

УДК 621.391

Б.Н. Ланецкий, А.А. Артеменко

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МОМЕНТОВ ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ РЭС ЗРК, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

Формулируется задача определения периода проведения контролей предельного состояния (КПС) по технико-экономическому критерию, предлагается метод её решения. Приводятся основные расчетные соотношения для разных вариантов задания регрессионных зависимостей показателей безотказности от календарной продолжительности эксплуатации (суммарной наработки). Предлагаются рекомендации по обоснованию периода проведения КПС.

**Ключевые слова:** периодичность КПС, оптимизационная задача, средние удельные затраты, параметра потока отказов, радиоэлектронные средства зенитных ракетных комплексов.

### Введение

**Постановка проблемы.** Одной из задач, решаемых при эксплуатации радиоэлектронных средств (РЭС) ЗРК по техническому состоянию (ЭТС), является определение периодичностей проведения контролей предельного состояния (КПС) РЭС.

В нормативных документах [1], регламентирующих эксплуатацию по техническому состоянию, установлен фиксированный период проведения КПС РЭС, не зависящий от фактического технического состояния объекта. Для снижения затрат на ЭТС целесообразно период КПС увеличивать. При этом возрастает вероятность перехода РЭС в предельное состояние на интервалах между КПС. В связи с этим необходимо технико-экономическое обоснование такого периода проведения КПС, при котором не допускается переход РЭС в предельное состояние, а суммарные (удельные) затраты на ЭТС – минимальные.

**Анализ литературы.** В научно-технической литературе решение задачи определения оптимальных периодичностей проведения КПС при эксплуатации по техническому состоянию фактически не исследованы. В [2 – 5] рассматривается задачи оптимизации периодичности проведения ремонтов (полных восстановлений) и “профилактических обслуживаний” для СТС различного назначения. В этих работах предполагается известной функция распределения наработки между отказами. При ЭТС функция распределения наработки СТС до ресурсного отказа, как правило, неизвестна. Одним из критериев наступления предельного состояния РЭС ЗРК при ЭТС [6] является достижение показателя “средняя наработка на отказ” и (или) “вероятность безотказного включения” своих предельно допустимых значений. В [7] оцениваются требования к точности определения этих показателей при КПС.

**Целью статьи** является обоснование выбора моментов проведения контролей предельного со-

стояния РЭС ЗРК, эксплуатируемых по техническому состоянию.

### Основная часть

Одной из особенностей эксплуатации по техническому состоянию является обязательность проведения КПС. Эффективность проведения КПС в значительной мере определяется его своевременностью. На основе информации, собираемой в процессе ЭТС (данные о наработках между отказами, собираемые на интервалах между КПС, результатов проведения испытаний на безотказность при КПС и др.) оцениваются показатели безотказности объекта и строятся их регрессионные зависимости от календарной продолжительности эксплуатации (суммарной наработки), которые предлагается использовать для принятия решения о предельном (непредельном) состоянии объекта контроля и для обоснования моментов проведения последующих КПС.

При наличии отработанной системы контроля технического состояния РЭС ЗРК, совершенной системы сбора и обработки информации о надежности момент проведения КПС целесообразно определять по результатам прогнозирования момента наступления предельного состояния. Как правило, при КПС контролируются показатели безотказности (ПБ), стоимости выполненных к моменту проведения КПС технических обслуживаний и текущих ремонтов и при необходимости оценивается стоимость восстановительных работ или предстоящего ремонта или технических обслуживаний и ремонтов на интервале эксплуатации до проведения следующего КПС [6].

Сформулируем задачу обоснования выбора моментов проведения контролей предельного состояния РЭС ЗРК, эксплуатируемых по техническому состоянию. Будем считать, что КПС проводится с периодом  $t$ . Отказы между КПС устраняются с помощью текущих ремонтов, которые можно отне-

сти к минимальным восстановлением (МВ) [2]. Средние затраты на проведение МВ составляют  $C_m$ ; на проведение КПС –  $C_{кпс}$ . Кроме того, при ЭТС РЭС ЗРК предполагается известной регрессионная зависимость параметра потока отказов РЭС ЗРК от календарной продолжительности эксплуатации или суммарной наработки  $\omega(t)$ . Ниже рассмотрены регрессионные зависимости параметра потока отказов РЭС ЗРК от календарной продолжительности эксплуатации.

На каждый цикл "эксплуатация – КПС"  $[0, \tau]$  приходится в среднем [2, 3]

$$\Omega(\tau) = \int_0^{\tau} \omega(t) dt \quad (1)$$

минимальных восстановлений. Поэтому соотношение для интенсивности удельных затрат за цикл "эксплуатация – КПС" можно представить в виде

$$R(\tau) = \frac{C_m \Omega(\tau) + C_{кпс}}{\tau} \quad (2)$$

В [6, 8] показано, что зависимость  $\omega(t)$  на интервалах штатной эксплуатации РЭС ЗРК между ремонтами является монотонной неубывающей. Так как за интервал  $(0, \tau)$  изделие не должно перейти в предельное состояние, то в соответствии с техническим критерием предельного состояния на этом интервале должно выполняться неравенство

$$\omega(t) \leq \omega_{пд} \quad \text{для } t \in (0, \tau), \quad (3)$$

где  $\omega_{пд}$  – предельно допустимое значение параметра потока отказов.

Необходимо найти такой период проведения КПС, за который изделие не достигнет предельного состояния (т.е. будет выполняться неравенство (3)), а интенсивность удельных затрат  $R(\tau)$  (2) будет минимальной.

Предлагается следующий порядок решения этой задачи:

1) подготовить исходные данные (величины параметров  $C_m$ ,  $C_{кпс}$ ,  $\omega_{пд}$ , построенные на момент решения задачи регрессионные зависимости [6]);

2) найти оптимальное значение периода КПС ( $\tau_R$ ) по критерию минимума удельных затрат (2), т.е. найти корень уравнения  $\frac{dR(\tau)}{d\tau} = 0$ ;

3) найти предельно допустимое значение периода проведения КПС ( $\tau_{пд}$ ) как результат решения неравенства (3);

4) найти оптимальный период проведения КПС по соотношению

$$\tau_{КПС} = \min(\tau_{пд}, \tau_R), \quad (4)$$

Из условия  $\frac{dR(\tau)}{d\tau} = 0$  и (2), получим следующее уравнение для отыскания величины  $\tau_R$

$$\tau\omega(\tau) - \Omega(\tau) = C, \quad (5)$$

где  $C = \frac{C_{кпс}}{C_m}$ .

Уравнение (5) имеет единственный корень при условии что  $\omega(t)$  неограниченно возрастает [3].

Получим теперь основные расчетные соотношения для  $\tau_R$  и  $\tau_{пд}$  при следующих вариантах задания регрессии, удовлетворяющих условию неограниченного возрастания  $\omega(t)$ :

$$\omega_1(\tau) = a_0 + a_1\tau; \quad (6)$$

$$\omega_2(\tau) = b_0 + b_1\tau + b_2\tau^2; \quad (7)$$

$$\omega_3(\tau) = \omega_0 + \Delta\omega e^{k\tau}, \quad (8)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $\omega_0$ ,  $\Delta\omega$ ,  $k$  – параметры регрессионных зависимостей.

Из (5) для регрессионной зависимости (6) получим следующее соотношение для  $\tau_{R1}$ :

$$\tau_{R1} = \sqrt{\frac{2C}{a_1}}. \quad (9)$$

Для квадратичной (7) и экспоненциальной (8) регрессии оптимальные периоды проведения КПС по критерию минимума удельных затрат находятся из уравнений (10) и (11) соответственно:

$$3b_1\tau^2 + 4b_2\tau^3 = 6C; \quad (10)$$

$$k\tau + \ln\left(\tau - \frac{1}{k}\right) = \ln\left(\frac{C}{\Delta\omega} - \frac{1}{k}\right). \quad (11)$$

Результатом решения неравенства (3) для рассмотренных регрессионных зависимостей являются следующие соотношения:

$$\tau_{пд1} \leq \frac{\omega_{пд} - a_0}{a_1}; \quad (12)$$

$$\tau_{пд2} \leq \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4b_2(b_0 - \omega_{пд})}}{2b_2}; \quad (13)$$

$$\tau_{пд3} \leq \frac{1}{k} [\ln(\omega_{пд} - \omega_0) - \ln \Delta\omega]. \quad (14)$$

Тогда оптимальный период КПС оценивается по соотношению

$$\tau_{КПСi} = \min(\tau_{пдi}, \tau_{Ri}). \quad (15)$$

Для выбора оптимального периода проведения КПС необходимо знать погрешности расчетов величины  $\tau_{КПС}$  по разным критериям ( $\tau_R$  и  $\tau_{пд}$ ), которые, в свою очередь, определяются точностью задания исходных данных, а именно  $\Delta C_m$ ,  $\Delta C_{кпс}$ ,

$\Delta\omega_{\text{пд}}$ , и точностью построения регрессионной зависимости  $\omega_i(t)$  ( $\Delta a_0, \Delta a_1, \Delta b_0, \Delta b_1$  и т.д.).

Так, для линейной регрессии (6)

$$\tau_{R1} = \left( \frac{2C_{\text{КПС}}}{C_m \cdot a_1} \right)^{1/2}, \text{ а } \tau_{\text{пд1}} = \frac{\omega_{\text{пд}} - a_0}{a_1} \text{ и абсолют-}$$

ные погрешности расчета величин  $\tau_{R1}$  и  $\tau_{\text{пд1}}$  рассчитываются по соотношениям:

$$\Delta\tau_{R1} = \frac{\sqrt{C_{\text{КПС}}}}{2} \cdot \left( \sqrt{2C_{\text{КПС}}} \cdot \Delta C_{\text{КПС}} + \frac{1}{C_m^2} \cdot \Delta C_m + \frac{1}{a_1^2} \cdot \Delta a_1 \right), \quad (16)$$

$$\Delta\tau_{\text{пд1}} = \frac{1 - a_0}{a_1} \cdot \Delta\omega_{\text{пд}} + \frac{\omega_{\text{пд}} - 1}{a_1} \cdot \Delta a_0 + \frac{\omega_{\text{пд}} - a_0}{a_1^2} \cdot \Delta a_1. \quad (17)$$

$$\text{и } \Delta\tau_{\text{КПС1}} = \max(\Delta\tau_{R1}, \Delta\tau_{\text{пд1}}). \quad (18)$$

Аналогичным образом можно получить погрешности для других типов регрессии.

Исходя из полученных соотношений можно сформулировать следующие требования к точности оценивания  $\tau_{\text{КПС}}$ . Приемлемой можно принять такую точность при которой выполняется неравенство

$$\Delta\tau_{\text{КПС}} \leq \frac{\tau_{\text{КПС}}}{4}. \quad (19)$$

На основе изложенной методики можно разработать практические рекомендации по определению моментов проведения КПС для различных интервалов эксплуатации ЗРК по техническому состоянию, например 10-15; 15-20 лет и т.д.

## Выводы

В работе сформулирована задача определения периода (момента) проведения контролей предельного состояния по технико-экономическому критерию, получено её решение в общем виде. Для основных видов регрессионных зависимостей пара-

метра потока отказов РЭС ЗРК от календарной продолжительности эксплуатации (или суммарной наработки) получены расчетные соотношения для периода проведения КПС ( $\tau_{\text{КПС}}$ ) и для погрешностей его оценки, сформулированы требования к погрешности оценивания  $\tau_{\text{КПС}}$ .

## Список литературы

1. Порядок експлуатації за технічним станом озброєння та військової техніки зенітних ракетних та радіотехнічних військ, за якими не здійснюється авторський нагляд. Затв. Наказ МО України №53 від 05.02.2010р.
2. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
3. Барлоу Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Сов. радио, 1969. – 488 с.
4. Голиков В.Ф. О влиянии точности определения характеристик надежности на выбор периода профилактического обслуживания // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1986. – № 1. – С. 66–69.
5. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1990. – Т.8: Эксплуатация и ремонт. – 320 с.
6. Модель оценивания стоимости эксплуатации сложных технических систем по техническому состоянию. Общие положения / Б.Н. Ланецкий, В.В. Лукьянчук, А.А. Артеменко и др. // Системы озброєння і військова техніка. – 2013. – № 1 (33). – С. 87–90.
7. Ланецкий Б.Н. Обоснование требований к точности оценки показателей безотказности РЭС эксплуатируемых ЗРК для решения задач продления назначенных сроков службы (ресурсов) / Б.Н. Ланецкий, В.В. Кобзев // Системы обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2006. – Вип. 4(53). – С.110–117.

Поступила в редколлегию 20.04.2015

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

## ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МОМЕНТУ ПРОВЕДЕННЯ КОНТРОЛЮ ГРАНИЧНОГО СТАНУ РЕЗ ЗРК, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

Б.М. Ланецкий, А.А. Артеменко

Формулюється задача визначення періоду проведення контролю граничного стану (КГС) за техніко-економічним критерієм, пропонується метод її вирішення. Приводяться основні розрахункові співвідношення для різних варіантів завдання регресійних залежностей показників безвідмовності від календарної тривалості експлуатації (сумарного наробітку). Пропонуються рекомендації з обґрунтування періоду проведення КГС.

**Ключові слова:** періодичність КГС, оптимізаційне завдання, середні питомі витрати, параметр потоку відмов, радіоелектронні засоби зенітних ракетних комплексів.

## GROUND OF CHOICE OF MOMENT OF REALIZATION OF CONTROL OF THE MAXIMUM STATE OF RADIOELECTRONIC SYSTEMS OF ANTI-AIRCRAFT SYSTEMS, THAT ARE OPERATING BY THE TECHNICAL STATE

B.N. Lanetskiy, A.A.Artemenko

The method of determination of moment of realization of control of the maximum state is developed radio electronic facilities of zenithal rocket complexes on-the-road on the technical state with providing of the set level of faultlessness and minimum specific expenses. The period of realization of control of the maximum state is determined for two types of dependence of parameter of stream of abandonments from calendar duration exploitation (works): linear and nonlinear.

**Keywords:** periodicity of control of the maximum state, optimization task, middle specific expenses, steam-meter of stream of refuses, radio electronic facilities of zenithal rocket complexes.