

Б.М. Ланецький, І.В. Коваль, О.О. Зверев, В.П. Попов

## МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗЕНІТНОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСУ ПРИ ТРИВАЛІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

**Анотація.** Експлуатація зенітного ракетного озброєння (ЗРО) протягом тривалого терміну характеризується зміною технічного стану і надійності основних його зразків. Це має значний вплив на показники ефективності використання ЗРО за призначенням. Розглядається оцінювання ефективності функціонування зенітного ракетного комплексу (ЗРК) з урахуванням його технічного стану та надійності за допомогою коефіцієнту збереження ефективності (КЗЕ) ЗРК. З цією метою розроблена модель надійності для оцінки КЗЕ, яка містить: модель надійності зенітного ракетного комплексу (ЗРК) при тривалій експлуатації, модель динаміки надійності наземних бойових засобів (НБЗ) ЗРК при встановленій системі технічного обслуговування (ТО) і ремонту та модель динаміки надійності зенітних керованих ракет (ЗКР) при тривалій експлуатації. Також розглядається вплив можливості модернізації ЗКР, з метою підвищення імовірності ураження цілі однією ракетою на ефективність використання ЗРК за призначенням.

**Ключові слова:** тривала експлуатація, коефіцієнт збереження ефективності, модель експлуатації, модель динаміки надійності

**Abstract.** Over a long period use of anti-aircraft missile weapons (AAMW) is characterized by a change in the technical condition and reliability of its main samples. This has a significant influence on indicators of the effectiveness of the use of AAMW by appointment. The assessment of the effectiveness of the anti-aircraft missile system (SAMS) operation is considered, taking into account its technical condition and reliability using the coefficient of conservation of efficiency (CCE) of SAMS. For this purpose, a reliability model was developed for the evaluation of the CCE, which contains: a model of the reliability of an SAMS during over a long period use, a model of the dynamics of the reliability of the ground combat equipment (GCE) SAMS with an established system of maintenance and repair, and a model of the dynamics of the reliability of surface-to-air missiles (SAM) over a long period use. The effect of the possibility of modernizing SAM, in order to increase the probability of hitting a target with one missile on the effectiveness of using SAMS as intended, is also considered.

**Keywords:** over a long period use, coefficient of conservation of efficiency, model of operation, model of reliability dynamics

Ефективність функціонування ЗРК з урахуванням його технічного стану та надійності можна оцінювати з використанням оперативного-тактичного показника: КЗЕ -  $K_{ef}$  [1]. В якості показника ефективності доцільно використовувати математичне сподівання (МСП) числа цілей, що знищуються, тому для цього потрібно знати:

- МСП числа цілей, що знищуються ЗРК за час ведення протиповітряного бою до повної витрати боєкомплекту ЗРК за умови, що ЗРК на момент початку бойової роботи працездатний та не відмовляє в процесі функціонування -  $M$  ;

- МСП числа цілей, що знищуються ЗРК за час ведення протиповітряного бою до повної витрати боєкомплекту ЗРК з урахуванням технічного стану та рівня надійності ЗРК при тривалій експлуатації -  $M^*(\varphi(t_e), H)$ .

В загальному вигляді КЗЕ ЗРК визначається за співвідношенням:

$$K_{ef}(\varphi(t_e)) = \frac{M^*(\varphi(t_e), H)}{M}, \quad (1)$$

Для коректної оцінки КЗЕ необхідно враховувати початковий технічний стан ЗРК в момент приведення у готовність до використання за призначенням, його зміни в процесі очікування використання за призначенням в увімкненому стані та інші особливості функціонування ЗРК.

З цією метою розглядається модель надійності ЗРК при тривалій експлуатації, яка містить сукупність моделей:

- модель експлуатації наземних бойових засобів (НБЗ) ЗРК за типовою циклограмою використання за призначенням (ТЦВП);
- модель динаміки надійності НБЗ ЗРК при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту (ТО) і ремонту;
- модель динаміки надійності ЗРК при тривалій експлуатації.

**Модель експлуатації НБЗ ЗРК за ТЦВП** описує можливі експлуатаційні стани на інтервалі експлуатації, що розглядається відносно моменту  $t_e$ . При цьому розглядаються три етапи експлуатації ЗРК.

На першому етапі ЗРК знаходиться на чергуванні у працездатному стані і готовий до бойового використання. З періодом  $T_{кф}$  проводяться контролю функціонування тривалістю  $t_{кф}$ . З регулярним періодом  $T_{то}$  проводяться ТО тривалістю  $t_{то}$ . При увімкненні, проведенні контролю функціонування (КФ), вимкненні, знаходженні у вимкненому стані можуть виникати відмови, які виявляються при КФ. При цьому ЗРК переходить у стан відновлення працездатності, який завершується КФ та подальшим вимкненням ЗРК за умови його працездатного стану. Технічне обслуговування завершується проведенням КФ, за результатами якого ЗРК вимикається при його працездатному стані або переходить у стан відновлення працездатності у протилежному випадку.

На другому етапі від моменту надходження сигналу на приведення у готовність до бойового використання до моменту надходження цілевказівки на знищення цілі ЗРК знаходиться в режимі очікування в увімкненому стані, або у випадку непрацездатного стану - в режимі відновлення працездатності.

На третьому етапі ЗРК знаходиться в режимі бойового використання, за умови його працездатного стану на момент надходження цілевказівки. Використання ЗРК за призначенням буде успішним у випадку безвідмовного функціонування.

У відповідності до описаних етапів в моделі розглядаються наступні можливі експлуатаційні стани НБЗ ЗРК на інтервалі експлуатації, що дорівнює циклу ТО:  $E_1$  - вимкнені, очікують бойового використання;  $E_2$  - увімкнені, проводиться КФ;  $E_3$  - увімкнені, проводиться відновлення працездатності;  $E_4$  - увімкнені, проводиться тренування, бойова робота;  $E_5$  - увімкнені, проводиться ТО. Відносно етапів ТЦВП, які описані вище імовірності перебування НБЗ ЗРК в одному зі станів  $E_i$  можна оцінити, як відношення сумарного часу перебування НБЗ ЗРК в стані  $E_i$  за цикл ТО відносно моменту  $t_e - t_{\Sigma i}(t_e, T_u)$  до тривалості циклу ТО -  $T_u$ , тобто:

$$P_{E_i}(t_e, T_u) = \left( \frac{t_{\Sigma i}(t_e, T_u)}{T_u} \right), i = 1, 2, \dots, 5. \quad (1)$$

**Модель динаміки надійності НБЗ ЗРК при встановленій системі ТО і ремонту** описує процеси зміни технічного стану НБЗ ЗРК з урахуванням рівня безвідмовності, періодичних КФ, ТО та відновлень працездатного стану (поточних ремонтів) на інтервалах між КФ і ТО при тривалій експлуатації.

Ця модель представлена нестационарним коефіцієнтом готовності (НКГ), який є імовірністю того, що у довільний момент експлуатації  $t_e$  НБЗ ЗРК працездатні. Цей коефіцієнт розраховується за формулою:

$$K_c(t_e) = P_1(t_e)P_2(t_e)P_3(t_e), \quad (2)$$

де  $P_1(t_e)$  - імовірність перебування НБЗ ЗРК у працездатному стані у довільний момент часу  $t_e$  по складових частинах, які не контролюються при ТО і КФ;

$P_2(t_e)$  - імовірність перебування НБЗ ЗРК у працездатному стані у період між ТО по складових частинах, які не контролюються при КФ, але контролюються при ТО;

$P_3(t_e)$  імовірність перебування НБЗ ЗРК у працездатному стані у період між КФ по складових частинах НБЗ ЗРК, які контролюються при КФ.

Модель експлуатації НБЗ ЗРК за ТЦВП та модель динаміки надійності НБЗ ЗРК при встановленій системі ТО і ремонту використовуються для розрахунку нестационарного повного коефіцієнту готовності (НПКГ) -  $K_{zn}(t_e, t_{oc})$ . Нестационарний повний коефіцієнт оперативної готовності НБЗ ЗРК, який додатково до НПКГ враховує імовірність безвідмовної роботи НБЗ ЗРК за тривалість протиповітряного бою розраховується за формулою:

$$K_{oe.n}(t_e, t_{oc}, t_{\bar{op}}) = K_{zn}(t_e, t_{oc}) \cdot P_{НБЗ}(t_{\bar{op}}), \quad (3)$$

де  $P_{НБЗ}(t_{\bar{op}})$  - імовірність безвідмовної роботи НБЗ ЗРК за тривалість бойової роботи -  $t_{\bar{op}}$ ,

$t_{oc}$  - час очікування використання за призначенням.

**Модель динаміки показників надійності ЗКР при тривалій експлуатації** характеризує надійність ЗКР, які входять до складу ЗРК. Модель представлена двома показниками:

- імовірність того, що з  $r$ -ЗКР, які поставлені на передстартову підготовку, не менше  $n$  будуть визнані готовими до використання в бойовій роботі, що визначається за формулою:

$$P_{r,n}(t_e) = \sum_{i=n}^r C_r^i P_{nn}^i(t_e) (1 - P_{nn}(t_e))^{r-i}, \quad (4)$$

де  $P_{nn}(t_e)$  - імовірність того, що одна ЗКР, яка поставлена на передстартову підготовку, буде визнана готовою до використання в бойовій роботі;

$C_r^i$  - біноміальний коефіцієнт;

- імовірність безвідмовної роботи ЗКР за час польоту  $t_n$  -  $P_n(t_e, t_n)$ .

З урахуванням розроблених моделей математична модель для розрахунку КЗЕ ЗРК має вид [2]:

$$K_{ef}(t_e, t_{\bar{op}}, t_n) = K_{oe.n}(t_e, t_{\bar{op}}) \cdot P_{r,n}(t_e) \cdot \frac{1 - (1 - P_n(t_e, t_n) \cdot P_1)^n}{1 - (1 - P_1)^n}, \quad (5)$$

де  $P_1$  - імовірність ураження цілі однією ЗКР.

Підвищення КЗЕ можливе за рахунок модернізації засобів ЗРК, що впливає на зміну імовірності ураження цілі однією ракетою -  $P_1$ .

На практиці розроблену модель доцільно використовувати:

- при обґрунтуванні вимог до показників надійності НБЗ ЗРК та ЗКР на їх розробку або модернізацію, виходячи з заданих вимог до КЗЕ ЗРК з урахуванням особливостей ТЦВП та системи ТО і ремонту;

- при формуванні планів ремонту НБЗ ЗРК та ЗКР, а саме при визначенні моментів часу їх виведення в ремонт за критерієм зниження ефективності функціонування ЗРК нижче граничної;

- при розробці методик оцінки ефективності ЗРК з урахуванням тривалостей експлуатації НБЗ ЗРК та ЗКР в бойових документах (наприклад в бойовому статуті).

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 2860:1994. Надійність техніки. Терміни та визначення. – К., 1995. – 92 с.
2. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения в 11 т. Т.11. Синтез системы поддержания исправности средств поражения: монография / Б.П. Креденцер, Б.Н. Ланецкий, А.А. Любарец, И.В. Одноралов, А.Н. Шатров, М.А. Шишанов. – К.: Видавничий дім Дмитра Бураго, 2019. – 331 с.

3. Основы теории комплексного обоснования требований к техническим показателям сложных систем: монография / В.В. Зубарев, А.П. Ковтуненко, А.В. Василенко, И.Б. Чепков, М.А. Шишанов. – К.: 2010. – 356 с.

4. Ланецкий Б.Н. Комплексное оценивание показателей безотказности и остаточной долговечности сложных технических систем, эксплуатируемых по техническому состоянию. Основные положения / Б.Н. Ланецкий, В.В. Лук'янчук, А.А. Артеменко // Системи обробки інформації. – 2016. – № 2(139). – С. 40-43.

**Ланецкий Борис Миколайович** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, gans7995@gmail.com

**Коваль Ігор Вікторович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник науково-дослідного відділу Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, igkov63@gmail.com

**Зверев Олексій Олексійович** – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, gans7995@gmail.com

**Попов Валерій Петрович** – науковий співробітник науково-дослідного відділу Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, popvp64@gmail.com

**Boris Lanetskii** – Doctor of technical sciences, Professor, Leading Researcher of scientific research department of Central Scientific Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kiyv, gans7995@gmail.com

**Igor Koval** – Candidate of technical science, Senior Research, Senior Research Associate of scientific research department of scientific center of Air Force of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, igkov63@gmail.com

**Oleksii Zvieriev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lead Researcher of Scientific Research Department of Development of Development of Radio Equipment of Scientific Research Management of Central Scientific Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kiyv, gans7995@gmail.com

**Valeriy Popov** – Research Associate of scientific research department of sci-entific center of Air Force of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, popvp64@gmail.com