

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 623.765.4

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-17-26

Оптимизация управления режимом готовности зенитных огневых средств в системе зенитного огневого прикрытия ордера надводных кораблей при угрозе атак противокорабельных крылатых ракет

В. А. Галий, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

С. Н. Иванищев, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

В. Н. Букрий, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

В настоящее время определяющим в развитии теории военного искусства на море стал факт перехода к созданию и применению противником высокоточного оружия большой дальности – противокорабельных крылатых ракет, что позволяет поражать корабли с удаленных рубежей без входа в зону действия истребительной авиации и досягаемости зенитных ракетных комплексов.

Перспективным направлением в организации построения и эффективного боевого применения таких сложных систем, как контур противовоздушной обороны одиночного надводного корабля, система противовоздушной обороны группы надводных кораблей при угрозе нападения и при отражении атак противокорабельных крылатых ракет является совершенствование алгоритмов обработки информации и управления системами вооружения в сочетании с их автоматизацией.

Современные информационные технологии, основанные на использовании вычислительной техники и математического моделирования, позволяют усовершенствовать процесс принятия решений в задачах построения сложных систем, планирования и организации их деятельности. Методы искусственного интеллекта, автоматизация процесса управления силами и средствами в бою значительно повышают эффективность принятия решений. Скоротечный характер и быстрая смена обстановки в противовоздушном бою требуют решения задачи по отражению атак противокорабельных крылатых ракет в реальном масштабе времени, что невозможно без полной автоматизации процесса управления силами и средствами противовоздушной обороны, при котором участие человека в противовоздушном бою должно быть сведено к минимуму, а по возможности – исключено.

Одной из сложных систем, требующей полной автоматизации и функционирования в реальном масштабе времени, является система зенитного огневого прикрытия ордера надводных кораблей. Определение оптимального (целесообразного) режима готовности входящих в ее состав зенитных огневых средств является обязательным условием эффективного функционирования системы зенитного огневого прикрытия и системы противовоздушной обороны в целом.

В статье предлагается решение задачи по оптимизации управления режимом готовности зенитных огневых средств в системе зенитного огневого прикрытия ордера надводных кораблей при угрозе атак противокорабельных крылатых ракет. Полученные результаты позволяют обосновать оптимальный (целесообразный) режим готовности и выработать рекомендации для установления графика дежурства зенитных огневых средств в интересах противовоздушной обороны.

Представленная математическая модель и разработанные на ее основе алгоритм и программа могут быть рекомендованы для включения как в системы автоматизированного боевого управления, так и в боевые информационно-управляющие системы соединений надводных кораблей и одиночных кораблей соответственно.

Ключевые слова: противовоздушная оборона, противокорабельная крылатая ракета, поле векторов потенциалов поражения, график дежурства зенитных огневых средств, действующая зона поражения, режим готовности зенитных огневых средств, боевая готовность.

Введение
озможность нанесения вероятным противником ударов противокорабельных крылатых ракет (ПКР) одновременно

с нескольких направлений, на предельно малых высотах, а также возможность маневрирования последних в зонах поражения корабельных зенитных огневых средств (ЗОС) создают боль-

шие трудности для эффективного функционирования системы зенитного огневого прикрытия ордеров надводных кораблей [1, 2].

Определение оптимальных (целесообразных) режимов готовности корабельных зенитных огневых средств является необходимым условием эффективного функционирования системы зенитного огневого прикрытия в противовоздушном бою и одной из важных задач, требующих решения перед выходом кораблей в море [3, 4].

Цель исследования – определение оптимального (целесообразного) режима готовности зенитных огневых средств при угрозе атак противокорабельных крылатых ракет.

Необходимо отметить, что слово «целесообразный» здесь и далее по тексту означает определенную степень уверенности в том, что искомым экстремум найден.

Постановка задачи оптимизации управления режимом готовности зенитных огневых средств

Упорядоченное чередование различных степеней готовности к стрельбе зенитных огневых средств, а именно БГ № 1 («боевая тревога») и БГ № 2 («походная»), называется режимом готовности.

Поскольку управление режимом готовности зенитных огневых средств ордера надводных кораблей преследует обеспечение боевой устойчивости охраняемых кораблей, то главными критериями качества управления режимом готовности будут следующие.

1. При угрозе атаки ПКР с одного или нескольких направлений:

а) вероятность непоражения одиночного охраняемого надводного корабля;

б) математическое ожидание числа непораженных кораблей из состава группы охраняемых надводных кораблей.

2. При угрозе атак ПКР с разных направлений, когда направления атак ПКР неизвестны, чему соответствует построение равнопрочной системы зенитного огневого прикрытия, критерии, характеризующие поле векторов потенциалов поражения, создаваемое в интересах каждого из охраняемых кораблей.

Поскольку в дежурстве по противовоздушной обороне, как на отдельном корабле, так и в ордере надводных кораблей, могут находиться зенитные огневые средства различных типов, постольку в задаче обоснования оптимального (целесообразного) управления режимом готовности достаточно полной характеристикой, а значит, и целевой функцией, может служить суммарный потенциал поражения

средств воздушного нападения зенитных огневых средств при условии оптимального (целесообразного) построения системы зенитного огневого прикрытия ордера надводных кораблей, т. е. выражение вида

$$G = \mu = \sum_{(i)} m_i p_i. \quad (1)$$

Число стрельб каждого комплекса m_i зависит от установленного режима боевой готовности, т. е.

$$m_i = m(t_{1i}, t_{2i}, \text{техническая надежность } i\text{-го комплекса}),$$

где t_{1i} и t_{2i} – время пребывания i -го комплекса в боевой готовности № 1 и боевой готовности № 2 соответственно.

Обозначим:

m_{1i} – число стрельб i -го зенитного огневых средства по потоку средств воздушного нападения из состояния БГ № 1;

m_{2i} – число стрельб i -го зенитного огневых средства по потоку средств воздушного нападения из состояния БГ № 2.

Тогда математическое ожидание числа стрельб комплекса по потоку средств воздушного нападения с учетом его различной готовности и технической надежности определяется как

$$m_i = m_{1i} P\{m_{1i}\} + m_{2i} P\{m_{2i}\},$$

где $P\{m_{1i}\}$ – вероятность исправного состояния i -го комплекса в период БГ № 1, т. е. вероятность того, что i -й комплекс, находясь в состоянии БГ № 1, способен по технической надежности выполнить m_{1i} стрельб по потоку средств воздушного нападения; $P\{m_{2i}\}$ – вероятность исправного состояния i -го комплекса в период БГ № 2, т. е. вероятность того, что i -й комплекс, находясь в состоянии БГ № 2, способен по технической надежности выполнить m_{2i} стрельб по потоку средств воздушного нападения.

Тогда выражение (1) примет вид

$$G = \mu = \sum_i p_i [m_{1i} P\{m_{1i}\} + m_{2i} P\{m_{2i}\}]. \quad (2)$$

Множество допустимых решений (2) есть множество зенитных огневых средств, необходимое для отражения атак средств воздушного нападения с требуемой эффективностью.

Наряду с этим для обоснования графика дежурства зенитных огневых средств должны учитываться:

– соотношения максимально допустимого времени приведения каждого зенитного огневого средства в готовность к приему целеуказания, обеспечивающего обстрел ПКР на дальних границах действующей зоны поражения, и располагаемого времени перевода комплекса из БГ № 2 в БГ № 1;

– периоды времени, в течение которых наиболее вероятно нанесение противником ударов ПКР (на основании данных разведки и прогноза развития тактической обстановки) [5, 6].

Из приведенных соображений следует, что задача управления режимом готовности зенитных огневых средств распадается на три составляющие:

- обоснование режима готовности для каждого комплекса, обеспечивающего максимизацию целевой функции, т. е. математического ожидания числа стрельб по потоку средств воздушного нападения с учетом технической надежности;

- обоснование максимально допустимого времени перевода зенитных огневых средств в готовность к приему целеуказания, обеспечивающего обстрел ПКР, начиная с дальних границ действующих зон поражения;

- обоснование графика дежурства зенитных огневых средств по противовоздушной обороне.

С этой целью решаются задачи:

1. Обоснование целесообразного режима готовности зенитных огневых средств.

2. Обоснование максимально допустимого времени перевода зенитных огневых средств в готовность к приему целеуказания.

3. Выработка рекомендаций для установления графика дежурства зенитных огневых средств по противовоздушной обороне.

Основные ключевые моменты решения поставленных задач с учетом ограниченных размеров публикуемой статьи приводятся ниже.

Задача 1. Обоснование целесообразного режима готовности зенитного комплекса

Суть рассматриваемой задачи состоит в выборе таких значений времени пребывания t_1 в БГ № 1 и времени пребывания t_2 в БГ № 2, при которых для заданных характеристик надежности целевая функция $G = m = m_1 P\{m_1\} + m_2 P\{m_2\}$ обратится в max.

Как показано в работе Антонова Ю. С. (Теоретические основы построения системы зенитного огневого прикрытия соединения надводных кораблей в интересах противоракетной обороны: дис. ... д-ра техн. наук, 1990), число

стрельб, выполняемых комплексом из состояния БГ № 1 и БГ № 2, определяются выражениями

$$m_1 = \sum_{k=1}^{K_{ц}} \left\{ \frac{1}{\ln(1+\gamma)} \right\} \times \ln \left[\left[\frac{d^{\wedge} - V_{ц} t_{\text{раб}1} - (k-1)V_{ц}(2\tau_{п} - t_a)}{d_{\text{вых}} + V_p(T - k_{ц}t_a)} + \frac{V_p(1+\gamma)(T - k_{ц}t_a)}{d_{\text{вых}} + V_p(T - k_{ц}t_a)} \right] \right];$$

$$m_2 = \sum_{k=1}^{K_{ц}} \left\{ \frac{1}{\ln(1+\gamma)} \right\} \times \ln \left[\left[\frac{d^{\wedge} - V_{ц} t_{\text{раб}2} - (k-1)V_{ц}(2\tau_{п} - t_a)}{d_{\text{вых}} + V_p(T - k_{ц}t_a)} + \frac{V_p(1+\gamma)(T - k_{ц}t_a)}{d_{\text{вых}} + V_p(T - k_{ц}t_a)} \right] \right];$$

$$d^{\wedge} = \begin{cases} \frac{d_{\text{ор}} - V_{ц} t_{\text{раб}1(2)}}{1+\gamma} & \text{при } d_{\text{ор}} < d_{\text{вх}}(1+\gamma) + V_{ц} t_{\text{раб}1(2)} \\ d_{\text{вх}} & \text{при } d_{\text{ор}} \geq d_{\text{вх}}(1+\gamma) + V_{ц} t_{\text{раб}1(2)} \end{cases}$$

где $d_{\text{ор}}$ – гарантированная дальность обнаружения ПКР [7]; $V_{ц}$ – скорость ПКР; V_p – скорость зенитной управляемой ракеты; $\gamma = V_{ц}(V_p)^{-1}$;

$K_{ц}$ – количество целевых каналов зенитных огневых средств; $d_{\text{вх}}, d_{\text{вых}}$ – удаление дальней и ближней границ действующих зон поражения зенитных огневых средств; t_a – временной интервал между ПКР; $\tau_{п}$ – интервал пуска зенитных управляемых ракет; $t_{\text{раб}}$ – работное время по подготовке и производству первого залпа зенитных управляемых ракет; $T = T_{\text{раб}} + t_{\text{исх}} + t_{\text{зур}}$; $\tau_{\text{раб}}$ – работное время по подготовке и производству второго и последующих залпов зенитных управляемых ракет; $t_{\text{исх}}$ – время приведения зенитного ракетного комплекса в готовность к приему целеуказания; $t_{\text{зур}}$ – интервал времени между разрывами первой и последней зенитных управляемых ракет в районе цели; $t_{\text{раб}1} = t_{\text{прц}} + \max\{t_{\text{подг}}; t_{\text{п.п}}\} + t_{\text{ст}}$; $t_{\text{раб}2} = t_{\text{прц}} + t_{\text{гот}} + \max\{t_{\text{подг}}; t_{\text{п.п}}\} + t_{\text{ст}}$; $t_{\text{подг}}$ – работное время зенитной батареи по подготовке пуска; $t_{\text{п.п}}$ – время предстартовой подготовки

зенитной управляемой ракеты; $t_{ст}$ – время от нажатия кнопки «Пуск» до схода первой зенитной управляемой ракеты; $t_{рот}$ – время перевода комплекса из БГ № 2 в БГ № 1.

Пусть режим готовности есть упорядоченное чередование циклов готовности, каждый из которых представлен временем t_1 пребывания в БГ № 1 и временем t_2 пребывания в БГ № 2, т. е. $t_{ц} = t_1 + t_2$.

Предположим, что момент появления цели, а значит, и момент выдачи целеуказания комплексу равнозначны в течение цикла $t_{ц}$.

Обозначим dp – вероятность появления цели в промежутке времени dt . Тогда в соответствии с принятым предположением

$$dp = \frac{1}{t_{ц}} dt.$$

Вероятность того, что при появлении цели комплекс исправен и готов к приему целеуказания, когда

$$P_1(t) dp, \text{ если он находится в БГ № 1;}$$

$$P_2(t) dp, \text{ если он находится в БГ № 2,}$$

где $P_1(t)$ и $P_2(t)$ – вероятности того, что комплекс, находящийся, соответственно, в БГ № 1 и БГ № 2, готов к открытию огня (к обстрелу целей) в момент времени t , т. е. находится в исправном техническом состоянии.

Вследствие этого вероятности выполнения m_1 стрельб в интервале $[0; t_1]$, т. е. во время БГ № 1, и m_2 стрельб в интервале $[t_1; t_1 + t_2]$, т. е. во время БГ № 2, соответственно, определяются как

$$P\{m_1\} = \int_0^{t_1} P_1(t) dp = \frac{1}{t_{ц}} \int_0^{t_1} P_1(t) dt;$$

$$P\{m_2\} = \int_{t_1}^{t_1+t_2} P_2(t) dp = \frac{1}{t_{ц}} \int_{t_1}^{t_1+t_2} P_2(t) dt.$$

Тогда целевая функция примет вид

$$\begin{aligned} G = \bar{m} &= m_1 P\{m_1\} + m_2 P\{m_2\} = \\ &= \frac{m_1}{t_{ц}} \int_0^{t_1} P_1(t) dt + \frac{m_2}{t_{ц}} \int_{t_1}^{t_1+t_2} P_2(t) dt. \end{aligned}$$

Для удобства преобразуем целевую функцию, разделив обе части последнего равенства на m_1 и обозначив

$$\frac{\bar{m}}{m_1} = k \text{ и } \frac{m_2}{m_1} = k',$$

получим

$$k = \frac{1}{t_{ц}} \int_0^{t_1} P_1(t) dt + k' \frac{1}{t_{ц}} \int_{t_1}^{t_1+t_2} P_2(t) dt. \quad (3)$$

Из последнего выражения видно, что при $k' = P_1(t) = P_2(t) = 0$

$$k = 0,$$

при $k' = P_1(t) = P_2(t) = 1$

$$k = 1,$$

то есть

$$0 \leq k \leq 1,$$

и означает возможное снижение числа стрельб комплекса из БГ № 2 за счет снижения технической надежности комплекса и несвоевременности обнаружения средств воздушного нападения. При достаточно малой дальности обнаружения средств воздушного нападения, т. е. когда дальняя граница действующей зоны поражения комплекса совпадает с ближней, число его стрельб из положения походной готовности $m_2 = 0$, и в этом случае $k' = 0$.

Таким образом, $0 \leq k' \leq 1$ и определяет возможное снижение числа стрельб комплекса из положения походной готовности за счет несвоевременности обнаружения воздушных целей.

Пусть $P_{r1} = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} P_1(t) dt$ – средняя вероятность исправного состояния комплекса в период боевой готовности $[0; t_1]$;

$P_{r2} = \frac{1}{t_2} \int_{t_1}^{t_1+t_2} P_2(t) dt$ – средняя вероятность исправного состояния комплекса в период походной готовности $[t_1; t_1 + t_2]$.

Для вывода формул средней вероятности исправного состояния комплекса в период БГ № 1 и БГ № 2 использован метод, предложенный Г. Г. Абезгаузом. Принимается, что случайное время между двумя последовательными отказами и случайное время восстановления комплекса после отказа имеют распределение Вейбулла с параметрами λ и μ соответственно.

Тогда выражение (3) запишется в виде

$$G = k = \frac{t_1}{t_{ц}} P_{r1} + k' \frac{t_2}{t_{ц}} P_{r2}. \quad (4)$$

Подробный вывод формулы (4) приведен в диссертации Антонова Ю. С.

Из этого выражения следует, что задача оптимизации целесообразного режима готовности состоит в определении значений t_1 и t_2 из множества возможных значений $\{T\} = \{t_{ц}\}$, обращающих в максимум целевую функцию k .

Вероятность безотказного функционирования зенитного огневого средства в момент времени t при условии его безотказного включения определяется выражением

$$P_1(t) = P_{\text{вк}} \dot{P}_1(t) + (1 - P_{\text{вк}}) \ddot{P}_1(t),$$

где $P_{\text{вк}}$ – вероятность безотказного включения зенитного огневого средства; $\dot{P}_1(t)$ – вероятность безотказного функционирования зенитного огневого средства в момент времени t при условии его безотказного включения; $\ddot{P}_1(t)$ – вероятность безотказного функционирования зенитного огневого средства в момент времени t при условии отказа в момент включения; t – момент обнаружения цели (момент выдачи целеуказания).

$$\begin{aligned} \dot{P}_1(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp\{-(\lambda + \mu)t^a\} = \\ &= k_{\text{ог}} \left[1 + \frac{\lambda}{\mu} \exp\left(\frac{\mu t^a}{k_{\text{ог}}}\right) \right], \end{aligned}$$

где $k_{\text{ог}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$;

$$\begin{aligned} \ddot{P}_1(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[1 + \exp\{-(\lambda + \mu)t^a\} \right] = \\ &= k_{\text{ог}} \left[1 + \exp\left(\frac{\mu t^a}{k_{\text{ог}}}\right) \right]. \end{aligned}$$

Задача определения оптимального (целесообразного) режима готовности зенитных огневого средств заключается в следующем. Требуется выбрать продолжительность периодов t_1 и t_2 так, чтобы с учетом ограничений $t_1 \leq T_1$, $t_2 \geq T_2$, $t_1, t_2 \geq 0$ и заданных $P_{\text{вк}}$, k , α , λ , μ коэффициент k (4) принял максимальное (экстремальное) значение. Аналитический путь решения этой задачи приводит к сложным трансцендентным уравнениям. Поэтому целесообразно использовать численные методы. С этой целью использован метод покоординатного спуска (метод Гаусса – Зайделя).

Проведенные исследования показали:

1. Функция (4) является гладкой и унимодальной, а процесс спуска по координатам (с учетом знака) сходится к минимуму.

2. Характерными для обнаружения низколетящих целей (даже в беспомеховой обстановке) являются условия, когда система обнаружения воздушных целей не обеспечивает своевременного перевода зенитных огневого средств из походного режима в готовность к стрельбе [8–10]. В этом случае $k' = 0$, и рациональный режим готовности характеризуется следующими величинами: $t_1 = T_1$; $t_2 = T_2$; $t_{ц} = t_1 + t_2$.

После определения целесообразного режима готовности для каждого отдельного комплекса переходим к решению второй задачи.

Задача 2. Обоснование максимально допустимого времени перевода комплекса в готовность к приему целеуказания

Поставленная задача формулируется в следующем виде: определить для v -го зенитного огневого средства максимально допустимое время $t_{\text{отв}}^0$ приведения его в готовность к приему целеуказания, при котором обеспечивается обстрел первых ПКР атакующих групп на дальней границе действующей зоны поражения.

Для расчета величины $t_{\text{отв}}^0$ необходимо знать максимальную гарантированную дальность обнаружения каждой из j атакующих групп ПКР радиолокационными станциями обнаружения ордера надводных кораблей – $d_{\text{max } j}$. Тогда гарантированная дальность обнаружения ПКР, отсчитываемая от s -го корабля, определяется как

$$d_{\text{ор } sj \text{ max}} = \sqrt{(d'_{\text{max } j})^2 + d_s^2 - 2d'_{\text{max } j} d_s \cos(\alpha_{js})}, \quad (5)$$

где $d_{\text{ор } sj \text{ max}}$ – гарантированная дальность обнаружения от s -го надводного корабля до ПКР j -й группы; d_s – удаление s -го надводного корабля от центра ордера; $\alpha_{js} = |\Pi_{\text{обн } j} - \Pi_s|$; $\Pi_{\text{обн } j}$ – пеленг обнаружения ПКР j -й группы от центра ордера; Π_s – пеленг s -го надводного корабля от центра ордера.

Принимается, что дальность, рассчитанная по формуле (5), соответствует гарантированной дальности от s -го надводного корабля до ПКР j -й группы на момент начала оповещения кораблей ордера об обнаружении ПКР.

Максимальная реализуемая дальность стрельбы v -го зенитного огневого средства s -го над-

водного корабля по ПКР j -й группы, атакующей l -й охраняемый корабль, с учетом времени оповещения $t_{оп}$, времени объявления боевой тревоги

$t_{б.т}$ и времени приведения комплекса в готовность к приему целеуказания $t_{гот}$ определяется как

$$d_{стрvj} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_{орсj\max} - V_{цj}^{\wedge} (t_{рабv} + t_{оп} + t_{б.т} + t_{готvl})}{1 + Y_{vj}} \\ \text{при } d_{орсj\max} < d_{\max v} (1 + Y_{vj}) + V_{цj}^{\wedge} (t_{рабv} + t_{оп} + t_{б.т} + t_{готvl}) \\ d_{\max v} \\ \text{при } d_{орсj\max} \geq d_{\max v} (1 + Y_{vj}) + V_{цj}^{\wedge} (t_{рабv} + t_{оп} + t_{б.т} + t_{готvl}) \end{array} \right\}, \quad (6)$$

где $t_{готvl}$ – максимально допустимое время приведения в готовность к приему ЦУ v -го зенитного огневое средства для обстрела ПКР j -й группы, атакующих l -й надводный корабль, при котором обеспечивается встреча первой ПКР на дальней границе действующей зоны поражения;

$$Y_{vj} = \frac{V_{цj}}{V_{pv}}.$$

В формуле (6) значение приведенной скорости цели $V_{цj}^{\wedge}$ определяется в соответствии с выражением

$$V_{цj}^{\wedge} = \frac{(d_{орсj\max} - d_{выхvj}) V_{цj}}{\sqrt{d_{орсj\max}^2 - P_{ls}^2} - \sqrt{d_{выхvj}^2 - P_{ls}^2}},$$

$$(v = \overline{1, M_l}); (j = \overline{1, J}); (s, l = \overline{1, L}),$$

где $d_{выхvj}$ – удаление от стреляющего корабля ближней границы действующей зоны поражения v -го зенитного огневое средства при стрельбе по ПКР j -й группы, атакующим l -й надводный корабль ордера; P_{ls} – курсовой параметр относительно s -го корабля ПКР, атакующих l -й корабль; M_l – общее количество зенитных огневых средств на L кораблях.

Принимая во внимание возможность получения информации об обнаружении атаки ПКР как по каналу оповещения, так и от собственных средств обнаружения надводного корабля, в соответствии с (6)

$$\frac{\max [d_{орсj\max} - V_{цj}^{\wedge} t_{оп}; d_{орсj}]}{1 + Y_{vj}} - \frac{V_{цj}^{\wedge} (t_{рабv} + t_{б.т} + t_{готvl})}{1 + Y_{vj}} > d_{выхvj}.$$

Тогда условие, при котором установленная боевая готовность v -го зенитного огневое средства s -го надводного корабля обеспечит об-

стрел ПКР j -й группы, атакующих l -й корабль на дальней границе действующей зоны поражения, может быть записано в виде

$$t_{готvl} < \frac{\max [d_{орсj\max} - V_{цj}^{\wedge} t_{оп}; d_{орсj}] - d_{выхvj} (1 + Y_{vj})}{V_{цj}^{\wedge}} - (t_{рабv} + t_{б.т}),$$

или, окончательно,

$$t_{готv} < t_{готv}^0 = \min_{(j,l)} \{t_{готvl}\}, (j = \overline{1, J}), (l = \overline{1, L}), \quad (7)$$

где J – количество групп ПКР; L – количество атакуемых надводных кораблей; $t_{готv}^0$ – максимально допустимое время приведения в готовность к приему целеуказания v -го зенитного огневое средства для обстрела первых ПКР атакующих групп на дальних границах действующей зоны поражения.

Нарушение условия (7) отражает тот факт, что при ограниченных дальностях обнаружения ПКР радиолокационными станциями кораблей ордера v -е зенитное огневое средство не успевают их обстрелять и поэтому должно быть переведено в БГ № 1 заблаговременно, т. е. до момента обнаружения первых ПКР атакующих групп [11, 12].

Задача 3. Выработка рекомендаций для установления графика дежурства зенитных огневых средств

В качестве целевой функции в этой задаче может быть выбран главный критерий эффективности построения системы зенитного огневое прикрытия ордера надводных кораблей как при угрозе атаки ПКР с одного или нескольких направлений (1-й вариант решения задачи), так и в случае, когда направления атак ПКР неизвестны (2-й вариант решения задачи).

Максимум целевой функции достигается при условии оптимального (целесообразного) варианта построения системы зенитного огневое

прикрытия ордера, что обеспечивает максимально возможный в данных условиях уровень боевой устойчивости охраняемых кораблей [13].

График дежурства зенитных огневых средств по противовоздушной обороне должен обеспечить в угрожаемый период своевременный перевод в БГ № 1 зенитных комплексов, принимающих непосредственное участие в отражении атак ПКР [14, 15].

При этом для каждого зенитного огневого средства решающее значение имеет соотношение максимально допустимого времени перевода комплекса в готовность к приему целеуказания и располагаемого времени перевода его из БГ № 2 в БГ № 1, а именно:

– если максимально допустимое время перевода зенитного огневого средства в готовность к приему целеуказания превышает располагаемое время перевода его из БГ № 2 в БГ № 1, то комплекс может находиться в БГ № 2;

– если максимально допустимое время перевода зенитного огневого средства в готовность к приему целеуказания меньше или равно располагаемому времени его перевода из БГ № 2 в БГ № 1, то комплекс должен находиться в БГ № 1.

Результаты исследования и их обсуждение

В отличие от рассмотренных выше главных критериев эффективности построения системы зенитного огневого прикрытия, используемых для оптимизации управления режимом готовности, суммарный потенциал поражения средств воздушного нападения дежурных зенитных огневых средств ордера кораблей [16] не может быть использован в качестве целевой функции при обосновании графика дежурства зенитных огневых средств по противовоздушной обороне, поскольку, во-первых, не полностью определяет значение главного критерия эффективности построения системы зенитного огневого прикрытия, в частности, распределение потенциала поражения по направлениям [17, 18]; во-вторых, связан с определяемым заранее, исходя из тактических соображений, уровнем главного критерия эффективности, который зачастую для располагаемого состава сил и средств ордера может оказаться либо недостижимым, либо неоправданно заниженным по сравнению с оптимальным (целесообразным) вариантом построения системы зенитного огневого прикрытия [19].

Если условия боевой обстановки требуют изменения выработанного режима готовности зенитных огневых средств в сторону нежелательного сокращения времени их пребывания в походной готовности или при выходе послед-

них из строя, необходимо определить новое оптимальное (целесообразное) построение системы зенитного огневого прикрытия, а в случае такой возможности – требуемый состав и местоположение кораблей (самолетов) радиолокационного дозора [20], обеспечивающих наращивание радиолокационного поля на угрожаемых направлениях.

При обнаружении воздушного противника все без исключения комплексы, пребывающие в БГ № 2, должны быть переведены в высшую степень боевой готовности – БГ № 1.

Следует отметить, что по такому же алгоритму осуществляется оптимизация управления режимом боевой готовности дежурных зенитных огневых средств кораблей в повседневных условиях. При этом существенное увеличение максимально допустимого времени перевода зенитных огневых средств в БГ № 1 за счет наращивания радиолокационного поля системами противовоздушной обороны частей и соединений сухопутных войск и систем противовоздушной обороны территорий и наземных объектов позволяет значительную часть зенитных комплексов держать в «холодном» состоянии и только незначительную их часть – в БГ № 2. Это позволяет в случае угрозы воздушного нападения своевременно переводить в высшую степень боевой готовности все зенитные огневые средства как одиночного корабля, так и соединения надводных кораблей [21].

Выводы

В соответствии с целью исследования разработанная математическая модель позволяет определять оптимальные (целесообразные) режимы готовности зенитных огневых средств ордера надводных кораблей при угрозе атак противокорабельных крылатых ракет.

Актуальность работы заключается в том, что полученные результаты исследования хотя и представляются, на первый взгляд, интуитивно понятными, но требуют проведения сложных расчетов на ЭВМ по оптимизации построения системы зенитного огневого прикрытия, и в руководящих документах отражены, по мнению авторов, недостаточно корректно.

Оптимизация управления режимом готовности зенитных огневых средств является одним из необходимых условий оптимизации построения системы зенитного огневого прикрытия и системы противовоздушной обороны ордера надводных кораблей в целом при угрозе атак противокорабельных крылатых ракет.

Представленная математическая модель и разработанные на ее основе алгоритм и програм-

ма, опубликованные в работах, имеющих закрытый характер, могут быть рекомендованы для включения в системы автоматизированного боевого управления и в боевые информационно-управляющие системы соединений надводных кораблей и одиночных кораблей соответственно [22].

Библиографические ссылки

1. *Корабельников А. Л., Кринуцкий Ю. В.* Тенденции применения сил и средств воздушного нападения и направлений совершенствования ПВО // Военная мысль. 2021. № 2. С. 28–35.
2. *Hampton B.* Weapons Systems. *Background and Issues for Congress*, 2018.
3. *Измайлов Р.* Вчера, сегодня и завтра противовоздушной обороны кораблей ВМФ России // Национальная оборона. 2021. № 8. С. 94–101.
4. *Сильников М. В., Лазоркин В. И.* Формализация системы противовоздушной обороны и системы активной защиты объектов и средств поражения в условиях массированного налета средств воздушно-космического нападения // Известия РАН. 2021. Вып. 117. С. 25–32.
5. *Федоров А., Листовский В.* Любая цель будет уничтожена // Национальная оборона. 2020. № 8. С. 36–43.
6. *Егоров К.* Перспективы развития высокоточных средств поражения класса «воздух – земля» // Зарубежное военное обозрение. 2020. № 12. С. 42–55.
7. *Друзин С. В., Горевич Б. Н.* Методика формирования облика радиолокационных станций перспективной системы вооружения войсковой ПВО // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2020. № 2. С. 6–31.
8. *Солдаткин А.* Перспективные решения – задачи совершенствования ЗРК МД // Национальная оборона. 2020. № 9. С. 128–131.
9. *Смирнов М. А.* Методика оценки эффективности информационных средств ЗРК (ЗРС) при обнаружении ГЗКР с учетом динамики ЭПР цели // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2019. № 1. С. 18–23.
10. *Wang H., Chen S., Xu F., Jin Y.-O.* Application of deep-learning algorithms to MSTAR data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015, pp. 3743-3745.
11. Обеспечение стойкости корабельных радиоэлектронных систем / А. Харланов, Л. Попов, И. Кузнецов, А. Жидков // Морской сборник. 2019. № 6. С. 65–68.
12. *Long Y., Gong Y., Xiao Z., Liu O.* Accurate object localization in remote sensing images based on convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, vol. 55, no. 5. DOI: 10.3390/rs10010131.
13. *Горев А. Г., Козлов И. Л.* Количественное обоснование решений на основе аналитического моделирования // Военная мысль. 2020. № 7. С. 117–122.

14. *Созинов П. А.* Актуальные задачи математического моделирования систем ВКО // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2017. № 3. С. 17–26.

15. *Денисов М.* Модернизация американской многофункциональной системы управления оружием «Иджис» // Зарубежное военное обозрение. 2021. № 7. С. 77–79.

16. *Антонов Ю. С.* Некоторые проблемы оптимизации построения системы вооружения и управление ее элементами в процессе боевых действий // Вестник Академии военных наук. 2005. № 3. С. 128–138.

17. *Kousalya B., Vasanthi T.* Protection of k-out-of-n systems under intentional attacks using imperfect false elements. *International Journal of Performability Engineering*, 2013, no. 9, pp. 529-537.

18. *Guo J., Zhao Z., Zhou J.* Evaluation of Intelligent Air Defense algorithm based on Machine Learning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 769, no. 042118.

19. *Бурькин А. А.* Реализация элементов технологии искусственного интеллекта в перспективных АСУ надводного корабля и АСУ временного формирования сил ВМФ // Военная мысль. 2021. № 4. С. 50–58.

20. *Белоусов С.* О взаимодействии с истребителями над Черным морем // Морской сборник. 2020. № 6. С. 61–65.

21. *Степанов А.* Зарубежные комплексы и средства противодействия БПЛА // Зарубежное военное обозрение. 2021. № 3. С. 60–68.

22. *Маттиас А., Масленникова Т., Корсунский А.* Интегрированные системы управления для надводных кораблей ВМФ // Морской сборник. 2018. № 10. С. 53–55.

References

1. Korabel'nikov A.P., Krinitskii Yu.V. [The trends in the use of air attack forces and means and air defense improvement lines]. *Voennaya mysl'*, 2021, no. 2, pp. 28-35 (in Russ.).
2. Hampton B. Weapons Systems. *Background and Issues for Congress*, 2018.
3. Izmailov R. [Yesterday, today and tomorrow of air defense of RN ships]. *Natsional'naya oborona*, 2021, no. 8, pp. 94-101 (in Russ.).
4. Sil'nikov M.V., Lazorkin V.I. [Formalization of the air defence system and active object protection systems from means of destruction in conditions of massive raid of means of aerospace attack]. *Izvestiya RARAN*, 2021, vol. 117, pp. 25-32 (in Russ.).
5. Fedorov A., Listovskii V. [Any target will be destroyed]. *Natsional'naya oborona*, 2020, no. 8, pp. 36-43 (in Russ.).
6. Egorov K. [Development prospects of precision-guided weapon of "air-ground" class]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2020, no. 12, pp. 42-55 (in Russ.).
7. Druzin S.V., Gorevich B.N. [Methodology for developing a conceptual design of radar stations for prospective air defence weapon systems]. *Vestnik Koncerna*

VKO "Almaz - Antey", 2020, no. 2, pp. 6-31 (in Russ.). DOI: 10.38013/2542-0542-2020-2-6-31.

8. Soldatkin A. [Promising solutions - the tasks of improving AMS of SR]. *Natsional'naya oborona*, 2020, no. 9, pp. 128-131 (in Russ.).

9. Smirnov M.A. [Methodology for evaluating effectiveness of air defense missile system (ADMS) information resources when detecting a hypersonic cruise missile, with account for the dynamic target scattering crossover]. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz - Antey"*, 2019, no. 1, pp. 18-23 (in Russ.).

10. Wang H., Chen S., Xu F., Jin Y.-O. Application of deep-learning algorithms to MSTAR data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015, pp. 3743-3745.

11. Kharlanov A., Popov L., Kuznetsov I., Zhidkov A. [Stability providing of shipboard electronic systems]. *Morskoi sbornik*, 2019, no. 6, pp. 65-68 (in Russ.).

12. Long Y., Gong Y., Xiao Z., Liu O. Accurate object localization in remote sensing images based on convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, vol. 55, no. 5. DOI: 10.3390/rs10010131.

13. Gorev A.G., Kozlov I.L. [Quantitative justification of decisions based on analytical modeling]. *Voennaya mysl'*, 2020, no. 7, pp. 117-122 (in Russ.).

14. Sozinov P.A. [Crucial tasks of mathematical modeling of aerospace defense systems]. *Vestnik koncerna VKO "Almaz - Antey"*, 2017, no. 3, pp. 17-26 (in Russ.).

15. Denisov M. [Modernization of American multi-functional weapon control system "Aegis"]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2020, no. 7, pp. 77-79 (in Russ.).

16. Antonov Yu.S. [Some problems of optimizing of building of weapon system and controlling its elements in process of combat operations]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2005, no. 3, pp. 128-138 (in Russ.).

17. Kousalya B., Vasanthi T. Protection of k-out-of-n systems under intentional attacks using imperfect false elements. *International Journal of Performability Engineering*. 2013, vol. 9, pp. 529-537.

18. Guo J., Zhao Z., Zhou J. Evaluation of Intelligent Air Defense algorithm based on Machine Learning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 769, no. 042118.

19. Burykin A.A. [Implementation of elements of artificial intelligence technology in promising ICS of surface ship and ICS of temporary formation of Navy forces]. *Voennaya mysl'*, 2021, no. 4, pp. 50-58 (in Russ.).

20. Belousov S. [On interaction of fighters over Black Sea]. *Morskoi sbornik*, 2020, no. 6, pp. 61-65 (in Russ.).

21. Stepanov A. [Foreign complexes and means of countering UAV]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2021, no. 3, pp. 60-68 (in Russ.).

22. Mattias A., Maslennikova T., Korsunskiy A. [Integrated control systems for surface ships of Navy]. *Morskoi sbornik*, 2018, no. 10, pp. 53-55 (in Russ.).

Control Optimization of Readiness Mode of Antiaircraft Fire Weapons in Antiaircraft Fire Covering System of Surface Ships Formation in Case of Attack Threat of Anti-Ship Cruise Missiles

V.A. Galiy, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

S.N. Ivanischev, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

V.N. Bukriy, PhD in Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Currently, the decisive factor in the development of the theory of military art in the sea is the fact of transition to the creation and use of precision-guided long-range munition by an enemy - anti-ship cruise missiles (ASCM), so that to destroy ships from remote lines without entering the zone of the fighter aircraft action and reach of the antiaircraft missile system.

A promising direction in the organization of the building and effective combat use of such complex systems as the anti-aircraft defense contour of a single surface ship, and the anti-aircraft defense system of a group of surface ships in the threat of attack and repelling attacks of anti-ship cruise missiles, is the improvement of the algorithms for information processing and control of weapons systems in combination with their automation.

Modern information technologies based on the use of computer technology and mathematical modeling allow improving the decision-making process in the tasks of building complex systems, processes of planning and organizing their activities. The methods of "artificial intelligence", automation of the process of forces and means control in combat significantly increase the efficiency of decision-making. The fleeting nature and rapid change of the situation in anti-aircraft combat require solving the problem of repelling attacks by anti-ship cruise missiles in real time, that is impossible without full automation of the process of controlling the forces and means of anti-aircraft defense, in case of that human participation in anti-aircraft combat should be minimized, and completely excluded if possible.

One of the complex systems that require full automation and real-time operation is the anti-aircraft fire covering system for surface ships formation. Determination of the optimal (expedient) combat readiness mode of the anti-aircraft fire weapons included in its composition is a prerequisite for the effective functioning of the anti-aircraft fire covering system in anti-aircraft combat.

The article proposes a problem solution of the control optimization of the combat readiness mode of the anti-aircraft fire weapons in the anti-aircraft fire covering system of the surface ships formation in the case of the attacking threat of the anti-ship cruise missiles. The obtained results will substantiation of an optimal (expedient) mode of

combat readiness and also creation of recommendations for setting the duty schedule of the anti-aircraft fire weapons in the interests of anti-aircraft defense.

The presented mathematical model and the developed on its basis algorithm and program can be recommended for inclusion in both automated combat control systems and respectively combat information and control systems of connections of surface ships and single ships.

Keywords: antiaircraft defense, anti-ship cruise missiles, vector field of effective potential, AFW duty schedule, effective affected area, readiness mode of AFW, readiness for combat.

Получено 11.01.2022

Образец цитирования

Галий В. А., Иванищев С. Н., Букрий В. Н. Оптимизация управления режимом готовности зенитных огневых средств в системе зенитного огневого прикрытия ордера надводных кораблей при угрозе атак противокорабельных крылатых ракет // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 1. С. 17–26. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-17-26.

For Citation

Galiy V.A., Ivanischev S.N., Bukriy V.N. [Control Optimization of Readiness Mode of Antiaircraft Fire Weapons in Antiaircraft Fire Covering System of Surface Ships Formation in Case of Attack Threat of Anti-Ship Cruise Missiles]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 17-26 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-17-26.