

УДК 623.4.017

Б.Н. Ланецкий, И.В. Коваль, А.А. Шоколовский, В.П. Попов, К.В. Борисенко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБОСНОВАНИЮ ОБЪЁМОВ ИСПЫТАНИЙ ЗЕНИТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРОДЛЕНИЯ ИХ НАЗНАЧЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Рассматриваются вопросы обоснования объёмов испытаний зенитных управляемых ракет (ЗУР) при решении задач продления их назначенных показателей. Приводятся основные расчётные соотношения и графики зависимостей, используемые при обосновании количества ЗУР, необходимых для проведения испытаний, и их продолжительности. Разрабатываются рекомендации по порядку обоснования объёмов испытаний ЗУР.

**Ключевые слова:** продление назначенных показателей, средний остаточный ресурс, продолжительность испытаний.

### Введение

**Постановка проблемы.** Одной из основных задач, решаемых при продлении назначенных показателей (НП) ЗУР, является задача проведения испытаний и исследований по оценке технического состояния ЗУР, их составных частей, комплектующих элементов и материалов, оценке и прогнозированию их надёжности. По результатам проведённых испытаний и исследований, их обработки и анализа должны приниматься обоснованные решения о возможности продления установленных в нормативной документации назначенных показателей. Для обоснованного принятия таких решений необходимо располагать результатами оценивания и контроля показателей "остаточной надёжности" ЗУР в целом, её составных частей, комплектующих изделий приемлемой точности и достоверности. В свою очередь, для получения таких результатов оценивания и контроля показателей остаточной надёжности необходимо спланировать соответствующие испытания, обосновать требуемые их объёмы.

В зависимости от типа ЗУР, распределения парка ЗУР по годам их изготовления, особенностей режимов и условий их эксплуатации, наличия априорной информации о техническом состоянии и уровне надёжности на момент планирования испытаний объёмы испытаний будут существенно отличаться. В связи с этим при разработке программ работ по продлению назначенных показателей ЗУР актуальной является задача обоснования объёмов испытаний на надёжность ЗУР в целом, их составных частей, комплектующих изделий и материалов.

**Анализ литературы.** Имеется большое количество работ, посвящённых вопросам обоснования объёмов испытаний на надёжность опытных и серийно изготавливаемых изделий. Решение задачи планирования объёмов испытаний на надёжность

при проведении работ по продлению НП ЗУР имеет свою специфику. Для принятия обоснованных решений по продлению НП необходимо оценивать показатели остаточной долговечности, остаточной сохраняемости и другие показатели "остаточной надёжности" парка ЗУР.

В известных работах [1 – 7] в основе оценивания показателей ресурса лежат физические и статистические методы. Физические методы основаны на физических принципах расходования ресурса [1, 2, 3], их применение ограничено тем, что они не учитывают случайную природу отказов, а полученные этими методами оценки позитивных показателей долговечности характеризуют их максимальное значение без учёта фактических режимов и условий эксплуатации. Использование физических представлений о ресурсных характеристиках изделий с использованием вероятностно-статистических методов их оценки рассматривается как наиболее перспективное направление [6].

При наличии результатов подконтрольной и лидерной эксплуатации ЗУР, их составных частей, специальных испытаний на надёжность целесообразно использовать вероятностно-статистические методы оценивания показателей остаточной долговечности [4, 6, 7]. В связи с этим ниже для обоснования объёмов испытаний ЗУР при решении задач продления их назначенных показателей рекомендуется использовать вероятностно-статистический подход.

**Цель статьи.** Разработка рекомендаций по обоснованию объёмов испытаний ЗУР на надёжность при решении задач продления их назначенных показателей.

### Основная часть

При решении задач продления НП используют показатели остаточного срока службы и остаточного ресурса –  $R(\tau)$  сверх наработки  $\tau$  (далее – остаточ-

ный ресурс). Под остаточным ресурсом понимается суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние [8]. Под средним остаточным ресурсом изделия понимают математическое ожидание остаточного ресурса сверх наработки  $\tau$ , т. е.:

$$R(\tau) = M(\xi_\tau), \text{ где } \xi_\tau = \begin{cases} \xi - \tau & \text{при } \xi \geq \tau, \\ 0 & \text{при } \xi \leq \tau. \end{cases}$$

$\xi$  – наработка до ресурсного отказа.

При  $\tau = 0$  величина  $R(\tau)$  равна "среднему ресурсу", установленному в [8].

При известном законе распределения наработки до ресурсного отказа –  $P(x)$ , величина среднего остаточного ресурса оценивается по соотношению:

$$R(\tau) = \frac{1}{P(\tau)} \int_{\tau}^{\infty} P(x) dx. \quad (1)$$

При работах по продлению НП исследуются величины "усечённых остаточных ресурсов" парка ЗУР, рассматриваемых на интервале  $(\tau, \tau+t)$ . Величина "усечённого остаточного ресурса" определяется как условная случайная величина:

$$\xi_\tau(t) = \begin{cases} \xi - \tau, & \text{если изделие отказало на интервале } (\tau, \tau+t); \\ t, & \text{если изделие не отказало на интервале } (\tau, \tau+t), \end{cases}$$

где  $t$  – продолжительность испытаний (наблюдений). Соответствующий показатель – "усечённый средний остаточный ресурс" определён как математическое ожидание случайной величины  $\xi_\tau(t)$  [6]:

$$R_t(\tau) = M\{\xi_\tau(t)\}.$$

При известном  $P(x)$  величина  $R_t(\tau)$  рассчитывается по соотношению:

$$R_t(\tau) = \frac{1}{P(\tau)} \int_{\tau}^{\tau+t} P(x) dx.$$

Продлеваемый интервал эксплуатации ЗУР, безотказно эксплуатируемых в течение календарной продолжительности  $\tau$ , устанавливается на основе результатов оценивания среднего остаточного срока службы сверх времени  $\tau$ . Аналогично, продлеваемая величина назначенного ресурса ЗУР в пределах продлеваемого назначенного срока службы устанавливается на основе результатов оценивания среднего остаточного ресурса сверх наработки  $\tau$ . Приведённые ниже соотношения можно использовать применительно к календарным продолжительностям эксплуатации и к ресурсным характеристикам.

Так как  $R(\tau) \geq R_t(\tau)$ , то при заданной доверительной вероятности  $\gamma$  любая односторонняя нижняя доверительная граница (ОНДГ) для  $R_t(\tau)$  является также ОНДГ для  $R(\tau)$ . В работе [6] получена оценка для ОНДГ показателя  $R_t(\tau)$  уровня  $\gamma$  при произ-

вольном законе распределения среднего остаточного ресурса, которая представлена в виде:

$$R_{t\gamma}^{(H)}(\tau) = \widehat{R}_t(\tau) - \frac{t}{2} \sqrt{\left( \frac{1}{n} + \frac{1}{P(\tau)} - 1 \right) \frac{\gamma}{1-\gamma}}, \quad (2)$$

$$\widehat{R}_t(\tau) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} \xi_\tau^{(i)}(t),$$

где  $n$  – общее число однотипных изделий с начала наблюдений, т.е при  $t=0$ ;  $k$  – число отказавших изделий за наработку  $\tau$ ,

$$\xi_\tau^{(i)}(t) =$$

$$= \begin{cases} \xi_i - \tau, & \text{если } i\text{-е изделие отказало на интервале } (\tau, \tau+t); \\ t, & \text{если } i\text{-е изделие не отказало на интервале } (\tau, \tau+t), \end{cases}$$

где  $\xi_i$  – наработка  $i$ -го изделия до ресурсного отказа.

Пусть ожидаемый уровень среднего остаточного ресурса не менее  $\rho$  с вероятностью не ниже  $\gamma$ , т.е.  $\text{Вер}[R(\tau) \geq \rho] \geq \gamma$ . Найдём минимально необходимую продолжительность испытаний (наблюдений) –  $t_p$  сверх времени  $\tau$  при условии, что в течение интервала  $(\tau, \tau+t_p)$  не будут наблюдаться отказы. Из формулы (2) при принятых допущениях можно получить следующее соотношение для величины  $t_p$ :

$$t_p = \frac{\rho}{1 - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{1}{n} + \frac{1}{P(\tau)} - 1 \right) \frac{\gamma}{1-\gamma}}}. \quad (3)$$

При  $P(\tau) = 1$  соотношение (3) преобразуется к виду:

$$t_p = \frac{\rho}{1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma}{n(1-\gamma)}}}. \quad (4)$$

Этот результат получен в [6]. Из (3) следует, что при уменьшении ожидаемого уровня среднего остаточного ресурса ЗУР время наблюдения  $t_p$  уменьшается. То же самое происходит и при уменьшении вероятности  $\gamma$ , а также при увеличении  $n$  или вероятности  $P(\tau)$ .

Требуемое количество ЗУР, выделяемое на испытания, можно оценить, используя соотношение (2). Проведя преобразования, аналогичные вышеизложенным, при  $P(\tau) = 1$ , получим следующее соотношение для минимального количества ЗУР, которые необходимо выделить на испытания:

$$n \geq \frac{\gamma}{4(1-\gamma)} \left( 1 + \frac{R_{t\gamma}^{(H)}(\tau)}{t - R_{t\gamma}^{(H)}(\tau)} \right)^2. \quad (5)$$

Ниже на рис. 1 приведены графики зависимостей минимального требуемого количества ЗУР для проведения наблюдений (испытаний) от  $t$ , полученные в соответствии с соотношением (5). Как видно из

приведённых графиков зависимостей при увеличении продолжительности испытаний (наблюдений) минимальное количество изделий, необходимое для испытаний, уменьшается и составляет при  $t=60$  месяцев: 1) 7 изделий при  $\gamma=0,8$ ; 2) 10 изделий при  $\gamma=0,85$ ; 3) 15 изделий при  $\gamma=0,9$ ; 4) 30 изделий при  $\gamma=0,95$ . При этом предполагается, что ОНДГ величины среднего остаточного ресурса составляет 36 месяцев.

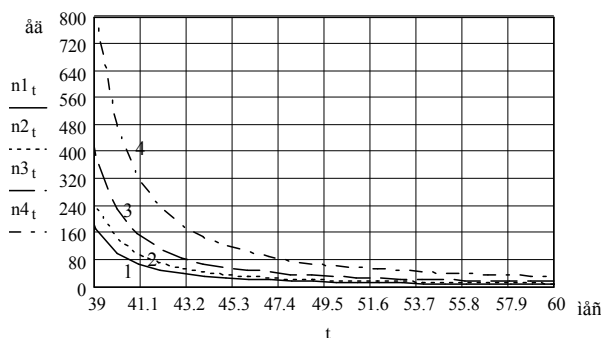


Рис. 1. Графики зависимостей минимального количества изделий, необходимых для проведения испытаний от продолжительности испытаний, полученные при величинах доверительных вероятностей 1)  $\gamma=0,8$ ; 2)  $\gamma=0,85$ ; 3)  $\gamma=0,9$ ; 4)  $\gamma=0,95$

При планировании объёма испытаний в рамках Программы работ по продлению НП ЗУР рекомендуется сначала рассчитывать требуемое количество ЗУР –  $n$ , а затем уточнять величину продолжительности испытаний –  $t_p$ . При решении задач продления первоначально установленных НП ЗУР, как правило  $P(\tau)=1$ , и для планирования объёмов испытаний можно использовать соотношения (4), (5). Однако для решения задач продления НП парка ЗУР с продолжительностью эксплуатации, значительно превышающей первоначально установленные НП, как правило  $P(\tau) \neq 1$ . В связи с этим необходимым является уточнение минимально необходимых количества изделий для испытаний –  $n$  и продолжительности испытаний (наблюдений)  $t_p$  с использованием соотношения (3).

Ниже на рис. 2. представлены графики зависимостей продолжительностей испытаний –  $t_p$  от продолжительности ожидаемого уровня среднего остаточного ресурса при следующих величинах:  $P(\tau)=0,8$  и 1, минимальное количество изделий для проведения испытаний  $n=7, 15, 30$ .

Из приведённых на рис. 2 графиков зависимостей следует, что при установленном минимально необходимом количестве изделий для проведения испытаний в количестве  $n=7$  и вероятности безотказной работы  $P(\tau=60\text{мес.})=0,8$  время наблюдения (испытания)  $t_p$  составит примерно 86 месяцев. При увеличении  $n$  до 15 и 30 изделий  $t_p$  составит 75 и

70 месяцев соответственно. При  $P(\tau)=1$  и  $n=30$  время наблюдения  $t_p$  составит примерно 62 месяца.

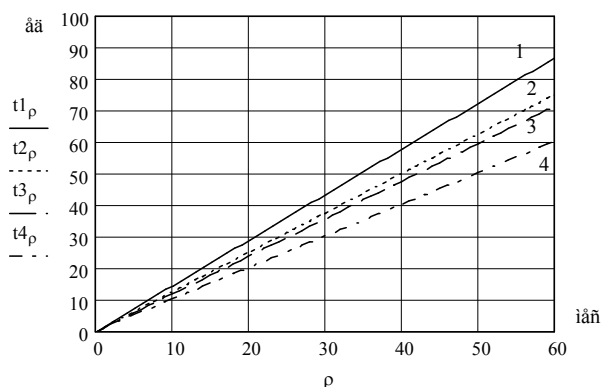


Рис. 2. Графики зависимостей времени наблюдения  $t_p$  от ожидаемого уровня среднего остаточного ресурса  $\rho$  при:

- 1)  $\gamma=0,8$ ;  $P(\tau)=0,8$ ;  $n=7$ ; 2)  $\gamma=0,8$ ;  $P(\tau)=0,8$ ;  $n=15$ ;
- 3)  $\gamma=0,8$ ;  $P(\tau)=0,8$ ;  $n=30$ ; 4)  $\gamma=0,8$ ;  $P(\tau)=1$ ;  $n=30$

При планировании работ по продлению НП для установления величины интервала продления необходимым является расчёт ОНДГ остаточного усечённого среднего ресурса  $R_{ty}^{(H)}(\tau)$  в соответствии с соотношением (2). При допущении, что продление НП производится впервые по окончании наработки  $\tau$  и  $P(\tau)=1$ ,  $\hat{R}_t(\tau)=t$ , а также  $t_p=62$  месяца в соответствии с соотношением (2), рассчитана зависимость величины  $R_{ty}^{(H)}(\tau)$  от  $n$ , которая приведена на графике 1 рис. 3. Из анализа этого графика можно сделать вывод, что  $R_{ty}^{(H)}(\tau)$  может быть принята примерно равной продолжительности планируемого интервала продления при установлении для испытаний количества ЗУР  $n \geq 30$ . Графики зависимостей 2 и 3 получены для тех же условий, но при  $P(\tau)=0,9$  и  $0,8$ .

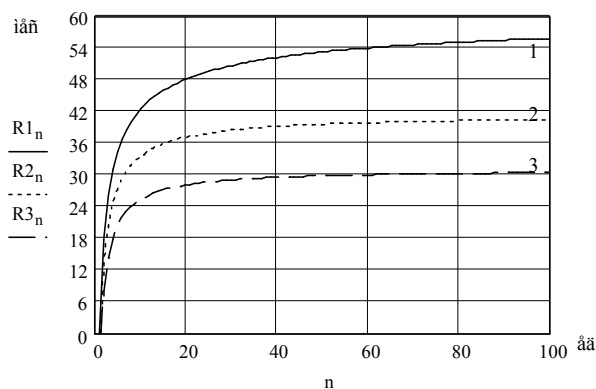


Рис. 3. Графики зависимостей уточнённой величины ОНДГ  $R_{ty}^{(H)}(\tau)$  от количества изделий при: 1)  $\gamma=0,8$ ,  $P(\tau)=1$ ,  $t=62$ ; 2)  $\gamma=0,8$ ,  $P(\tau)=0,9$ ,  $t=62$ ; 3)  $\gamma=0,8$ ,  $P(\tau)=0,8$ ,  $t=62$

Необходимо отметить, что ОНДГ показателя "средний остаточный ресурс" при известном законе распределения наработки до ресурсного отказа и произвольном законе отличаются. Проведём их количественный анализ при  $\tau=0$  и  $t \rightarrow \infty$  и при разных законах распределения наработки до ресурсного отказа.

Так, при нормальном законе распределения наработки до ресурсного отказа ОНДГ среднего ресурса, определяется по соотношению:

$$R_\gamma^{(i)}(n) = \hat{R}(n) - U_\gamma \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

где  $U_\gamma$  –  $\gamma$ -квантиль нормального распределения;

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;  $\hat{R}(n)$  – точечная оценка среднего ресурса. Для произвольного закона распределения наработки до ресурсного отказа ОНДГ среднего ресурса получается из формулы (2), при  $\tau=0$ ,  $P(\tau)=1$  и определяется по соотношению:

$$R_\gamma^{(i)}(n) = \hat{R}(n) - \sqrt{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

Точность оценивания среднего ресурса определяется ошибкой оценки показателя среднего ресурса, которая определяется как:

$$\Delta R_\gamma(n) = \hat{R}(n) - R_\gamma^{(i)}(n). \quad (8)$$

Из (8) следует, что при нормальном законе распределения величина ошибки оценки показателя среднего ресурса определяется как:

$$\Delta R_\gamma(n) = U_\gamma \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (9)$$

при произвольном законе распределения:

$$\Delta R_\gamma(n) = \sqrt{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (10)$$

Ниже на рис. 4 представлены графики зависимостей величин ошибок определения среднего ресурса от  $n$  при  $\sigma=5$  мес. и  $\gamma=\{0,8; 0,9\}$  для нормального (графики 1, 2) и произвольного (графики 3, 4) законов распределения соответственно.

Из приведённых зависимостей можно количественно оценить увеличение необходимых объемов испытаний при отсутствии данных о законах распределения наработки до ресурсного отказа.

При планировании работ по продлению НП ЗУР целесообразно устанавливать величину ОНДГ среднего остаточного срока службы не меньше величины продлеваемого интервала эксплуатации, а величину ОНДГ среднего остаточного ресурса не меньше чем величина, продлеваемого назначенного ресурса в пределах остаточного срока службы.

В эксплуатационной документации на ЗУР устанавливаются, как правило, несколько видов назначенных показателей, например: назначенный

срок службы, назначенный срок хранения, назначенный ресурс бортового оборудования, назначенная дальность транспортирования и другие.

■

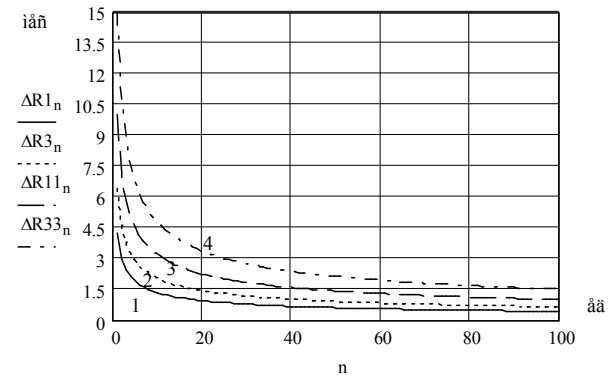


Рис. 4. Графики зависимостей величин ошибок определения среднего ресурса от  $n$  для нормального (график 1 при  $\gamma=0,8$ ; график 2 при  $\gamma=0,9$ ) и произвольного (график 3 при  $\gamma=0,8$ ; график 4 при  $\gamma=0,9$ ) законов распределения наработки до ресурсного отказа

Работы по продлению НП ЗУР проводятся на разных уровнях их разукрупнения, т.е. изделиях в целом, их составных частях, комплектующих элементах и материалах. НП устанавливаются применительно к изделию в целом, его соответствующим составным частям и комплектующим элементам. Основными составными частями, по которым планируются работы по продлению НП ЗУР, являются:

- бортовая аппаратура,
- планер,
- двигательная установка.

Для планирования работ по продлению необходимо определять возможность проверки и выработки всех установленных видов ресурсов на ЗУР. Требуемое количество ЗУР для проведения испытаний выбирается как максимальное количество ЗУР из числа ЗУР, необходимых для выполнения работ по продлению по каждому из назначенных показателей, т.е. из условия  $n = \max \{n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_l\}$ , где  $n_i$  – количество ЗУР, необходимое для выполнения работ с целью определения возможности продления  $i$ -го назначенного показателя,  $l$  – количество назначенных показателей. После проведения расчётов и выбора необходимого количества ЗУР целесообразно провести уточнение плановой длительности испытаний для тех видов ресурсов, по которым для исследований требуется количество изделий  $n_j < n$ . Уточнение плановой длительности испытаний проводится в соответствии с соотношением (3). Кроме того, при уточнении плановой длительности испытаний необходимо учитывать, то обстоятельство, что самыми длительными являются испытания на сохраняемость ЗУР в различных режимах. Максимально быстро можно получить результаты при проведении наблюдений

ний(испытаний) ЗУР на сохраняемость в наиболее жёстких для них условиях хранения, а затем произвести пересчёт полученных результатов для других более мягких условий.

## Выводы

В статье разработаны рекомендации по обоснованию объёмов испытаний ЗУР при решении задач продления их назначенных показателей.

Приведены расчётные соотношения для установления минимально необходимых объёмов испытаний (минимального количества изделий и минимально необходимой продолжительности их испытаний) для решения задач продления НП ЗУР. При обосновании объёмов испытаний рекомендуется сначала обосновывать требуемое количество ЗУР, а затем величину продолжительности их испытаний. В свою очередь, обоснование требуемого количества изделий рекомендуется проводить путём расчёта их минимально необходимого количества из условий: 1) ОНДГ среднего остаточного срока службы не меньше продолжительности продлеваемого интервала эксплуатации; 2) ОНДГ среднего остаточного ресурса не меньше чем величина, продлеваемого назначенного ресурса в пределах продлеваемого назначенного срока службы.

Приведены результаты сравнительного анализа зависимости точности оценки среднего ресурса от количества испытываемых изделий при известном и произвольном законах распределения наработки до ресурсного отказа.

В зависимости от наличия априорной информации о законах распределения наработок до ресурсного отказа для обоснования объёмов испытаний используются расчётные соотношения параметрических или непараметрических методов оценивания показателей остаточной долговечности.

Планируемые назначенные сроки службы не должны превышать полученные по результатам испытаний оценки ОНДГ среднего остаточного ресурса с заданной вероятностью.

## Список литературы

1. Карташов Г.Д. Модели расходования ресурса изделий электронной техники / Г.Д. Карташов // *Обзоры по электронной технике. – Серия 8. – Вып. 1(43).* – М.: ЦНИИ "Электроника", 1977.
2. Карташов Г.Д. Принципы расходования ресурса и их использование для оценки надёжности / Г.Д. Карташов. – М.: Знание, 1980. – 188 с..
3. Гродзенский С.Я. Физические методы обеспечения и оценки надёжности электронных приборов / С.Я. Гродзенский // *Обзоры по электронной технике. – Серия 1. – Вып. 8(797).* – М.: ЦНИИ "Электроника", 1982. – С. 12-35.
4. Садыхов Г.С. Показатель остаточного ресурса и его свойства / Г.С. Садыхов // *Издание АН СССР, серия "Техническая кибернетика".* – 1985. – №4. – С. 98-102.
5. Северцев Н.А. Надёжность сложных систем в эксплуатации и отработке / Н.А. Северцев. – М.: Сов. радио, 1989. – 432 с.
6. Садыхов Г.С. Остаточный ресурс объектов и методы его оценки / Г.С. Садыхов. – М.: Знание, 1986. – 98 с.
7. Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Т6. Экспериментальная отработка и испытания / Под общ. ред. Р.С. Судакова, О.И. Тёскина. – 376 с.
8. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – ГОСТ 27.002-89. – М., 1990. – 37 с.

Поступила в редколлегию 5.03.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.А. Демидов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## РЕКОМЕНДАЦІЇ З ОБҐРУНТУВАННЯ ОБ'ЄМІВ ВИПРОБУВАНЬ ЗЕНІТНИХ КЕРОВАНИХ РАКЕТ ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАВДАНЬ ПРОДОВЖЕННЯ ЇХ ПРИЗНАЧЕНИХ ПОКАЗНИКІВ

Б.М. Ланецький, І.В. Коваль, А.А. Шоколовський, В.П. Попов, К.В. Борісенко

*Розглядаються питання обґрунтування об'ємів випробувань зенітних керованих ракет (ЗКР) при вирішенні завдань продовження їх призначених показників. Приводяться основні розрахункові співвідношення і графіки залежностей, які використовуються при обґрунтуванні кількості ЗР, необхідних для проведення випробувань та їх тривалості. Розробляється рекомендації щодо порядку обґрунтування об'ємів випробувань ЗКР.*

**Ключові слова:** продовження призначених показників, середній залишковий ресурс, тривалість випробувань.

## RECOMMENDATIONS AS TO GROUNDING THE TEST SET VOLUMES FOR THE SURFACE-TO-AIR GUIDED MISSILES WHEN SOLVING THE PROBLEM OF EXTENDING THEIR ASSIGNED SERVICE TERMS

B.N. Lanecky, I.V. Koval, A.A. Shokolovsky, V.P. Popov, K.V. Borisenko

*The issue of determining test set volumes for the surface-to-air guided missiles (SAGM) when deciding on the issue of extending their assigned service terms. Basic computation expressions are given along with the plots that are used when deciding on the number of SAGM to be tested and on the duration of tests themselves. Recommendations are presented as to how decide on the SAGM test set volumes.*

**Keywords:** extending the assigned service terms, mean resource left, test duration.