УДК 621.891.031

Бобровицький О.В.

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ПО ЇХ ВИТРИВАЛОСТІ

Підвищення витривалості, надійності та довговічності авіаційної техніки (АТ) – важлива складова сучасної військової Доктрини України, а також важлива народногосподарська проблема.

Наявність багатьох критеріїв працездатності авіаційних матеріалів (АМ), суб'єктивізм при їх виборі викликають початкову потребу в створенні інтегральних критеріїв працездатності, що поєднувати кілька окремих критеріїв, зокрема, поєднання таких критеріїв, як витривалість, надійність та довговічність.

Отже, метою даної статті є розробка методології оцінювання надійності авіаційних конструкцій та їх окремих елементів через параметри протидії втоми АМ – їх витривалості.

Велика кількість наукових публікацій, що містять іноді взаємовиключні результати, спонукали автора до розробки саме інтегрального критерію працездатності АМ на основі системно-логістичного підходу.

Такий підхід має забезпечити об'єктивність, швидкодію та комплектність при оцінюванні надійності літальних апаратів (ЛА) як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації.

В роботі [1] описано математичну модель процесу функціонування інтегрального критерію працездатності АМ, а в роботі [2] – програмне забезпечення для реалізації цієї моделі.

Отже, дана публікація дозволяє провести експрес-діагноз надійності елементів АТ з можливістю подальшого уточнення за допомогою [1, 2].

Нехай на елемент АТ діє гармонічне, симетричне навантаження, задані розподілення границь витривалості деталі $f\left(\sigma_{-1\ddot{A}}\right)$ і амплітуда напруги σ_a, що виникає під впливом гармонічного навантаження. Потрібно визначити (побудувати) функцію розподілення ресурсу $f\left(t\right)$ цього елементу.

Слід обрахувати, що коли амплітуда напруги в елементі менше границі витривалості, то руйнування елемента не відбудеться і його ресурс $f\left(t\right)=\infty$. Коли ж амплітуда напруги перевищує границю витривалості, то матиме місце втомне руйнування елемента на N-му циклі зміни напруги. Число циклів зміни напруги в залежності від співвідношення $\dfrac{\sigma_a}{\sigma_{-1\ddot{A}}}$ лежить в межах від 10^3 до 10^7 [1, 3-5].

Слід також ураховувати, що границя витривалості елемента являється випадковою величиною і підкоряється закону нормального розподілення або закону розподілення Вейбулла. З точки зору зручності розрахунків надійності найбільш частіше використовується закон нормального розподілення [6, 7]

$$f\left(\sigma_{-1\ddot{A}}\right)=\frac{\psi}{\sqrt{2\pi D_{\sigma(-1\ddot{A})}}}exp\left[-\frac{\left(\sigma_{-1\ddot{A}}-\bar{\sigma}_{-1\ddot{A}}\right)^2}{2D_{\sigma(-1\ddot{A})}}\right]. \tag{1}$$

Розсіювання границі витривалості елемента викликає розсіювання ресурсу. На рис. 1 показана повна імовірносна крива втомленості. Розглянемо, як таке розсіювання ресурсу викликає розсіювання границі витривалості. Можливі обидва випадки.

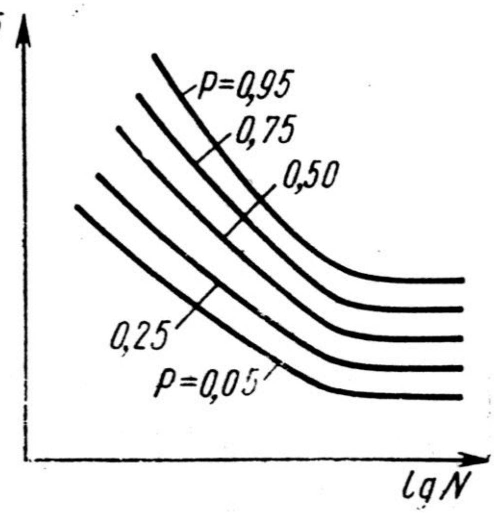

Рисунок 1 – Імовірносна крива втомленості

I – амплітуда напруги $\sigma_{\grave{a}}$ (рис.2) перехрещує усі сукупності гілок ліворуч або, інакше лежить вище максимальної можливості границі витривалості. У цьому випадку повністю обмеженої довговічності вся сукупність елементів вийде зі строю. Диференційна і інтегральна криві розподілення ресурсу елемента показані на рис. 2.

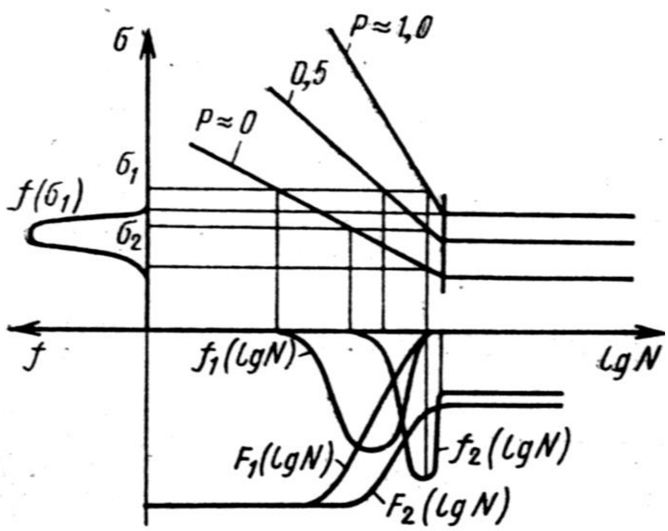

Рисунок 2 – Схема до визначення розподілення ресурсу

II – амплітуда перехрещує частину сукупності гілок ліворуч кривої втомленості, а потім проходить нижче не перехрещених гілок праворуч паралельно їм. У цьому випадку від втомленості зруйнується лише та частина елементів, якій відповідає частина перехрещених гілок повної імовірності діаграми втомленості. Диференційна і інтегральна криві розподілення ресурсу показані на рис. 2. Ці криві не досягають осі абсцис і йдуть на деякій відстані паралельно їй.

Розглянемо побудову функції розподілення ресурсу і функції розподілення безвідмовної роботи в області повністю обмеженої довговічності. Для цієї області справедливий вираз [8]

$$\sigma_{-1\ddot{A}} = \sigma_a \sqrt[m]{N / N_0} = \varphi(N), \tag{2}$$

де N – число циклів до руйнування.

При частоті $\bar{n}$ зміни напруги число циклів N до руйнування пов’язане з ресурсом співвідношення

$$t = N / \bar{n}. \tag{3}$$

Знайдемо закон розподілення числа циклів до руйнування N по формулі $f(N) = f\left[\varphi(N)\varphi'(N)\right]$. Підставляючи у цю формулу залежність (2) і її похідну, отримаємо

$$f(N) = \frac{\sqrt[m]{N / N_0}}{\sqrt{2\pi D_{\sigma(-1\ddot{A})}}} exp\left[-\frac{\left(\sigma_0 \sqrt[m]{N / N_0} - \bar{\sigma}_{-1\ddot{A}}\right)^2}{2D_{\sigma(-1\ddot{A})}}\right].$$

Уводячи коефіцієнт запасу по втомленості $k = \bar{\sigma}_{-1} / \sigma_a$, а також враховуючи співвідношення

$$\gamma_{m\sigma(-1\ddot{A})} = \sqrt{D_{\sigma(-1\ddot{A})}} / \bar{\sigma}_{-1\ddot{A}}$$

представимо $f(N)$ у вигляді

$$f(N) = \frac{\sqrt[m]{N / N_0}}{\sqrt{2\pi \nu_{m\sigma(-1\ddot{A})} k_m N}} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sqrt[m]{N / N_0}}{k\gamma_{m\sigma(-1\ddot{A})}} - \frac{1}{\gamma_{\sigma(-1\ddot{A})}}\right)^2\right].$$

Імовірність безвідмовної роботи

$$Ð = 1 - \int_0^N f(N)\,dN.$$

Якщо ввести нову змінну

$$\gamma = \frac{\sqrt[m]{N / N_0} - k}{k\gamma_{\sigma(-1\ddot{A})}}, \tag{4}$$

похідна якої дорівнює

$$d\gamma = \frac{\sqrt[m]{N / N_0}}{k\gamma_{\sigma(-1Ä)} N_m} dN ,$$

тоді інтеграл обчислюється за допомогою функції Лапласа. Імовірність безвідмовної роботи

$$Ð = 0{,}5\left[1 + \hat{O}\left(\gamma\right)\right]; \tag{5}$$

імовірність відмови

$$Q = 0{,}5\left[1 - \hat{O}\left(\gamma\right)\right]. \tag{6}$$

Коефіцієнт запасу при повністю обмеженій довговічності завжди менше одиниці

$$k = \frac{1}{1 + 3_{\sigma(-1Ä)}} \leq 1 .$$

Звідси можна знайти залежність числа циклів до руйнування від характеристики безпеки, що пов'язана з імовірністю безвідмовної роботи або руйнування (відмова)

$$N = N_0 \left[\left(Y^{\gamma}{}_{\sigma(-1Ä)} + 1 \right) k \right]^m . \tag{7}$$

Задаючись імовірностями *P* або *Q*, слід визначити характеристику безпеки γ і по формулі (7) визначати число циклів до руйнування, яке відповідає імовірностям *P* або *Q*.

По отриманих даних можна побудувати криві *P(N)* і *Q(N)* або *P(t)* і *Q(t)*. На рис. 3 показані ці криві.

Для розрахунків, крім значень N_0 і σ_a, потрібно знати коефіцієнт варіації і середнє значення границі витривалості деталі.

Коефіцієнт варіації границі витривалості деталі визначається по формулі

$$\gamma_{\sigma(-1Д)} = \sqrt{\gamma^2_{\sigma \max} + \gamma^2_{\sigma(-1)} + \gamma^2_{\alpha}} , \tag{8}$$

де $\gamma_{\sigma max}$ – коефіцієнт варіації границь витривалості деталей, виготовлених із металу однієї плавки; $\gamma_{\sigma(-1)}$ – коефіцієнт варіації середніх границь витривалості зразків із металу однієї марки, але різних плавок; γ_{α} – коефіцієнт варіації розмірів деталей (особливо в зонах концентраторів напруги).

Експериментально встановлено, [9, 10], що $\gamma_{\sigma max}$ = 0,03...0,07; $\gamma_{\sigma(-1)} \approx \gamma_{\sigma T} \approx \gamma_{\sigma B}$ = 0,05...0,10, тут $\gamma_{\sigma T}$, $\gamma_{\sigma B}$ – коефіцієнти варіації границі текучості і тимчасового опору.

Коефіцієнт варіації γ_α в значному ступені залежить від рівня технології і контролю виготовлення деталей і лежить в межах від 0,02 до 0,1. З обліком приведених даних можна визначити діапазон зміни коефіцієнта варіації границі витривалості деталі. Цей коефіцієнт змінюється в межах від 0,06 до 0,16. Для розрахунків можна приймати $\gamma_{\sigma(-1\text{Ä})} = 0{,}1$.

Границю витривалості деталі знаходять як співвідношення добутку границі витривалості сталі σ_{-1} масштабного коефіцієнта ε_k до ефективного коефіцієнта конструкції напруг $k_{\text{ýô}}$, тобто

$$\sigma_{-1\text{Ä}} = \sigma_{-1}\varepsilon_k / k_{\text{ýô}} . \qquad (9)$$

Ефективний коефіцієнт концентрації визначають експериментально – порівнянням границь витривалості гладких зразків з границями витривалості зразків з концентраторами. Масштабний коефіцієнт визначають також експериментально. Він уявляє собою співвідношення границі витривалості σ_{-1} великого зразка до границі витривалості стандартного зразка. Цей коефіцієнт лежить в межах від 0,66 до 1,0.

Середню границю витривалості можна знайти по формулі для визначення границі витривалості деталі

$$\bar{\sigma}_{-1\text{Ä}} = \bar{\sigma}_{-1} / k_{\text{Ä}} .$$

Тут $k_{\text{Ä}}$ – коефіцієнт. який можна знайти по формулі, що запропонована В.П. Когаєвим [11]

$$k_{\text{Ä}} = \frac{k_{\text{ýô}}}{\varepsilon_\sigma} + \frac{1}{\beta} - 1 ,$$

де $k_{\text{ýô}}$ – ефективний коефіцієнт концентрації напруг; ε_σ – коефіцієнт впливу абсолютних розмірів; β – коефіцієнт, який характеризує вплив якості обробки на границю витривалості.

Для отримання параметрів функції розподілення ресурсу необхідно задатися законом його розподілення. Як закон розподілення ресурсу можна використовувати закон логарифмічно нормального розподілення. Прийнято записувати щільність логарифмічно нормального розподілення у вигляді

$$f(t) = \frac{\text{À}}{\sqrt{2\pi\, D_{lg\,N}}} exp\left[-\frac{(lg\,N - C)^2}{2D_{lg\,N}} \right], \qquad (10)$$

де C – математичне очікування величин $lg\,N$; $D_{lg\,N}$ – дисперсія $lg\,N$ (коефіцієнт варіації).

$$\frac{\sqrt{D_{lg\,N}}}{lg\,C} = 0{,}05...0{,}15;\ \text{A} = 0{,}4343.$$

При відсутності даних C і $D_{lg\,N}$ їх можна отримати по математичному очікуванню і дисперсії ресурсу. Математичне очікування $\overline{t}$ і D_i дисперсія ресурсу пов'язані з параметрами C і $D_{lg\,N}$ слідуючи ми співвідношеннями

$$\overline{N} = \overline{n}\overline{t} = exp\left(\frac{C}{A} + \frac{D_{lg\,N}}{2A^2}\right) \approx e^{\frac{C}{A}}, \tag{11}$$

$$\begin{gathered} D_N = \overline{n}^2 D_t = exp\left(2\frac{C}{A} + \frac{D_{lg\,N}}{A^2}\right)\left(exp\frac{D_{lg\,N}}{A^2} - 1\right) \approx \\ \approx exp\left(2\frac{C}{A}\right)\left(exp\frac{D_{lg\,N}}{A^2} - 1\right) = \overline{N}^2\left(exp\frac{D_{lg\,N}}{A^2} - 1\right). \end{gathered} \tag{12}$$

Використовуючи методи лінеаризації, з (2), отримаємо значення N і D_N

$$\overline{N} = \left(\frac{\overline{\sigma}_{-1Ä}}{\sigma_a}\right)^m N_0 = \left(\overline{\sigma}_{-1Ä}\right)^m \frac{N_0}{\sigma_a^m} = k^m N_0, \tag{13}$$

$$\begin{gathered} D_N = \left(\frac{\partial N}{\overline{\partial}\sigma_{-1Ä}}\right)^2 D_{\sigma(-1Ä)} = \left(\overline{m}\sigma_{-1Ä}^{m-1}\right)^2 D_{\sigma(-1Ä)}\left(\frac{N_0}{\sigma_a^m}\right)^2 = \\ = k^{2m}\left(m\nu_{\sigma(-1Ä)}N_0\right)^2. \end{gathered} \tag{14}$$

З сумісного рішення рівнянь (11) і (12) визначаємо C і $D_{lg\,N}$ як функції $\overline{N}$ і D_N

$$C = A\,ln\,k^m N_0;$$

$$D_{lg\,N} = A^2\,ln\left[1 + \left(m\nu_{\sigma(-1Ä)}\right)^2\right].$$

Знаючи параметри C і $D_{lg\,N}$, імовірність безвідмовної роботи зі зростанням числа циклів N підраховуємо по формулі

$$P(N) = 0{,}5\left[1 + \Phi(\nu)\right], \tag{15}$$

а імовірність відмови

$$Q(N) = 0{,}5\left[1 - \Phi(\nu)\right], \tag{16}$$

де

$$\nu = \frac{lg\,NC}{\sqrt{D_{lg\,N}}} = \frac{lg\,N - A\ln k^{m} N_{0}}{A\sqrt{ln\left[1+\left(m\nu_{\sigma\left(-1\ddot{A}\right)}\right)^{2}\right]}}. \tag{17}$$

З формули (17) отримаємо залежність між числом циклів до руйнування і характеристикою безпеки

$$N = 10^{c+\nu\sqrt{D_{lg\,N}}} = 10^{A\ln k^{m} N_{0}+\nu A\sqrt{ln\left[1+\left(m\nu_{\sigma\left(-1\ddot{A}\right)}\right)^{2}\right]}} \tag{18}$$

Задаючись імовірністю безвідмовної роботи або відмови, слід визначити характеристику безпеки, по ній відповідно число циклів до руйнування.

Проаналізуємо функції розподілення ресурсу в області частково обмеженої довговічності. Для побудови функцій імовірності безвідмовної роботи і відмови елемента можна використовувати ті ж залежності, але не на всьому інтервалі числа N, а до N_0, після якого довговічність становиться необмеженою, а імовірності безвідмовної роботи і відмови – постійними і відповідно рівними $P(N_0)$ або $Q(N_0)$.

На рис.4 показані функції зміни $P(N)$ і $Q(N)$ в області частково обмеженої довговічності.

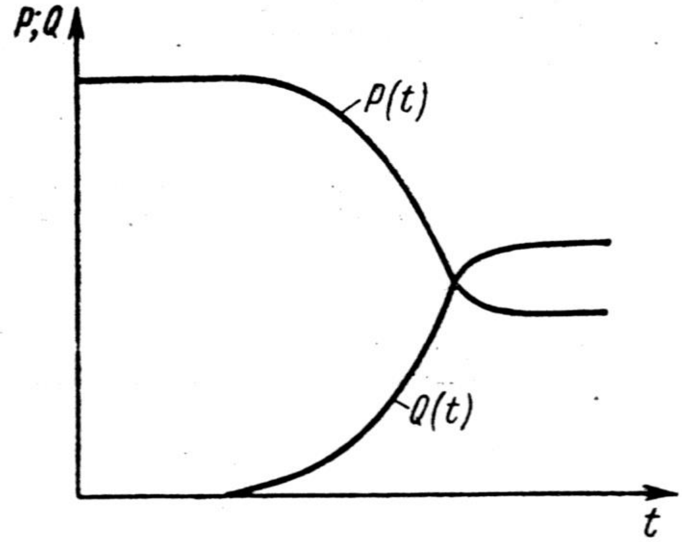

Рисунок 4 – Залежності P і Q від t в області частково обмеженої довговічності

В обох розглянутих випадках приймали, що σ_a являється детермінованою амплітудою (рис. 5, а). Разом з тим на елементи впливають в основному навантаження з випадковими амплітудами (рис. 5, б). Можуть також впливати блочні навантаження (рис. 5, в). До того ж ці навантаження можуть мати коефіцієнт асиметрії циклу, який не дорівнює одиниці.

У всіх цих випадках для побудови функцій розподілення ресурсу (імовірності безвідмовної роботи) необхідно визначити гармонійні детерміновані напруги з симетричним циклом, еквівалентні $\sigma_{ýêâ}$ по руйнуючій дії випадкової напруги, або використовувати їх при визначенні коефіцієнта запасу k замість σ_a.

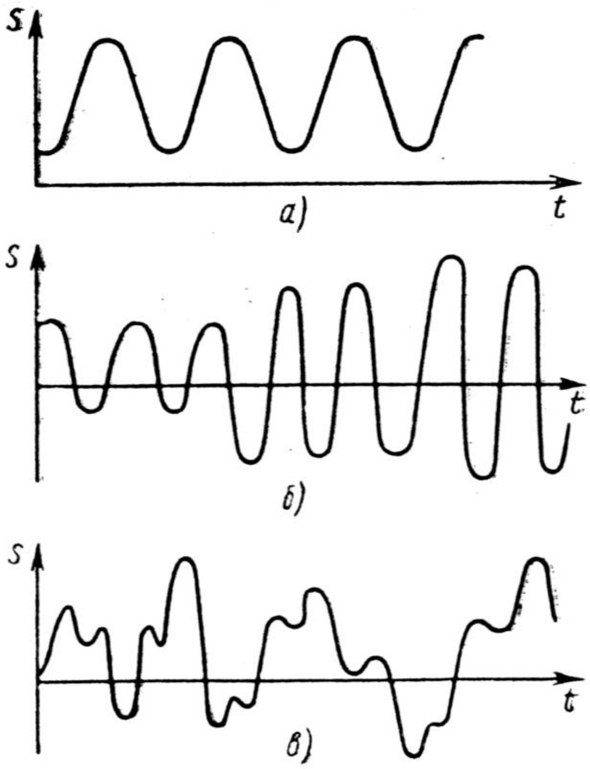

Рисунок 5 – Види навантажень:
а – з детермінованою амплітудою; б – блочні навантаження; в – з випадковою амплітудою

$$k = \bar{\sigma}_{-1Ä} \sqrt[m]{N / N_0} \,/\, \sigma_{ýêâ} . \qquad (19)$$

Якщо ЛА працюють в різноманітних експлуатаційних умовах під впливом випадкових навантажень, але статистичні характеристики напруги при цьому однакові, то розсіювання ресурсу визначається також тільки розсіюванням границь витривалості. Це пояснюється тим, що еквівалентні напруги для усіх машин однакові. Якщо машини працюють в різноманітних експлуатаційних умовах і еквівалентні напруги різноманітні, то розсіювання ресурсу залежить не тільки від розсіювання границі витривалості, але і від розсіювання еквівалентних напруг. При цьому коефіцієнт запасу являє собою відношення середніх значень границь витривалості і еквівалентної напруги

$$k = \bar{\sigma}_{-1Ä} \sqrt[m]{N / N_0} \,/\, \bar{\sigma}_{ýêâ} . \qquad (20)$$

Коефіцієнт варіації границі витривалості деталі слід находити по формулі

$$\nu_{\sigma(-1Ä)} = \sqrt{\nu^2_{\sigma max} + \nu^2_{\sigma(-1)} + \nu^2_2 + \psi^2_{ýêâ}} , \qquad (21)$$

де $\psi_{ýêâ}$ – коефіцієнт варіації еквівалентних напруг.

Для АТ, що працює у широкому діапазоні експлуатаційних умов, і з запасом, який розраховується по найбільш важким умовам експлуатації, можна прийняти $\psi_{ýêâ} = 0$.

Отримані залежності для визначення функцій розподілення ресурсу можна використовувати для визначення показників надійності систем, тобто для визначення t_ν і λ.

Коли довговічність не обмежена, то надійність елементу на протязі усього ресурсу приймають рівній одиниці.

Якщо довговічність обмежена повністю, то, ставлячи собі за імовірність P по формулах (5), і (7) або (4), (5), (17) і (18) знаходимо t_ν. Тоді визначаємо λ по формулі $\lambda = t/\left(t_{0,37} - t_\nu\right)$, де $t_{0,37}$ – ресурс, який відповідає імовірності безвідмовної роботи, яка дорівнює 0,37.

Ставлячи собі за імовірність Р = 0,37, визначимо характеристику безпеки і по формулам (3), (4), (7) або (3), (17) і (18) визначимо $t_{0,37}$.Коли довговічність обмежена частково, то спочатку знаходимо t_ν, якщо воно менше або дорівнює N_0/n, то λ приймаємо рівним 0, а коли більше, ніж N_0/n , то з деяким запасом

$$\lambda = -ln\,P\left(N_0\right)/\left(\frac{N_0}{\bar{n}} - t_\nu\right). \tag{22}$$

Висновки

1. Схема розподілення ресурсу АТ залежить від частоти зміни напруги $\bar{n}$ та числа циклів N до руйнування.

2. Для прогнозування надійності деталі АТ необхідно знати наступні величини: база випробувань N_0, амплітудне значення напруги σ_a , коефіцієнт варіації γ_α і середнє значення границі витривалості деталі $\bar{\gamma}_\sigma$.

3. Коефіцієнт варіації γ_α залежить від рівня технології виготовлення, складання і контролю.

4. При експлуатації з дією випадкових навантажень розсіювання ресурсу визначається розсіюванням границь витривалості.

Література

1. Приймаков О.Г., Лисяк О.О., Бобровицький О.В., Іващенко І.І. Математичне моделювання процесу функціонування інтегрального показника працездатності авіаційних матеріалів. – Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии.– 2003.- Вып.19.– С. 136-141.

2. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В., Лисяк О.О., Приймаков Г.О. Програмне забезпечення та методологія діагностування надійності, довговічності та витривалості авіаційних конструкцій. – Інтегровані технології та енергозбереження. – 2004. Вип. №4. – С. 107-116.

3. Приймаков О.Г., Приймаков Г.О., Бобровицький О.В., Лисяк О.О. Математичне моделювання довговічності несучих елементів авіаційної техніки.– Вестник науки и техники.– 2004.– Вып.2-3.– С. 4-9.

4. Васильев В.Н., Иванюк А.Н.. Моделирование систем в гражданской авиации. / В 2-х ч.–М.,: Транспорт, 1977.– 362с.

5. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В., Лисяк О.О. Прогнозування надійності,

довговічності та витривалості авіаційних матеріалів // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції "АВІА-2003" –Т.3.– К.: Вид.НАУ, 2003.– С. 32.39-32.42.

6. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В. Прогнозування витривалості авіаційних матеріалів.– Вестник науки и техники.– 2002– Вип. 4.– С. 5-11.

7. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В. Прискорене визначення межі витривалості авіаційних матеріалів.– Вестник науки и техники.–2003.– Вип.1.– С. 4-8.

8. Приймаков О.Г., Бобровицький О.В., Лисяк О.О. Циклічна довговічность деталей авіаційної техніки.- Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологи– 2003.– Вып.18– С. 147-153.

9. Приймаков О.Г., Приймаков Г.О., Бобровицький О.В. Працездатність деталей авіаційної техніки з точки зору термодинаміки.– Вестник науки и техники.– 2003. Вип.4.– С. 21-28.

10. Приймаков О.Г., Приймаков Г.О., Чотій Л.Ю, Розрахунок на повзучість деталей авіаційної техніки.- Встник науки и техники.– 2003. Вип.4.– С.28-34.

11. Костецкий Б.И., Калиниченко Н.В. Качество поверхности и трение в машинах.–К.:Техника,1969.– 215с.

УДК 621.891.031

Бобровицкий А.В.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПО ИХ ВЫНОСЛИВОСТИ

Создана методология оценки надёжности авиационных конструкций и их элементов по параметрам выносливости. Эта методология учитывает варьирование эксплуатационных условий и функций распределения ресурса. Определён коэффициент вариации выносливости деталей авиационной техники.