

УДК 621.396.96

Б.М. Ланецький, О.Д. Флоров, К.В. Борисенко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ІМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ В ЕЛЕМЕНТАХ РАКЕТНОГО ДВИГУНА ТВЕРДОГО ПАЛИВА ЗЕНІТНОЇ КЕРОВАНОЇ РАКЕТИ

Аналізуються особливості зенітної керованої ракети (ЗКР) й ракетного двигуна твердого палива (РДТП) зенітної керованої ракети як об'єктів експлуатації й продовження призначених показників, а також методи оцінки показників залишкового ресурсу. Пропонується для оцінки показників залишкового ресурсу РДТП використати метод „доламування” і імовірнісну модель накопичення пошкоджень в елементах РДТП ЗКР у часі. Розглядається імовірнісна модель у якій процеси накопичення пошкоджень описується марківськими випадковими процесами, приводяться основні розрахункові співвідношення.

**Ключові слова:** зенітна керована ракета, ракетні двигуни твердого палива, накопичення пошкодження, запас ресурсу.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На теперішній час на озброєнні зенітних ракетних військ Повітряних Сил (ЗРВ ПС) та військ протиповітряної оборони (ППО) Сухопутних військ Збройних Сил України перебувають зенітні керовані ракети різних типів, на яких виконані роботи із продовження призначених показників на визначений строк і плануються роботи щодо їх продовження на черговий строк. Вирішення задачі продовження призначених показників ЗКР з тривалістю експлуатації понад 25 років ускладнюється специфікою об'єкту експлуатації, окремі складові частини якого є тими що не контролюються, не обслуговуються та не відновлюються при штатній експлуатації, та до яких пред'являються високі вимоги щодо безпечної експлуатації та надійності. До однієї з таких складових частин ЗКР необхідно віднести ракетний двигун твердого палива (РДТП). РДТП ЗКР є складною конструкцією [1, 2], яка характеризується великою розмаїтістю конструкцій, які відрізняються габаритними, масовими, тяговими, часовими й іншими характеристиками. При великій розмаїтості конструкцій у них можна виділити наступні основні частини: корпус, заряд твердого палива (вкладний або скріплений з корпусом ракети), сопловий блок, система запуску. Також в окремих типах ЗКР можна визначити такі складові: виконавчі органи керування вектором тяги, вузли відсічення тяги й аварійного відключення. Таким чином ЗКР необхідно розкривати як складну технічну систему та провести дослідження продовження призначених показників складових частин і комплектуючих виробів РДТП, експлуатаційні данні про стан і рівень надійності яких відсутні.

В сучасних умовах існує та заглиблюється протиріччя між необхідністю вирішення зростаючих за складністю задач із забезпечення безпечної експлуатації та надійності ЗКР і її складових частин, та обмеженими можливостями з оцінки фактичного техні-

чного стану і надійності старіючих складових частин і комплектуючих виробів ЗКР та після їх відновлення.

Одним із способів усунення цього протиріччя є визначення фактичного стану РДТП шляхом оцінювання його залишкового ресурсу.

**Аналіз літератури.** В теперішній час розроблено велика кількість різних методів оцінки показників залишкового ресурсу технічних виробів, зв'язаних з прогнозуванням моменту переходу об'єкту в граничний стан. Їх можливо класифікувати [3] за наступними ознаками: за видом оцінюваного показника (параметричне та імовірнісне оцінювання); за категорією ресурсної відмови (раптові та поступові); за способом отримання вихідних даних (індивідуальні та групові) та інші. Зокрема, в основі групового методу оцінюються показники остаточного ресурсу, вихідні данні яких про оцінюваний параметр збираються на визначеній групі однотипних об'єктів, а в основі індивідуального методу – відомості про оцінюваний параметр, заснований на спостереженнях за поведінкою конкретного об'єкту.

При виконанні групових методів оцінюється статистичний залишковий ресурс, а при використанні індивідуальних методів – індивідуальний залишковий ресурс.

Так, в [4] рішається задача оцінки залишкового ресурсу об'єкту, якщо мається можливість для періодичного виміру ресурсного (визначального) параметру.

Для оцінки показника залишкового ресурсу в теперішній час інтенсивно досліджуються процеси витрати ресурсу. Наприклад, моделі витрати ресурсу (Седякіна, Пальмгрена – Майнера, Фрейденталя й ін.) [2, 5 – 8].

Вище перелічені індивідуальні та групові методи та моделі мають частковий (окремий) характер і вимагають значних об'ємів інформації, що при рішенні задачі продовження призначених показників надійності робить їх застосування практично неможливим.

Це змушує звернутися до математичних моделей феноменологічного характеру, тобто таких, які не використовують безпосередньо фізичні явища про витрату ресурсу. Одним з можливих напрямків при розробці таких моделей є добре розроблений апарат теорії марківських процесів з дискретним часом.

**Мета статті.** Побудова імовірнісної моделі накопичення пошкоджень елементів РДТП для вирішення задачі визначення їх залишкового ресурсу.

### Основна частина

Виникнення відмов ряду елементів ЗКР при експлуатації, у тому числі при використанні за призначенням, добре описується імовірнісною моделлю накопичення пошкоджень [2, 5, 6]. До таких елементів (далі об'єктів) відносяться складові ракетних двигунів твердого палива з неметалічних матеріалів з невисокою міцністю, наприклад, заряди РДТП, теплозахисне покриття, гумовотехнічні деталі.

Передбачається, що об'єкт протягом тривалої експлуатації перебуває під впливом різних навантажень: вібраційних (при транспортуванні, пусках); ударних, що відбуваються при такелажних роботах (різні вантажно-розвантажувальні роботи, які проводяться із РДТП при його виготовленні, спорядженні ЗКР, при транспортуванні, зберіганні на складах, періодичних оглядах), температурні напруги. Рівень цих навантажень при штатній експлуатації, як правило, перебуває в межах установлених нормативною документацією, однак їхня дія приводить до появи пошкоджень – мікродефектів в структурі матеріалу. Накопичуючись з часом, мікродефекти можуть у результаті „вирости” у критичний дефект об'єкта, який в свою чергу приводить до відмови. При цьому ресурс об'єкта визначається рівнем (ступенем) пошкодження.

Запас ресурсу РДТП, що залишився після певної тривалості штатної експлуатації, повинен бути достатньо великим. Оцінка надійності таких об'єктів пов'язана з визначенням цього запасу. У зв'язку із цим для оцінки показників залишкового ресурсу можна використати метод „доламування” [2, 9], який зводиться до наступного. Вибірку випробовуваних об'єктів розбивають на дві групи. Одну групу об'єктів піддають впливу всіх експлуатаційних навантажень, характерних для штатної експлуатації (відповідно до ТУ). Потім, вибравши один з видів навантажень, збільшують рівень навантаження, доводячи об'єкт до відмови („доламують”). Іншу групу об'єктів відразу після виготовлення піддають впливу такого ж форсованого навантаження до виникання відмови.

За різницею ресурсів (вираженого в одиницях часу або кількості циклів навантаження) у двох групах об'єктів оцінюють ступінь пошкоженості при штатній експлуатації й запас ресурсу.

Для одержання кількісних оцінок залишкового ресурсу необхідна математична модель накопичення

пошкоджень.

До процесів кумулятивних (тобто таких, що накопичуються) пошкоджень, які можна оцінити за допомогою математичного апарату марківських процесів можна віднести: утомлене зношування, ріст утомлених тріщин, повзучість т.і.

Як показано теоретично й експериментально, для цих фізичних процесів є цілком застосованою модель „удару” [2, 5, 7], відповідно до якої перехід об'єкта з одного стану в інший (який відрізняється ступенем пошкоженості) відбувається стрибкоподібно, у дискретні моменти часу. Модель „удару” приводить до несуттєвих втрат в описі фізики явища в порівнянні з досягнутими при цьому перевагами, за рахунок можливості застосування математичного апарата теорії марківських ланцюгів і істотного зниження трудомісткості проведених обчислень.

Розглянемо модель накопичення пошкоджень із використанням марківських ланцюгів, у яких імовірності переходів з одного стану в інший не залежить від часу (або номера випробувань). Будемо вважати, що об'єкт у процесі експлуатації може перебувати в одному з  $(n+1)$  станів  $E_0, E_1, \dots, E_n$ , що розрізняються між собою ступенем усталосного пошкодження. Ступінь пошкодження об'єкта зростає за мірою збільшення номера стану. Стан  $E_0$  – початковий, він відповідає моменту виготовлення. При цьому об'єкт має однаковий ступінь пошкоженості, отриманий в процесі виготовлення.

Стан  $E_n$  є кінцевим і відповідає критичному пошкодженню, який приводить до відмови. Пошкодження незворотні (усунення пошкоджень об'єкта при експлуатації не проводиться) і переходи можливі тільки зі стану з меншим номером у стан з більшим номером.

Накопичення пошкоджень в об'єкті розглядається як однорідний у часі марківський процес, для якого ймовірності  $p_{ij}$  переходів  $E_i \rightarrow E_j$  повністю визначається номером стану (рис. 1.). Матриця перехідних ймовірностей  $p_{ij}$  розглянутої моделі є верхньою трикутною, елементи якої характеризуються як  $p_{ij}$  – умовні ймовірності того, що об'єкт, перебуваючи в стані  $E_i$ , переходить в стан  $E_j$ ;

$p_{nn} = 1$  – ймовірність того, що об'єкт потрапивши в стан  $E_n$  залишиться в ньому на протязі всього циклу навантаження, що визначає стохастичну матрицю

$$\sum_{j=0}^n p_{ij} = 1; \quad p_{nn} = 1.$$

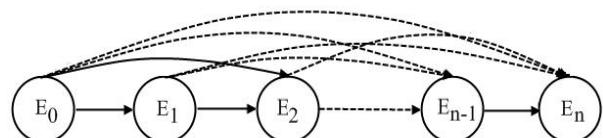


Рис. 1. Модель процесу накопичення пошкоджень в об'єкті

Із рис. 1 виходить, що для опису процесу пошкодження необхідна оцінка  $(n+1)\frac{n}{2}$  інтенсивностей переходів, що потребує більшого об'єму експериментальних даних. У зв'язку з тим, що в розглянутій феноменологічній моделі число станів і переходів не пов'язано з фізичними процесами, то модель процесу накопичення пошкоджень об'єкта можна представити у вигляді (рис. 2) При цьому задача побудови відповідної моделі накопичення пошкоджень суттєво спрощується, якщо вдається із фізичної моделі відмов визначити залежність  $\lambda_i = f_i(\lambda_0)$ . Тоді інтенсивність переходів можна визначити за результатами випробувань: за оцінками математичного очікування (МОЧ)  $\bar{\tau}$  та середньоквадратичного відхилення (СКВ)  $S_\tau$  тривалості напрацювань до відмов.

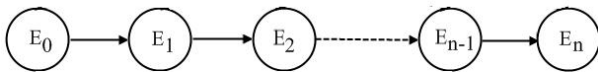


Рис. 2. Спрощена модель процесу накопичення пошкоджень в об'єкті

Перехідні імовірності марківських ланцюгів задовольняють системі диференціальних рівнянь А.Н. Колмогорова й можуть бути визначені для заданого часу навантаження  $\tau$ .

Інтенсивності переходів залежать від результатів випробувань (МОЧ  $\bar{\tau}$  й СКВ  $S_\tau$  часу (або числа циклів) навантаження до відмов) і зв'язані співвідношеннями

$$\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\lambda_i} = \bar{\tau}; \quad \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\lambda_i^2} = S_\tau^2.$$

Якщо представити залежність між інтенсивностями переходів  $\lambda_i$  у вигляді

$$\lambda_i = \frac{\lambda_0}{K_i},$$

де  $K_i$  – відома функція ( $K_i = f(i, q)$ ), то отримаємо для обчислення початкової інтенсивності  $\lambda_0$  і допоміжного параметра  $q$  систему рівнянь

$$\begin{cases} \bar{\tau} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^{n-1} K_i, \\ S_\tau^2 = \frac{1}{\lambda_0^2} \sum_{i=0}^{n-1} K_i^2 \end{cases}, \quad (1)$$

або

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{\left( \sum_{i=0}^{n-1} K_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}},$$

де  $V = \frac{S_\tau}{\bar{\tau}}$  – коефіцієнт варіації тривалості експлуатації до відмови.

Зокрема, в [2] прийнята залежність  $K_i = (1+i)^q$  і всі інтенсивності відмов знаходяться через оцінки величин  $\lambda_0$  і  $q$ , а потім і перехідні імовірності  $p_{ij}$  марківського ланцюга.

Інтенсивності переходів визначають по результатам випробувань „нових” об'єктів. Так як обсяги випробувань звичайно малі, для підвищення точності доцільно в якості МОЧ  $\bar{\tau}$  та дисперсії часу  $S_\tau^2$  до руйнування зробити зважену оцінку за результатами випробувань за методом „доламування” двох груп об'єктів (з обсягами випробувань  $N_1, N_2$ ):

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_1 N_1 + \tau_2 N_2}{N_1 + N_2};$$

$$S_\tau^2 = \frac{S_{\tau_1}^2 (N_1 - 1) + S_{\tau_2}^2 (N_2 - 1)}{N_1 + N_2 - 2}.$$

Кількість станів об'єкта  $n$  у моделі, що розглядається, не пов'язане з фізичними представленнями, а обирається прийнятним для правильного опису переходів об'єкта з початкового стану  $E_0$  у стан  $E_n$ .

Обмеження для  $n$  задається нерівністю  $n \geq \frac{1}{V^2}$ .

### Висновки

В статті розглянута феноменологічна модель накопичення пошкоджень в елементах РДТТ.

Розроблена модель накопичення пошкоджень дозволяє врахувати основні джерела розкиду кумулятивних пошкоджень елементів РДТТ:

початковий рівень пошкоджень, інтенсивність і послідовність кумулятивних пошкоджень; рівень пошкоджень, який відповідає граничному стану;

стратегію проведення періодичних контрольно-технічних освідочтувань.

Розглянута модель є універсальною, не потребує значного об'єму експериментальних даних, її можливо застосовувати для рішення задач продовження призначених показників.

### Список літератури

1. Особенности анализа надежности ракетных двигателей твердого топлива зенитных управляемых ракет для решения задач продления их назначенных показателей / Б.Н. Ланецкий, В.В. Лукьянчук, А.А. Шоколовский, И.В. Коваль, В.П. Попов // Наука і техніка ПС ЗСУ. – Х.: ХУПС. – 2010, (2). – С. 82-87.
2. Надежность ракетных двигателей на твердом топливе: моногр. / Ю.М. Милехин, А.Ю. Берсон, В.К. Кавицкая, Э.И. Эрибург. – М.: МГУП, 2005. – 878 с.
3. Методи оцінювання залишкового ресурсу (терміну служби) зенітних керованих ракет / Б.Н. Ланецкий, В.В. Лук'янчук, В.В. Лісовенко, К.В. Борисенко // Проблемні питання розвитку ОВТ: тези доповідей. – К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2010. – С. 165.
4. Стрельников В.П. Оценка остаточного ресурса на основе измерения диагностических параметров / В.П. Стрельников // Системотехника. – К., 2003. – С. 1-7.

5. Герцбах И.Б. Модели отказов / И.Б. Герцбах, Х.Б. Кордонский. – М.: Сов. радио, 1966. – 167 с.

6. Богданофф Дж. Вероятностные модели накопления повреждений: пер. с англ. / Дж Богданофф., Ф. Козин. – М.: Мир, 1989. – 344 с.

7. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность: пер. с англ. / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Наука, 1984. – 328 с.

8. Надежность технических систем Справочник под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

9. Майоров А.В. Планирование и проведение ускоренных испытаний на надежность устройств электронной автоматики / А.В. Майоров, Н.П. Потюков. – М.: Радио и связь, 1982. – 144 с.

Надійшла до редколегії 13.06.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Ермаков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ РДТТ ЗУР

Б.Н. Ланецкий, А.Д. Флоров, К.В. Борисенко

*Анализируются особенности зенитной управляемой ракеты (ЗУР) и ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) зенитной управляемой ракеты как объектов эксплуатации и продления назначенных показателей, а также методы оценки показателей остаточного ресурса. Предлагается для оценки показателей остаточного ресурса РДТТ использовать метод "доламывания" и вероятностную модель накопления повреждений в элементах РДТТ ЗУР во времени. Рассматривается вероятностная модель, в которой процессы накопления повреждений описывается марковскими случайными процессами, приводятся основные расчетные соотношения.*

**Ключевые слова:** зенитная управляемая ракета, ракетные двигатели твердого топлива, накопление повреждений, запас ресурсу.

## PROBABILITY MODEL OF ACCUMULATION OF SAM SRM ELEMENTS DAMAGE

B.N. Lanets'kyi, A.D. Florov, K.V. Borysenko

*The features of the anti-aircraft guided missile (SAM) and the solid rocket motor fuel (SRM) of the anti-aircraft guided missile as objects of exploitation and renewal of designated indicators are analysed, as well as methods for estimating the residual life indicators. For estimating the residual life of solid propellant rocket motors it is offered to use the "breaking a secret" and probabilistic model of damage accumulation in solid propellant rocket missiles elements over time. Probabilistic model, in which the processes of damage accumulation are described by Markov processes, is studied, the main settlement ratio are stated.*

**Keywords:** zenithal guided rocket, rocket engines of hard fuel, accumulation of damage, stocked a resource.