

УДК 623.4.017

Б. М. ЛАНЕЦЬКИЙ, доктор технічних наук,
професор,

І. В. КОВАЛЬ, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,

В. В. ЛУК'ЯНЧУК, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

(Науковий центр Повітряних Сил Харківського
національного університету Повітряних Сил
ім. І. Кожедуба)

Методичні рекомендації щодо визначення кількості зенітних керованих ракет та ракетних двигунів для контрольних льотних та вогневих стендових випробувань при виконанні завдань продовження призначених показників

Розроблено аналітичні моделі з визначення кількості зенітних керованих ракет (ЗКР) та ракетних двигунів (РД) для проведення контрольних льотних та вогневих стендових випробувань при виконанні завдань продовження призначених показників та рекомендації щодо обґрунтування кількості ЗКР і РД для випробувань з урахуванням апріорної інформації щодо показників безвідмовності, що отримана за результатами попередніх робіт з продовження призначених показників у вигляді одностороннього нижнього довірчого інтервалу.

Разработаны аналитические модели для определения количества зенитных управляемых ракет (ЗУР) и ракетных двигателей (РД) для проведения контрольных летных и огневых стендовых испытаний при решении задач продления назначенных показателей и рекомендации для обоснования количества ЗУР и РД для испытаний с учетом априорной информации относительно показателей безотказности, которая получена по результатам предыдущих работ по продлению назначенных показателей в виде одностороннего нижнего доверительного интервала.

Зенітні керовані ракети (ЗКР), що знаходяться на озброєнні Повітряних Сил України, на теперішній час 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 призначених показників, за результатами яких приймається рішення щодо можливості їхнього продовження. Такі випробування є досить витратними, тому кількість ЗКР для їх проведення повинна бути мінімізована і обґрунтована за умов забезпечення підтвердження прийнятих оцінок показників надійності та безпеки.

Найважливішою складовою частиною ЗКР, що визначає безпеку її експлуатації та функціональні характеристики, є ракетні двигуни (РД). У зв'язку з цим до показників надійності РД пред'являються більш високі вимоги, ніж до показників надійності інших складових частин ЗКР (так, потрібна величина основного показника надійності РД – імовірності безвідмовної роботи становить 0,990–0,999) [1]. У процесі експлуатації РД та його складові частини не перевіряються. Стан порохових зарядів, піротехнічних засобів, гумовотехнічних деталей, теплозахисних покриттів та інших комплектувальних виробів РД, що 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 РД, що входять до складу ЗКР, та ЗКР у цілому.

Попереднє оцінювання показників надійності РД може проводитися на основі [2]:

апріорних даних про надійність комплектувальних виробів РД і РД у цілому, що отримані за результатами попередніх робіт з продовження;

інформації, що отримана за результатами вогневих стендових випробувань (ВСВ) РД та комплексних випробувань у складі ЗКР при КЛВ;

інформації, що отримана за результатами контрольно-технічних оглядів РД, у тому числі після розбирання РД і зовнішнього огляду його окремих комплектувальних виробів та за результатами проведення автономних випробувань окремих комплектувальних виробів РД.

Для РД, 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 РД значно зростає в разі неможливості проведення КЛВ ЗКР. Але ВСВ є руйнівними і досить витратними видами випробувань, тому їх обсяги повинні бути мінімізовані, при цьому повинно забезпечуватися підтвердження прийнятих оцінок показників надійності. Відомо, що ВСВ РД повинні бути забезпечені відповідними стендами та методиками для їх проведення. Це дозволяє забезпечити вимірювання основних параметрів РД та оцінювання показників надійності комплектувальних елементів РД, 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 у цілому.

При плануванні КЛВ ЗКР та ВСВ РД необхідно враховувати, що найменш витратними є безвідмовні випробування, при яких кількість виробів для їх проведення є мінімальною. Але в разі виникнення відмов виробів при проведенні таких випробувань кількість виробів може значно збільшуватися, що треба враховувати при плануванні випробувань як для ЗКР, так і для РД.

Питанням оцінювання результатів випробувань на надійність присвячено чимало робіт. Так, наприклад, стаття [3] присвячена обґрунтуванню обсягів випробувань ЗКР при вирішенні задач продовження їх призначених показників. У статті наведені основні розрахункові співвідношення і графіки залежностей, що 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.

У роботах [4, 5] розглядається відома класична модель випробувань, що заснована на біноміальній схемі. Наводяться співвідношення, які пов'язують показники надійності, що оцінюються, з кількістю виробів, потрібних для проведення випробувань. Окремий розділ присвячений питанням оцінювання показників надійності з урахуванням апріорної інформації, яка задана у вигляді достовірного довірчого інтервалу, тобто довірчої імовірності $\gamma_a = 1$. Однак з досвіду випробувань РД та ЗКР відомо, що таку довірчу імовірність отримати практично неможливо. Тому актуальним на даний час є проведення дослідження щодо оцінювання та контролю надійності виробів з урахуванням апріорної інформації у вигляді довірчого інтервалу з довірчою імовірністю (ДІ) $\gamma_a < 1$ при різних кількостях відмов при ВСВ та КЛВ.

Метою статті є обґрунтування кількості ЗКР та РД для проведення контрольних льотних та вогневих стендових випробувань при вирішенні задач продовження призначених показників з урахуванням апріорної інформації та кількості відмов при проведенні випробувань.

Обґрунтування кількості ЗКР та РД для проведення КЛВ та ВСВ при проведенні робіт з продовження призначених показників повинно проводитися з урахуванням апріорної інформації щодо показників надійності цих виробів. Стосовно обґрунтування кількості ЗКР для проведення КЛВ апріорною інформацією щодо показників надійності є інформація, отримана за результатами їх КЛВ при виконанні попередніх робіт з продовження. Але слід зазначити, що через малі обсяги 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 РД як апріорна використовується інформація щодо імовірності безвідмовної роботи (ІБР) РД, яка отримана

за результатами їхніх випробувань у складі ЗКР, тобто за результатами КЛВ ЗКР. У разі, якщо ці випробування є безвідмовними, оцінку ІБР ЗКР можливо прийняти за оцінку ІБР РД. Оскільки вимоги щодо величини ІБР РД є високими, то задачу її контролю доцільно вирішувати перевіркою виконання вимог у формі нижньої довірчої межі, що, у свою чергу, пов'язано з оцінюванням односторонньої нижньої довірчої межі (ОНДМ) цього показника. Найбільш прийнятною з погляду підтвердження вимог до надійності, є вимоги до номінального рівня $P_{номп.}$ та контрольного рівня $P_{номп.}$, який підтверджується з довірчою імовірністю γ . При цьому повинні виконуватися нерівності $P_{\gamma} \geq P_{номп.}$, $P_{номп.} < P_{номп.}$.

Апріорна інформація щодо імовірності безвідмовної роботи ЗКР під час виконання завдання або ІБР РД (далі – показника безвідмовності виробів) полягає в тому, що згідно з результатами попередніх випробувань показник безвідмовності знаходиться в інтервалі $[P_{на}, 1]$ 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 апріорного інтервалу ($\gamma_a = 1$) і результатів проведення випробувань за таким співвідношенням:

$$P_{2\gamma} = P_n + P_{1\gamma}(1 - P_n), \quad (1)$$

де $P_{1\gamma}$ – значення ОНДМ показника безвідмовності виробів, що отримується за результатами проведення випробувань без врахування апріорної інформації. Співвідношення (1) можна отримати фідучіальним методом [4, 6] у припущенні, що показник безвідмовності P , що оцінюється, є випадковою величиною, апріорний розподіл якої є рівномірним на інтервалі $[P_n, 1]$. Оцінка $P_{2\gamma}$, яка розрахована за співвідношенням (1), є завищеною, що може призводити до неправильних рішень.

У практиці проведення робіт з продовження призначених показників апріорний довірчий інтервал ІБР відомий з довірчою імовірністю $\gamma_a < 1$. У цьому випадку апостеріорна оцінка ОНДМ показника безвідмовності може бути розрахована за співвідношенням за умови $P_{1\gamma} \geq 1 - \gamma_a$.

$$P_{2\gamma} = 1 - \frac{1}{\gamma_a}(1 - P_{1\gamma})(1 - P_{на}) \quad (2)$$

Співвідношення (2) отримане фідучіальним методом [7] у припущенні, що апріорний розподіл випадкової величини P є рівномірним з імовірністю $1 - \gamma_a$ на інтервалі $[0, P_{на}]$ та з імовірністю γ_a на інтервалі $[P_{на}, 1]$.

У загальному випадку $P_{1\gamma}$ можна розраховувати за приблизним співвідношенням [8]

$$P_{1\gamma} \approx \frac{n-d}{n}(1-\gamma)^{\frac{1}{n-d}}, \quad (3)$$

де d – кількість виробів, що відмовили. Тоді співвідношення (2) можна записати у вигляді

$$P_{2\gamma} \approx 1 - \frac{1}{\gamma_a} \left[1 - \left(\frac{n-d}{n} (1-\gamma)^{n-d} \right) \right] (1 - P_{na}). \quad (4)$$

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

$$P_{1\gamma} = (1 - \gamma)^{1/n}. \quad (5)$$

Кількість виробів для випробувань пропонується обґрунтовувати, виходячи з припущення, що

$$P_{2\gamma} \geq P_{\text{нотр.}} \quad (6)$$

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

Із співвідношень (2), (5) і (6) випливає, що мінімальний обсяг безвідмовних випробувань виробів за умов наявності апіорної інформації може бути розрахований за співвідношенням

$$n \geq \frac{\ln(1 - \gamma_{\text{нотр.}})}{\ln\left(1 - \gamma_a \frac{1 - P_{\text{нотр.}}}{1 - P_{na}}\right)}, \quad (7)$$

де $\gamma_{\text{нотр.}}$ – потрібна довірна імовірність для контролю показника безвідмовності. Розрахунок за співвідношенням (7) виконується при виконанні нерівності $P_{na} \leq P_{\text{нотр.}}$.

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

$$n = \frac{\ln(1 - \gamma_{\text{нотр.}})}{\ln P_{\text{нотр.}}}. \quad (8)$$

Співвідношення (7) можна використовувати:

для обґрунтування кількості ЗКР при КЛВ, при цьому як показник безвідмовності, що контролюється, рекомендується використовувати імовірність, яка дорівнює добутку $P_{n,n} P_{\text{вз}}$, де $P_{n,n}$ – імовірність того, що в період бойового чергування ЗКР, поставлена на передстартову підготовку, за результатами контролю передстартової підготовки буде визнана готовою до використання в бойовій роботі (або імовірність безвідмовної передстартової підготовки); $P_{\text{вз}}$ – умовна імовірність безвідмовної роботи ракети за час виконання польотного завдання за умови позитивного результату контролю передстартової підготовки;

для обґрунтування кількості ВСВ РД, при цьому як показника безвідмовності, що контролюється, використовується ІБР РД за тривалість його роботи.

Номинальні значення ІБР РД, з міркувань безпеки рекомендується обирати на рівні 0,95...0,99, а для ЗКР значення імовірності, яка є добутком $P_{n,n} P_{\text{вз}}$, рекомендується обирати на рівні 0,6...0,8.

Нижче наведені результати розрахунків мінімальної потрібної кількості ЗКР та РД для проведення випробувань за співвідношенням (7) у вигляді графіків залежностей мінімальної потрібної кількості випробувань n від величини апіорної ОНДМ: на рис. 1 – для РД, на рис. 2 – для ЗКР відповідно. Залежності будуються при виконанні нерівностей: $P_{na} \leq P_{\text{нотр.}}$ та $P_{2\gamma} \geq P_{\text{нотр.}}$.

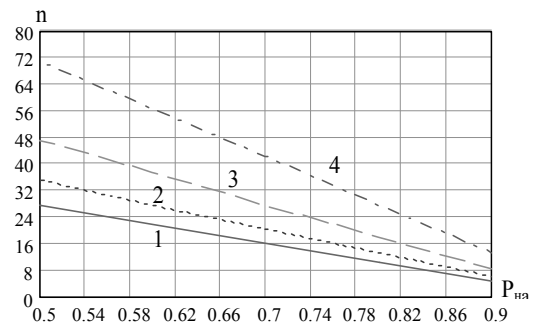


Рис. 1. Графіки залежностей мінімальних потрібних кількостей РД для ВСВ від величини апіорної ОНДМ при фіксованих величинах $\gamma_a = 0,8$; $\gamma_{\text{нотр.}} = 0,9$ та різних значеннях $P_{\text{нотр.}}$: 1 – 0,95; 2 – 0,96; 3 – 0,97; 4 – 0,98

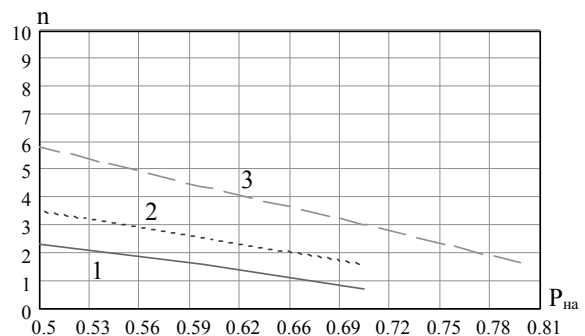


Рис. 2. Графіки залежностей мінімальних потрібних кількостей ЗКР для КЛВ від величини апіорної ОНДМ при фіксованих величинах $\gamma_a = 0,7$; $\gamma_{\text{нотр.}} = 0,85$ та різних значеннях $P_{\text{нотр.}}$: 1 – 0,6; 2 – 0,7; 3 – 0,8

На рис. 3 для порівняння наведені графіки залежностей мінімальних потрібних кількостей ЗКР та РД для проведення КЛВ та ВСВ від величини $P_{\text{нотр.}}$ за умов відсутності апіорної інформації, розраховані за співвідношенням (7).

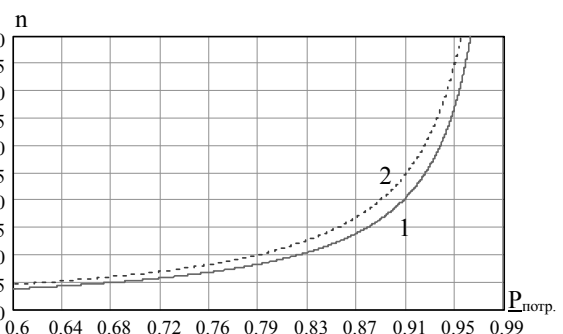


Рис. 3. Графіки залежностей мінімальних потрібних кількостей ЗКР та РД від величини $P_{\text{нотр.}}$: 1 – для ЗКР при $\gamma_{\text{нотр.}} = 0,85$; 2 – для РД при $\gamma_{\text{нотр.}} = 0,9$ за умов відсутності апіорної інформації

У табл. 1 для порівняння як приклад наведені мінімальні кількості ЗКР і РД, що потрібні для проведення КЛВ ЗКР та ВСВ РД за умов наявності і відсутності апіорної інформації щодо показників надійності для потрібних значень $\gamma_{\text{нотр.}}$ і $P_{\text{нотр.}}$. Дані для порівняння обрані з графіків залежностей, наведених на рис. 1–3.

Таблиця 1. Мінімальні кількості ЗКР і РД, що потрібні для проведення контрольних льотних та вогневих стендових випробувань

Потрібні величини ДІ та контрольного рівня Р для ЗКР	Характеристика апіорної інформації щодо надійності ЗКР	Потрібна кількість ЗКР для КЛВ	Потрібні величини ДІ та контрольного рівня Р для РД	Характеристика апіорної інформації щодо надійності РД	Потрібна кількість РД для ВСВ
$\gamma_{номр.}=0,85$; $P_{номр.}=0,8$	$P_{на}=0,6$; $\gamma_a=0,7$	5	$\gamma_{номр.}=0,9$; $P_{номр.}=0,95$	$P_{на}=0,6$; $\gamma_a=0,8$	22
	$P_{на}=0,7$; $\gamma_a=0,7$	3		$P_{на}=0,7$; $\gamma_a=0,8$	16
	$P_{на}=0,8$; $\gamma_a=0,7$	2		$P_{на}=0,9$; $\gamma_a=0,8$	4
	відсутня	8		відсутня	45

У разі виникнення відмов у процесі проведення випробувань кількість виробів для їх проведення повинна уточнюватися з використанням співвідношень (4) і (6). На рис. 4 показані графіки залежностей для апостеріорної ОНДМ $P_{2\gamma}$ від кількості виробів n при фіксованих значеннях d , $P_{на}$, γ_a , $\gamma_{номр.}$. При цьому потрібна кількість n обирається шляхом вирішення задачі графічним методом у відповідності до критерію (6). На графіках для прикладу обрана величина контрольного рівня $P_{номр.}=0,95$ у відповідності до якої обирається потрібна кількість виробів n з урахуванням кількості відмов $d=\{0,1,2,3\}$.

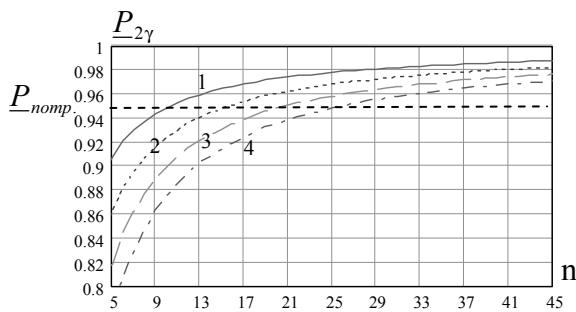


Рис. 4. Графіки залежностей апостеріорної оцінки ОНДМ показника безвідмовності від кількості РД для ВСВ при фіксованих $\gamma_{номр.}=0,9$; $\gamma_a=0,8$; $P_{на}=0,8$: для $d=0$ (крива 1); для $d=1$ (крива 2); для $d=2$ (крива 3); для $d=3$ (крива 4)

З наведених графіків залежностей можна зробити висновки, що за умов виконання вимог щодо рівня ОНДМ $P_{номр.}=0,95$ мінімальна потрібна кількість РД складає 10 виробів ($n=10$), а у разі випробувань з відмовами вона складає: 16 РД при $d=1$; 20 РД при $d=2$; 25 РД при $d=3$. Аналогічно побудовані графіки залежностей апостеріорної оцінки ОНДМ показника безвідмовності від кількості ЗКР при КЛВ. Як початкові дані прийняті такі: $\gamma_{номр.}=0,85$; $\gamma_a=0,7$; $P_{на}=0,7$. З графіків випливає, що за умов виконання вимог щодо рівня ОНДМ $P_{номр.}=0,8$ мінімальна потрібна кількість складає 4 ЗКР ($n=4$), а у разі випробувань з відмовами: 6 ЗКР при $d=1$; 8 ЗКР при $d=2$; 10 ЗКР при $d=3$.

Висновки. За результатами проведених досліджень можна надати такі методичні рекомендації:

при плануванні обсягів контрольних льотних випробувань ЗКР та вогневих стендових випробувань РД

необхідно проводити обґрунтування їх мінімальних обсягів з використанням співвідношень (2), (5), (7);

обґрунтовувати мінімальні потрібні кількості ЗКР та РД для проведення КЛВ та ВСВ можливо за наявності апіорної інформації у вигляді ОНДМ рівня $\gamma_a < 1$;

у більш загальному випадку при відмовах об'єктів випробувань ($d > 0$) при їх проведенні потрібно будувати залежність $P_{2\gamma}$ від n при різних кількостях відмов об'єктів d у відповідності до співвідношень (4) і обирати кількість виробів для випробувань в залежності від $P_{номр.}$ за критерієм (6).

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ланецький Б. М., Жуков В. С., Алексєєв О. С. Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту засобів зенітних ракетних систем : навч. посіб. Ч. 1. Х. : ХУПС, 2009. 509 с.
2. Ланецький Б. Н., Коваль І. В., Лук'яничук В. В. Шоколовський А. А., Попов В. П. Особенности анализа надежности ракетных двигателей твердого топлива зенитных управляемых ракет для решения задач продления их назначенных показателей // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України / ХУПС. 2010. Вип. 2 (4). С. 82–87.
3. Ланецький Б. Н., Коваль І. В., Шоколовський А. А., Попов В. П., Борисенко К. В. Рекомендации по обоснованию объемов испытаний зенитных управляемых ракет при решении задач продления их назначенных показателей // Системы обработки інформації. 2014. Вип. 4 (120). С. 25–31.
4. Статистические задачи отработки систем и таблицы для числовых расчётов показателей надёжности : учеб. пособ. для вузов / под ред. Р. С. Судакова. М. : Высш. шк., 1975. 604 с.
5. Скрипник В. М., Гречин А. Л. Альтернативные испытания малых выборок на надёжность / под ред. А. М. Широкова. Мн. : Наука и техника, 1986. 240 с.
6. Надёжность технических систем : справ. / Ю. К. Белов, В. А. Богатырев, В. В. Болотин [и др.]. М. : Радио и связь. 1985. 608 с.
7. Ланецький Б. М., Коваль І. В., Лук'яничук В. В. Обґрунтування обсягів випробувань зенітних керованих ракет та ракетних двигунів твердого палива при їх тривалій експлуатації для вирішення завдань

- продовження призначених показників // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України / ХУПС. 2016. № 4 (25). С. 44–47.
8. Надёжность и эффективность в технике : справ. В 10 т. М. : Машиностроение, 1989. Т. 6: Экспериментальная отработка и испытания / под общ. ред. Р. С. Судакова, О. И. Тескина. – 374 с.
- Рецензент Б. О. Демідов**, д-р техн. наук, проф. (Науковий центр Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба)