

УДК 623.4.017

Б.М. Ланецький, І.В. Коваль, В.В. Лук'янчук

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ОБҐРУНТУВАННЯ ОБСЯГІВ ВИПРОБУВАНЬ ЗЕНІТНИХ КЕРОВАНИХ РАКЕТ ТА РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ ТВЕРДОГО ПАЛИВА ПРИ ЇХ ТРИВАЛІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ПРОДОВЖЕННЯ ПРИЗНАЧЕНИХ ПОКАЗНИКІВ

У статті обґрунтовуються потрібні обсяги контрольних льотних випробувань (КЛВ) зенітних керованих ракет (ЗКР) та вогневих стендових випробувань ракетних двигунів твердого палива при їх тривалій експлуатації для вирішення завдань продовження призначених показників. Пропонується обґрунтувати обсяги випробувань з урахуванням апріорної інформації щодо показників безвідмовності, яка отримана за результатами попередніх робіт з продовження у вигляді довірчого інтервалу.

Ключові слова: обсяги випробувань зенітних керованих ракет, обсяги вогневих стендових випробувань, імовірність безвідмовної роботи, апріорна інформація, довірчий інтервал, довірна імовірність.

Вступ

Постановка проблеми. На даний час ЗКР, які знаходяться на озброєнні Повітряних Сил України, потребують вирішення питання продовження їх призначених показників на термін більше 25 років. Як відомо, до ЗКР пред'являються високі вимоги з безпеки експлуатації та надійності. Тому, контрольні льотні випробування (КЛВ) ЗКР є обов'язковим етапом робіт з продовження, за результатами яких приймається рішення щодо можливості продовження призначених показників ЗКР. Такі випробування є досить витратними, тому їх обсяги повинні бути мінімізованими і обґрунтованими за умов забезпечення підтвердження прийнятних оцінок показників надійності.

Найважливішою складовою частиною ЗКР, що визначає безпеку її експлуатації та функціональні характеристики, є ракетний двигун твердого палива (РДТП). У зв'язку з цим до показників надійності РДТП пред'являються більш високі вимоги ніж до показників надійності інших складових частин ЗКР (так, потрібна величина основного показника надійності РДТП – імовірності безвідмовної роботи становить 0,990-0,999) [1]. В процесі експлуатації РДТП та його складові частини не перевіряються. Стан порохових зарядів, піротехнічних засобів, гумовотехнічних деталей, теплозахисних покриттів та інших комплектувальних виробів РДТП, які протягом тривалої експлуатації можуть суттєво змінити свої властивості, не контролюється. Тому одним з проблемних питань при проведенні робіт з продовження призначених показників ЗКР (далі – робіт з продовження) є оцінка надійності РДТП, які входять до складу ЗКР, та ЗКР в цілому.

Оцінювання показників надійності РДТП може

проводитися на основі [2]:

– апріорних даних про надійність комплектувальних виробів РДТП і РДТП у цілому, які отримані за результатами попередніх робіт з продовження;

– інформації, яка отримана за результатами вогневих стендових випробувань (ВСВ) РДТП та комплексних випробувань у складі ЗКР при КЛВ;

– інформації, яка отримана за результатами контрольно-технічних оглядів РДТП, в тому числі після розбирання РДТП і зовнішнього огляду його окремих комплектувальних виробів та за результатами проведення автономних випробувань окремих комплектувальних виробів РДТП.

Для РДТП, що мають календарні тривалості експлуатації, які значно перевищують початково встановлені призначені терміни служби (понад 25-30 років), актуальним є проведення ВСВ. Тому такі випробування повинні бути передбачені програмою робіт з продовження призначених показників ЗКР. Актуальність ВСВ РДТП значно зростає у разі неможливості проведення КЛВ ЗКР. Але ВСВ є руйнівним і досить витратним видом випробувань, тому їх обсяги повинні бути мінімізовані, але при цьому повинно забезпечуватися підтвердження прийнятних оцінок показників надійності. Відомо, що ВСВ РДТП повинні бути забезпечені відповідними стендами та методиками для їх проведення. Це дозволяє забезпечити вимірювання основних параметрів РДТП та оцінювання показників надійності комплектувальних елементів РДТП, що в цілому збільшує обсяг апріорної інформації. Цю апріорну інформацію можна використовувати при обґрунтуванні потрібних обсягів ВСВ, що дає можливість зменшувати витрати за рахунок зниження обсягів ВСВ при їх високій інформативності і скоротити обсяги КЛВ ЗКР в цілому. На цей час в Україні відсутні відпові-

дні методики та стендове обладнання для проведення ВСВ РДТП, а також апіорна інформація щодо показників надійності комплектувальних виробів РДТП. Тому, в якості апіорних даних щодо показників надійності РДТП можна використовувати інформацію, яка отримана за результатами КЛВ ЗКР при виконанні попередніх робіт з продовження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Питанням оцінювання результатів випробувань на надійність присвячено чимало робіт. Так, наприклад, стаття [3] присвячена обґрунтуванню обсягів випробувань ЗКР при вирішенні завдань продовження їх призначених показників. В статті наведені основні розрахункові співвідношення і графіки залежностей, які використовуються при обґрунтуванні кількості ЗКР, необхідної для проведення випробувань та тривалості цих випробувань. Мінімальна потрібна кількість ЗКР для проведення випробувань отримується в залежності від тривалості спостережень (випробувань) та величини залишкового середнього ресурсу.

В роботах [4; 5] розглядається відома класична модель випробувань, яка заснована на біноміальній схемі. Наводяться співвідношення, що пов'язують показники надійності, які оцінюються з кількістю виробів, потрібних для проведення випробувань. Окремий розділ присвячений питанням оцінювання показників надійності з урахуванням апіорної інформації, яка задана у вигляді достовірного довірчого інтервалу, тобто довірча імовірність $\gamma_a = 1$. Однак з досвіду випробувань РДТП та ЗКР відомо, що таку довірчу імовірність отримати практично неможливо. Тому актуальним на даний час є проведення дослідження щодо оцінювання показників надійності виробів з урахуванням апіорної інформації у вигляді довірчого інтервалу з імовірністю $\gamma_a < 1$.

Мета статті. Метою статті є обґрунтування обсягів контрольних льотних випробувань ЗКР та вогневих стендових випробувань РДТП при їх тривалій експлуатації для вирішення завдань продовження призначених показників ЗКР з урахуванням апіорної інформації.

Викладання основного матеріалу

Обґрунтування мінімальних обсягів КЛВ ЗКР, а також ВСВ РДТП при проведенні робіт з продовження призначених показників повинно проводитися з урахуванням апіорної інформації щодо показників надійності цих виробів. Стосовно обґрунтування обсягів ЗКР для проведення КЛВ апіорною інформацією щодо показників надійності є інформація, отримана за результатами їх КЛВ при виконанні попередніх робіт з продовження. Але слід зазначити, що з причини малих обсягів випробувань ЗКР за результатами КЛВ отримується оцінка імовірності

безвідмовної роботи (ІБР) ЗКР за час виконання польотного завдання ЗКР на рівні 0,8 з довірчою імовірністю $\gamma_a < 1$. При цьому при обґрунтуванні обсягів ВСВ РДТП в якості апіорної інформації використовується інформація щодо імовірності безвідмовної роботи (ІБР) РДТП, яка отримана за результатами їх випробувань у складі ЗКР, тобто за результатами КЛВ ЗКР. У разі, якщо ці випробування є безвідмовними, оцінку ІБР ЗКР можливо прийняти за оцінку ІБР РДТП. Оскільки вимоги щодо величини ІБР РДТП є високими, то завдання її контролю доцільно вирішувати перевіркою виконання вимог у формі нижньої довірчої межі, що, у свою чергу, пов'язане з оцінюванням односторонньої нижньої довірчої межі (ОНДМ) цього показника.

Апіорна інформація щодо ІБР ЗКР або ІБР РДТП (далі – показника безвідмовності виробів) полягає в тому, що згідно з результатами попередніх випробувань показник безвідмовності знаходиться в інтервалі $[P_n, 1]$ з довірчою імовірністю $\gamma_a < 1$. Відомо, що мінімальний обсяг випробувань досягається при безвідмовних випробуваннях виробів. При плануванні безвідмовних випробувань завдання обґрунтування обсягів випробувань полягає в знаходженні кількості виробів – n , при випробуванні яких буде підтверджене прийнятне значення ОНДМ показника безвідмовності з потрібною високою довірчою імовірністю γ .

Відомо [4], що апостеріорну оцінку ОНДМ показника безвідмовності виробів можна отримати з урахуванням достовірного апіорного інтервалу ($\gamma_a = 1$) і результатів проведення випробувань за наступним співвідношенням:

$$\underline{P}_{2\gamma} = P_n + \underline{P}_{1\gamma}(1 - P_n), \quad (1)$$

де $\underline{P}_{1\gamma}$ – значення ОНДМ показника безвідмовності виробів, яке отримується за результатами проведення випробувань без врахування апіорної інформації. Співвідношення (1) можна отримати фідучіальним методом [4; 6] у припущенні, що показник безвідмовності P , що оцінюється, є випадковою величиною, апіорний розподіл якої є рівномірним на інтервалі $[P_n, 1]$.

У більш загальному випадку, коли апіорний довірчий інтервал ІБР відомий з довірчою імовірністю $\gamma_a < 1$, апостеріорна оцінка ОНДМ показника безвідмовності може бути розрахована за наступним співвідношенням:

$$\underline{P}_{2\gamma} = 1 - \frac{1}{\gamma_a}(1 - \underline{P}_{1\gamma})(1 - P_n) \quad (2)$$

за умови $\underline{P}_{1\gamma} \geq 1 - \gamma_a$.

Співвідношення (2) отримане фідучіальним методом [6] у припущенні, що апіорний розподіл ви-

падкової величини P є рівномірним з імовірністю $1-\gamma_a$ на інтервалі $[0, P_H]$. та з імовірністю γ_a на інтервалі $[P_H, 1]$.

За умови, що випробування будуть безвідмовними, величина $P_{1\gamma}$ розраховується за співвідношенням:

$$P_{1\gamma} = (1-\gamma)^{1/n} \tag{3}$$

Обсяг випробувань виробів (n) пропонується обґрунтувати виходячи з припущення, що

$$P_{2\gamma} \geq P_{\text{потр.}} \tag{4}$$

де $P_{\text{потр.}}$ – потрібна ОНДМ показника безвідмовності.

Із співвідношень (2), (3) і (4) слідує, що мінімальний обсяг випробувань виробів за умови наявності апріорної інформації та безвідмовних випробувань може бути розрахований за наступним співвідношенням:

$$n \geq \frac{\lg(1-\gamma_{\text{потр.}})}{\lg\left(1-\gamma_a \cdot \frac{1-P_{\text{потр.}}}{1-P_H}\right)} \tag{5}$$

де $\gamma_{\text{потр.}}$ – потрібна довірча імовірність для контролю показника безвідмовності.

За умови відсутності апріорної інформації обсяг випробувань виробів, який потрібно спланувати, знаходиться за співвідношенням [4]:

$$n = \frac{\lg(1-\gamma_{\text{потр.}})}{\lg P_{\text{потр.}}} \tag{5}$$

Нижче на рис. 1, 2 наведені результати розрахунків потрібної кількості виробів для проведення випробувань у вигляді графіків залежностей потрібного обсягу випробувань для умов наявності (рис. 1) та відсутності (рис. 2) апріорної інформації відповідно.

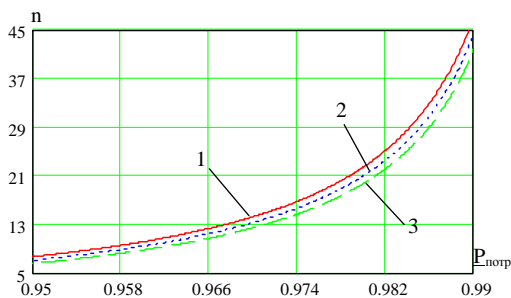


Рис. 1. Графіки залежностей обсягів випробувань виробів (n) від потрібної величини ОНДМ показника безвідмовності ($P_{\text{потр.}}$) за умови наявності апріорної інформації при фіксованих величинах $\gamma_{\text{потр.}}=0,98$ та $P_H=0,9$ для різних значень γ_a :
1 – для 0,8; 2 – для 0,85; 3 – для 0,9

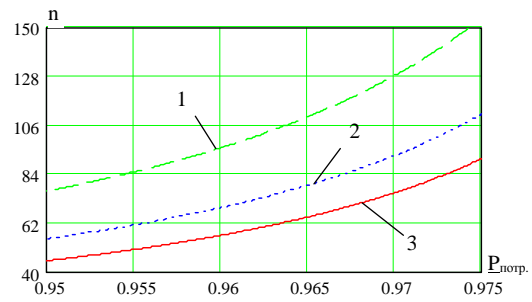


Рис. 2. Графіки залежностей обсягів випробувань виробів (n) від потрібної величини ОНДМ показника безвідмовності ($P_{\text{потр.}}$) за умови відсутності апріорної інформації при різних величинах $\gamma_{\text{потр.}}$:
1 – для 0,98; 2 – для 0,95; 3 – для 0,9

З наведених графіків залежностей на рис. 1 видно, що за наявності апріорних даних щодо показників безвідмовності ($P_H=0,9$ при $\gamma_a = \{0,8; 0,85; 0,9\}$) для контролю ІБР у формі ОНДМ на рівні $P_{\text{потр.}}=0,95$ потрібний мінімальний обсяг випробувань повинен дорівнювати наступним значенням:

- не менше 6 виробів при $\gamma_a=0,8$;
- не менше 7 виробів при $\gamma_a=0,85$;
- не менше 8 виробів при $\gamma_a=0,9$.

За умов відсутності апріорних даних щодо показників безвідмовності для контролю ІБР у формі ОНДМ на рівні $P_{\text{потр.}}=0,95$ при потрібних довірчих ймовірностях $\gamma_{\text{потр.}}=\{0,98; 0,95; 0,9\}$ потрібний мінімальний обсяг випробувань повинен дорівнювати наступним значенням:

- не менше 77 виробів при $\gamma_{\text{потр.}}=0,98$;
- не менше 56 виробів при $\gamma_{\text{потр.}}=0,95$;
- не менше 45 виробів при $\gamma_{\text{потр.}}=0,9$.

Для підтвердження ОНДМ показника безвідмовності на рівні $P_{\text{потр.}}=0,95$ при довірчій імовірності $\gamma_{\text{потр.}}=0,98$ потрібний обсяг безвідмовних випробувань при наявності апріорної інформації буде значно меншим потрібного обсягу таких випробувань при відсутності апріорної інформації.

Висновки

Для контролю показників безвідмовності РДТП та ЗКР з тривалою експлуатацією в програмі робіт з продовження призначених показників доцільно передбачити вогневі стендові випробування РДТП та контрольні льотні випробування ЗКР. З метою мінімізації обсягів цих випробувань виробів пропонується пред'являти вимоги щодо показників безвідмовності в формі ОНДМ.

Отримані співвідношення для контролю показника ІБР у формі ОНДМ з урахуванням апіорної інформації у вигляді одностороннього довірчого інтервалу з довірчою імовірністю $\gamma_a < 1$. Наведені результати моделювання залежності потрібної кількості виробів для проведення випробувань для умов наявності та відсутності апіорної інформації. Показано, що для контролю показника безвідмовності в формі ОНДМ обсяг випробувань виробів при наявності апіорної інформації може бути значно зменшений в порівнянні з обсягом випробувань при відсутності апіорної інформації.

Список літератури

1. Ланецький Б.М. Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту засобів зенітних ракетних систем: Навчальний посібник Ч.1 / Б.М. Ланецький, В.С. Жуков, О.С. Алексєєв; за ред. Б.М. Ланецького. – Х.: ХУПС, 2009. – 509 с.
2. Ланецький Б.Н. Особенности анализа надежности ракетных двигателей твердого топлива зенитных управляемых ракет для решения задач продления их назначенных показателей / Б.Н. Ланецкий, И.В. Коваль, В.В. Лукьянчук, А.А. Шоколовский, В.П. Попов // Наука і

техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – ХУПС, 2010. – № 2 (4). – С. 82-87.

3. Ланецкий Б.Н. Рекомендации по обоснованию объемов испытаний зенитных управляемых ракет при решении задач продления их назначенных показателей / Б.Н. Ланецкий, И.В.Коваль, А.А.Шоколовский, В.П.Попов, К.В. Борисенко // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 4(120). – С. 31-35.

4. Статистические задачи обработки систем и таблицы для числовых расчётов показателей надёжности: Учеб. пособие для вузов; Под ред. Р.С. Судакова. – М.: Высшая школа, 1975. – 604 с.

5. Скрипник В.М. Альтернативные испытания малых выборок на надёжность / В.М. Скрипник, А.Л. Гречин; под ред. А.М. Широкова. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 240 с.

6. Надёжность технических систем: Справочник / Ю.К. Белов, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под редакцией Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

Надійшла до редколегії 7.11.2016

Рецензент: д-р техн. наук проф. Б.О. Демідов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕМОМ ИСПЫТАНИЙ ЗЕНИТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ И РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ ИХ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОДЛЕНИЯ НАЗНАЧЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Б.Н. Ланецкий, И.В. Коваль, В.В. Лукьянчук

В статье обосновываются требуемые объемы контрольных летных испытаний (КЛИ) зенитных управляемых ракет (ЗУР) и огневых стендовых испытаний ракетных двигателей твердого топлива при их продолжительной эксплуатации для решения задач продления назначенных показателей. Предлагается обосновывать объемы испытаний с учетом априорной информации относительно показателей безотказности, которая получена по результатам предыдущих работ по продлению в виде доверительного интервала.

Ключевые слова: объемы испытаний зенитных управляемых ракет, объемы огневых стендовых испытаний, вероятность безотказной работы, априорная информация, доверительный интервал, доверительная вероятность.

SUBSTANTIATION OF EXTENT OF TEST OF SURFACE-TO-AIR MISSILES AND MISSILE SOLID-PROPELLANT MISSILE ENGINES IN THE CASE OF THEIR CONTINUOUS SERVICE FOR SOLVING PROBLEMS OF EXTENSION OF STATED INDICES

B.N. Lanetsky, I.V. Koval, V.V. Lukyanchuk

Required extent of control-flight test for surface-to-air missiles and firing block test of solid-propellant missile engines in the case of their continuous service for solving problems of extension of stated indices is substantiated in the work. It is proposed to substantiate extent of test taking into account a priori information about reliability factors, which was obtained from results of previous tests as the confidence interval.

Keywords: extent of test of surface-to-air missiles, extent of firing block test of solid-propellant missile engines, faultness probability, a priori information, confidence interval, confidence probability.