

УДК 621.829.037

О.Г. Приймаков, Р.М. Джус

НАДІЙНІСТЬ І РЕСУРС АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ

Запропонована методологію розрахунку надійності і ресурсу авіаційної наземної техніки (АНТ). Розглянуто питання забезпечення надійності за зносом, розрахунку й обґрунтування показників ресурсу АНТ.

Ключові слова: надійність авіаційної наземної техніки, ресурс авіаційної наземної техніки, залишковий ресурс, нормальний розподіл (Гауса), щільність розподілу, імовірність безвідмовної роботи.

Постановка завдання та аналіз літератури

Підвищення надійності і довговічності бойової авіаційної техніки, включаючи авіаційну наземну техніку, – одна із складових сучасної військової Доктрини Збройних Сил України. Виконання цього військового науково-технічного завдання можливе лише за наявності науково обґрунтованої розрахункової бази та методології її використання.

Аналіз [1 – 4] показує, що дотепер не створена єдина методологія розрахунку надійності та ресурсу АНТ, виходячи з показників її зносостійкості.

На підставі параметрів потоків відмовлень розраховуються такі показники надійності: імовірність безвідмовної роботи $P(L)$, напрацювання на відмовлення $t_{\text{від}}(L)$, змінні витрати на підтримку агрегатів у працездатному стані, параметри ресурсу до капітального і між капітальними ремонтами і комплексні показники (зокрема, коефіцієнт технічної готовності).

Мета статті – створення методології розрахунку надійності та ресурсу АНТ, спираючись на прогнозовані показники зносостійкості.

Основний матеріал

1. Імовірність безвідмовної роботи та наробітку на відмовлення. Для відновлюваних об'єктів $P(L)$ визначається за формулою

$$P(L) = \exp \left[- \int_0^L \omega_a(L) dL \right], \quad (1)$$

де $\omega_a(L)$ – відкоректований параметр потоку відмовлень агрегату.

Відомо [17], що підсумовування достатньо великої кількості випадкових потоків за певних умов призводить до пуассонівського потоку, при якому проміжки часу між двома сусідніми відмовами під-

лягають експонентному розподілу. Оскільки $\omega_a(L)$ залежить від пробігу, то лише для окремих інтервалів ΔL_t можна прийняти $\omega_a(\Delta L_t) = \omega_{at} = \text{const}$. Тоді імовірність безвідмовної роботи агрегату на інтервалі

$$P_t(L) = \exp(\omega_{at}), \quad (2)$$

а середній напрацювання на відмову

$$I_{\text{віді}} = \omega_{at}^{-1}. \quad (3)$$

Змінні витрати на поточний ремонт агрегату включають витрати на запасні частини, трудові витрати та матеріали можуть бути записані у вигляді питомих (диференціальних) $C_{\text{д}}(L)$ або сумарних $C_{\Sigma}(L)$ витрат:

$$C_{\text{ді}}(L) = \bar{\alpha} K \sum_{j=1}^M \omega_{ji}(L) C_j; \quad (4)$$

$$C_{\Sigma}(L) = \sum_{i=1}^N C_{\text{ді}}(L) \Delta L, \quad (5)$$

де $\omega_{ji}(L)$ – відкорельований з урахуванням стратегії заміни і кореляції параметр потоку відмовлень j -ї деталі на i -му інтервалі пробігу;

C_j – оптова ціна j -ї деталі;

M – кількість деталей, що лімітують надійність агрегату;

$\bar{\alpha}$ – коефіцієнт (див. [1]);

K – коефіцієнт, що враховує співвідношення між витратами на запасні частини й інші витрати при поточному ремонті (трудова витрати і матеріали) [2, 3].

З метою прогнозування коефіцієнтів K були виконані розрахунки для вантажних автомобілів з урахуванням року початку випуску T та загальної маси Q (табл. 1).

**Коефіцієнти обліку складових витрат при поточному ремонті К
(для вантажних бортових автомобілів АНТ)**

Залежність	Рівняння	σ_K	η
K = f(Q)	K = 3,74 – 0,078Q	0,43	0,76
	K = 1,81 + 9,520/Q	0,37	0,83
K = f(t)	K = 3,92 – 0,053t	0,58	0,48
	K = 1,51 + 25,26/t	0,49	0,66
K = f(Q, t)	K = 3,97 – 0,0144t – 0,071Q	0,375	–

Примітка: Q – загальна маса автомобіля, t; t = T – 1944; T – рік випуску моделі автомобіля; σ_K – середнє квадратичне відхилення коефіцієнта, K; η – кореляційне відношення.

Вихідні дані для розрахунків, що включають витрати на запасні частини, трудові витрати і матеріали, взяті з довідкової літератури. З аналізу отриманих залежностей випливає, що спостерігається стійка тенденція зниження коефіцієнтів K залежно від T і Q. Відмітимо, що нормативні дані для складових витрат приводяться для автомобіля в цілому, тому при прогнозах розрахунках робиться допущення про можливість використання отриманих залежностей для окремих агрегатів. В міру нагромадження інформації для нових автомобілів складові витрати повинні уточнюватися.

Оптові ціни деталей для проєктованого автомобіля, які входять у формулу (4), визначаються в такий спосіб: за аналогією з раніше випущеними моделями, за результатами експертного опитування або на основі калькуляції собівартості та переходу до оптової ціни.

Уточнимо поняття питомих і диференційних витрат, обумовлених у результаті розподілення ціни (або іншого показника) на пробіг автомобіля і мають розмірність грн./тис. км. Якщо при розрахунках розподілення здійснюється на інтервалі пробігу автомобіля ΔL , то такі витрати варто вважати диференційними (або вони можуть бути отримані на основі диференційних залежностей, наприклад, за допомогою параметра потоку відмовлень). Якщо розподілення здійснюється на пробіг автомобіля L, то витрати будемо відносити до питомих. Варто відмітити, що питомі і диференційні витрати тотожні тільки у випадку нелінійних залежностей наростання показника, тому що операції розподілення і диференціювання дають однаковий результат.

2. Показники ресурсу агрегату. Згідно з [4] агрегат направляється на капітальний ремонт, якщо базова й основна деталі мають потребу в ремонті, що вимагає повного розбирання агрегату, працездатність не може бути відновлена або її відновлення шляхом проведення поточних ремонтів економічно недоцільне. Отже, критерій постановки агрегату на капітальний ремонт є техніко-економічним, а випад-

кова величина ресурсу до капітального ремонту може бути представлена у вигляді

$$R = \min(R_T, R_e), \quad (6)$$

де R_T , R_e – випадкові величини ресурсів агрегату за технічним й економічним критеріями.

Функція розподілу ресурсу агрегату до капітального ремонту $F_a(R)$, за допомогою якої визначаються середній і гамма-процентний ресурси, розраховується за формулами для мінімальних значень на основі функцій розподілення ресурсів за технічним $F_T(R)$ та економічним $F_e(R)$ критеріями:

$$F_a(R) = 1 - [1 - F_T(R)][1 - F_e(R)]. \quad (7)$$

Ресурс агрегату за технічним критерієм. Для здійснення його розрахунковим шляхом необхідно побудувати логічну модель ресурсу базової деталі, що включає виявлення основних перетинів, наприклад, з використанням дефектних відомостей на капітальний ремонт аналогічних конструкцій, а також визначення видів і параметрів руйнівних процесів і граничних станів. Однак, незважаючи на теоретично ясну постановку завдання, у даний час відсутні не тільки методики прогнозування ресурсів базових деталей за технічним критерієм, але вони не виконуються і для існуючих конструкцій. Тому оцінювання, як правило, здійснюється за результатами випробувань. Це пояснюється багатьма причинами, головні з яких такі [5 – 9]:

відсутність точних критеріїв граничних станів (крім явних випадків руйнування у вигляді тріщин, пробоїв, сколів);

труднощі обліку впливу зміни розмірів (геометрії) перетинів базових деталей (зношення, деформації, порушення співвісності отворів і т.ін.) на навантажувальні режими і граничні стани інших деталей агрегату, тобто на їх ресурси;

необхідність визначення великої кількості вихідних даних для описання руйнівних процесів, що протікають у перетинах базових деталей, їх взаємозв'язок (корельюємість);

одночасність для розтягуючих (стискаючих) навантажень моментів кручення згину, що представляють нестационарні випадкові процеси, а також залишкові напруги і т.п.

Розрахунок показників надійності агрегату АНТ. У більшості випадків найбільш ефективним шляхом вирішення завдань визначення показників надійності агрегатів є моделювання на ЕОМ із застосуванням методу статистичних випробувань (Монте-Карло). Багаторазове «програвання» моделей дає випадкові послідовності напрацювань, що обробляються потім звичайними статистичними методами.

На рис. 1 наведений один з варіантів схеми моделювання ресурсу R складових деталей агрегату до

першого відмовлення. Обробка алгоритму здійснюється в такий спосіб. За допомогою генератора випадкових чисел (ГВЧ) моделюється вектор випадкових чисел (ВЧ) $\{\xi_j\}^N$ розмірністю N. Оскільки модель довговічності зазвичай включає незалежні і залежні випадкові величини (ВВ), то вектор $\{\xi_j\}^N$ поділяється на два вектори розмірністю m та p для моделювання m одномірних та p багатомірних ВВ. Результатом моделювання є вектор $\{\bar{Z}_j\}^N$ випадкових аргументів моделі довговічності L i-ї деталі системи. Крім вектора $\{\bar{Z}_j\}^N$ модель довговічності включає також вектор не випадкових аргументів

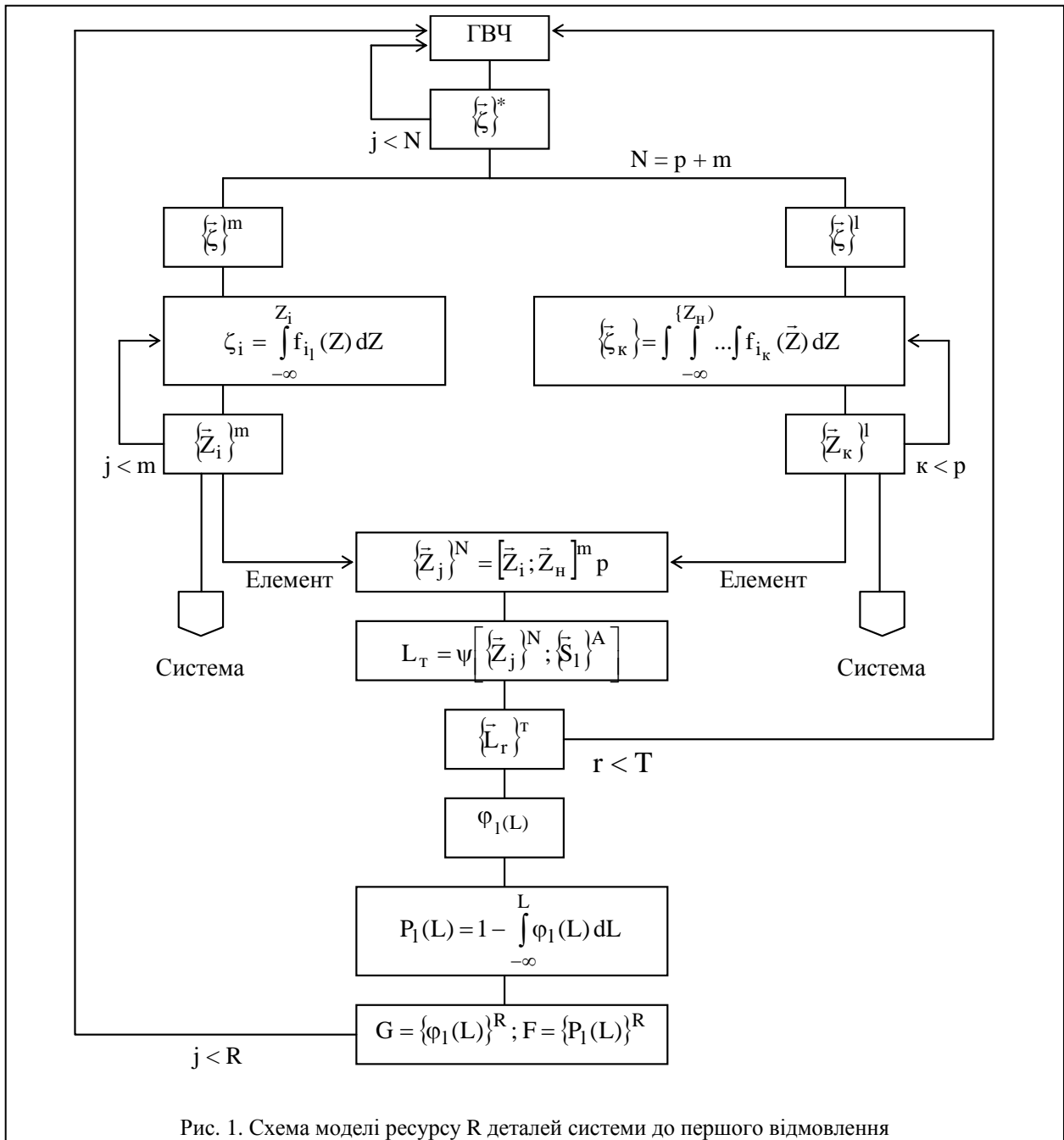


Рис. 1. Схема моделі ресурсу R деталей системи до першого відмовлення

$\{\bar{S}_1\}^A$. Повторюючи розрахунок T раз, отримаємо випадкову послідовність напрацювань $\{\bar{L}_r\}^T$.

Розрахунок виконується для R елементів агрегату, причому для кожної l -ї деталі задається своя модель довговічності $\psi_l[\{\bar{Z}_j\}^N, \{\bar{S}_1\}^A]$ і свої розподілення випадкових аргументів вектора $\{\bar{Z}_j\}^N$. Результатом розрахунку й обробки є функціонали G і F , що визначають щільність розподілу ресурсу $\varphi_l(L)$ та імовірність безвідмовної роботи $P_l(L)$ складового агрегату R елементів.

При моделюванні показників надійності відновлюваних систем наступні відмовлення знаходяться за рекурентною формулою

$$L_{j+1}^1 = L_j^1 + L_{j,j+1}^1, \quad (8)$$

де $L_{j,j+1}^1$ – напрацювання l -ї деталі між j та $j + 1$ відмовленнями.

Для моделювання напрацювань між відмовленнями можна скористатися кореляційними залежностями або ввести функції «старіння», що звичайно задаються у вигляді вагових коефіцієнтів α_j^1 до напрацювань до першого відмовлення $L_{j,j+1}^1 = \alpha_j^1 L_{j=1}^1$. У результаті моделювання n реалізацій перших і наступних відмовлень l -ї деталі розглянутої системи (агрегату) одержимо матрицю напрацювань:

$$A_1 = \begin{pmatrix} L_{11}^1 & L_{12}^1 & \dots & L_{1m}^1 \\ L_{21}^1 & L_{22}^1 & \dots & L_{2m}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1}^1 & L_{n2}^1 & \dots & L_{nm}^1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

де L_{il}^1 – i -а реалізація напрацювання l -ї деталі до j -го відмовлення;

m – кількість відмовлень.

Виконавши розрахунки напрацювань для всіх деталей і представивши їх у вигляді матриць (9), знайдемо безліч напрацювань деталей агрегату.

Вибравши із сукупності напрацювань мінімальні значення, отримаємо матрицю напрацювань агрегату на відмовлення:

$$\{L_{ij}\} = \min\{L_{ijl}\}, \quad l = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

де N – число елементів, що входять в агрегат;

L_{ij} – i -а реалізація напрацювання агрегату до j -го відмовлення.

З матриці (10) після статистичної обробки можна одержати функції щільності розподілення напрацювань та імовірності безвідмовної роботи агрегату до першого і наступного відмовлень. Потік відмовлень

агрегату знаходиться шляхом підсумовування потоків відмовлень деталей, обумовлених матрицею (9)

$$h_1(L) = \sum_{j=1}^m \varphi_{lj}(L) \Delta L \cong \omega_1 \Delta L, \quad (11)$$

де $\varphi_{lj}(L)$ – функція щільності розподілення ресурсу l -ї деталі до j -го відмовлення;

L – інтервал пробігу.

Розглянемо моделювання характеристик надійності редуктора ведучого моста автомобіля з колісною формулою 6×4 і знайдемо його оптимальний за економічним критерієм ресурс, скориставшись загальною схемою рішення подібних задач (рис. 2).

Ведучий міст можна віднести до пристроїв з послідовним з'єднанням невідновлюваних елементів, замінних у випадку відмовлення на нові. Характерною рисою взаємодії елементів автомобільних трансмісій, у тому числі ведучого моста, є заміна деталей, контактуючих із тими, що відмовили (наприклад, пари шестірень). Надійність незв'язаних деталей можна вважати незалежною від надійності інших елементів. До деталей, що лімітують надійність ведучого моста відносяться: шестірни головної передачі, підшипники, півосі та сальники. За винятком сальників усі перераховані елементи піддаються руйнуванню і для розрахунку їх ресурсу можна скористатися формулою з [1]. Ресурс сальників вважаємо відомим апіорі, встановленим у результаті випробувань дослідної партії агрегатів, аналогічно проєктованим за призначенням. Припустимо, що їх ресурс має логарифмічно нормальний розподіл з параметрами $\bar{x}_n = 4,675$, $\sigma_n = 0,804$ [4, 6].

Узагальнений навантажувальний режим редуктора у вигляді розподілень ординат і амплітуд крутячого моменту на півосі та середній інтенсивності навантаження наведений на рис. 3.

Розрахунок коефіцієнтів пропорційності k_c і моделювання ресурсу деталей здійснювалися на ЕОМ. Вихідні дані для моделювання напрацювань до першого відмовлення перерахованих деталей представлені в табл. 2. Для кожної з деталей генерувалося по 500 випадкових напрацювань, з яких формувалися «емпіричні» розподілення ресурсу у вигляді гістограм.

З урахуванням у ведучих мостах автомобіля форми 6×4 декількох однотипних елементів (чотири півосі, дві головні передачі і т.п.) визначалося розподілення мінімальних членів вибірок відповідно до моделі слабшої ланки [1]:

$$L_j = \min\{L_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots, 500,$$

де M – кількість однотипних елементів у конструкції.

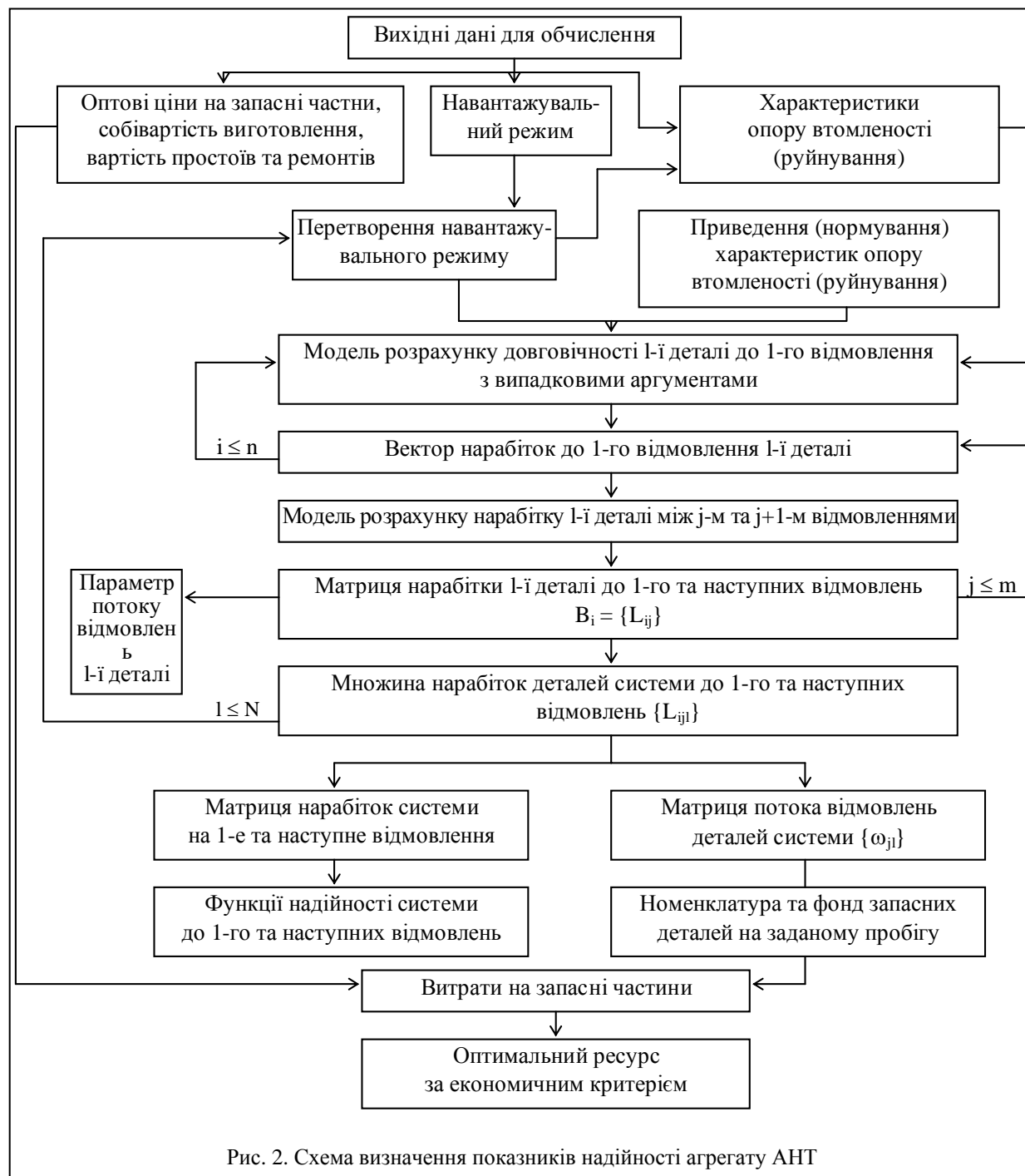


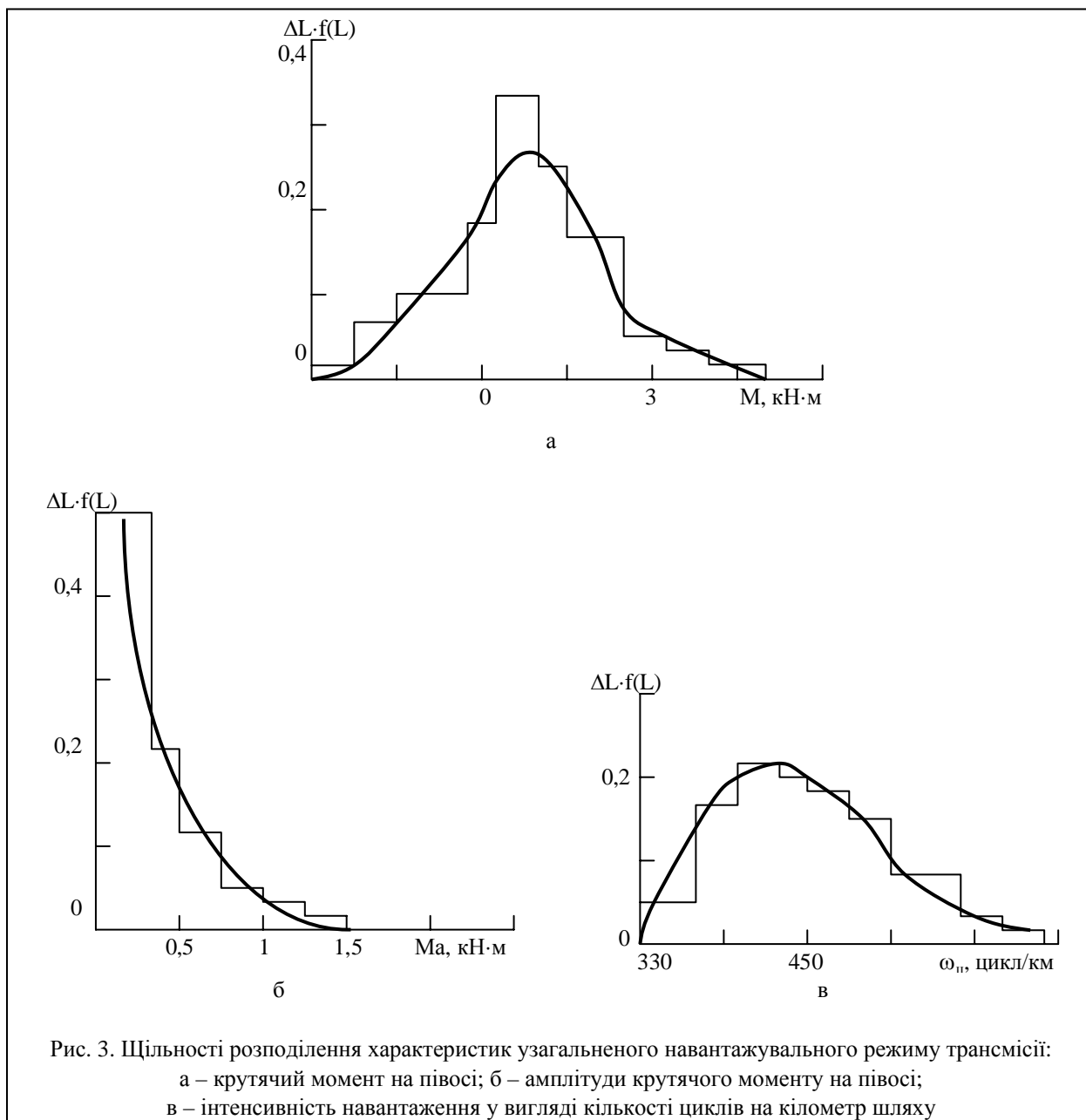
Рис. 2. Схема визначення показників надійності агрегату АНТ

Це ж правило застосовувалося при розрахунку шестірень на вигин і за контактними напругами ($M = 2$). Напрацювання між відмовленнями моделювався за законом, отриманим із закону розподілення ресурсу до першого відмовлення з урахуванням виправлення $\alpha = 0,65$ на середнє значення. Наступні відмовлення визначалися за формулою (8). Обробка отриманих даних показала, що ресурс шестірень має нормальне, а півосі та підшипників – логарифмічно нормальне розподілення. Змодельований за правилом (10) ресурс всього агрегату має також логариф-

мічно нормальний закон з параметрами $\bar{x}_d = 4,587$, $\sigma_d = 0,73$ (табл. 2).

3. Забезпечення надійності за зносом. Під забезпеченням надійності за зносом варто розуміти визначення необхідної зносостійкості елементів і розмірів зносостійкого покриття, при яких протягом заданого ресурсу з заданою імовірністю не буде досягнутий граничний знос.

На даний час забезпечення надійності елементів за зносом носить в основному конструкційний характер. Воно зводиться до застосування нових зно-



состійких конструкційних матеріалів і поліпшених мастильних матеріалів, забезпечення конструкційної наступності, виключення зовнішнього тертя та поліпшення умов тертя, забезпечення рівностійкості та оптимальної форми елементів, компенсації зносу, резервованої зносостійкості, контролю за зносом. Розрахунки, як правило, не виконуються. У зв'язку з цим проектування машини із заздалегідь відомим міжремонтним циклом утруднено.

Незважаючи на орієнтовний характер розрахунку, все ж доцільно оцінювати необхідну зносостійкість елементів за заданою імовірністю безвідмовної роботи і заданим ресурсом.

За заданою імовірністю $P(t)$ і відомим коефіцієнтом варіації v_t знаходимо по номограмі з [1] відпові-

дне значення $\lambda t = \lambda t[P, r]$. Тоді

$$\lambda = \lambda t[P, r] / t = 1 / (\bar{t} v_t), \quad (12)$$

де t – заданий ресурс.

Звідси середній ресурс дорівнює

$$\bar{t} = t / (\lambda t[P, r] v_t) \quad (13)$$

при необхідному запасі зносостійкості

$$k_H = \tan / (h_{пр} - h_0). \quad (14)$$

Маючи дані про зовнішні або проміжні середовища, знаходимо середню відносну зносостійкість:

$$\epsilon_H = \bar{k}_H \bar{k}_a \bar{k}_p \bar{k}_d, \quad (15)$$

а за відносною зносостійкістю – необхідну твердість

Середні ресурси ведучого моста і деталей, що лімітують його надійність

Деталь	\bar{L} , тис. км	σ_L , тис. км
Конічний підшипник одинарний	764/495*	133
Конічний підшипник здвоєний	1175/765	228
Піввісь	472/308	205
Циліндрична шестірня ведуча	260/169	42
Сальник редуктора	146/95	139
Ведучий міст у зборі	128**	108**

* У чисельнику – ресурси до першого відмовлення, у знаменнику – між відмовленнями.

** Середнє напрацювання до відмовлення.

тертьової поверхні. При цьому рівняння (15) розв'язується методом ітерацій.

При малих коефіцієнтах варіацій ресурсу ($\sim 0,32$) для визначення необхідної зносостійкості як вихідне рівняння варто використовувати рівняння

$$P(t) = \frac{\Phi(\gamma) + 1}{2}, \quad (16)$$

де

$$\gamma = (t - \bar{t}) / \sigma_t. \quad (17)$$

Тоді для даної імовірності за таблицею функцій Лапласа визначаємо характеристику $\gamma(P)$:

$$(\bar{t} - t) / v_t \bar{t} = \gamma(P). \quad (18)$$

З цього рівняння випливає, що середній ресурс

$$\bar{t} = t / [1 - \gamma(t)v_t]. \quad (19)$$

Потім за формулами (14) і (15) знаходимо необхідну зносостійкість.

При використанні статистичних параметрів швидкості зношування середній ресурс визначаємо за формулою

$$\bar{t} = t_i [\gamma(P)v_i + 1].$$

Подальший розрахунок ведемо за викладеною методикою. Для підвищення точності результатів розрахунку варто перевіряти експериментально й уточнювати вихідні розрахункові дані.

Висновки

Приймаючи до уваги вищевикладене, можна зробити такі висновки:

1. Ресурс агрегатів АНТ найбільш раціонально призначати за технічним критерієм.
2. Найбільш ефективним є розрахунок показників надійності АНТ із застосуванням методу статистичних випробувань (метод Манте-Карло).
3. Необхідну зносостійкість елементів конструкцій АНТ варто оцінювати за заданою імовірністю безвідмовної роботи і заданим ресурсом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крагельский И.В., Непомнящий Е.Ф. Об усталостном механизме износа при упругом контакте // Изв. АН СССР, ОТН. – М., 1963. – Вып. 5. – С. 190 – 192.
2. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования. – М.: Изд. стандартов, 1997. – 60 с.
3. Костецкий Б.И., Колесниченко Н.В. Качество поверхности и трение в машинах. – К.: Техника, 1996. – 215 с.
4. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В., Лисяк О.О. Прогнозування надійності, довговічності та витривалості авіаційних матеріалів // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції „АВІА-2003”. – К.: НАУ, 2003. – Т. 3. – С. 32.39 – 32.42.
5. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В. Прогнозування витривалості авіаційних матеріалів // Вестник науки и техники. – 2002. – Вып. 4. – С. 5 – 11.
6. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В. Прискорене визначення межі витривалості авіаційних матеріалів // Вестник науки и техники. – 2003. – Вып. 1. – С. 4 – 8.
7. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В., Лисяк О.О. Циклічна довговічність деталей авіаційної техніки // Открытые информационные компьютерные интегрированные технологии. – 2003. – Вып. 18. – С. 147 – 153.
8. Приймаков О.Г., Приймаков Г.О., Бобровицький О.В. Працездатність деталей авіаційної техніки з точки зору термодинаміки // Вестник науки и техники. – 2003. – Вып. 4. – С. 21 – 28.
9. Приймаков О.Г., Приймаков Г.О., Чотій Л.Ю. Розрахунок на повзучість деталей авіаційної техніки // Вестник науки и техники. – 2003. – Вып. 4. – С. 28 – 34.

Надійшла 27.04.2006

Рецензент: д-р техн. наук професор В.А. Войтов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба.