

отдельного элемента, режимам его испытаний, а также к характеристикам системы, причем с указанием сроков окончания периода системной приработки.

Проблема задания требований к отдельному элементу, системе в целом, планируемое изменение характеристик системы в ходе ее развития, а также процедура принятия ее заказчиком, еще ждут своего решения.

*Российская Академия наук  
Статья поступила 12.11.2000*

УДК 629.7.01+629.7.07

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛЕННОСТИ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ЛИЧНОГО СОСТАВА

© 2001, Л.И. Волков

Предложена модель, связывающая показатели надежности РК с численностью и обученностью обслуживающего персонала, глубиной контроля технологических процессов эксплуатации. Приведены расчеты, показывающие границы опасного падения надежности при сокращении личного состава.

### Расчетные зависимости

Введем характеристику

$$k = \frac{N_{шт}}{N}, \quad (1)$$

где  $N_{шт}$  – штатная численность личного состава (ЛС);  $N$  – реально существующая численность ЛС.

Исследуем зависимость надежности (безотказности) одной пусковой установки (ПУ) в течение срока  $T - P(k, T, r)$ , где  $r$  – количество степеней контроля выполняемых личным составом технологических операций на ПУ. Будем полагать, что при  $k = 1,00$  и  $k = 1,58$  (существующая сейчас численность) обеспечивается четыре уровня контроля ( $r = 4$ ). При  $k = 2,00 - r = 3$ , при  $k = 3,00 - r = 2$ .

Таким образом, можно считать, что безотказность для заданного интервала  $(0, T)$  зависит только от  $k$ , т. е.  $P(k)$ .

Вероятность безотказной работы 1 ПУ на интервале времени  $(0, T)$  определяется выражением

$$P(k) = P_1(k) \cdot P_2 \cdot P_3(k), \quad (2)$$

где  $P_1(k)$  – вероятность отсутствия отказа из-за действия внешней среды (нападение, гроза, землетрясение и т. п.);  $P_2$  – вероятность отсутствия отказов из-за неисправности техники;  $P_3(k)$  – вероятность отсутствия отказа из-за ошибок ЛС (номеров расчетов и контролируемых).

Вероятность  $P_2$  для выбранного интервала  $(0, T)$  в исследовании принимается средним значением. Более строго эту величину можно определить с учетом срока боевого дежурства, проводимых дистанционных периодических проверок (ДПП) и регламентов, при которых вскрываются и устраняются отказы. Подробнее см. [1].

Вероятность  $P_1(k)$  зависит от коэффициента численности, т. к. при малой численности  $N$  труднее организовать необходимую охрану и оборону ПУ, восстановление готовности.

### Литература

1. Уилкс С. Математическая статистика. – М.: Наука, 1967.
2. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1987.

Будем полагать, что существует зависимость

$$P_1(k) = P_{10} \cdot \exp(-ak), \quad (k \geq 1), \quad (3)$$

где  $P_{10}$  и  $a$  – расчетные (опытные) коэффициенты (рис. 1).

Исследуем зависимость  $P_3(k)$ . Ошибки личного состава, влияющие на безотказность ПУ, могут возникнуть только в ходе выполнения работ на вооружении.

Укрупненно рассмотрим 4 технологических процесса:

- постановка на боевое дежурство;
- устранение неисправностей, выявленных при постоянном контроле за состоянием ПУ и в ходе ДПП;
- проведение регламента на ПУ;
- снятие комплекса с боевого дежурства.

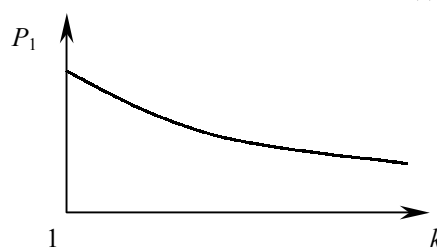


Рис. 1. Вид функции  $P_1(k) = P_{10} \cdot e^{-ak}$ , ( $k \geq 1$ )

При малом количестве ЛС надежность выполнения этих технологических процессов уменьшается, т. к. номера расчетов работают менее внимательно, сил для контроля меньше, сказывается усталость операторов и контролеров.

Вероятность  $P_3(k)$  можно представить в виде

$$P_3(k) = P_{31}(k) [P_{32}(k)]^{m_2} [P_{33}(k)]^{m_3} P_{34}(k), \quad (k \geq 1), \quad (4)$$

где  $P_{31}(k)$  – вероятность отсутствия отказов по вине ЛС при постановке РК на боевое дежурство;  $P_{32}(k)$  – вероятность отсутствия отказов по вине ЛС при устранении одной типовой неисправности на ПУ, обнаруженной постоянным контролем или в ходе дистанционных периодических проверок;  $m_2$  – суммарное

*Лев Иванович Волков – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, генерал-лейтенант в отставке*

количество устраняемых неисправностей за период  $(0, T)$ ;  $P_{33}(k)$  – вероятность отсутствия отказов по вине ЛС при проведении регламента;  $m_3$  – количество регламентов ПУ за период  $(0, T)$ ;  $P_{34}(k)$  – вероятность отсутствия отказов по вине ЛС при снятии комплекса с боевого дежурства.

Каждый из четырех технологических процессов контролируется, причем существует  $(r = 1, 2, 3, 4)$  четыре уровня контроля, зависящие от реальной численности ЛС. Каждую из четырех составляющих  $P_{3i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), входящих в выражение (4), с учетом проведения контроля можно представить в следующей форме (рис. 2):

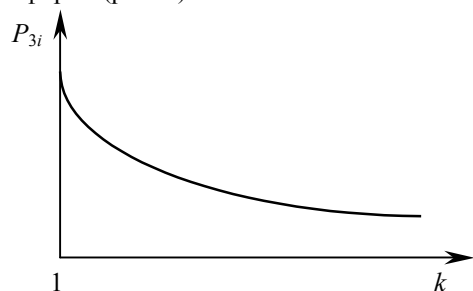


Рис. 2. Вид функции  $P_{3i}(k, r)$

$$P_{3i}(k, r) = \{ [P_{3i\delta}(k, r=0)] + [1 - P_{3i\delta}(k, r=0)] P_{in}(r) \}^{m_i}, \quad (5)$$

где  $P_{3i\delta}(k, r=0)$  – вероятность отсутствия отказов по вине ЛС при проведении одного  $i$ -го технологического процесса без контроля ( $r = 0$ );  $m_i$  – количество раз проведения  $i$ -го процесса за интервал времени  $(0, T)$ ; для  $i = 1$  и  $4$   $m_1 = m_4 = 1$ , т. к. постановку на боевое дежурство и снятие с него обычно проводят только один раз;  $P_{in}(r)$  – вероятность устранения ошибки ЛС, ведущей к отказу, за счет  $r$  уровней контроля  $i$ -го технологического процесса.

Функции  $P_{3i\delta}(k)$  можно представить в виде зависимостей

$$P_{3i\delta}(k) = P_{3i\delta 0} \cdot e^{-\alpha_i k}, \quad (k \geq 1), \quad (6)$$

где  $P_{3i\delta 0}$ ,  $\alpha_i$  – коэффициенты, определяемые расчетным или опытным путем.

Функции  $P_{in}(r)$  можно представить также экспоненциальной зависимостью (рис. 3):

$$P_{in}(r) = P_{in0} \cdot e^{\beta r}, \quad (r = 1, 2, 3, 4), \quad (7)$$

где  $P_{in0}$ ,  $\beta$  – расчетные или опытные коэффициенты.

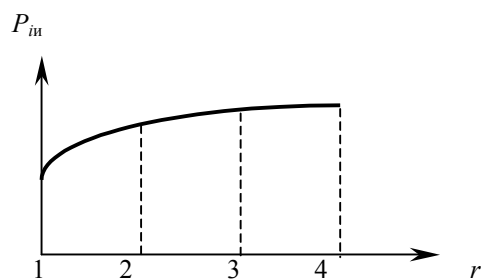


Рис. 3. Вид функции  $P_{in}(r) = P_{in0} \cdot e^{\beta r}$ , ( $r = 1, 2, 3, 4$ )

В соответствии с зависимостями (2)–(6) окончательно получим выражение для вероятности отсутствия отказов на одной ПУ в течение времени  $(0, T)$ :

$$P_k = P_{10} \cdot e^{-ak} \cdot P_2 \prod_{i=1}^4 \{ [P_{3i\delta}(k)] + [1 - P_{3i\delta}(k)] \cdot P_{in0} \cdot e^{\beta r} \}^{m_i}.$$

## Пример расчета

### 1. Исходные данные

Задана группировка однотипных РК с 45 ПУ, находящимися на боевом дежурстве 15 лет.

Необходимо оценить надежность группировки на интервале 16–20 лет боевого дежурства.

Вероятность отсутствия отказов из-за неисправности техники  $P_2 = 0,96$  за 5 лет, на интервале 16–20 лет.

Предполагается, что на этом интервале не будет постановок на боевое дежурство ( $m_1 = 0$ ), проводится только один регламент ( $m_2 = 1$ ). Дежурство заканчивается снятием с боевого дежурства ( $m_4 = 1$ ). За пять лет будет проведено 10 ДПП. В среднем при одной проверке вскрывается 0,3 неисправности в расчете на 1 ПУ, требующие устранения с работами на пусковой установке. Кроме того, по данным постоянного контроля, в год в расчете на 1 ПУ вскрывается 0,2 неисправности, требующие работы на пусковой установке. Таким образом, получаем для интервала в 5 лет:

$$m_2 = 10 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,2 = 4.$$

Известны также коэффициенты функций  $P_{3i\delta}$ , представленные в табл. 1.

Таблица 1

| $i$ | $P_{3i\delta 0}$ | $\alpha_i$ |
|-----|------------------|------------|
| 1   | –                | –          |
| 2   | 0,990            | 0,04       |
| 3   | 0,960            | 0,06       |
| 4   | 0,930            | 0,08       |

Данные предполагают, что процесс устранения неисправностей менее сложен, чем регламент, а регламент менее сложен, чем снятие с боевого дежурства.

Функция  $P_1(k)$  имеет вид (рис. 4)

$$P_1(k) = 0,99 \cdot e^{-0,02k}, \quad (k \geq 1, T = 5 \text{ лет}).$$

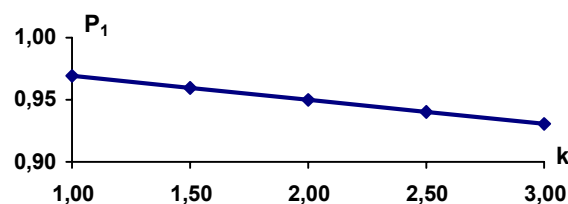


Рис. 4. График функции  $P_1(k)$

Функция  $P_{in}(r) = 0,8 \cdot e^{0,04r}$  для всех  $i$  ( $k \geq 1$ ), (рис. 5).

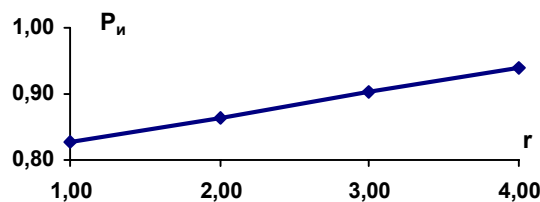


Рис. 5. График функции  $P_{in}(r)$

## 2. Результаты расчетов

Значения функции  $P_1(k)$  представлены в табл. 2 ( $T = 5$  лет).

Таблица 2

| $k$      | 1,00  | 1,58  | 2,00  | 3,00  |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| $P_1(k)$ | 0,970 | 0,959 | 0,951 | 0,932 |

Значения функции  $P_{in}(r)$  для  $i = 1, 2, 3, 4$  представлены в табл. 3.

Таблица 3

| $r$      | 1     | 2     | 3     | 4     |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{in}$ | 0,833 | 0,867 | 0,902 | 0,939 |

Значения функций  $P_{328}(k)$ ,  $P_{338}(k)$ ,  $P_{348}(k)$  сведены в табл. 4.

Таблица 4

| $r$          | 1,00  | 1,58  | 2,00  | 3,00  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{328}(k)$ | 0,951 | 0,929 | 0,914 | 0,878 |
| $P_{338}(k)$ | 0,904 | 0,873 | 0,851 | 0,802 |
| $P_{348}(k)$ | 0,867 | 0,833 | 0,809 | 0,754 |

Результаты расчета функций  $P_3(k, r)$  представлены в табл. 5 и на рис. 6.

Таблица 5

| $r$ | $k$ | 1,00  | 1,58  | 2,00  | 3,00  |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| 1   |     | 0,932 | 0,907 | 0,891 | 0,854 |
| 2   |     | 0,944 | 0,926 | 0,913 | 0,883 |
| 3   |     | 0,960 | 0,945 | 0,934 | 0,912 |
| 4   |     | 0,974 | 0,965 | 0,959 | 0,945 |

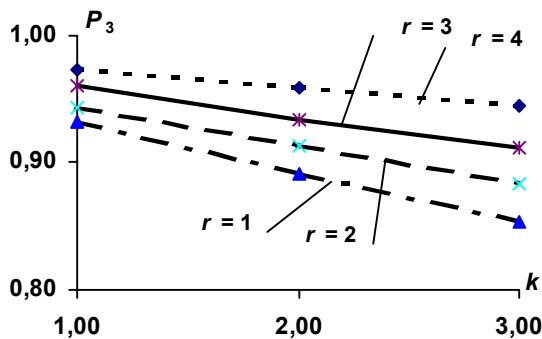


Рис. 6. Функции  $P_3(k, r)$

Наконец, значения функции  $P(k, r)$  сведены в табл. 6.

Таблица 6

| $r$ | $k$ | 1,00  | 1,58  | 2,00  | 3,00  |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| 1   |     | 0,868 | 0,835 | 0,813 | 0,764 |
| 2   |     | 0,879 | 0,853 | 0,834 | 0,790 |
| 3   |     | 0,894 | 0,870 | 0,853 | 0,816 |
| 4   |     | 0,907 | 0,889 | 0,876 | 0,846 |

С учетом принятого соотношения  $k(r)$  окончательно получим зависимости вероятности отсутствия

Российская Академия наук  
Статья поступила 12.11.2000

отказа на 1 ПУ в течение 5 лет (16–20 лет) от численности ЛС. Значения функции  $P(k)$  представлены в табл. 7 и на рис. 7.

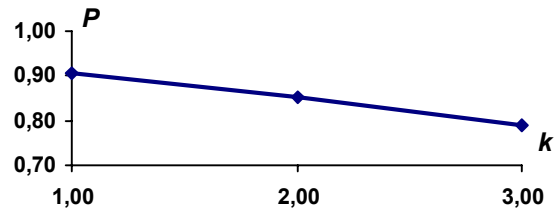


Рис. 7. Функция  $P(k)$

Таблица 7

| $k$    | 1,00  | 1,58  | 2,00  | 3,00  |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| $P(k)$ | 0,907 | 0,889 | 0,853 | 0,790 |

## 3. Анализ результатов расчета

Отказы на 1 ПУ в течение 5 лет боевого дежурства (с 16 по 20 год) и снятия с боевого дежурства (утилизации) будут возникать с вероятностями  $Q(k) = 1 - P(k)$  (см. табл. 8).

Таблица 8

| $k$    | 1,00  | 1,58  | 2,00  | 3,00  |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| $Q(k)$ | 0,093 | 0,111 | 0,147 | 0,210 |

Для 45 ПУ за пять лет возникает следующее количество отказов (см. табл. 9).

Таблица 9

| $k$       | 1,00 | 1,58 | 2,00 | 3,00 |
|-----------|------|------|------|------|
| $n_{отк}$ | 4,2  | 5,0  | 6,6  | 9,5  |

Сокращение личного состава приводит к снижению безотказности по трем причинам:

- ухудшение охраны и обороны ПУ;
- ошибки персонала при выполнении технологических процессов;
- ослабление контроля за выполнением работ на ПУ.

Снижение надежности почти пропорционально уменьшению численности ЛС. В общем количестве отказов доля, приходящаяся на технику, по мере увеличения  $k$  падает. Так, при  $k = 1$  отказы техники составляют  $(1 - 0,960) \cdot 45 = 1,8$ , т. е.  $1,8/4,2 \cdot 100\% = 43\%$ , при  $k = 1,58$  соответственно  $(1 - 0,960) \cdot 45 = 1,8$ ;  $1,8/5,0 \cdot 100\% = 36\%$ , при  $k = 2 - 27\%$ , а при  $k = 3 - 19\%$ .

Плохая работа персонала из-за малой численности становится основной причиной отказов.

## Литература

1. Волков Л.И. Оценка и задание количественных показателей безопасности ракетных и ракетно-космических комплексов / Отчет по теме «Безопасность» №478. – 4 ЦНИИ МО, 1997. – 82 с.