

УДК 62-192.001:519.711.3

Б.Н. Ланецкий, С.Н. Донцов, А.А. Зверев

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЁТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗРК С УЧЁТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И НАДЁЖНОСТИ ЕГО БОЕВЫХ СРЕДСТВ

Рассматривается аналитическая модель для расчёта величины математического ожидания числа уничтожаемых средств воздушного нападения (СВН) из состава заданного налёта зенитным ракетным комплексом (ЗРК) группировки зенитной ракетной обороны (ЗРО) с учётом надёжности и технического состояния, используемая для сравнительного анализа вариантов проектируемого ЗРК и решения других задач.

зенитный ракетный комплекс, математическое ожидание числа уничтожаемых целей с учётом надёжности, граф надёжности

Введение

Постановка проблемы. При сравнительном анализе вариантов проектируемого ЗРК наиболее приемлемы аналитические модели для расчёта показателя эффективности ЗРК, которые бы обеспечива-

ли высокую чувствительность оцениваемого показателя эффективности ЗРК к изменениям тактико-технических характеристик (ТТХ) проектируемого ЗРК и СВН из состава заданного налёта с учётом характеристик надёжности ЗРК. Известные аналитические модели для оценки показателя эффектив-

ности ЗРК – математического ожидания (м.ож.) числа уничтожаемых целей, – характеризуются низкой чувствительностью к изменениям ТТХ ЗРК и СВН. При этом не учитывается техническое состояние и надёжность боевых средств ЗРК и ЗРК в целом в различных режимах работы и на этапах боевой работы, соответствующих этим режимам (в момент объявления готовности №1, начала боевой работы, в процессе функционирования). Это не позволяет решать задачи сравнительного анализа по этому показателю различных вариантов проектируемого ЗРК.

Анализ исследований и публикаций. В известных аналитических моделях [1 – 4] для оценки эффективности использования ЗРК математические ожидания числа уничтожаемых целей рассчитываются без учёта структуры ЗРК, технического состояния боевых средств, функционирующих на определённых этапах использования ЗРК, а также без учёта режимов работы ЗРК (БР, ДР и др.).

Известный подход рассматривает в качестве одного из показателей надёжности стационарный коэффициент оперативной готовности $K_{ог}(t_{бр})$, где $t_{бр}$ – общее время отражения удара СВН (при этом нестационарный коэффициент оперативной готовности не используется для оценки надёжности ЗРК).

Такая упрощённая аналитическая модель не даёт возможность точно оценить эффективность ЗРК, что затрудняет её использование для решения задачи сравнительного анализа различных вариантов проектируемого ЗРК и других задач.

Цель статьи: разработать аналитическую модель для расчёта показателя эффективности ЗРК с учётом технического состояния боевых средств и их надёжности, которую можно использовать для решения задач сравнительного анализа по этому показателю различных вариантов проектируемого ЗРК.

Для адекватной оценки влияния надёжности средств ЗРК на эффективность стрельбы необходимо максимально полно учитывать пространственно-временную динамику боя, временной резерв и возможности по последовательному обстрелу цели.

Основной материал

В данной статье рассматривается методика расчёта м.ож. числа уничтожаемых целей с учётом надёжности и технического состояния ЗРК на момент обслуживания заявок. Данная методика базируется на изложенном в [5, 6] подходе к определению номинального количества стрельб при заданном построении противовоздушного боя, технических характеристиках средств ЗРК, лётно-технических характеристиках СВН и тактических способах их применения. При этом не учитываются этапы функционирования (боевой работы) ЗРК (с участием определённых средств ЗРК на каждом из этапов) и режимы работы ЗРК.

Исходными параметрами данной методики, подлежащие учёту при оценке надёжности, является время безотказной работы $t_{бр i}$, соответствующее длительности обслуживания группы совместно обстреливаемых целей (sr -ой группы) [1], интервалы между обслуживанием групп совместно обстреливаемых целей заданного типового удара СВН $t_{ож i}$, время минимального восстановления $t_{в min}$.

Алгоритм расчёта количества уничтоженных целей с учётом надёжности ЗРК следующий:

1. В соответствии с заданным типовым налётом строится временная диаграмма применения ЗРК по налёту СВН (рис. 1).

2. На основе сравнения $t_{в min}$ и $t_{бр i}$ в зависимости от применяемого метода ТР (эксплуатирующим персоналом, ремонтной бригадой или же сервисный) делается вывод, является ли ЗРК за данный заданный интервал времени восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

3. В соответствии с вышеизложенным строится граф надёжности ЗРК при последовательном обслуживании целей заданного налёта.

4. На основе графа надёжности с учётом расчёта эффективности ЗРК при отражении заданного налёта СВН не учитывающего надёжность ЗРК рассчитывается м.ож. числа уничтоженных целей с учётом надёжности для определённых состояний ЗРК на момент обслуживания.

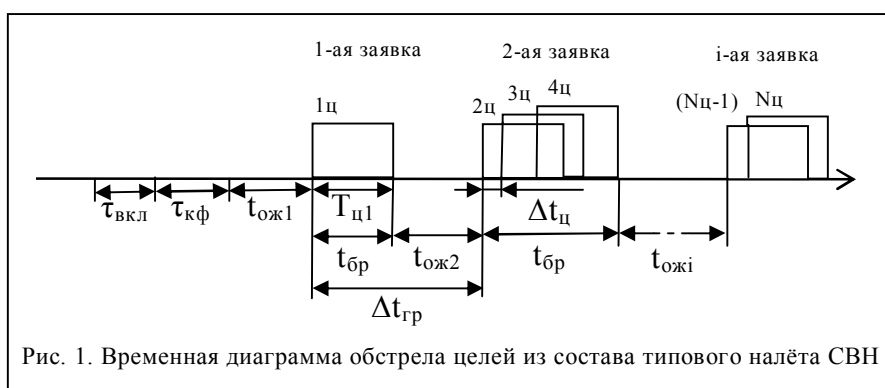
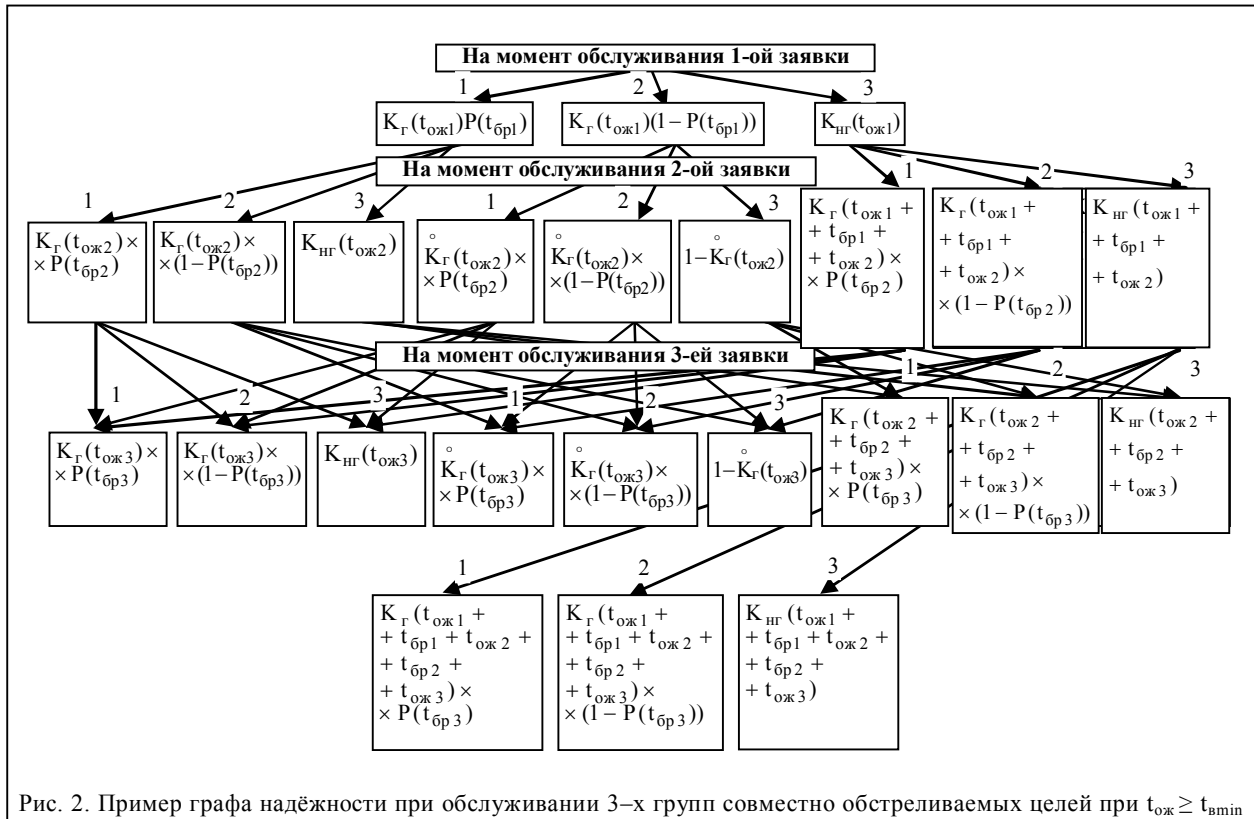


Рис. 1. Временная диаграмма обстрела целей из состава типового налёта СВН



На рис. 2 представлен граф надёжности при обслуживании трёх sr -х групп при условии, что $t_{ож i} \geq t_{в min}$.

При этом 1 – состояние, при котором ЗРК работоспособен к началу обслуживания и не отказал в течение обслуживания заявки, 2 – ЗРК работоспособен к началу обслуживания и отказал во время обслуживания заявки, 3 – ЗРК неработоспособен к началу обслуживания.

Ниже рассматриваются пример расчёта м.ож. числа уничтоженных целей с учётом надёжности для определённых состояний ЗРК на момент обслуживания.

При этом ЗРК при обслуживании вышеуказанных групп целей (заявок) находился в состоянии 3 на момент обслуживания 1-ой заявки, в состоянии 2 на момент обслуживания 2-ой заявки и в состоянии 1 на момент обслуживания 3-ей заявки. Тогда м.ож. числа уничтоженных целей с учётом надёжности и в соответствии с [6] определяется следующим образом:

$$M[\xi_S] = M[\xi_{S1}]K_{нГ}(t_{ож1}) + M[\xi_{S2}]K_{Г}(t_{ож1} + t_{бр1} + t_{ож2})(1 - P(t_{бр2})) + M[\xi_{S3}]K_{Г}(t_{ож3})P(t_{бр3}). \quad (1)$$

В формуле (1) $M[\xi_S]$ – м.ож. числа СВН из состава S -ого налёта ξ_S , уничтожаемых ЗРК с учётом надёжности, $M[\xi_{Sr}]$ – м.ож. числа целей ξ_{Sr} , уничтожаемых ЗРК при боевой работе по Sr -ой группе СВН, определяемые по методике, указанной в [6],

$K_{Г}(t_{ож Г})$ – коэффициент готовности ЗРК к применению.

В общем случае м.ож. числа СВН из состава S -ого налёта можно представить в виде:

$$M[\xi_S] = \sum_{r=1}^I M[\xi_{Sr}] \Pi_r,$$

где Π_r – показатель надёжности, учитывающий состояние ЗРК на момент обслуживания текущей заявки в зависимости от предыдущего состояния.

Для определения показателей надёжности, которые соответствуют состояниям ЗРК для условия $t_{ож i} \geq t_{в min}$, по результатам анализа возможных исходов получена таблица показателей надёжности (табл. 1).

В данной таблице $K'_{Г}$ и $K'_{нГ}$ могут принимать одно из трёх значений в зависимости от состояния предшествующее данному переходу от состояния к состоянию, соответствующее моменту обслуживания определённой цели. Величины $t_{ож \Sigma i}$ и $t_{ож \Sigma i+1}$ находятся в соотношении:

$$t_{ож \Sigma i+1} = t_{ож \Sigma i} + t_{бр i+1} + t_{ож i+1}.$$

При этом $t_{ож \Sigma i}$ представляет собой сумму временных интервалов $t_{ож}$ и $t_{бр}$, за которую ЗРК не был восстановлен (не был готов к применению).

Граф надёжности для случая $t_{ож i} < t_{в min}$ и обслуживания 4-х заявок (групп совместно обстреливаемых целей) приведён на рис. 3.

Показатели надёжности (для условия $t_{ож\ i} \geq t_{в\ min}$)

Переход	Показатели надёжности (соответствующие состояниям)	K'_r (в зависимости от предыдущего состояния)
1 → 1	$K'_r P(t_{бр\ i}) \rightarrow K_r(t_{ож\ i+1}) P(t_{бр\ i+1})$	1 → $K_r(t_{ож\ i})$
1 → 2	$K'_r P(t_{бр\ i}) \rightarrow K_r(t_{ож\ i+1})(1 - P(t_{бр\ i+1}))$	
1 → 3	$K'_r P(t_{бр\ i}) \rightarrow K_{нг}(t_{ож\ i+1})$	
2 → 1	$K'_r(1 - P(t_{бр\ i})) \rightarrow \overset{\circ}{K}_r(t_{ож\ i+1}) P(t_{бр\ i+1})$	2 → $\overset{\circ}{K}_r(t_{ож\ i})$
2 → 2	$K'_r(1 - P(t_{бр\ i})) \rightarrow \overset{\circ}{K}_r(t_{ож\ i+1})(1 - P(t_{бр\ i+1}))$	
2 → 3	$K'_r(1 - P(t_{бр\ i})) \rightarrow 1 - \overset{\circ}{K}_r(t_{ож\ i+1})$	
3 → 1	$K'_{нг} \rightarrow K_r(t_{ож\ \Sigma\ i+1}) P(t_{бр\ i+1})$	1 → $K_{нг}(t_{ож\ i})$ 2 → $1 - \overset{\circ}{K}_r(t_{ож\ i})$ 3 → $K_{нг}(t_{ож\ \Sigma\ i})$
3 → 2	$K'_{нг} \rightarrow K_r(t_{ож\ \Sigma\ i+1})(1 - P(t_{ож\ i+1}))$	
3 → 3	$K'_{нг} \rightarrow K_{нг}(t_{ож\ \Sigma\ i+1})$	

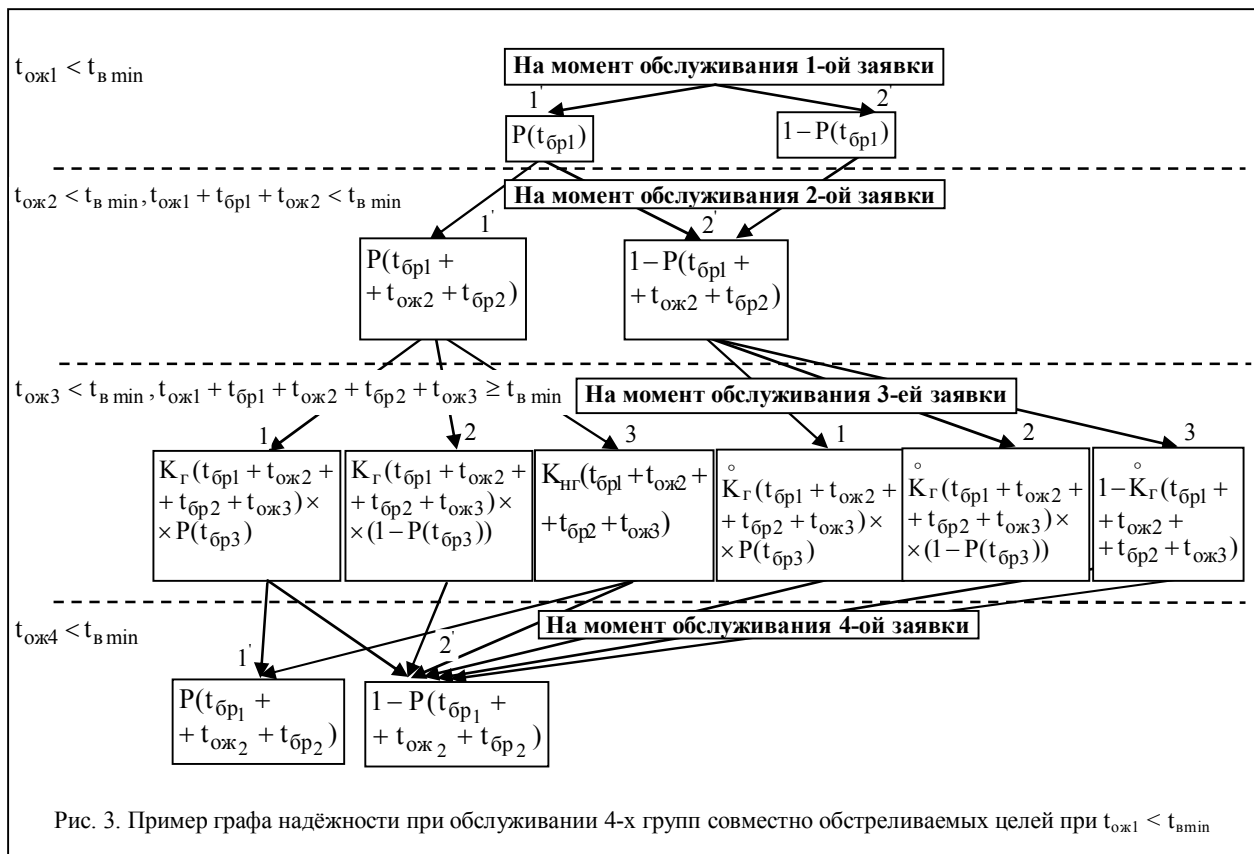


Рис. 3. Пример графа надёжности при обслуживании 4-х групп совместно обстреливаемых целей при $t_{ож1} < t_{в\ min}$

При этом 1' – состояние, при котором ЗРК работоспособен и не отказал в течение обслуживания заявки, 2' – ЗРК отказал во время обслуживания заявки, состояния 1, 2, 3 аналогичны состояниям, приведённым ранее.

Ниже рассматриваются пример расчёта м. ож. числа уничтоженных целей с учётом надёжности

для определённых состояний ЗРК на момент обслуживания.

Пример: ЗРК при обслуживании вышеуказанных групп целей (заявок) находился в состоянии 1' на момент обслуживания 1-й, 2-й и 4-й заявки и в состоянии 1 на момент обслуживания 3-й заявки, тогда м. ож. числа уничтоженных целей с учётом

надёжности и в соответствии с [6] определяется следующим образом:

$$M[\xi_S] = M[\xi_{S1}]P(t_{\text{бр}1}) + M[\xi_{S2}]P(t_{\text{бр}1} + t_{\text{ож}2} + t_{\text{бр}2}) + M[\xi_{S3}]K_{\Gamma}(t_{\text{бр}1} + t_{\text{ож}2} + t_{\text{бр}2} + t_{\text{ож}3}) \times P(t_{\text{бр}3}) + M[\xi_{S4}]P(t_{\text{бр}1} + t_{\text{ож}2} + t_{\text{бр}2}). \quad (2)$$

В формуле (2) обозначения аналогичны обозначениям в формуле (1).

Для определения показателей надёжности, которые соответствуют состояниям ЗРК для условия $t_{\text{ож}i} < t_{\text{в min}}$, по результатам анализа возможных исходов получена таблица показателей надёжности (табл. 2).

Таблица 2

Показатели надёжности (для условия $t_{\text{ож}i} < t_{\text{в min}}$)

Переход	Показатели надёжности (соответствующие состояниям)
1' → 1'	$P(t_{\text{бр}\Sigma i}) \rightarrow P(t_{\text{бр}\Sigma i+1})$
1' → 2'	$P(t_{\text{бр}\Sigma i}) \rightarrow (1 - P(t_{\text{бр}\Sigma i+1}))$
1' → 1	$P(t_{\text{бр}\Sigma i}) \rightarrow K_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i+1})P(t_{\text{бр}\Sigma i+1})$
1' → 2	$P(t_{\text{бр}\Sigma i}) \rightarrow K_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i+1})P(1 - t_{\text{бр}\Sigma i+1})$
1' → 3	$P(t_{\text{бр}\Sigma i}) \rightarrow K_{\text{нг}}(t_{\text{ож}\Sigma i+1})$
2' → 1	$(1 - P(t_{\text{бр}\Sigma i})) \rightarrow \overset{\circ}{K}_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i})P(t_{\text{бр}i+1})$
2' → 2	$(1 - P(t_{\text{бр}\Sigma i})) \rightarrow \overset{\circ}{K}_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i+1})(1 - P(t_{\text{бр}i+1}))$
2' → 3	$(1 - P(t_{\text{бр}\Sigma i})) \rightarrow 1 - \overset{\circ}{K}_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i+1})$
1' → 1 → 1'	$K_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i})P(t_{\text{бр}i}) \rightarrow P(t_{\text{бр}\Sigma i})$
2' → 1 → 1'	$\overset{\circ}{K}_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i})P(t_{\text{бр}i}) \rightarrow P(t_{\text{бр}\Sigma i})$
1' → 2 → 2'	$K_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i})(1 - P(t_{\text{бр}i})) \rightarrow 1 - P(t_{\text{бр}\Sigma i+1})$
1' → 3 → 2'	$K_{\text{нг}}(t_{\text{ож}\Sigma i}) \rightarrow 1 - P(t_{\text{бр}\Sigma i+1})$
2' → 2 → 2'	$\overset{\circ}{K}_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i})(1 - P(t_{\text{бр}i})) \rightarrow 1 - P(t_{\text{бр}\Sigma i+1})$
2' → 3 → 2'	$(1 - K_{\Gamma}(t_{\text{ож}\Sigma i})) \rightarrow 1 - P(t_{\text{бр}\Sigma i+1})$

Выводы

Разработанная аналитическая модель позволяет оценить эффективность функционирования ЗРК при отражении заданного налёта СВН с учётом его технического состояния на этапах обслуживания групп совместно обстреливаемых целей (sr-x групп). Это позволит решать задачи модернизации (проектирования) ЗРК на начальном этапе сравнительного анализа различных вариантов модернизируемого (проектируемого) ЗРК.

Список литературы

1. Петухов С.И., Степанов А.Н. Эффективность ракетных средств ПВО. – М.: Воениздат, 1976. – 104 с.
2. Неупокоев Ф.К. Стрельба зенитными ракетами. – М.: Воениздат, 1980. – 104 с.
3. Раскин Л.Г., Математические методы исследования операций и анализа сложных систем вооружения

ПВО. Математическое моделирование функционирования сложных систем. – Х.: ВИРТА, 1988. – 177 с.

4. Ковтуненко А.П., Шершнев Н.А. Основы теории построения и моделирования функционирования сложных систем вооружения (системы зенитного управляемого ракетного оружия). – Х.: ВИРТА, 1992. – 233 с.

5. Ланецкий Б.Н., Зверев А.А., Донцов С.Н. Коэффициент сохранения эффективности ЗРК и основные положения по его расчету // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС. – 2005. – Вып. 9 (49). – С. 101-106.

6. Ланецкий Б.Н., Донцов С.М. Аналитическая модель для расчёта эффективности зенитного ракетного комплекса при отражении заданного налёта средств воздушного нападения // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вып. 10 (38). – С. 103-111.

Поступила в редакцию 21.08.2006

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