

## ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ЗЕНИТНОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА НАДВОДНОГО КОРАБЛЯ СО ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМОЙ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В.И. Носенко, О.В. Иванченко, К.Б. Матузаев, С.А. Маврин  
(Севастопольский военно-морской институт им. П.С. Нахимова)

*Разработана полумарковская аналитико-стохастическая модель надежности зенитного ракетного комплекса надводного корабля (ЗРК НК) со встроенной системой контроля технического состояния. Представленная модель, в отличие от известных, позволяет учесть режимы эксплуатации, возможные технические состояния и наиболее критические ситуации (наличие скрытых отказов), возникающие при использовании по назначению ЗРК НК.*

***полумарковская аналитико-стохастическая модель надежности, встроенная система контроля технического состояния***

Важнейшей составляющей успешного решения задач противовоздушной обороны группировок кораблей ВМС Вооруженных Сил Украины является эффективное боевое применение зенитных огневых средств (ЗОС). Основу ЗОС составляют зенитные ракетные комплексы надводных кораблей (ЗРК НК).

**Введение.** Перспективы создания современных ЗРК НК во многом зависят не только от возможностей реализации новых физических принципов их боевого применения, но и от возможностей по поддержанию требуемого уровня надежности. Для решения этой сложной задачи необходимо еще на этапах разработки, производства и опытной эксплуатации ЗРК одновременно с конструктивной реализацией основных тактико-технических характеристик выполнить целый комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению надежности.

**Анализ литературы.** В большинстве известных работ [1 – 6], посвященных вопросам обеспечения безотказности изделий военного назначения, в качестве основных показателей надежности используют нестационарные характеристики, к которым относятся нестационарный коэффициент оперативной готовности (НКОГ) и нестационарный коэффициент готовности (НКГ) [1, 2].

Широкое использование нестационарных характеристик надежности обусловлено тем, что они более точно описывают процессы изменения технических состояний ЗРК при использовании их по назначению [3, 4]. Наиболее близкими к изложенным в статье методическим подходам к ре-

шению данного класса задач являются работы [7, 8]. Однако и в этих работах не в полной мере учитываются специфика и особенности эксплуатации ЗРК со встроенной системой контроля технического состояния (КТС).

**Постановка проблемы.** Анализ литературы [1 – 9] и проведенных исследований свидетельствует, что серьезной проблемой обеспечения эффективной эксплуатации ЗРК НК со встроенной системой контроля их технического состояния, являются скрытые отказы РЭС, входящих в состав зенитного ракетного комплекса. Если система КТС построена не оптимальным образом, то затрудняется процесс поиска и устранения данного типа отказов. В свою очередь это обстоятельство может привести к значительному снижению эффективности боевого применения ЗРК. Поэтому актуальной является задача построения таких систем КТС, которые достоверно в течение заданного времени выявляли бы все типы отказов, включая скрытые, что позволит значительно повысить оперативность и качество решения задач технического обслуживания и ремонта ЗРК надводного корабля по состоянию.

**Цель статьи.** В настоящей статье приводится содержательное описание полумарковской модели надежности зенитного ракетного комплекса надводного корабля со встроенной системой контроля технического состояния и сложными режимами эксплуатации. На основе представленной модели получены расчетные соотношения для определения значений нестационарного коэффициента оперативной готовности, которые могут быть использованы для задания предельных величин показателей технического диагностирования ЗРК. Представленная модель, в отличие от известных, позволяет учесть режимы эксплуатации, возможные технические состояния ЗРК, а также качество функционирования встроенной системы КТС.

**Результаты исследований.** Специфика эксплуатации ЗРК надводных кораблей, а также учет известных законов распределения случайных временных интервалов наработок между отказами и восстановлений в режимах приведения в готовность и контроля технического состояния, позволяют рассмотреть модель надежности ЗРК как полумарковскую [8].

В соответствии с признаками и условиями возникновения отказов [9] построим соответствующую полумарковскую математическую модель надежности зенитного ракетного комплекса надводного корабля со встроенной системой контроля технического состояния. Для этого представим процесс функциониро-

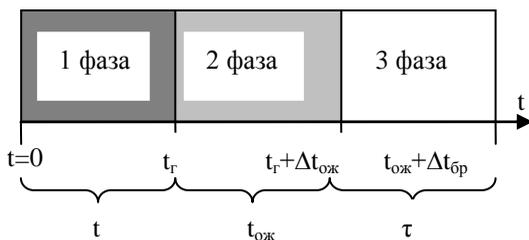


Рис. 1. Временная диаграмма процесса функционирования ЗРК НК

вания ЗРК НК в виде 3-х фазного процесса (рис. 1).

Анализ опыта эксплуатации ЗРК НК и боевого применения ЗРК – аналогов Воздушных Сил свидетельствует о целесообразности введения следующих ограничений и допущений [7]:

1) продолжительности интервалов  $t$ ,  $t_{ож}$ ,  $\tau$  являются предсказуемыми прогнозируемыми величинами, т.е. рассматриваются как известные детерминированные величины. Это допущение справедливо для условий мирного времени, когда ЗРК эксплуатируются и применяются по назначению в плановом порядке. Например, тактические учения на местах постоянного базирования, тактические учения с боевой стрельбой в условиях плавания, проводимые в соответствии с планом боевой подготовки;

2) предполагается, что в режимах приведения в готовность и ожидания на ЗРК возникают одиночные отказы, после отказа изделие не функционирует и, следовательно, до восстановления его работоспособности не отказывает. На интервалах  $t \in [0; t_{\Gamma}]$  и  $t_{ож} \in [t_{\Gamma}; t_{\Gamma} + \Delta t_{ож}]$  число восстановлений неограниченно;

3) будем полагать, что на интервалах  $t \in [0; t_{\Gamma}]$  и  $t_{ож} \in [t_{\Gamma}; t_{\Gamma} + \Delta t_{ож}]$  возможны два уровня эксплуатационных состояний ЗРК, которые определяются по результатам контроля функционирования. Причем, число технических состояний на каждом уровне различно. Например, в состоянии скрытого отказа изделие (т.е. изделие неработоспособно и включено) может находиться только на интервале  $t \in [0; t_{\Gamma}]$ .

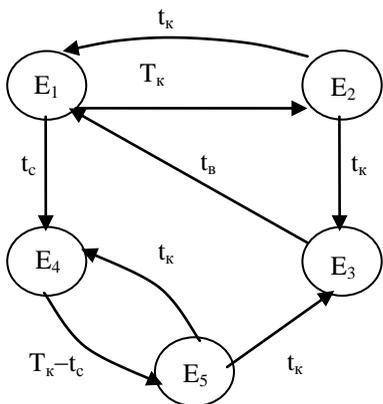


Рис. 2. Размеченный граф смены технических состояний ЗРК НК

Учитывая приведенные ограничения и допущения, рассмотрим процесс эксплуатации ЗРК как процесс смены технических состояний в соответствии с графом состояний, представленном на рис. 2.

Будем полагать, что в начальный момент эксплуатации на работоспособном (РС) и готовом к боевому применению ЗРК (состояние  $E_1$ ) с установленной периодичностью  $T_k$  в течение интервала времени  $t_k$  проводится КТС. Продолжительности интервалов времени  $T_k \in [0; t_1]$  и  $t_k \in [t_1; t_1 + \Delta t_k]$ , где  $\Delta t_k \neq 0$ , являются неслучайными (детерминированными) величинами.

В ходе КТС в случайные моменты времени, распределенные по экспоненциальному закону, могут возникать внезапные и ложные отказы. При их возникновении производится восстановление РС ЗРК (состояние  $E_3$ ), кото-

рое длится случайное время  $t_b$ , распределенное по закону Эрланга, после чего ЗРК переходит в состояние  $E_1$ . В течение интервала времени  $t \in [0; t_r]$  готовности ЗРК к боевому применению в случайные моменты времени  $t_c$ , распределенные по гамма-распределению [9], возникают скрытые отказы, при которых ЗРК переходит в неработоспособное (НРС) состояние  $E_4$ . При этом будем считать, что в соответствии с ранее рассмотренной схемой, скрытые отказы возникают только при накоплении некоторого числа повреждений  $g$ . Далее из состояния  $E_4$  через случайное время  $T_k - t_c$  ЗРК переходит в состояние контроля технического состояния  $E_5$ . При проведении контроля в состоянии  $E_5$  отказ вскрывается с достоверностью  $d$  и ЗРК переходит через не случайное время  $t_k$  в состояние  $E_3$  (восстановления) или за такое же время с вероятностью  $1 - d$  отказ не обнаруживается, т.е. ЗРК возвращается в состояние  $E_4$ .

Предлагаемая схема достаточно полно описывает взаимосвязь группы параметров, определяющих организацию периодических проверок, а также приводит к простым обозримым выкладкам, позволяющим проиллюстрировать постановку и решение задач оптимизации параметров системы эксплуатации с использованием полумарковских процессов.

В соответствии с описанием процесса (рис. 2), получим его количественные характеристики в виде вектора значений  $Q(X) = \{Q_{ij}(X, t)\}$ . Поскольку периодические проверки следуют через не случайное время  $T_k$ , имеем

$$Q_{12} = \begin{cases} 0 \cdot \text{при} \cdot t < T_k; \\ 1 \cdot \text{при} \cdot t \geq T_k, \end{cases} \quad (1)$$

где  $Q_{ij}$  – функция распределения времени пребывания элемента в  $i$ -м ( $i = \overline{1,5}$ ) состоянии перед перемещением в  $j$ -е, если бы данный выход был единственным.

Переход из состояния  $E_1$  в состояние  $E_4$  осуществляется в случайное время  $t_c$ , подчиненное гамма-распределению с интенсивностью возникновения скрытых повреждений  $\lambda_3$  до момента  $T_k$ , т.е.

$$Q_{14}(t) = \begin{cases} 1 - \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda_3 t)^k}{k!} e^{-\lambda_3 t} \cdot \text{при} \cdot t < T_k; \\ 0 \cdot \text{при} \cdot t \geq T_k. \end{cases} \quad (2)$$

Переход из состояния  $E_2$  в работоспособное состояние  $E_1$  при отсутствии отказов в ходе КТС происходит через не случайное время  $t_k$ , равное продолжительности проверки технического состояния, поэтому

$$Q_{21} = \begin{cases} 0 \cdot \text{при} \cdot t < t_k; \\ 1 \cdot \text{при} \cdot t \geq t_k. \end{cases} \quad (3)$$

Переход из  $E_2$  в состояние  $E_3$  из-за возникших в случайные момен-

ты времени внезапных и ложных отказов характеризуется вероятностью

$$Q_{23} = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}, \quad (4)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – интенсивности внезапных и ложных отказов соответственно.

Переход из состояния  $E_3$  (восстановления РС) в состояние  $E_1$  зависит от случайной величины  $t_b$ , распределенной по закону Эрланга [8]

$$Q_{31}(t) = 1 - (1 + \mu t)e^{-\mu t}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – интенсивность восстановления.

Переход из состояния скрытых отказов  $E_4$  в состояние восстановления  $E_3$  происходит через не случайное время  $t_k$  с вероятностью  $d$ , поэтому

$$Q_{53} = \begin{cases} 0 \cdot \text{при} \cdot t < t_k; \\ d \cdot \text{при} \cdot t \geq t_k. \end{cases} \quad (6)$$

В (6) вероятность  $d$  рассматривается как достоверность КТС.

В случае необнаружения скрытого отказа системой КТС осуществляется переход через не случайное время  $t_k$  из состояния  $E_5$  в состояние  $E_4$  с вероятностью  $1 - d$

$$Q_{54} = \begin{cases} 0 \cdot \text{при} \cdot t < t_k; \\ 1 - d \cdot \text{при} \cdot t \geq t_k. \end{cases} \quad (7)$$

Тогда согласно [8] численные значения вероятностей переходов из  $i$ -го состояния ( $i = \overline{1,5}$ ) в  $j$ -е ( $j = \overline{1,5}$ ) могут быть получены с помощью следующих соотношений:

$$P_{12} = \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda_3 T_k)^k}{k!} e^{-\lambda_3 T_k}; \quad (8)$$

$$P_{14} = 1 - \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda_3 T_k)^k}{k!} e^{-\lambda_3 T_k}; \quad (9)$$

$$P_{21} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t_k}; \quad (10)$$

$$P_{23} = 1 - P_{21} = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t_k}; \quad (11)$$

$$P_{53} = d; \quad (12)$$

$$P_{54} = 1 - d. \quad (13)$$

Так как переходы из состояния  $E_4$  в  $E_5$  и  $E_3$  в  $E_1$  – единственно возможные, то

$$P_{45} = P_{31} = 1. \quad (14)$$

В соответствии с [8] находим вероятности пребывания исследуемой модели (рис. 2) в каждом  $i$ -м состоянии с использованием соотношений вида:

$$P_1 = \frac{\bar{t}_1}{A}; \quad (15)$$

$$P_2 = \frac{P_{12}\bar{t}_2}{A}; \quad (16)$$

$$P_3 = \frac{(1-P_{21}P_{12})\bar{t}_3}{A}; \quad (17)$$

$$P_4 = \frac{(P_{14}/(1-P_{54}))\bar{t}_4}{A}; \quad (18)$$

$$P_5 = \frac{(P_{14}/(1-P_{54}))\bar{t}_5}{A}; \quad (19)$$

$$A = \bar{t}_1 + P_{12}\bar{t}_2 + (1-P_{21}P_{12})\bar{t}_3 + \frac{P_{14}}{1-P_{54}}(\bar{t}_4 + \bar{t}_5), \quad (20)$$

где  $\bar{t}_i$  – безусловное математическое ожидание времени пребывания ЗРК в  $i$ -м состоянии, где  $i = \overline{1,5}$ .

С учетом начальных технических состояний ЗРК [7], воспользовавшись соотношениями (15) и (17), рассчитаем значения нестационарного коэффициента оперативной готовности по формулам

$$K_{o,r}(t) = [P_1(t)K_{\Gamma}(t_{ож}) + P_3(t)\overset{\circ}{K}_{\Gamma}(t_{ож})]P(\tau); \quad (21)$$

$$P(\tau) = e^{-\Lambda\tau}, \quad (22)$$

где  $P_1(t)$  – вероятность того, что ЗРК находится в РС состоянии  $E_1$ ;  $P_3(t)$  – вероятность того, что ЗРК находится в НРС состоянии  $E_3$ ;

$K_{\Gamma}(t_{ож})$  и  $\overset{\circ}{K}_{\Gamma}(t_{ож})$  – значения нестационарных коэффициентов готовности ЗРК в момент времени  $t_{ож}$  окончания интервала ожидания при условии, что в момент начала интервала ожидания ЗРК был РС с вероятностью  $P_1(t)$  или НРС с вероятностью  $P_3(t)$ ;  $P(\tau)$  – вероятность безотказной работы ЗРК на интервале боевого применения  $\tau \in [t_{ож}; t_{ож} + \Delta t_{бр}]$ ;  $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$  – суммарная интенсивность отказов ЗРК.

На рис. 3 – 6 представлены графики зависимостей  $K_{O,r}(T_K)$  и  $K_{O,r}(d)$  для следующих исходных данных: интенсивность скрытых механических повреждений изделий из состава ЗРК  $\lambda_3 = 0,1 \text{ ч}^{-1}$ ; интенсивность внезапных отказов РЭС ЗРК  $\lambda_1 = 0,2 \text{ ч}^{-1}$ ; интенсивность ложных отказов  $\lambda_2 = 0,1 \text{ ч}^{-1}$ ; интенсивность восстановления работоспособности механических и радиоэлектронных составляющих ЗРК  $\mu = 1 \text{ ч}^{-1}$ ; продолжительности интервалов контроля  $t_k = 10$  мин, ожидания  $t_{ож} = 1$  час,

боевого применения  $\tau = 20$  мин.

С помощью представленных зависимостей (рис. 3 – 6) установлено:

– для изделий ЗРК с низким уровнем надежности ( $0,4 \leq K_{O,r} \leq 0,7$ ) требуемые (оптимальные) значения показателей качества функционирования системы КТС для  $r = 1$  составляют:  $t_k^{\min} = 3$  мин,  $t_k^{\max} = 9$  мин; величина периода КТС изменяется в пределах  $T_k \in [2\text{ч}, \dots, 3\text{ч}]$ , а достоверность КТС ( $d$ ) должна составлять не менее  $0,9$ ;

– для высоконадежных изделий ЗРК ( $K_{O,r} > 0,7$ ) требуемые (оптимальные) значения показателей качества функционирования системы КТС для  $r = 4$  составляют:  $t_k^{\min} = 3$  мин,  $t_k^{\max} = 23$  мин; величина оптимального периода КТС изменяется в пределах  $T_k \in [8\text{ч}, \dots, 9\text{ч}]$ , а достоверность КТС ( $d$ ) должна составлять не менее  $0,5$ .

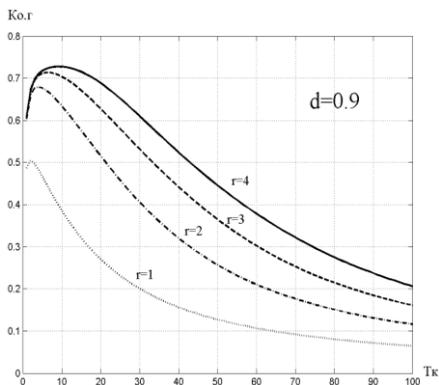


Рис. 3. Графики зависимостей  $K_{O,r}(T_k)$  для  $r = \overline{1,4}$

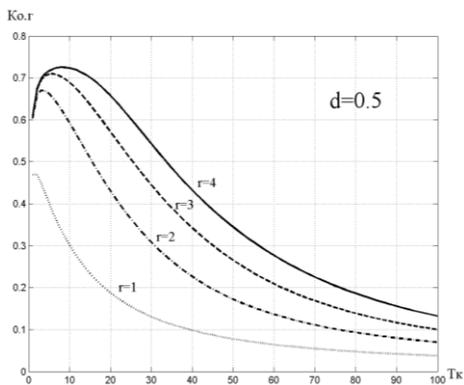


Рис. 4. Графики зависимостей  $K_{O,r}(T_k)$  для  $r = \overline{1,4}$

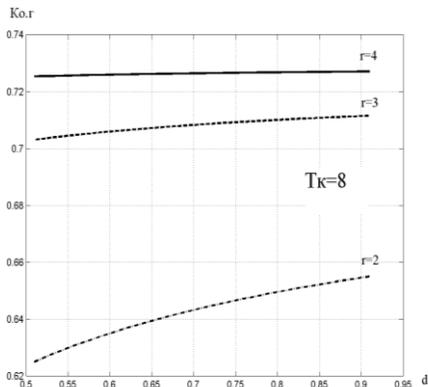
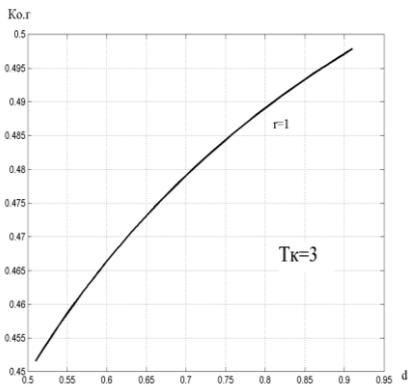


Рис. 5. График зависимости  $K_{0,r}(d)$   
для  $r = 1$

Рис. 6. Графики зависимостей  $K_{0,r}(d)$   
для  $r = \overline{2,4}$

**Выводы.** Представленная в статье модель может быть использована для обоснования оптимальных по уровню контролируемой надежности показателей качества функционирования встроенной системы контроля технического состояния, что позволит обеспечить эффективную эксплуатацию и боевое применение ЗРК НК в различных условиях обстановки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Городнов В.П., Дробаха Г.А., Єрмошин М.О., Смірнов Є.Б., Ткаченко В.І. Моделювання бойових дій військ (сил) протиповітряної оборони та інформаційне забезпечення процесів управління ними (теорія, практика, історія розвитку): Монографія. – Х.: ХВУ, 2004. – 409 с.*
2. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.*
3. *Ланецкий Б.Н. Расчет коэффициента оперативной готовности системы со случайными продолжительностями интервалов ожидания и использования по назначению // Зб. наук. пр. – Х.: ХВУ. – 1998. – Вип. 21. – С. 100-106.*
4. *Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев и др.; Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1983. – 606 с.*
5. *Ланецкий Б.Н., Радкевич А.А. Аналитический метод расчета нестационарного коэффициента готовности системы со сложным режимом работы. – Депонированная рукопись № 4900. – М.: ЦИВТИ, 1990.*
6. *Демидов Б.А., Рыбачук О.И., Иванченко О.В., Лихопий С.В. Обоснование предельных величин показателей безотказности и ремонтпригодности сложной технической системы со случайными продолжительностями интервалов ожидания и использования по назначению // Зб. наук. пр. ХВУ. – Х.: ХВУ, 2002. – Вип. 3 (41). – С. 42-44.*
7. *Аналитико-стохастическая модель надежности изделия военного назначения со сложными режимами эксплуатации / В.А. Колпаков, О.В. Иванченко, Л.Н. Данилович, С.А. Маврин, И.В. Грушевой // Зб. наук. пр. СВМИ. – Севастополь: СВМИ. – 2005. – Вип. 1 (7). – С. 17-25.*
8. *Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. – М.: Высшая школа, 1981. – 368 с.*
9. *Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. – М.: Сов. радио, 1966. – 166 с.*

Поступила 2.04.2006

**Рецензент:** доктор технических наук, доцент Д.Б. Кучер,  
Севастопольский военно-морской институт им. П.С. Нахимова.

---