)$ потоку відмов ЛА, що знаходяться в стані бойової готовності (в умовах бою), ремонт яких здійснюється силами технічного забезпечення АРП.

Відповідно до графа станів випишемо систему рівнянь для середніх чисельностей ЛА певного типу, що знаходяться в різних станах:

$$\begin{aligned} \frac{dn_0(t)}{dt} &= -\lambda_{01}n_0(t) + \lambda_{10}n_1(t) + \mu_{20}n_2(t) + \mu_{30}n_3(t); n_0(0) = N_0; \\ \frac{dn_1(t)}{dt} &= -\lambda_{01}n_1(t) + \lambda_{01}n_0(t); n_1(0) = N_1; \\ \frac{dn_2(t)}{dt} &= -\mu_{20}n_2(t) + \lambda_{12}n_1(t); n_2(0) = N_2; \\ \frac{dn_3(t)}{dt} &= -\mu_{30}n_3(t) + \lambda_{13}n_1(t); n_3(0) = N_3; \\ n_0(t) + n_1(t) + n_2(t) + n_3(t) &= N(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Система рівнянь (2) не має поглинаючих станів, а також вхідних потоків інтенсивності із зовнішніх джерел. Отже, така система є замкнутою, у якій сумарна чисельність ЛА $N(t)$, що знаходиться у різних станах, є постійною величиною. Разом з тим, слід зазначити, що не завжди є можливість відновити техніку, тому в стані A_3 накопичуватиметься невідновлювана техніка (втрати).

Для подальшого аналізу систему диференціальних рівнянь (2) представимо у вигляді дискретного процесу з інтервалом дискретизації Δt , який задається з умови заданої точності розв'язання задачі. Приймаючи, що військові операції плануються з часом дискретизації 1 годину, доцільно прийняти $\Delta t = 1$ годину. Послідовне інтегрування системи рівнянь (2) на інтервалах $t \in [t_{2k-2}; t_{2k-1}]$ і $t \in [t_{2k-1}; t_{2k}]$ призводить до системи різницьових рівнянь.

Інтенсивності λ, μ визначаються середнім числом подій, що припадають на одиницю часу і мають розмірність $\frac{1}{\text{час}}$. При цьому

$\lambda_{01}, \lambda_{10}, \lambda_{12}, \lambda_{13}$ можуть визначатися на основі статистичних даних за результатами ведення бойових дій або результатів моделювання цих дій.

Інтенсивність ремонту ЛА μ залежить від часу обслуговування одиниці техніки та визначається як:

$$\mu_{20} = \frac{\Delta u_2}{n_2(t) \Delta t}, \mu_{30} = \frac{\Delta u_3}{n_3(t) \Delta t}, \quad (3)$$

де Δu_2 – обсяг ремонту ЛА, проведеного силами а.бр. за час Δt ; Δu_3 – обсяг ремонту ЛА, проведеного силами АРП під час Δt .

Очевидно, що кожний стан ЛА потребує витрат $C_j(t)$, ($j = \overline{0,3}$), необхідних для проведення заходів технічного забезпечення. Позначимо: $C_0(t)$ – витрати на утримання ЛА у режимі постійної готовності; $C_1(t)$ – витрати на утримання ЛА у боеготовому стані; $C_2(t), C_3(t)$ – витрати на виконання ремонту силами а.бр. та АРП відповідно.

Усі витрати доцільно поділити на дві групи. Перша група включає поточні витрати, пов'язані з утриманням ЛА у військах. Це насамперед витрати, пов'язані з підтримкою інфраструктури зберігання техніки, заробітною платою обслуговуючого персоналу і використанням витратних матеріалів, необхідних для обслуговування ЛА. Припустимо, що витрати на утримання одного ЛА в режимі зберігання або очікування ремонту однакові й лінійно залежать від часу його знаходження в даному режимі:

$$C_0(t) = C_0 \cdot t, \quad (4)$$

де C_0 — витрати за одиницю часу.

Аналогічне припущення приймемо і для витрат при утриманні ЛА у боеготовому стані, але при вищій їх інтенсивності:

$$C_1(t) = c_1 \cdot t, c_1 > c_0. \quad (5)$$

Тоді величина витрат за утримання ЛА у різних станах під час визначеного періоду T складе:

$$C_c(T) = c_0[n_0(T) + n_2(T) + n_3(T)] + c_1 n_1(T), \quad (6)$$

Інша група витрат включає витрати, пов'язані безпосередньо з виконанням заходів щодо відновлення ЛА. Ці витрати будемо вважати також лінійними, але відносно чисельності відновлюваних ЛА. Приймемо c_2, c_3 – витрати на ремонт ЛА силами а.бр. і АРП відповідно, що припадають на один ЛА. Тоді повні витрати на ремонт за час T складуть:

$$C_p(T) = c_2 n_2(T) + c_3 n_3(T). \quad (7)$$

Сума поточних і очікуваних витрат характеризує повні витрати $C_\Sigma(T)$ на технічне забезпечення протягом розглянутого періоду часу.

Отримана модель дає змогу проводити аналіз впливу основних параметрів системи відновлення АТ в умовах бойових дій на показники ефективності системи технічного забезпечення авіації в цілому, основними з яких є:

– коефіцієнт справності ЛА за час T :

$$\overline{K_{И}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T K_{И}(t), K_{И}(t) = \frac{(n_0(t) + n_1(t))}{N}; \quad (8)$$

– коефіцієнт боеготовності ЛА за час T :

$$\overline{K_{Б}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T K_{Б}(t), K_{Б}(t) = \frac{n_1(t)}{N}; \quad (9)$$

– питомі витрати на ремонт ЛА:

$$\overline{C_p} = \frac{C_p(T)}{N \cdot T}, \quad (10)$$

де N – загальна кількість ЛА (постійна величина); T – розрахунковий період експлуатації.

Розглянемо модельний приклад, що ілюструє працездатність розробленої ММ за таких вхідних даних, які наведені в таблиці 1.

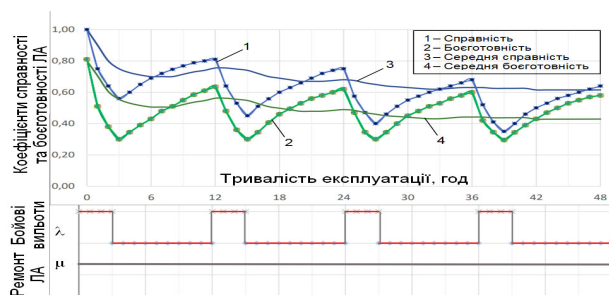
Таблиця 1

Вхідні дані модельного прикладу

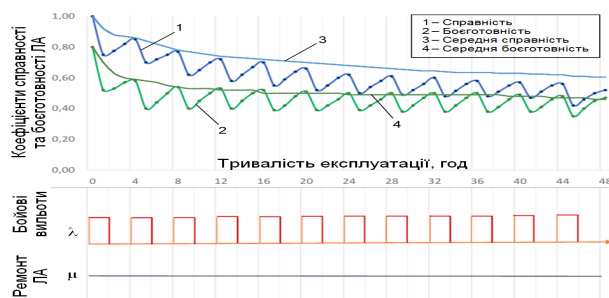
Параметр	Позначення	Значення
Крок моделювання	Δt	1 год
Часовий інтервал моделювання	T	48 год
Загальна кількість ЛА	N	12
Початкова чисельність боеготових ЛА	$n_2(0)$	10
Періодичність бойових вильотів	$T + \tau$	6 год
Середня тривалість бойового вильоту	τ	1 год
Інтенсивність перевodu ЛА в боеготовий стан	λ_{01}	0,2
Інтенсивність перевodu ЛА в стан постійної готовності	λ_{10}	0,1
Інтенсивність відмов ЛА, які підлягають ремонту силами а.бр.	λ_{12}	0,1
Інтенсивність відмов ЛА, які підлягають ремонту силами АРП	λ_{13}	0,2
Інтенсивність втрат	λ_3	0,1
Інтенсивність відновлення ЛА силами а.бр.	μ_{20}	0,1
Інтенсивність відновлення ЛА силами АРП	μ_{30}	0,15
Вартість утримання одного зразка ЛА в частині	c_1	0,2 у.од.
Вартість утримання одного зразка ЛА в частині в боеготовому стані	c_2	0,3 у.од.
Вартість ремонту в а.бр.	c_3	2 у.од.
Вартість ремонту в АРП	c_4	3 у.од.

Джерело: розроблено авторами

На рис. 2 і 3 показано графіки динаміки зміни справності й боездатності ЛА при різних середній тривалості боїв τ та їх періодичності $T + \tau$.

Рис. 2. Динаміка зміни коефіцієнтів справності та боєготовності при ЛА при $\tau = 3$

Джерело: розроблено авторами

Рис. 3. Динаміка зміни коефіцієнтів справності та боєготовності при ЛА при $\tau = 1$

Джерело: розроблено авторами

У першому випадку (рис. 2): $\tau = 3$ години, $T + \tau = 12$ годин.

У іншому випадку (рис. 3) розглянуто приклад, у якому середня тривалість бою втричі менша ($\tau = 1$ година), при збільшенні періодичності боїв у 2 рази: $T + \tau = 6$ годин.

У першому і другому випадках середній коефіцієнт справності ЛА за час T склав $\overline{K_I} = 0,61$, а коефіцієнт боєготовності $\overline{K_B} = 0,45$. При цьому, в момент закінчення аналізованого періоду в першому випадку $K_I(T) = 0,62$, а в другому $K_I(T) = 0,51$ (рис. 3), що говорить на користь першого варіанту. Однак, мінімальна інтенсивність у першому випадку $\min(K_I(t)) = 0,35$, а у другому $\min(K_I(t)) = 0,41$, що може бути критично при веденні бойових дій.

У табл. 2 відображені результати оцінки розглянутих варіантів відновлення ЛА за показниками, що характеризують справність, боєготовність і витрати на відновлення, розраховані за формулами (8), (9), (10) відповідно.

Таблиця 2

Результати моделювання

Показник	$\mu_{20} = 0,1$	$\mu_{20} = 0,3$	$\mu_{20} = 0,3$ при $\overline{K_I} < 0,6$	$\mu_{20} = 0$
Коефіцієнт справності $\overline{K_I}$	0,61	0,71	0,67	0,23
Коефіцієнт боєготовності $\overline{K_B}$	0,45	0,55	0,51	0,17
Питомі затрати $\overline{C_p}$	0,29	0,34	0,32	0,18

Джерело: розроблено авторами

На рис. 4 представлені графіки залежності показників справності і боєготовності від витрат.

Отримані залежності дозволяють визначати величину витрат на відновлення ЛА при забезпеченні заданого рівня їх справності та боєздатності в умовах бойових дій, або, навпаки, проводити оцінки рівня боєздатності та справності ЛА при заданому ліміті асигнувань на проведення заходів з відновлення.

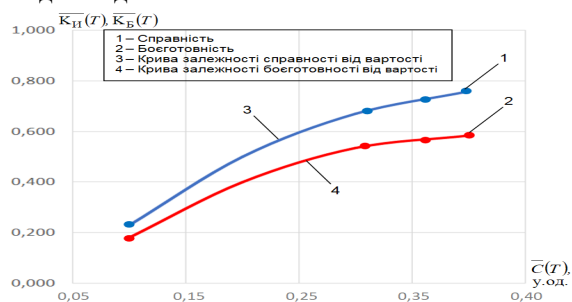


Рис. 4. Результати моделювання при різних варіантах відновлення ЛА

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, розроблена математична модель дозволяє моделювати процес відновлення ЛА у ході бойових дій тактичного підрозділу та проводити оцінку ефективності системи технічного забезпечення за показниками, що характеризують рівні боєготовності та справності, а також витрат, необхідних для здійснення відновлення ЛА. При цьому, в моделі використані періодичні імпульсні функції інтенсивностей виходу з ладу ЛА, які залежать від періодичності та тривалості бойових дій. Отримана модель може бути використана як для аналізу системи технічного забезпечення авіації, так і для вирішення оптимізаційних завдань управління технічним забезпеченням.

Разом з тим, слід зазначити, що запропонована модель є одноканальною, що значно полегшує її математичний опис. Однак, при моделюванні військових підрозділів вищого рівня, наприклад, а.бр., можуть виникнути складності, оскільки може з'явитися кілька каналів обслуговування, а склад зразків ЛА буде неоднорідним.

Висновки

Дослідження щодо оцінювання ефективності системи відновлення ЛА та розроблення відповідних СППР набувають стратегічного значення в умовах повномасштабної війни. Такі дослідження не лише допомагають прогнозувати динаміку справності авіаційної техніки, але й сприяють створенню алгоритмів для швидкого прийняття рішень командирами підрозділів. Наведена у статті модель оптимального управління дозволяє балансувати між швидкістю ремонту, витратами на ресурси та ризиками подальших втрат, що безпосередньо впливає на загальну ефективність тактичних формувань. У контексті України це може стати інструментом для посилення обороноздатності, інтеграції з міжнародними

стандартами НАТО та адаптації до гібридних загроз. Таким чином, пропонується ММ процесу відновлення АТ на прикладі авіаційної ескадрильї не тільки закладає основу вирішення задачі оптимального управління з урахуванням критеріїв справності, боеготовності та затрат, але й вносить вклад у розвиток військової науки, забезпечуючи теоретичну основу для практичних рішень у реальних бойових умовах.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на: формалізацію впливу бойових дій на особовий склад та ремонтну базу; розгляд неоднорідних тактичних угруповань літаків (змішані авіаційні тактичні підрозділи ударних / винищувальних літаків); врахування ремонтних черг з пріоритизацією; обмеженість специфічних запчастин і ланцюжків постачання.

Список літератури

1. Tripp R.S., McGarvey R.G., Van Roo B.D., Masters J.M., Sollinger J.M. A Repair Network Concept for Air Force Maintenance. Conclusions from Analysis of C-130, F-16, and KC-135 Fleets. *Santa Monica : RAND Corporation*, 2010. 63 p. URL: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monographs/2010/RAND_MG919.pdf (дата звернення 01.10.2025).
2. Mills P., Leftwich J.A., Van Abel K., Mastbaum J. Estimating Air Force Deployment Requirements for Lean Force Packages. A Methodology and Decision Support Tool Prototype. *Santa Monica : RAND Corporation*, 2017. 78 p. URL: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR1855.html (дата звернення 01.10.2025).
3. Кивлюк В.С., Ганненко Ю.О. Удосконалення системи забезпечення матеріальними ресурсами Збройних сил України. *Social development & Security*. 2018. Вип. 2(4). С. 49–58.
3. Павловський І.В. Пропозиції щодо удосконалення системи логістичного забезпечення Збройних сил України. *Озброєння та військова техніка*, 2017. № 1. С. 50–54. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=ovt_2017_1_9 (дата звернення 01.10.2025).
5. Наконечний О.В. Аналіз умов та факторів, що впливають на ефективність функціонування системи логістики сил оборони держави. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Вип. 3. С. 48–57. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=suntz_2019_3_10 (дата звернення 01.10.2025).
6. Баранов Ю., Баранов А., Кузьмичев А. Вибір та обґрунтування показників оцінки ефективності функціонування системи логістичного забезпечення. *Зб. наук. праць Національної академії Державної прикордонної служби України*. 2019. № 3(81). С. 291-301. DOI: 10.32453/3.v8i1i3.477.
7. Цимбалістова О.А. Логістичне забезпечення авіаційних підрозділів МВС України. *Наук. економ. журнал "Інтелект XXI"*, 2020, № 1. С.142-147. DOI: 10.32782/2415-8801/2020-1.26.
8. Serrano A., Kalenatic D., López C., Montoya-Torres J. R. Evolution of Military Logistics. *Logistics* 2023. No. 7(2). Art. 22. DOI: 10.3390/logistics7020022.
9. Новічонок С.М., Кравчук О.Д., Леоненко О.М., Сокол О.М., Терентьєва І.В. Шляхи удосконалення оцінки якості аеродромно-технічного забезпечення польотів повітряних суден Збройних Сил України з урахуванням досвіду країн-партнерів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 2024. № 4 (53). – С. 46–53. DOI: 10.30748/nitps.2023.53.06.
10. Ланецкий Б.Н., Лукьянчук В.В., Жуков В.С., Теребуха И.Н. Разработка моделей процесса текущего ремонта парка зенитных ракетных комплексов группировки зенитных ракетных войск. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2013. Вип. № 4. – С. 53–58.
11. Теребуха И.Н. Комплексная модель совместного функционирования функциональных подсистем текущего ремонта РЭС ЗРК с разработкой модели функционирования подсистемы обеспечения запасными частями. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. Вип. № 1. – С. 61–65.
12. Шишанов М.О. Гуляев А.В., Шевцов М.М. Обґрунтування методу моделювання процесу функціонування системи відновлення озброєння та військової техніки угруповання військ. *Озброєння та військова техніка*. 2017. Вип. 1(13). – С. 75–77.
13. Дачковський В.О., Коцюрuba В.І. Методика оцінювання ефективності функціонування системи відновлення озброєння та військової техніки. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2020. Вип. 1(37). – С. 5–14. DOI: 10.33099/2311-7249/2020-37-1-5-14.

14. Сампір О. Удосконалена методика оцінювання системи відновлення озброєння та військової техніки окремої механізованої бригади. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*. Vol. 11, No. 5. DOI: 10.33445/sds.2021.11.5.16.
15. Старцев В.В., Третяк В.Ф., Бровко М.Б., Джигірей В.О., Коломійцев О.В. Підходи щодо підтримки рішення на виконання заходів з відновлення озброєння та військової техніки в системі логістичного забезпечення Повітряних Сил Збройних Сил України. *Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2022. Вип. 1(11). – С. 116–126.
16. Старцев В., Мусієнко О., Гурін О., Просяник В., Коломійцев О. Методики оцінювання ефективності відновлення озброєння та військової техніки Повітряних Сил Збройних Сил України. *Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2022. № 2(2). – С. 134–144. DOI: 10.37701/dndivsovt.12.2022.14.
17. Старцев В.В., Третяк В.Ф., Міхальова Л.В., Коломійцев О.В., Борщ В.В., Олійник Р.М. Основні положення методики оцінювання можливостей відновлення озброєння та військової техніки Повітряних Сил Збройних Сил України, пошкоджених під час ведення бойових дій. *Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2022. Вип. 3(13). – С.110–120. DOI: 10.37701/dndivsovt.13.2022.12.
18. Вентцель Е.С. Исследование операций. *Сов. радио*, 1972. – 552 с.
19. Haddad W.M., Chellaboina V. Nonlinear Dynamical Systems and Control: A Lyapunov-Based Approach. *Princeton : Princeton University Press*, 2006. – 682 p.
20. Солнишкіна І.В. Теорія масового обслуговування: навчальний посібник. Київ : Нац. авіа. університет, 2005. 80 с.
21. Коваленко І.М., Мельник В.І. Теорія ймовірностей та теорія масового обслуговування : підручник. Київ : Видавничий дім "Слово", 2010. – 432 с.
22. Стеценко І.В. Моделювання систем : навч. посіб. М-во освіти і науки України, Черк. держ. технол. ун-т. Черкаси: видавництво "Маклаут", 2011. – 501с.
23. Коваленко І.М., Дубровський С.В. Системи масового обслуговування та їх застосування. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2012. – 212 с.
24. Литвинов А.Л. Теорія систем масового обслуговування: навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. – 141 с.
25. Челобітченко О.О. Методика управління експлуатацією авіаційної техніки в міжнародних миротворчих операціях за критерієм мінімуму ремонтно-експлуатаційних витрат: дис. канд. техн. наук : 20.02.14. Київ, 2005. – 216 с.
26. Наказ Міністерства оборони України від 05.07.2016 № 343 "Про затвердження Правил інженерно-авіаційного забезпечення державної авіації України" (зі змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1101-16#Text> (дата звернення 01.10.2025).

Надійшла до редколегії 20.10.2025

Схвалена до друку 20.11.2025

Відомості про авторів:

Мавренков Олексій Єфремович

доктор технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6578-4833>

Улізько Вячеслав Іванович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4553-7752>

Information about the authors:

Mavrenkov Oleksii

Doctor of Technical Sciences
Senior Researcher
Leading Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6578-4833>

Ulizko Viacheslav

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4553-7752>

FORMALIZATION OF THE PROCESS OF RESTORATION OF AIRCRAFT EQUIPMENT DURING COMBAT OPERATIONS BASED ON MATHEMATICAL MODELING METHODS

O. Mavrenkov, V. Ulizko

The article presents the results of research on the use of mathematical modelling methods for the process of restoration (repair) of aircraft as a basis for formulating and solving the problem of optimal control of that restoration process during combat operations. The efficiency of the aircraft restoration system is assessed by indicators of serviceability and combat readiness of tactical combat aircraft, as well as by the specific costs of their restoration. To describe the process of technical support for aviation, the mathematical apparatus of queuing theory with discontinuous impulsive functions of arrival intensities and differential expressions of the “mean-dynamics” method is used. Each aircraft in a squadron is considered to be in one of the following mutually exclusive states: serviceable (operational) but not combat-ready; serviceable and combat-ready; unserviceable and requiring repair by the aviation brigade’s technical support forces; and unserviceable and requiring repair by an aviation repair enterprise. The article provides examples demonstrating the performance of the developed mathematical model depending on the duration and periodicity of air battles, as well as the intensity of aircraft restoration within a tactical aviation group (illustrated by an aviation squadron). It is concluded that the presented mathematical model of the aircraft restoration process not only lays the foundation for solving the optimal-control problem taking into account serviceability, combat readiness and cost criteria, but also contributes to the advancement of military science by providing a theoretical basis for practical decisions in real combat conditions.

Keywords: aircraft equipment, aircraft, logistic support, technical support, restoration, mathematical model, queuing theory, mean dynamics method.