

УДК 519.8765.623.4622

В.О. Шуєнкін, М.О. Слюсаренко

Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ

МЕТОД АНАЛІТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІНИ БЕЗВІДМОВНОСТІ ЗАСОБІВ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК З УРАХУВАННЯМ ВОГНЕВОГО ВПЛИВУ ПРОТИВНИКА

Запропонований метод аналітичного моделювання процесу зміни безвідмовності засобів зенітних ракетних військ з урахуванням вогневого впливу противника. Дослідження проводилося на прикладі самохідної вогневої установки зенітного ракетного комплексу Бук-М1. Урахування таких факторів як укомплектованість, агресивні умови зовнішнього середовища (клімат, рельєф місцевості, сейсмогенні умови, стихійні лиха) дозволить більш обґрунтовано моделювати параметри безвідмовності на етапі проектування техніки та досягти їх прийнятних значень.

Ключові слова: ймовірність безвідмовної роботи, моделювання безвідмовності, наробіток до відмови (на відмову), час безперервної роботи, вогневий вплив противника.

Вступ

Постановка проблеми. Складність технічних систем та устаткування дедалі зростає. Із підвищенням вимог до якості техніки та умов її роботи, як наслідок, зростають вимоги до надійності, зокрема – до безвідмовності.

Відмова з технічних причин або від бойового впливу противника під час бойових дій може призвести до невиконання поставленої мети, а відповідно, й до зниження боєздатності зенітних ракетних військ. Нині бойовій техніці притаманний недостатній рівень безвідмовності під час експлуатації та бойового застосування. Це викликано як конструкторськими рішеннями, так і недосконалістю моделей, які застосовуються під час проектування. Крім того, не враховується бойовий вплив противника і з цим важко погодитися.

Стан будь-якої техніки змінюється з часом, залежно від витрати ресурсу. Якщо це не врахувати під час проектування, то виникає невідповідність між потрібним рівнем безвідмовності зразка техніки та значно нижчим її рівнем, який спостерігається при експлуатації.

Ця невідповідність зростає, якщо не враховувати бойовий вплив противника, адже зразок бойової техніки може вийти з ладу й унаслідок дії цієї складової. Саме це і відбувається на практиці. Тому, стаття є актуальною, оскільки авторами запропоновано варіант вирішення означеного вище питання за допомогою методу аналітичного моделювання процесу зміни безвідмовності бойових засобів зенітних ракетних військ (ЗРВ) з урахуванням вогневого впливу противника на прикладі самохідної вогневої установки (СВУ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1] розглядається метод оцінювання показника безвідмовності “імовірність безвідмовного ввімкнення” РЕЗ ЗРК, що експлуатується. Застосування методу засновано на використанні даних експлуатаційних спостережень.

Автори у [2] викладають принципи побудови математичних моделей, розглядають теоретичні основи аналітичного та імітаційного моделювання функціонування технічних систем у задачах дослідження їх надійності. Застосування запропонованих методів проілюстровано можливістю їх використання у задачах дослідження надійності систем зенітної керованої ракетної зброї.

Автори у [3] досліджують застосування методу статистичного моделювання для вирішення задач надійності та експлуатації радіоелектронної техніки. У [4] розглядаються загальні положення методики системного обґрунтування вимог до надійності радіоелектронних засобів зенітних ракетних комплексів (ЗРК). Обґрунтовується вибір номенклатури показників надійності та їх величин для радіоелектронних засобів ЗРК та його складових.

Аналітичні методи оцінювання надійності систем, стан яких оцінюється однорідним марковським процесом, висвітлюють автори у [5].

Слід зазначити, що у розглянутій літературі під час моделювання безвідмовності береться до уваги лише старіння та зношення комплектуючих техніки, отже бойовий вплив на них не враховується або враховується досить конспективно, без викладу відповідної аналітичної залежності.

Тому **метою статті** є виклад методу аналітичного моделювання процесу зміни безвідмовності засобів зенітних ракетних військ з урахуванням вогневого впливу противника.

Основна частина

Даний метод аналітичного моделювання процесу зміни безвідмовності засобів зенітних ракетних військ складається з двох моделей: математичної моделі безвідмовності зразків техніки з урахуванням старіння та зношення комплектуючих без урахування вогневого впливу противника та такої ж моделі тільки з урахуванням бойового впливу противника [6].

Навіть без урахування бойового впливу противника розбіжність між заявленою безвідмовністю зразка техніки та реально спостереженою може пояснюватися невірно прийнятою гіпотезою про розподіл часу наробітку до відмови зразка, тим більше, без урахування витрати ресурсу з початку експлуатації, старіння та зношення комплектуючих. Досвід експлуатації бойових засобів ЗРВ свідчить про те, що доцільно моделювати безвідмовність цієї техніки не однопараметричним експоненціальним розподілом випадкової величини часу \tilde{T} наробітку до відмови зразка техніки, як часто приймається,

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (1)$$

а більш загальним, більш гнучким розподілом, наприклад, двопараметричним (θ, α) розподілом Вейбулла.

$$P(t) = e^{-\theta \cdot t^\alpha}, \quad (2)$$

де λ – інтенсивність потоку відмов, $\lambda = \frac{1}{T}$ (1/год);

T – наробіток до відмови (год);

t – час безперервної роботи (год);

α – параметр форми, який враховує старіння та зношення комплектуючих;

θ – параметр масштабу розподілу Вейбулла.

Використання розподілу Вейбулла, як математичної моделі безвідмовності зразка техніки, дозволить на етапах її проектування та конструювання задавати вимоги стосовно надійності за допомогою аналітичного опису безвідмовності, на відміну від статистичного способу, коли статистика про зміну стану зразка техніки відсутня. Але ця модель не враховує вогневий вплив противника.

Як було наголошено вище, даний метод розглядається на прикладі СВУ. Під час експлуатації СВУ у разі виникнення будь-яких відмов здійснюється відновлення її працездатності обслугою або ремонтними органами. Зазвичай найбільш трудомістким є процес усунення відмов, що виникли від вогневого впливу противника. Частота появи таких відмов буде визначатися величиною бойових втрат озброєння, яка прогнозується стосовно умов оперативно-тактичної обстановки. Прогнозована величина таких втрат відображається у керівних докумен-

тах. В умовах бойових дій завжди існує обмеження у часі та можливостей своєчасного відновлення працездатності СВУ, що відмовили. Отже, виправданим є прагнення до того, щоб потік відмов СВУ через обмежену технічну надійність був нижчим, ніж потік відмов через вогневий вплив противника. Але цього можна досягти тільки за рахунок підвищення середнього наробітку на відмову (до відмови). Орієнтовні розрахунки свідчать, що величина середнього наробітку на відмову СВУ у цьому випадку може сягати понад 480 годин.

СВУ може виходити з ладу за роздільного або сумісного впливу на неї внутрішніх (обмежена технічна надійність) та зовнішніх (вогневий вплив противника) факторів. Тоді ймовірність виходу з ладу СВУ у результаті обмеженої технічної (чи власної) надійності або за рахунок вогневого впливу з боку противника у ході бойових дій військ, а також за сумісного впливу на її стан розглянутих факторів, визначається як ймовірність двох сумісних подій [7]:

$$Q^0 = Q_H + Q_B - Q_H \cdot Q_B = 1 - P^0, \quad (3)$$

де Q^0 – ймовірність того, що відбудуться дві сумісні та незалежні події: відмови СВУ у результаті вогневого впливу з боку противника, відмови через обмежену технічну надійність СВУ, а також відмови у разі здійснення обох цих подій одночасно;

Q_H – ймовірність відмови СВУ через обмежену технічну надійність;

Q_B – ймовірність відмови СВУ за рахунок впливу на СВУ з боку противника;

P^0 – ймовірність безвідмовної роботи СВУ під впливом даних подій.

Моделювання безвідмовності СВУ як на стадії її проектування, так і під час випробувань, тобто в умовах мирного часу, без урахування умов бойової обстановки, доцільно здійснювати з використанням розподілу Вейбулла, що дозволяє більш коректно обчислити значення середнього часу наробітку до відмови СВУ з урахуванням старіння та зношення її комплектуючих. Водночас, відмову СВУ, спричинену впливом на неї з боку противника, можна вважати практично незалежною від її стану, стану її комплектуючих. Крім того, з урахуванням залежності боєздатності бригади “Бук-М1” від кількості СВУ розподіл часу наробітку до відмови може бути прийнятий експоненціальним.

Як уже зазначалося вище, ймовірність відмови СВУ через її обмежену технічну надійність за Вейбулівського розподілу випадкової величини часу \tilde{T} безвідмовної роботи може мати такий вигляд:

$$Q_H(\tilde{T} < t) = 1 - e^{-\theta \cdot t^\alpha} = 1 - P_H(t), \quad (4)$$

а ймовірність відмови СВУ за рахунок вогневого

впливу на СВУ з боку противника за експоненціаль-ного розподілу випадкової величини часу безвідмовної роботи буде дорівнювати:

$$Q_{\beta}(t) = 1 - e^{-\varepsilon \cdot t} = 1 - P_{\beta}(t), \quad (5)$$

де ε – узагальнена (результуюча) величина відносних погодинних бойових втрат самохідних вогневих установок зенітної ракетної бригади у результаті вогневого впливу з боку противника протягом часу t (год) безперервної роботи СВУ;

P_H – імовірність безвідмовної роботи СВУ протягом часу t (год) безперервної роботи СВУ з урахуванням обмеженої технічної надійності;

P_{β} – імовірність безвідмовної роботи СВУ протягом часу t (год) безперервної роботи СВУ з урахуванням вогневого впливу з боку противника.

Підставляючи (4) та (5) у (3), отримуємо ймовірність відмови СВУ внаслідок обмеженої технічної надійності та вогневого впливу на неї з боку противника протягом часу t год безперервної роботи СВУ:

$$\begin{aligned} Q^0(t) &= 1 - P_H \cdot P_{\beta} = \\ &= 1 - e^{-(\theta \cdot t^{\alpha-1} + \varepsilon) \cdot t} = 1 - P^0(t), \end{aligned} \quad (6)$$

звідки ймовірність безвідмовної роботи СВУ у даних умовах застосування

$$\begin{aligned} P^0(t) &= 1 - Q^0(t) = \\ &= P_H \cdot P_{\beta} = e^{-(\theta \cdot t^{\alpha-1} + \varepsilon) \cdot t}. \end{aligned} \quad (7)$$

Дослідження свідчать про те, що можна прийняти параметр масштабу $\theta = \frac{1}{T}$, тоді вираз (7) можна переписати у вигляді:

$$\begin{aligned} P^0(t) &= e^{-(\theta \cdot t^{\alpha-1} + \varepsilon) \cdot t} = \\ &= e^{-\left(\frac{1}{T} \cdot t^{\alpha-1} + \varepsilon\right) \cdot t} \geq P_{\text{потр}}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $P_{\text{потр}}$ – необхідна ймовірність безвідмовної роботи (потрібна).

Звідки після логарифмування знаходимо середнє значення наробітку на відмову (до відмови) T у разі завдання тих або інших значень ε , $\alpha < 1$, t та $P_{\text{потр}}$:

$$T \geq -\frac{t^{\alpha}}{\varepsilon \cdot t + \ln P_{\text{потр}}} = \frac{t^{\alpha}}{-\ln P_{\text{потр}} - \varepsilon \cdot t}. \quad (9)$$

З формули (9) знаходимо припустимі значення узагальненої величини відносних погодинних бойових втрат ε та розраховуємо наробіток на відмову (до відмови) T , наприклад, за параметра форми $\alpha = 1,4$, $t = 5$ та різних значень ε .

Отримані значення ε можуть використовуватися не тільки для визначення середнього часу T наробітку до відмови СВУ у ході бойових дій, а й

для визначення можливої кількості ΔN_{β} виведених з ладу самохідних вогневих установок лише за рахунок вогневого впливу на них з боку противника протягом часу t безперервної роботи СВУ. Наприклад, для майбутнього планування роботи ремонтно-відновлювальних органів. Як уже зазначалося вище, за допомогою моделі, що розглядається, визначається такий час T безвідмовної роботи, коли відмови СВУ за рахунок обмеженої технічної надійності будуть значно нижчими, ніж відмови, пов'язані із вогневим впливом противника. Для цього введемо співвідношення:

$$\frac{\Delta N_H}{\Delta N_{\beta}} \leq \sigma, \quad (10)$$

де ΔN_H – кількість СВУ, виведених з ладу тільки через обмежену технічну надійність;

ΔN_{β} – кількість СВУ, виведених з ладу тільки через вогневий вплив противника.

Як відомо [7],

$$\Delta N_{\beta} = Q_{\beta} \cdot (1 - Q_H) \cdot N_0, \quad (11)$$

$$\Delta N_H = Q_H \cdot (1 - Q_{\beta}) \cdot N_0, \quad (12)$$

де N_0 – кількість СВУ у зенітній ракетній бригаді до початку бойових дій.

Певна кількість СВУ $\Delta N_{H\beta}$ може бути виведена з ладу як через обмежену технічну надійність, так і, одночасно, внаслідок вогневого впливу на них з боку противника:

$$\Delta N_{H\beta} = Q_H \cdot Q_{\beta} \cdot N_0.$$

Вочевидь, із підвищенням середнього часу наробітку до відмови СВУ кількість ΔN_H виведених з ладу СВУ внаслідок тільки обмеженої технічної надійності буде знижуватися. Враховуючи, що ймовірність події, яка пов'язується з виникненням величини $\Delta N_{H\beta}$, значно нижча порівняно з ймовірностями виникнення величин ΔN_{β} , ΔN_H , а також приймаючи, що робота ремонтно-відновлювальних органів буде пов'язана, переважно, із відновленням технічної готовності СВУ, виведених з ладу внаслідок дії противника, можна вважати, що $\Delta N_{H\beta} \approx 0$.

Підставляючи значення (11) та (12) у (10), отримуємо:

$$\frac{\Delta N_H}{\Delta N_{\beta}} = \frac{e^{-\left(\varepsilon - \frac{1}{T} \cdot t^{\alpha-1}\right) \cdot t} \cdot e^{-\varepsilon \cdot t}}{1 - e^{-\varepsilon \cdot t}} \leq \sigma, \quad \varepsilon \neq 0, \quad (13)$$

звідки

$$e^{-\left(\varepsilon - \frac{1}{T} \cdot t^{\alpha-1}\right) \cdot t} \leq e^{-\varepsilon \cdot t} + \sigma \cdot (1 - e^{-\varepsilon \cdot t}). \quad (14)$$

Логарифмуючи цей вираз, одержимо значення

часу T наробітку до відмови СВУ в умовах її застосування протягом t її безперервної роботи:

$$T \geq \frac{t^\alpha}{\varepsilon \cdot t + \ln \left[e^{-\varepsilon \cdot t} + \sigma \cdot (1 - e^{-\varepsilon \cdot t}) \right]}, \quad (15)$$

за $\sigma > 0$.

Рівняння (15) і складає суть математичної моделі. Для того, щоб збігалися одиниці виміру це рівняння, доречно записати у такому вигляді:

$$T \geq \frac{1 + \alpha^{1,604 \cdot \alpha} \cdot (t-1)}{\varepsilon \cdot t + \ln \left[e^{-\varepsilon \cdot t} + \sigma \cdot (1 - e^{-\varepsilon \cdot t}) \right]}, \quad (16)$$

оскільки за $\alpha < 1$ вираз $t^\alpha \approx 1 + \alpha^{1,604 \cdot \alpha} \cdot (t-1)$.

З метою визначення граничних значень погодинних відносних втрат ε порівнюємо вирази (9) та (15):

$$\begin{aligned} \frac{t^\alpha}{\varepsilon \cdot t + \ln \left[e^{-\varepsilon \cdot t} + \sigma \cdot (1 - e^{-\varepsilon \cdot t}) \right]} &= \\ &= -\frac{t^\alpha}{\varepsilon \cdot t + \ln P_{\text{потр}}}, \end{aligned} \quad (17)$$

звідки

$$\varepsilon \cdot t + \ln P_{\text{потр}} = -\varepsilon \cdot t - \ln \left[e^{-\varepsilon \cdot t} + \sigma(1 - e^{-\varepsilon \cdot t}) \right]$$

або

$$2 \cdot \varepsilon \cdot t = -\ln P_{\text{потр}} - \ln \left[e^{-\varepsilon \cdot t} + \sigma(1 - e^{-\varepsilon \cdot t}) \right]. \quad (18)$$

Якщо вирішувати це трансцендентне рівняння відносно ε , оскільки досягнути певного значення σ можна, враховуючи не лише T , а й ту чи іншу величину узагальнених відносних погодинних втрат ε , то отримаємо:

$$\varepsilon = \frac{1}{2 \cdot t} \cdot \left(1 + \sigma - \ln P_{\text{потр}} - \sqrt{(1 + \sigma - \ln P_{\text{потр}})^2 + 4 \cdot \ln P_{\text{потр}}} \right). \quad (19)$$

За $\sigma = 0$:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{1}{2 \cdot t} \cdot \left(1 + \sigma - \ln P_{\text{потр}} - \sqrt{(1 + \sigma - \ln P_{\text{потр}})^2 + 4 \cdot \ln P_{\text{потр}}} \right) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot t} \cdot \left(1 - \ln P_{\text{потр}} - \sqrt{(1 + \ln P_{\text{потр}})^2} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

При цьому із формули (9) виходить (оскільки знаменник повинен бути більше нуля:

$$\varepsilon < -\frac{\ln P_{\text{потр}}}{t}. \quad (21)$$

Якщо рівняння (20) вирішувати відносно σ , то його значення можна виразити через ε таким чи-

ном:

$$\begin{aligned} \sigma &= f(\varepsilon) = \\ &= - (1 - \varepsilon \cdot t) - \frac{1 - \varepsilon \cdot t}{\varepsilon \cdot t} \cdot \ln P_{\text{потр}} = \\ &= (1 - \varepsilon \cdot t) \cdot \left(-1 - \frac{\ln P_{\text{потр}}}{\varepsilon \cdot t} \right) > 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Отже, подальші розрахунки можна виконувати, користуючись функціями $\varepsilon = f(\sigma)$ або $\sigma = f(\varepsilon)$.

Далі можна розрахувати припустимі значення ε залежно від σ та $P_{\text{потр}}$, на відміну від раніше одержаних припустимих значень $\varepsilon = -\frac{\ln P_{\text{потр}}}{t}$, але з

урахуванням значення σ , яке досягається у разі задання $P_{\text{потр}}$, ε , t . Після цього виконуються остаточні розрахунки значень T для заданих σ , $P_{\text{потр}}$, $t = 5$ год.

Висновки

Запропонований метод аналітичного моделювання, на відміну від попередніх, дозволить врахувати зношення, старіння комплектуючих зразків ОВТ зенітних ракетних військ, а також вогневий вплив з боку противника, що показано на прикладі СВУ. Так, за результатами чисельного експерименту, без урахування старіння та зношування комплектуючих СВУ, наробіток на відмову складає $T = 100$ год. Із використанням даної моделі з урахуванням старіння та зношення комплектуючих СВУ та без урахування вогневого впливу противника – близько $T = 200$ год. Додаткове урахування вогневого впливу противника викликає необхідність доведення наробітку на відмову близько $T = 500$ год, що забезпечує ймовірність безвідмовної роботи або боєздатності зенітної ракетної бригади не нижче за 0,9 – 0,95.

Вважається, що за допомогою запропонованої математичної моделі можна більш аргументовано задавати вимоги розробникам з безвідмовності бойових засобів зенітних ракетних військ, що сприятиме підвищенню боєздатності. Запропонований метод математичного (аналітичного) моделювання надає можливість урахувати крім розглянутих й інші можливі фактори, наприклад укомплектованість, агресивні умови зовнішнього середовища: клімат, рельєф місцевості, сейсмогенні умови, стихійні лиха. Це й буде напрямом подальшого дослідження.

Список літератури

1. Ланецький Б.М. Метод оцінювання показника безвідмовності "імовірність безвідмовного ввімкнення" РЕЗ ЗРК, що експлуатується за технічним станом / Б.М. Ланецький, В.В. Лук'ячук, А.А. Артеменко // Збірник науко-

вих праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 1(9). – С. 74-78.

2. Ковтуненко А.П. Математическое моделирование в задачах исследования надежности технических систем: монография / А.П. Ковтуненко, В.В. Зубарев, Б.Н. Ланецкий, А.А. Зверев. – К.: Кн. изд-во Нац. авиац. ун-та, 2006. – 234 с.

3. Шишинок Н.А. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники / Н.А. Шишинок, В.Ф. Репкин, Л.Л. Барвинский. – М.: Сов. радио, 1964. – 551 с.

4. Ланецкий Б.М. Общие положения методики системного обоснования требований к показателям надежности радиоэлектронных средств с ЗРК / Б.М. Ланецкий, А.А. Зверев // Системы обработки информации. Зб. наук. пр. – Х.: ХВУ, 2003. – Вип. 3. – С. 174-180.

5. Козлов Б.А. Справочник по расчету надежности / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Сов. радио, 1966. – 432 с.

6. Метод аналитического моделирования процесса змі-

нення безвідмовності зразків техніки та математична модель безвідмовності технічних засобів з урахуванням агресивних умов експлуатації / ЦНДІ ЗС України; відп. вик. підполковник Д.О. Соломатін; вик. М.О. Слюсаренко. – К., 2015. – 33 с.

7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. пос. для вузов / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.

8. Хайкин С.Э. Физические основы механики / С.Э. Хайкин. – М.: Наука, 1971. – 752 с.

Надійшла до редколегії 20.10.2016

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.Ю. Богданович, Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ.

МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ СРЕДСТВ ЗЕНИТНЫХ РАКЕТНЫХ ВОЙСК С УЧЕТОМ ОГНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТИВНИКА

В.А. Шуенкин, М.А. Слюсаренко

Предложен метод аналитического моделирования процесса изменения безотказности средств зенитных ракетных войск с учетом огневого воздействия противника. Исследования проводились на примере самоходной огневой установки зенитного ракетного комплекса Бук-М1. Учет таких факторов как укомплектованность, агрессивные условия внешней среды, (климат, рельеф местности, сейсмогенные условия, стихийные бедствия) позволит более обосновано моделировать параметры безотказности на этапе проектирования техники и достичь их удобоваримых значений.

Ключевые слова: вероятность безотказной работы, моделирование безотказности, наработка на отказ (до отказа), время непрерывной работы, огневое воздействие противника.

METHOD OF ANALITICAL MODELING PROCESS OF CHANGING REALIBILITY FUNCTION OF ANTI-AIRCRAFT ROCKET TROOPS TAKING INTO ACCOUNT ENEMY'S FIRE INFLUENCE

V.O. Shuenkin, M.O. Sliusarenko

We suggested the method of analitical modelling process of changing realibility function taking into account enemy's fire influens. The research was carried out using as an example self-propelled jire installation of anti-aircraft missile system Buc-M1. Taking into account such factors as staffing, aggressive (climate, relief, seismic conditions, natural) opinion will allow modelling reliability parameters at the stage of technique projecting and give their meaning in a proper way.

Keywords: reliability function, modelling of reliability, mean operation time (between) failures, continuous work time, account enemy's fire influence.