

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія аеронавігація

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Безпека авіації: *Безпека авіації*» обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Авіаційний транспорт (Оператор безпілотних літальних апаратів)

272 Авіаційний транспорт

ТЕМА13. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ АТ

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС зі спеціальних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії аеронавігації, протокол від 28.08.2023 р.

Розробник:

Викладач циклової комісії аеронавігації, спеціаліст вищої категорії Журід В.І.

Рецензенти:

1. Професор циклової комісії аеронавігації, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, викладач-методист Тягній В.Г.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Передмова.
2. Безпека людини.
3. Безпека авіації.
4. Зміст додатку 17.

Навчальна та наукова література

1. Бабак В.П. Безпека авіації. Київ «Техніка», 2004.
2. Постанова Верховної Ради. Повітряний кодекс України. Керівний . Київ, 2011.
3. Міністерство транспорту України. Правила польотів у класифікованому повітряному просторі України. Наказ № 293, 295. Київ. 16.03.03, 04.05.05.

Додаткова література

1. Керівництво по розслідуванню АП та інцидентів
в. Дос 9756-A №965. Монреаль, 2000.
2. Правила розслідування АП з цивільними ПС в Україні. Київ, Державіаслужба, 2005-2010.
3. Керівництво по запобіганню авіаційних пригод
Дос 9433-AN №923 Монреаль, ІКАО, 1987.

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Довговічність, ремонтпридатність і збережуваність авіаційної техніки

Довговічність - одна з основних властивостей надійності, основними поняттями якої є граничний стан об'єкта та його ресурс, описаний вище.

У відповідності з ДСТУ

довговічність - це властивість об'єкта виконувати потрібні функції до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту.

Об'єкт може перейти у граничний стан, залишаючись працездатним, якщо, наприклад, його подальше використання за призначенням стане неприпустимим згідно з вимогами безпеки, економічності, ефективності та безшкідливості. Для систем авіаційного обладнання це характерно для акумуляторних батарей, автономних рульових машин ОАУ, кисневих шлангів і т.і.

Час до моменту переходу об'єкта у граничний стан в загальному випадку є випадковою величиною, тому методика встановлення технічного ресурсу для кожного з об'єктів АТ є складною інженерною задачею, що враховує прогнозовані дані фізичного та морального старіння, планує на техніці профілактичні роботи та ремонти. При досягненні призначеного технічного ресурсу в годинах по нальоту ЛА чи наробітку виробу об'єкти АТ незалежно від фактичного технічного стану знімаються з експлуатації та списуються (інколи направляються на спеціальні дослідження для прийняття рішення про продовження ресурсу, а в бойових умовах останній продовжується на застережений заздалегідь фіксований термін).

Ремонтпридатність - одна з властивостей надійності, яка характеризує пристосованість об'єкта до операцій ремонту та відновлення.

Згідно з ДСТУ під ремонтпридатністю розуміють властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції, шляхом проведення технічного обслуговування та ремонту. По суті ремонтпридатність є експлуатаційною технологічністю об'єктів, тобто придатністю до процесу експлуатації в частині, що стосується ремонту. Ремонтпридатність характеризується зручністю виконання операцій ремонту, потрібними витратами часу, праці, матеріалів, а також необхідною кваліфікацією спеціалістів ІАС.

Збережуваність - одна з властивостей надійності, яка характеризує здатність об'єкта протистояти негативному впливу умов та тривалості зберігання та транспортування на його безвідмовність, ремонтпридатність і довговічність.

Згідно з ДСТУ під збережуваністю розуміють властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції під час і після зберігання та (чи) транспортування.

На рис. зображені основні показники безвідмовності, ремонтпридатності, збережуваності та довговічності.

Очевидно, що тривале зберігання та транспортування для багатьох об'єктів може негативно впливати не тільки на їх поведінку під час зберігання та транспортування, але й при подальшому використанні об'єкта. Тому збережуваність можна характеризувати з двох сторін - під час і після зберігання та транспортування.

Встановлено, що відмови АТ утворюють, як правило, пуасонівські потоки, тобто потоки, які є ординарними та без післядії.

Потік відмов називається ординарним, якщо імовірність попадання на елементарну ділянку двох або більш подій знехтувано мала.

Потік подій відмов називається без післядії, якщо для будь-яких ділянок часу, які не перетинаються число подій, що попадають на одну з них, не залежить від того, скільки подій попало на іншу.

Більшість пуасонівських потоків відмов стаціонарні, тобто імовірність попадання того чи іншого числа подій на ділянку часу довжиною Δt залежить тільки від довжини ділянки і не залежить від місця його положення на вісі t .

Такі потоки відмов мають назву найпростіших (або стаціонарних пуасоновських потоків), їм відповідає експоненційний закон розподілу інтервалу часу між відмовами (в тому числі й до першої відмови).

В той же час в теорії надійності розглядаються і нестаціонарні потоки відмов, які характерні для старіючих об'єктів, яким відповідають інші закони розподілу наробітку об'єкта до першої відмови, і які будуть розглянуті нижче.

Розглянемо основні показники надійності, під якими розуміють кількісну характеристику однієї чи декількох властивостей надійності. При цьому одиничний показник надійності характеризує одну з властивостей (наприклад, безвідмовність), в той час як комплексний показник характеризує декілька властивостей, наприклад, безвідмовність і ремонтпридатність одночасно (рис. 1).

Для показників надійності наведемо дві форми подання:

імовірнісну та статистичну. Імовірнісна форма зазвичай буває зручніша при апріорних аналітичних розрахунках надійності, статистична - при експериментальному дослідженні надійності. Крім цього одні показники наочніше інтерпретуються у імовірнісних термінах, а інші - у статистичних.

Основними показниками безвідмовності невідновлюваних об'єктів, відповідно до ГОСТ 27.002 є імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов і середній наробіток об'єктів до відмови.

Імовірність безвідмовної роботи

Імовірнісне визначення. $P(t)$ - імовірність того, що в межах заданого наробітку відмова не виникає, тобто об'єкт, почавши працювати в момент часу $t = 0$, пропрацює безвідмовно на протязі часу t .

$$P(t) = P \{ \xi > t \} = 1 - F_{\xi}(t),$$

де ξ - випадковий наробіток об'єкта до відмови;

$F_{\xi}(t)$, - закон розподілу наробітку об'єкта до відмови.

До очевидних властивостей імовірності безвідмовної роботи належать такі:

1. $P(0) = 1$, тобто розглядаються лише ті об'єкти, які були працездатними в момент вмикання;

2. $P(t)$ є монотонне убиваючою функцією заданого наробітку t ;

3. $P(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, тобто будь-який об'єкт з часом відмовить.

Імовірність відмови об'єкта за час - t (імовірність протилежної події) визначається виразом

$$Q(t) = P\{\xi > t\} = 1 - P(t) + F_{\xi}(t),$$

Очевидно, що імовірність відмови, як функція від t , є законом розподілу наробітку до відмови $F_{\xi}(t)$ (рис.1.8). Вид закону розподілу $F_{\xi}(t)$ залежить від внутрішніх властивостей об'єкта та умов його роботи.

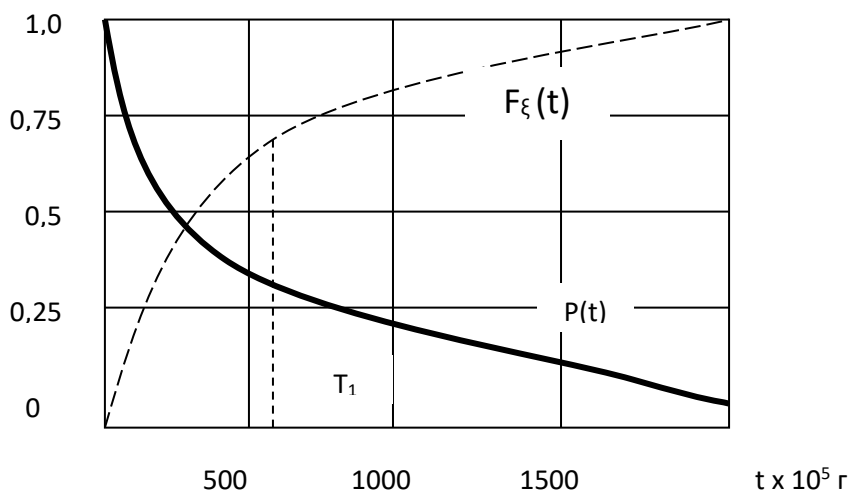


Рис. 1.8. Функції надійності $P(t)$ та розподілу наробітку до відмови $F_{\xi}(t)$

Найчастіше в теорії надійності використовуються: експоненційний (показовий) розподіл, розподіл Вейбула, зрізаний нормальний, які будуть описані нижче.

В диференціальній формі закон розподілу наробітку до відмови називається щільністю розподілу наробітку до відмови $f_{\xi}(t)$

$$f_{\xi}(t) = \frac{dF_{\xi}(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

Щільність $f_{\xi}(t)$ є невід'ємною функцією

$$\int_0^{\infty} f_{\xi}(t) dt = 1.$$

Імовірність безвідмовної роботи пов'язана з щільністю розподілу наробітку до відмови такою залежністю

$$P(t) = 1 - \int_0^t f_{\xi}(x) dt = \int_t^{\infty} f_{\xi}(x) dt.$$

Статистичне визначення. Оцінка імовірності безвідмовної роботи $\hat{P}(t)$ обчислюється як відношення числа об'єктів, які безвідмовно пропрацювали до моменту часу t , до числа об'єктів, справних у початковий момент часу $t = 0$.

$$\hat{P}(t) = \frac{N(t)}{N} = 1 - \frac{n(t)}{N},$$

де N - загальне число справних об'єктів до моменту часу $t = 0$;

$N(t)$ - число об'єктів, які безвідмовно пропрацювали до моменту часу t ;

$n(t)$ - число об'єктів, що відмовили до моменту часу t .

Оцінка щільності розподілу наробітку до відмови при умові, що за час Δt відмовили Δn об'єктів, дорівнює

$$\hat{f}_{\xi}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N \Delta t},$$

Величина $f_{\xi}(t) dt$ характеризує імовірність відмови за інтервал наробітку $(t, t + dt)$ об'єкта, взятого випадково із можливості однакових об'єктів. При цьому невідомо, працездатний цей об'єкт на початок інтервалу в момент t чи відмовив раніше. Це не завжди зручно на практиці, і $f_{\xi}(t)$ як самостійний показник надійності знаходить обмежене застосування. Частіше використовують поняття близьке за визначенням - інтенсивність відмов.

Інтенсивність відмов

Імовірнісне визначення. Інтенсивністю відмов об'єктів в момент часу t називається умовна щільність імовірності виникнення відмови невідновлюваного об'єкта, яка визначається для розглядаємого моменту часу при умові, що до цього моменту відмова не виникла.

$$\lambda(t) = \frac{f_{\xi}(t)}{P(t)} = - \frac{1}{p(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} = - \frac{d \ln p(t)}{dt}.$$

Інтегруючи (1.30) при початковій умові $P(0) = 1$ одержимо для функції надійності вираз через $\lambda(t)$

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] = e^{- \int_0^t \lambda(t) dt} \quad \text{при } \lambda = \text{const} \\ P(t) = e^{-\lambda t} \end{array} \right.$$

Інтенсивність відмов можна розглядати як відносну швидкість зменшення значень функції надійності $P(t)$ із збільшенням t .

З досвіду експлуатації відомі три основні види залежностей $\lambda(t)$ (рис. 1.9): після деякого періоду приробітку, як правило, з підвищеною інтенсивністю відмов, в найбільш типовому випадку (крива а). Інтенсивність залишається постійною до моменту T зняття з експлуатації. На частку пристроїв з подібними інтенсивностями відмов, що властиво різним електронним блокам, обчислювачам, приладам, припадає більш 80% агрегатів літака та обладнання.

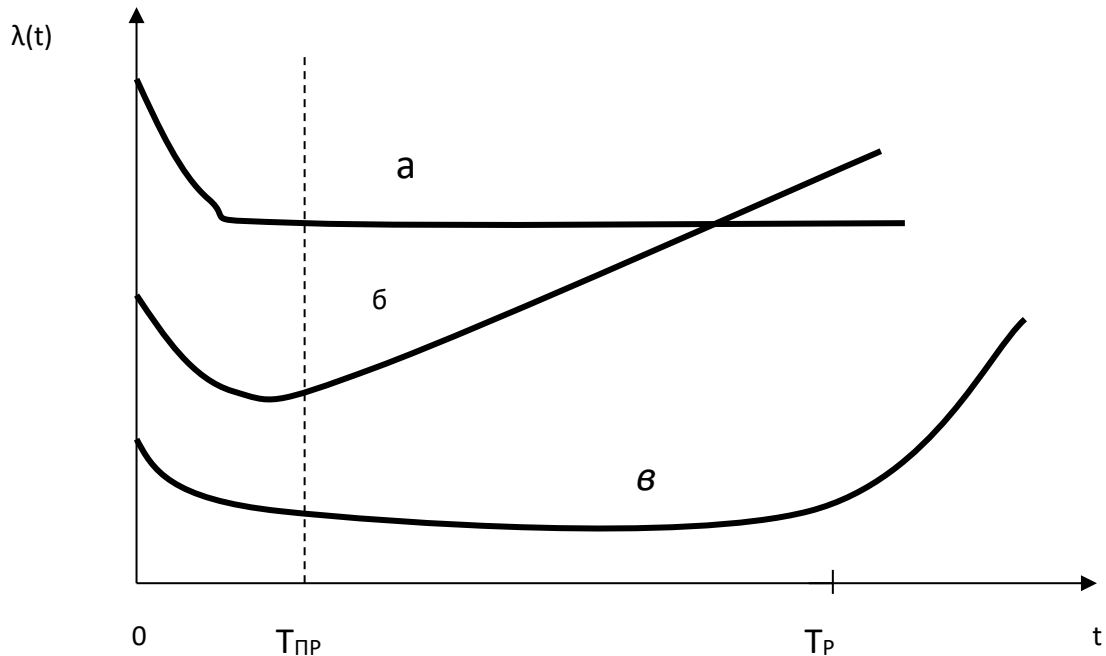


Рис. 1.9. Залежність інтенсивності відмов

У випадку другого виду залежностей $\lambda(t)$ (крива б) інтенсивність відмов лінійно зростає за наробітком, що характерно для старіючих об'єктів з переважанням поступових відмов (гіроскопічні прилади, рульові машини САУ та ін.).

У випадку третього виду залежностей $\lambda(t)$ (крива в) можна виділити три ділянки: період приробітку ($0, T_{пр.}$), період нормальної експлуатації ($T_{пр.}, T_p.$) з постійною інтенсивністю відмов і період зі збільшенням інтенсивності відмов внаслідок зносу та старіння матеріалів і деяких деталей об'єктів (електромеханічні приводи, комутаційна апаратура). Для таких об'єктів призначений технічний ресурс (наробіток до припинення експлуатації) T_p менший за призначений ресурс ЛА, що дозволяє здійснювати заміну об'єктів в період регламентних робіт або заводського ремонту.

Статистичне визначення. Оцінка інтенсивності відмов обчислюється як відношення числа відмов в інтервалі часу $[t, t + \Delta t]$ до добутку числа справних об'єктів у момент часу t на тривалість інтервалу часу Δt

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}.$$

Середній наробіток до відмови

Імовірнісне визначення. Середній наробіток до відмови є математичне очікування наробітку до відмови

$$T_1 = M \{ \xi_1 \} = \int_0^{\infty} t f_{\xi}(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Статистичне визначення. Оцінка середнього наробітку до відмови при плані випробувань $[N, U, T]$ рис. 1.3. запишеться як

$$\hat{T}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i + T(N - n(T))}{n(T)}.$$

де ξ_i – наробіток i -го об'єкту до відмови.

При $T \rightarrow \infty$, для плану випробувань $[N, U, N]$

$$\hat{T}_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{N}.$$

Для неремонтовних об'єктів типу елементів електронних схем, середній наробіток до першої відмови є поняттям умовним, оскільки вони, як правило не експлуатуються так довго і старіють раніше, ніж напрацьовують T_1 (для прикладу, наробіток до відмови елементів схем - транзистори, резистори і т.і. $T_1 = (5-10) \cdot 10^7$ год.).

Значення T_1 обчислюються як оцінки за експериментальними даними про відмови елементів у початковий період їх експлуатації. Тому під середнім наробітком до відмови можна розуміти наробіток, який мав би місце в дійсності, якщо елемент зберігав би на протязі всього періоду застосування ту інтенсивність відмов, яку він мав у початковий період експлуатації або на випробуваннях, тобто $\lambda = \text{const}$. Для таких умов до моменту часу $T = T_1$ повинно відмовити 63% всіх елементів.

Надійність відновлюваних об'єктів

Теорія відновлення бере свій початок з вивчення окремих задач теорії імовірності, пов'язаних з відмовами та відновленням об'єктів з точки зору прикладної математики і має справу з сумами незалежних невід'ємних

випадкових величин. Наприклад, визначення закону розподілу наробітку відновлюваного об'єкту до n -ї відмови $f_{\xi_n}(t)$ при відомому $f_{\xi}(t)$, визначення закону розподілу суми незалежних випадкових величин, що мають різні закони розподілу наробітків до відмови, часу відновлення та ін.

Розглянемо основні моделі процесів відновлення та показники відновлюваних систем. Потрібно відзначити, що для відновлюваних об'єктів наводяться тільки додаткові показники надійності. Всі показники для невідновлюваних об'єктів також можна застосовувати для відновлюваних.

Простий процес відновлення

Припустимо, мається сукупність об'єктів з тривалістю безвідмовної роботи у вигляді безперервної випадкової величини з законом розподілу $f_{\xi}(t)$. Припустимо, що процес відновлення починається з нового об'єкту в момент часу $t = 0$, який працює до відмови, що відбувається в момент часу $t = \xi_1$. Об'єкт миттєво замінюється та працює до відмови в момент $t = \xi_1 + \xi_2$. Припустимо, що цей процес триває, причому в моменти відмов об'єкти негайно замінюються новими. Тривалість безвідмовної роботи n -го об'єкта, що використовується дорівнює ξ_n а сама відмова відбудеться в момент часу s_n , де

$$s_n = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n$$

Якщо $\{\xi_1, \xi_2, \dots\}$ є незалежними однаково розподіленими випадковими величинами з одним і тим же законом розподілу з щільністю $f_{\xi}(t)$, то така система випадкових величин називається простим процесом відновлення (рис.1.13).

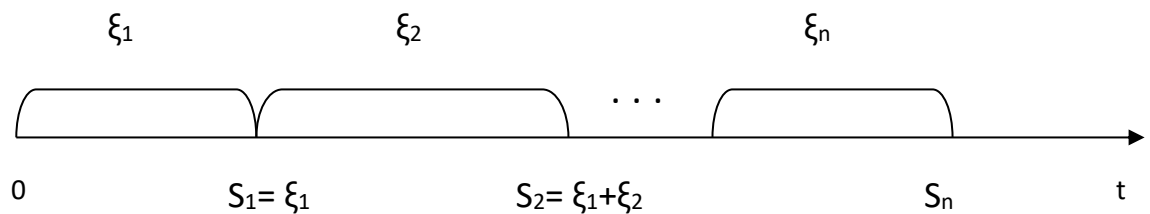


Рис. 1.13. Простий процес відновлення

Події відмов відновлюваних однотипних об'єктів утворюють потік однорідних подій відмов $\{s_i\}, i = 1, \bar{n}$.

В якості характеристики потоку відмов застосовують провідну функцію потоку відмов $\Omega(t)$ як математичне очікування числа відмов за час t .

$$\Omega(t) = M[n(t)] = \sum_{k=1}^{\infty} k P\{k = n\}$$

Перша похідна провідної функції потоку відмов є параметром потоку відмов $w(t)$ й характеризує середнє число відмов, які очікуються в малому інтервалі часу, та дорівнює:

$$\omega(t) = \Omega'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[n(t+\Delta t)] - M[n(t)]}{\Delta t}$$

Параметр потоку відмов пов'язаний з провідною функцією потоку відмов співвідношенням

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(t) dt$$

В теорії надійності на відміну від теорії масового обслуговування, як правило, не відрізняють інтенсивність і параметр потоку подій відмов тому, що потік відмов фізично є завжди ординарний. Тому параметр потоку відмов асимптотичне дорівнює імовірності відмови (відновлення) в інтервалі Δt .

Одним з кількісних показників безвідмовності відновлюваних об'єктів є середній наробіток на відмову.

Імовірнісне визначення

$$T_o = \frac{T}{M[n(T)]}$$

де $M[n(t)]$ - математичне очікування числа відмов за заданий період наробітку T .

Статистичне визначення \hat{T}_0 - відношення сумарного наробітку об'єкту до спостережуваного числа відмов

$$\hat{T}_0 = \frac{T}{n(T)} = \frac{\sum_{i=0}^{n(T)} T_i + \Delta T}{n(T)}$$

де T_i – наробіток об'єкту між i -ю та $(i+1)$ -ю відмовами;

ΔT - наробіток об'єкту після останньої спостережуваної відмови до закінчення спостережень.

В технічних завданнях на проектуємі об'єкти часто використовують середній параметр потоку відмов

$$w_{cp} = \frac{I}{T_p} \int_0^{T_p} w(t) dt$$

де T_p – призначений технічний ресурс об'єкту.

До одиничних показників надійності належать середній наробіток на відмову для даного випадку – на відновлення, та параметр потоку відмов (відновлень).

Наставляння з технічного забезпечення: книга 2. ІАЗ ч. 1. стр. 187.

1. T_c – наліт на відмову та пошкодження, які виявлені у польоті та на землі;

2. T_L - наліт на відмову та пошкодження, які виявлені у польоті;
3. T_{LB} - наліт на відмову, яка привела до невиконання бойового польотного завдання (основний показник).

Для літаків і вертольотів ВПС [14] що розробляються, нормуються на перспективу наліт на відмову та пошкодження які виявлені у польоті та на землі (T_c) в залежності від зльотної маси та року випуску (наліт на льотну подію ($T_{ЛП}$), а також імовірність безвідмовної роботи ($P_{БЗ}$) при виконанні бойового завдання). Так, для літаків-винищувачів ці величини наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Рік випуску	1990	1995	2000
Імовірність безвідмовної роботи	0,95	0,96	0,98
Наліт на відмову T_0 , год	3	5	6
Наліт на ЛП $T_{ЛП} \times 10^{-3}$ год.	60-80	130	150

Треба відзначити, що за статистичним матеріалом ці параметри обчислюються за нальотом (наробіткою) літака без урахування тривалості простоювання на відновленні як для випадку простого процесу відновлення. Але, щоб урахувати тривалість відновлення та обслуговування додатково обчислюються комплексні показники надійності (рис. 1.1). Урахування простою літаків важливо насамперед у період безперервних бойових дій.

До комплексних показників надійності належать коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності та коефіцієнт технічного використання (ДСТУ 2860-94), які використовуються в першу чергу для об'єктів, що функціонують безперервно.

Коефіцієнт готовності (K_r) згідно з ДСТУ (ГОСТ) визначається, як імовірність того, що об'єкт буде в працездатному стані у довільний момент часу, окрім періодів, що плануються, на протязі яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається. Стаціонарний коефіцієнт готовності обчислюється для стаціонарного випадкового процесу, тобто у довільний "достатньо віддалений" момент часу. Тому його можна визначити як математичне очікування відношення часу, протягом якого об'єкт знаходиться в стані працездатності в деякому інтервалі, до всієї тривалості цього інтервалу.