

Information systems modeling

УДК 323.774

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.03>

С. П. Коваленко, С. В. Герасимов, А. Ф. Волков, С. І. Корсунов, М. І. Оборонов

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДРОЗДІЛІВ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ

Анотація. Актуальним питанням сучасних локальних конфліктів є обґрунтування спроможності підрозділів протиповітряної оборони виконувати свої безпосередні завдання з прикриття з повітря дій наземних сил. Особливо актуально це питання постає в локальних конфліктах, коли простір, на якому необхідно виконувати поставлене завдання, розтягнутий по ширині та глибині територіального простору. **Мета статті** – розробка моделі оцінювання ефективності прикриття дії наземних сил підрозділами ППО в нових позиційних районах, які змінилися в розмірах по ширині та в глибину. **Результат.** В статті пропонується модель, яка дозволяє оцінювати ефективність прикриття озброєння та військової техніки і інфраструктури наземних сил підрозділами протиповітряної оборони. **Висновки.** Розроблена модель допоможе командирі підрозділу протиповітряної оборони оцінювати варіанти своєї структури, вибирати з них раціональні, з кращою ефективністю прикриття та допомагає йому прийняти правильне рішення на відбиття ударів з повітря. Запропонована модель дозволяє оцінювати ефективність прикриття наземних сил при різних вхідних даних і спроможність підрозділів протиповітряної оборони прикрити наземні сили залежно від місцевості та дій противника.

Ключові слова: модель; розрахунок ефективності; локальні конфлікти; протиповітряна оборона; граф можливих станів; повітряний простір.

Вступ

Постановка проблеми. Своє основне завдання підрозділи протиповітряної оборони (ППО) виконують, прикриваючи з повітря озброєння та військової техніки і інфраструктуру наземних сил, безпосередньо в складі цих сил [1, 2]. Локальні конфлікти все частіше розв'язуються у світі через неспроможність вирішити критичну ситуацію між двома протидіючими сторонами мирним шляхом, залучаючи політичні та дипломатичні сили для урегулювання. Це призводить до ситуації, яку необхідно вирішувати військовим командирам в короткий термін часу, заздалегідь не знаючи ширини та глибини територіального простору, на якому необхідно буде приймати рішення з прикриття наземних сил з повітря. Як правило в невідомому районі простір, на якому необхідно виконувати поставлене завдання, розтягнутий по ширині, що призведе до збільшення позиційних районів наземних сил як по ширині, так і в глибину. Це, в свою чергу, приведе до збільшення навантаження на підрозділи ППО з прикриття цих наземних сил з повітря. А за короткий термін часу військовим командирам складно прийняти правильне рішення, через те, що вони не знають про здатність підрозділів ППО прикрити дії наземних сил з повітря в новому позиційному районі. Для прийняття правильного рішення командирі протиповітряного підрозділу різного рівня ієрархії необхідно обґрунтувати можливість ефективного виконання ними бойового завдання. Тому пропонується модель, яка дозволяє оцінити ефективність прикриття підрозділами ППО дії наземних сил в новому, невідомому позиційному районі. Крім того, запропонована модель допомагає військовому командирі в автоматичному оцінюванні спроможності підрозділів ППО прикрити наземні сили з повітря [3, 4].

Виходячи з цього, розробка моделі розрахунку ефективності прикриття озброєння та військової техніки і інфраструктуру наземних сил підрозділами протиповітряної оборони в нових позиційних районах, які змінилися в розмірах по ширині та в глибину, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Все частіше в багатьох джерелах проводять аналіз ефективності застосування різних підрозділів в локальних конфліктах останніх десяти років [1-14]. Актуальним питанням на сьогоднішній день є й організація ППО, яка повинна забезпечувати прикриття з повітря усіх підрозділів, що залучаються для розв'язання завдань в конфліктних ситуаціях. Успіх будь-яких бойових дій залежить від вміння управління та наявності засобів автоматизації процесу управління [1-8], у яких алгоритми та математичний апарат [4, 5] дозволить за дуже короткий час вирішувати питання збору [4-9], обробки інформації та цілерозподілу цілей [10-14] між підрозділами ППО, що залучаються для прикриття дій наземних сил.

Мета статті – розробка моделі оцінювання ефективності прикриття дії наземних сил підрозділами ППО в нових позиційних районах, які змінилися в розмірах по ширині та в глибину. Модель пропонується використовувати в системах прийняття рішення для допомоги командирі прийняти правильне рішення на прикриття з повітря дії наземних сил.

Виклад основного матеріалу

Сучасні локальні військові конфлікти відрізняються своєю непередбачуваністю та швидкою зміною обстановки. Досвід останніх локальних військових конфліктів в Сирії та Нагорному Карабасі підтверджує дуже широке використання комп'ютерних технологій і безпілотних засобів розвідки та нападу, змінивши підхід до ведення бойових дій, через широке

застосування комп'ютерних технологій та роботизацію усіх процесів в бойовому застосуванні озброєння та військової техніки [8]. Виходячи з цього необхідно проаналізувати можливості діючих засобів ППО з прикриття дії наземних сил з повітря в складній ситуації при локальних конфліктах, коли наземні сили розтягнуті по ширині. В цій непростій ситуації стоїть завдання з дослідження можливостей підрозділів ППО прикрити площинні об'єкти наземних сил при збільшенні їх позиційних районів.

Для вирішення поставленого наукового завдання пропонується застосувати теорію ймовірностей. Відносно положень теорії ймовірностей будемо рахувати, що площі зон ураження зенітних комплексів (площа прикриття об'єкту) відноситься до площі позиційного району дії наземних сил, як відношення ймовірності знищення цілі в зоні ураження зенітних комплексів до ймовірності прикриття підрозділами ППО. Виходячи зі зробленого припущення можна розрахувати ймовірність прикриття підрозділами ППО озброєння та військової техніки і інфраструктури наземних сил.

На даний час для оповіщення підрозділів ППО про напад повітряного противника розроблена нова система автоматизованого управління засобами ППО різного рівня ієрархії нового покоління. Крім цього, для управління підрозділами ППО розроблений відповідний комп'ютерний програмний комплекс [9]. Він призначений для автоматизації процесів збору, обробки, відображення та видачі інформації про повітряну обстановку на неавтоматизованих командних пунктах, пунктах управління частин і підрозділів ППО. Але жоден з них не допомагає командирів підрозділів ППО різного рівня ієрархії в прийнятті правильного рішення на прикриття дії наземних сил від ударів з повітря. Тому пропонується модель, яка б допомагала командирів підрозділів ППО різного рівня ієрархії в прийнятті рішення на прикриття дії наземних сил з повітря в новому невідомому районі при локальних конфліктах.

Розглянемо протиповітряний бій як дуельні ситуації між засобами повітряного нападу (ЗПН) та зенітними ракетними комплексами (ЗРК) і зенітними артилерійськими комплексами (ЗАК) підрозділів ППО з прикриття дії наземних сил. Розрізнятимемо можливі стани S_{ij} протиповітряного бою по кількості i уражених ЗРК в цьому стані та числу j цілей, що одночасно обстрілюються. Тоді, з точки зору можливості обстрілу та знищення цілей, можна виділити три основні стани ЗРК (ЗАК): S_{00} – не уражений, вільний; S_{01} – не уражений, обстрілює одну ціль; S_{10} – уражений, ціль не обстрілює [1].

Перехід із стану S_{00} в стан S_{01} можливий при виявленні чергової цілі противника, що проходить через зону ураження ЗРК (ЗАК). Частота таких переходів пропорційна інтенсивності (I зпн/хв.) удару, які відбито, представлена на рис. 1 [1, 2].

Обстріл цілі може тривати деякий випадковий час циклу стрільби з математичним сподіванням і може закінчитися поразкою ЗРК (ЗАК) (перехід в стан S_{10} на рис. 1 з ймовірністю P^* ($0 < P^* \leq 1$)), або

може мати благополучний для ЗРК (ЗАК) результат з ймовірністю $(1 - P^*)$. Кожна обстріляна ціль може бути знищена з ймовірністю P_{zn} .

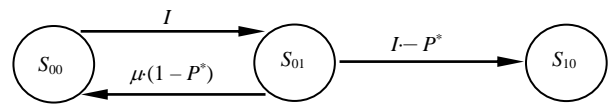


Рис. 1. Частота переходів із стану в стан ЗРК (Fig. 1. Frequency of transitions from state to state SAM)

Припустимо, що своєчасно виявляються усі цілі та поразка ЗРК можлива тільки в дуельному бою. Тоді для графа (рис. 1) можна записати систему диференціальних рівнянь Чепмена-Колмогорова, яка описує протиповітряний бій [1]

$$\begin{cases} \dot{P}_{00} = -I \cdot P_{00} + \mu \cdot (1 - P^*) \cdot P_{01}; \\ \dot{P}_{01} = -\mu \cdot P_{01} + I \cdot P_{00}; \\ \dot{P}_{10} = \mu \cdot P^* \cdot P_{01}. \end{cases} \quad (1)$$

На початку бою ЗРК (ЗАК) боєготовий і цілі в його зоні ураження відсутні

$$P_{00}(0) = 1, \quad P_{01}(0) = 0, \quad P_{10}(0) = 0. \quad (2)$$

Інтегруємо (1) за початкових умов (2):

$$\begin{aligned} P_{00} &= \frac{1}{\alpha} \left[(1 - \rho) \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} + \alpha \cdot ch \frac{\zeta \cdot t}{2} \right] \cdot e^{-\frac{(1+\rho)}{2} \mu \cdot t}; \\ P_{01} &= 2 \cdot \frac{\rho}{\alpha} \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} \cdot e^{-\frac{(1+\rho)}{2} \mu \cdot t}; \\ P_{10} &= 1 - \frac{1}{\alpha} \left[(1 + \rho) \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} + \alpha \cdot ch \frac{\zeta \cdot t}{2} \right] \cdot e^{-\frac{(1+\rho)}{2} \mu \cdot t}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\rho = \frac{I}{\mu}$; $\alpha = \sqrt{1 + \rho + 2\rho \cdot (1 - P^*)}$; $\zeta = \alpha \cdot \mu$.

Математичне сподівання кількості обстріляних цілей з моменту t бою пропорційно часу перебування ЗРК (ЗАК) в зайнятому стані та його продуктивності $\mu = 1/T_u$.

$$\begin{aligned} N(t) &= \mu \int_0^t P_{01}(\tau) d\tau = 1 / \left(\alpha \cdot P^* \right) \times \\ &\times \left[\alpha - \left((1 + \rho) \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} + \alpha \cdot ch \frac{\zeta \cdot t}{2} \right) \cdot e^{-\frac{(1+\rho)}{2} \mu \cdot t} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Математичне сподівання $N_{zn}(t)$ кількості знищених цілей пропорційне кількості $N(t)$ боїв

$$N_{zn}(t) = P_{zn} \cdot N(t). \quad (5)$$

Тоді граничні значення математичних сподівань кількості боїв (обстріляних цілей) і знищених ЗПН при необмеженому боєкомплекті ЗРК (ЗАК) і кількості ЗПН в ударі знайдемо з виразів (4) і (5)

$$N_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} N(t) = 1 / P^*; \quad (6)$$

$$N_{zn \infty} = P_{zn} \cdot \frac{1}{P^*}. \quad (7)$$

Наслідком переходу ЗРК (ЗАК) із одного стану в інший є рівність

$$n^*(t) = N^*(t) = N_{y^*}(t). \quad (8)$$

Знайдемо відносну кількість боїв, розділивши вираз (4) на співвідношення (6)

$$N^*(t) = 1 - \frac{1}{\alpha} \left[(1+\rho) \cdot sh \frac{\zeta \cdot t}{2} + \alpha \cdot ch \frac{\zeta \cdot t}{2} \right] \cdot e^{-\frac{(1+\rho) \cdot \mu \cdot t}{2}}. \quad (9)$$

Вираз для відносної кількості $N_{зпн}^*(t)$ знищених ЗПН співпадає з (9). Дійсно,

$$N_{зпн}^*(t) = \frac{N_{зпн}(t)}{N_{зпн\infty}} = \frac{N(t) \cdot P_{зпн}}{N_{\infty} \cdot P_{зпн}} = \frac{N(t)}{N_{\infty}} = N^*(t). \quad (10)$$

Відносне значення математичного сподівання кількості уражених ЗРК (ЗАК) співпадає з P_{10} :

$$n^*(t) = n(t)/n_0 = n(t) = 0 \cdot (P_{00} + P_{01}) + 1 \cdot P_{10} = P_{10}. \quad (11)$$

Порівнюючи вираз (3) для P_{10} і (9), переконуємося в їх тотожності, що з обліком (10) дозволяє підтвердити істинність рівності (8) відносних втрат сторін для даної моделі. Таким чином, отримана модель протиповітряного бою в умовах повної інформації є адекватною реальному процесу з точністю прийнятих гіпотез [1, 2].

Загальний потік цілей інтенсивності I розділяється на потік тих, які виявляються (інтенсивності $I_{вияв}$) і ЗПН, які не виявляються (інтенсивності I_{Π}), які можуть безкарно вражати ЗРК (ЗАК). Для пригнічення системи ППО противник виділяє деяку частину Q ЗПН удару ($0 \leq Q \leq 1$). Тому можна вважати, що із складу ЗПН, які не виявляються, частину Q цілей безкарно атакують і знищують ЗРК (ЗАК) з ймовірністю $P_{зпн}$ в результаті кожного безкарного удару [6]. Якщо позначити ймовірність своєчасного виявлення цілей, $P_{вияв}$, то інтенсивність I_{Π} безкарних знищуючих ударів знайдеться

$$I_{\Pi} = I \cdot (1 - P_{вияв}) \cdot Q \cdot P_{зпн}. \quad (12)$$

Таким ударам ЗРК (ЗАК) піддається, як у вільному S_{00} , так і в зайнятому стрільбою S_{01} стані. Крім того, частина Q цілей із складу своєчасно виявлених може також виконувати безкарні знищуючі удари по ЗРК (ЗАК), якщо застають батарею зайнятою обстрілом (в стані S_{01}). Нехтуючи можливістю відновлення ураженого ЗРК (ЗАК) за час бою, отримаємо граф можливих станів і переходів для ЗРК (ЗАК) в процесі бою, представлений на рис. 2, де

$$I_{\epsilon} = \mu \cdot (1 - P^*); \quad I_{\Pi} = I \cdot (1 - P_{вияв}) \cdot Q \cdot P_{зпн}; \quad (13)$$

$$I_{вияв} = I \cdot P_{вияв}; \quad I_{\nu} = \mu \cdot P^* + I_{\Pi} + I_{вияв} \cdot Q \cdot P_{зпн}.$$

Тоді система диференціальних рівнянь для ймовірності станів протиповітряного бою ЗРК (ЗАК) приймає вигляд [1]:

$$\begin{aligned} \dot{P}_{00} &= -(I_{вияв} + I_{\Pi}) \cdot P_{00} + I_{\epsilon} \cdot P_{01}; \\ \dot{P}_{01} &= -(I_{\epsilon} + I_{\nu}) \cdot P_{01} + I_{вияв} \cdot P_{00}; \\ \dot{P}_{10} &= I_{\Pi} \cdot P_{00} + I_{\nu} \cdot P_{01}, \end{aligned} \quad (14)$$

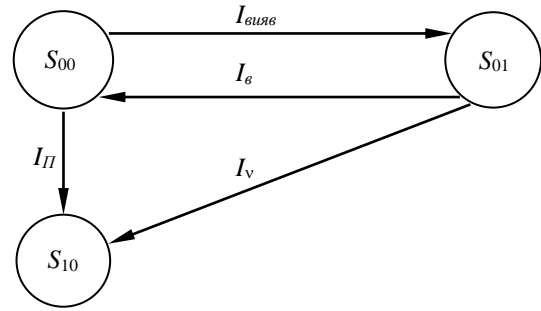


Рис. 2. Граф можливих станів і переходів ЗРК (Fig. 2. Graph of possible states and transitions of SAM)

звідки, після інтегрування за початкових умов (2) і з врахуванням (4), можна отримати

$$P_{00} = \left[(b_1 + a_1) \cdot e^{a_1 t} - (b_1 + a_2) \cdot e^{a_2 t} \right] / b_4;$$

$$P_{01} = \frac{I_{вияв}}{\chi_4} \left[e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t} \right];$$

$$P_{10} = 1 - \frac{1}{\chi_4} \left[(\chi_1 + I_{вияв} + \gamma_1) \cdot e^{\gamma_1 t} - (\chi_1 + I_{об} + \gamma_2) \cdot e^{\gamma_2 t} \right]; \quad (15)$$

$$N(t) = \mu \cdot \frac{I_{вияв}}{\chi_4} \left[\frac{1}{\gamma_1} (e^{\gamma_1 t} - 1) - \frac{1}{\gamma_2} (e^{\gamma_2 t} - 1) \right],$$

$$\chi_1 = I_{\epsilon} + I_{\nu}; \quad \chi_2 = I_{вияв} + I_{\Pi}; \quad \chi_3 = \chi_1 + \chi_2;$$

$$\text{де } \chi_4 = \sqrt{\chi_3^2 - 4 \cdot (\chi_1 \cdot \chi_2 - I_{вияв} \cdot I_{\epsilon})}; \quad (16)$$

$$\gamma_1 = -\frac{1}{2} \cdot (\chi_3 - \chi_4); \quad \gamma_2 = -\frac{1}{2} \cdot (\chi_3 + \chi_4).$$

Для грубої оцінки сподіваних результатів протиповітряного бою угруповання ППО, включаючи n_0 одноканальних по цілі ЗРК (ЗАК), які відбивають удар противника інтенсивністю I зпн/хв., модель бою угруповання можна замінити сукупністю моделей боїв (15) поодиноких ЗРК (ЗАК), кожний з яких відбиває удари інтенсивності

$$I_1 = I/n_0, \quad (17)$$

а загальний результат знайти як суму результатів протиповітряних боїв поодиноких ЗРК (ЗАК).

Знаючи модель бою та порядок оцінки дій в цій моделі можна перейти до моделі, яка б оцінювала ефективність стрільби визначеного підрозділу та своїми результатами допомогла б військовому командирі підрозділу ППО оцінювати спроможність підрозділу ППО прикрити дії наземних сил з повітря і, як результат, прийняти правильне рішення.

Однією з умов успіху дій наземних сил стає їх надійна система ППО, завдання якої доводиться вирішувати в типових умовах інформаційного та вогневого протистояння з повітряним противником та в умовах жорсткого ліміту часу.

У складі завдань управління підрозділами ППО основними є: організація системи ППО до й у ході протиповітряного бою; своєчасне виявлення ЗПН противника та забезпечення засобів ППО бойовою інформацією [6]; управління вогнем різномірних засобів ППО – ЗРК (ЗАК).

Кожне з відмічених завдань є багатопараметричним, вирішується в реальному масштабі часу й в умовах неповної, неточної інформації та дезінформації з боку противника [7]. Якість рішення будь-якої з цих задач істотно впливає на результати ППО, тому для їх швидкого вирішення необхідно використовувати засоби автоматизації, які ще недосконалі на даний час в підрозділах ППО. В автоматизованих засобах необхідні алгоритмічні та апаратні засоби, які б могли вирішувати: синтез елементів раціональної структури інформаційних і вогневих засобів підрозділів ППО; рішення завдань цілерозподілу та цілевказівки за даними про цілі [7]; автоматичні передачі команд управління на вогневі засоби підрозділів ППО; отримання від вогневих засобів підрозділів ППО доповідей і даних про цілі; документування процесів бойової роботи та тренажу.

Для вирішення поставленого завдання перед підрозділами ППО потрібні моделі, які б дозволяли оцінювати ефективність бойового застосування ЗРК (ЗАК) з урахуванням варіанту їх організації та структури, а також модель прогнозу ефективності бойових дій системи ППО в динаміці умов сподіваних і поточних бойових дій, та з урахуванням параметрів структури інформаційних зв'язків підрозділів ППО. Такого комплексу моделей для системи ППО ще немає. Але є часткові аналітико-стохастичні моделі прогнозу ефективності бойових дій засобів ППО [2]. Тому, використовуючи їх, пропонується модель, яка все це враховує та допомагає командирів підрозділів ППО оцінювати варіанти своєї структури, вибирати раціональні, з кращою ефективністю прикриття та допомагає прийняти правильне рішення на відбиття ударів з повітря.

Модель оцінювання ефективності прикриття дії наземних сил підрозділами ППО бригади умовно зображена на рис. 3 у вигляді блок-схеми алгоритму оцінки ефективності ЗРК (ЗАК), вибору параметрів елементів і структури підрозділів ППО, пропозицій командирів про ефективність вибраної структури для прийняття рішення на ведення бойових дій.

Запропонована модель припускає вибір типового складу внутрішніх і зовнішніх джерел радіолокаційної інформації, напряму обміну даними, склад вирішуваних завдань обробки даних, формування рекомендацій по складу засобів ППО і по їх управлінню.

Після збору початкової інформації необхідної для розрахунків, визначаються параметри сподіваного удару ЗПН, дані для розрахунку параметрів структури і інформаційних зв'язків засобів ППО (блок 1).

Модель оцінки ефективності підрозділів ППО (блок 2) з урахуванням інформаційних зв'язків між ЗРК (ЗАК), які забезпечують прогноз ефективності стрільби вогневих засобів ППО в різних умовах сподіваних і поточних бойових дій з метою наступного вибору раціональних параметрів структури інформаційних зв'язків системи ППО. Таким чином, враховується кількість засобів радіолокаційної інформації та структура інформаційних зв'язків між ЗРК. Це впливає на середнє значення $P_{\text{вияв}}$ за час

протиповітряного бою з урахуванням знищення командного пункту [3-5].



Рис. 3. Алгоритм розрахунку ефективності прикриття дії наземних сил підрозділами ППО
(Fig. 3. Algorithm for calculating efficiency covering the action of ground forces by air defense units)

Час t_2 , який залишився, визначається можливою ймовірністю виявлення цілей ЗРК (ЗАК) та з урахуванням перешкодової обстановки (він знаходиться в границях 0,2...0,4 від частки загального часу). Тоді середнє за часом бою значення ймовірності виявлення $P_{\text{вияв}}$ цілей в угрупованні ППО може бути визначене

$$P_{\text{вияв}}^{\text{ср}} = P_{\text{вияв}}^{\text{АЗВ}} \cdot \frac{t_1}{t_{\text{бою}}} + P_{\text{вияв}}^{\text{ССЦ}} \cdot \frac{t_2}{t_{\text{бою}}}, \quad (18)$$

де t_1 – середній час існування командного пункту наземних сил і централізованого управління вогнем; $t_2 = t_{\text{бою}} - t_1$, як середнє значення часу децентралізованого виконання завдань ЗРК (ЗАК) в ході протиповітряного бою.

Оцінка ефективності автоматизованого управління (блок 2) здійснюється по забезпеченню бойовою інформацією (інформацією для вирішення завдань цілевказівки та цілерозподілу ЗРК (ЗАК) по ці-

лям, які налітають). При якісному рішенні завдань збору, обробки радіолокаційної інформації та рішенні завдань цілевказівки та цілерозподілу, можна чекати: зменшення часу циклу стрільби за рахунок скорочення часу пошуку цілі, ухвалення рішення на обстріл і організацію стрільби в глибині зони ураження; зниження ймовірності знищення ЗРК (ЗАК) вогнем у відповідь ЗПН противника за рахунок скорочення циклу стрільби, а також додаткових заходів захисту ЗРК (ЗАК) (стрільба з запізненням включення високої напруги на випромінювання та наведення зенітних ракет за координатами цілевказівки) [3-5].

За результатами операцій блоку 2 готуються початкові дані ($P_{\text{вияв}}$, а також m і P^*) для розрахунків за формульною схемою блоку 3.

Модель прогнозу ефективності бойових дій вогневих засобів ППО (блок 3) дозволяє прогнозувати значення математичного сподівання кількості обстріляних $N_{\text{обс}}$ і знищених $N_{\text{знд}}$ ЗПН противника, кількості знищених ЗРК (ЗАК) і в спрощеному вигляді описується послідовністю формул для розрахунків з урахуванням динаміки протиповітряного бою:

1) визначається інтенсивність (I) удару ЗПН

$$I = \frac{N_{\text{ЗПН}}}{t_{\text{бою}}}; \quad (19)$$

2) визначається математичне сподівання кількості ЗПН в групах, у складі удару ЗПН

$$G_{\text{ЗПН}} = \sum_{i=1}^l i \cdot a_i; \quad (20)$$

3) визначається інтенсивність частини вхідного потоку ЗПН (по висоті польоту) і інтенсивність I_1 , що приходить на ЗРК (ЗАК) (значення j береться для тих висот, на яких цілі можуть бути обстріляні відповідно до їх тактико-технічних характеристик)

$$I_{\text{вх}} = I \cdot \sum_j BH_j; \quad I_1 = \frac{I}{n_0}; \quad (21)$$

4) визначається радіус зони ураження ЗРК (ЗАК) кожного типу з урахуванням доступної по висоті польоту частини вхідного потоку ЗПН з урахуванням кутів закриття

$$R_k^2 = \sum_j BH(H_j) \cdot R_k^2(H_j), \quad k = 1, \dots, q \quad (22)$$

5) знаходиться допоміжна величина, необхідна для розрахунків зон ураження

$$L = \sum_{k=1}^q m_k \cdot R_k^2; \quad (23)$$

6) визначається ймовірність (P) знищення ЗРК (ЗАК) k -го типу в ході одного протиповітряного бою з повітряною ціллю. Цю ймовірність приблизно можна оцінити з урахуванням сумарної середньої кількості основних і запасних позицій для застосування ЗРК (ЗАК) ($N_{\text{сп}}$, K_1) і кількості їх цільових каналів ($N_{\text{цк}}$, K_1)

$$P_k^* \cong \frac{0,5}{N_{\text{сп,к}} \cdot N_{\text{цк,к}}}, \quad k = \overline{1, q}; \quad (24)$$

7) визначається середнє значення продуктивності та ймовірність знищення ЗРК (ЗАК) у бою та ймовірність знищення цілі $P_{\text{зн}}$ при її обстрілі [1, 2]

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=1}^q \mu_k \cdot m_k \cdot N_{\text{цк,к}} \cdot R_k^2; \\ P^* &= \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=1}^q P_k^* \cdot m_k \cdot N_{\text{цк,к}} \cdot R_k^2; \quad (25) \\ P_{\text{зн}} &= \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=1}^q P_y^k \cdot m_k \cdot N_{\text{цк,к}} \cdot R_k^2; \end{aligned}$$

8) знаходяться коефіцієнти визначення вкладів типів ЗРК (ЗАК) в загальний результат бойових дій підрозділів ППО

$$\alpha_k = \frac{\mu_k \cdot m_k \cdot N_{\text{цк,к}} \cdot R_k^2}{\sum_{k=1}^q \mu_k \cdot m_k \cdot N_{\text{цк,к}} \cdot R_k^2}, \quad k = 1, \dots, q; \quad (26)$$

9) визначається максимально можлива кількість ЗПН, які обстрілюються (N_{max}), в дуельних боях до моменту знищення усіх ЗРК (ЗАК) угруповання ППО, з умовою відсутності обмежень на кількість ЗПН в ударі, на час удару й на кількість ракет в ЗРК та боеприпасів в ЗАК

$$N_{\text{max}} = n_0 / P^*; \quad (27)$$

10) визначається середнє значення коефіцієнта перекриття зон ураження ЗРК (ЗАК) ППО

$$S_3^n = \frac{4}{L_{\text{ФР}} \cdot L_2} \cdot \sum_{k=1}^q m_k \cdot N_{\text{цк,к}} \cdot R_k^2; \quad (28)$$

11) знаходиться граничне значення коефіцієнта перекриття зон ураження ЗРК (ЗАК) ППО

$$S_3^c = \sum_{k=1}^q m_k \cdot N_{\text{цк,к}}; \quad (29)$$

12) визначається оціночне значення коефіцієнта перекриття зон ураження ЗРК (ЗАК) ППО

$$S_3 = \min(S_3^n; S_3^c); \quad (30)$$

13) знаходиться проміжне значення коефіцієнта завантаження ЗРК (ЗАК) угруповання ППО

$$\rho = I_1 / \mu; \quad (31)$$

14) визначається оціночне значення коефіцієнта участі ЗРК (ЗАК) у бою з урахуванням ефекту «неповнодоступності» угруповання ППО (розташування на місцевості, переміщення для зміни позиції)

$$\begin{aligned} a &= \begin{cases} 1,0 & \text{при } S_3 < 1; \\ 1,33 - 0,32 \cdot S_3 - 0,02 \cdot S_3^2, & \text{інакше;} \end{cases} \\ b &= \begin{cases} 0,84 - 0,47 \cdot S_3 - 0,4 \cdot S_3^2, & \text{при } S_3 < 1; \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases} \quad (32) \\ K_y &= \begin{cases} 1,0, & \text{при } S_3 > 10; \\ 1 - a \cdot (b + \rho) \cdot \exp(-\rho), & \text{інакше;} \end{cases} \end{aligned}$$

15) оцінка коефіцієнта, який враховує груповий склад ЗПН в ударі

$$\eta = \begin{cases} S_3 / G_{ЗПН}, & \text{при } S_3 < G_{ЗПН}; \\ 1, & \text{інакше}; \end{cases} \quad (33)$$

16) визначається коефіцієнт завантаженості ЗРК

$$\rho_1 = \rho \cdot K_y \cdot \eta; \quad (34)$$

17) знаходиться значення відносних втрат сторін в динаміці бою (з урахуванням мобільних ЗРК (ЗАК), розмірів їх зони ураження, стрільби під час руху та з короткої зупинки, долі (Q) ЗПН, які виділяються для знищення ЗРК і з урахуванням безкарних ударів по позиціях їх розташування) [1, 2, 11]:

$$\begin{aligned} I_{вияв} &= I_1 \cdot P_0 \cdot K_y; \\ I_{П} &= I_1 \cdot (1 - P_0); \\ I_v &= \mu \cdot P^* + I_1 \cdot Q \cdot P_{yz}; \\ I_e &= \mu \cdot (1 - P^*); \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \chi_1 &= I_e + I_v; \quad \chi_2 = I_{вияв} + I_{П}; \quad \chi_3 = \chi_1 + \chi_2; \\ \chi_4 &= \sqrt{\chi_3^2 - 4 \cdot (\chi_1 \cdot \chi_2 - I_{вияв} \cdot I_e)}; \end{aligned} \quad (36)$$

$$\gamma_1 = \frac{\chi_3 - \chi_4}{2}; \quad \gamma_2 = \frac{\chi_3 + \chi_4}{2}; \quad (37)$$

18) знаходиться значення математичного сподівання величини відносних втрат сторін $P_{10}(t)$, кількість обстріляних цілей [1]

$$P_{10}(t) = 1 - \frac{1}{\chi_4} \cdot \left[(\chi_1 + I_{вияв} - \gamma_1) \cdot e^{-\gamma_1 t} - (\chi_1 + I_{вияв} - \gamma_2) \cdot e^{-\gamma_2 t} \right]; \quad (38)$$

$$W_y = P_y \cdot N_{обс.1}; \quad (39)$$

$$N_{обс.1} = \eta \cdot \mu \cdot \frac{I_{вияв}}{\chi_4} \cdot \left[\frac{(1 - e^{-\gamma_1 t})}{\gamma_1} - \frac{(1 - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2} \right]; \quad (40)$$

20) знаходиться кількість обстріляних $N_{обс}$ і знищених $N_{зн}$ ЗПН, а також знищених ЗРК $n_{зн.зрк}$

$$\begin{aligned} N_{обс} &= N_{обс.1} \cdot n_0; \quad N_{зн} = W_y \cdot n_0; \\ n_{зн.зрк} &= P_{10}(t) \cdot n_0; \end{aligned} \quad (41)$$

21) знаходиться розподіл математичного сподівання кількості втрат сторін і обстрілу ЗПН противника по типах ЗРК

$$\begin{aligned} N_{обс_k} &= N_{обс} \cdot \alpha_k; \quad N_{зн.ч_k} = N_{зн.ч} \cdot \alpha_k; \\ n_{зн.зрк_k} &= n_{зн.зрк} \cdot \alpha_k; \quad k = \overline{1, q}; \end{aligned} \quad (42)$$

22) знаходиться оцінка математичного сподівання кількості ($N_{p-\delta}$) знищених об'єктів прикриття типу ЗРК (ЗАК) [1]

$$N_{p-\delta}^{3H} = \min \left(N_{p-\delta}^H; \left(N_{ЗПН} - N_{зн.ч} \right) / n_1 \right); \quad (43)$$

$$N_{p-\delta} = N_{p-\delta}^H - N_{p-\delta}^{3H}; \quad (44)$$

де $P_{вияв}$ – ймовірність своєчасного виявлення ЗПН противника; n_0 – початкова кількість ЗРК (ЗАК) в угрупованні ППО; n_1 – полігонний наряд ЗПН для знищення наземного об'єкту; $N_{p-\delta}^H$ – початкова кількість не знищених наземних об'єктів; $N_{p-\delta}^{3H}$ – знищені наземні об'єкти; $N_{ЗПН}$ – кількість ЗПН противника в ударі; P^* – ймовірність знищення ЗРК (ЗАК) повітряною ціллю за період одного циклу стрільби; μ – продуктивність ЗРК (ЗАК) по обстрілу цілей.

Після визначення сподіваних значень показників ефективності стрільби ЗРК (ЗАК) системи ППО, у разі їх незадовільного значення (блок 4) слідує перехід до блоку вибору раціональних параметрів структури інформаційних зв'язків системи ППО (блок 5) і далі – на повторення розрахунків.

Інакше рішення задачі оцінки ефективності та вибору раціональних параметрів структури інформаційних зв'язків ЗРК (ЗАК) системи ППО вважається закінченим (блок 6). За наявності підготовлених програм таке завдання може вирішуватися, як завчасно, так і в ході бою.

Висновки

У статті запропонована модель оцінювання ефективності прикриття дій наземних сил підрозділами ППО. Розроблена модель дає можливість оцінювати ефективність ведення бойових дій ЗРК (ЗАК) при відбитті нападу з повітря, вибрати параметри елементів і структуру підрозділів ППО. Вона допомагає командирі підрозділів ППО різного рівня ієрархії оцінювати варіанти своєї структури, вибрати раціональні інформаційні зв'язки з кращою ефективністю прикриття та допомагає прийняти правильне рішення на відбиття ударів з повітря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко В.І. Бойове застосування високоточних засобів поразення і особливості боротьби з ними / В.І. Ткаченко, Є.І. Ряполов, Є.Б. Смірнов та ін. – Х.: ХНУПС, 2016. – 272 с.
2. Городнов В.П. Моделювання й оцінка ефективності бойових дій військ (сил) протиповітряної оборони: теорія, практика, історія розвитку / В.П. Городнов, Г.А. Дробаха, М.О. Єрмошин. – Х.: ХВУ, 2004. – 410 с.
3. Метод автоматизованої обробки інформації на ПУ ППО механізованої (танкової) бригади при паралельних та послідовних потоках інформації / С.П. Коваленко, В.М. Цвігун, І.В. Конєва, С.Г. Леушин // Системи обробки інформації. – 2004. – №7(35). – С. 71-76.
4. Ярош С.П. Обґрунтування організації зенітного ракетно-артилерійського прикриття угруповань військ з застосуванням міжвидових мобільних вогневих підрозділів ППО / С.П. Ярош, Б.М. Рябуха, Р.А. Соломонович // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – № 2(39). – С. 77-82. – DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.39.09>.
5. Дробаха Г.А. Взаємодія тактико-вогневих підрозділів зенітних ракетних військ та протиповітряної оборони сухопутних військ при вирішенні завдань протиповітряної оборони / Г.А. Дробаха, Б.А. Генев, Г.М. Зубрицький // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 90-93.

6. Borisenko M.V. Development of optimum navigation information processing algorithm / M.V. Borisenko, S.V. Herasimov, O.I. Kostenko, D.V. Makarchuk // *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. – 2018. – 3(32). – Pp. 38-44. – DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.32.06>.
7. Ефективний розподіл цілей між підрозділами ППО СВ – показник відверненого збитку військам / С.П. Коваленко, О.В. Коломійцев, Г.А. Левагін // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2010. – №2(22). – С. 211-215.
8. Kutsenko V.V. Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distance measuring passive location method / V.V. Kutsenko, S.P. Kovalenko, D.D. Dobrowolski // *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. – 2017. – №1 (26). – Pp. 82-84. – DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>.
9. Метод виключення зайвої та хибної інформації в алгоритмах управління на ПУ ППО СВ / С.П. Коваленко, В.В. Куценко, С.О. Кравченко // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2019. – №1(57). – С. 20-26.
10. Аналіз застосування угруповання повітряно-космічних сил Російської Федерації у Сирійській Арабській Республіці / Корсунов С.І., Коваленко С.П., Лезік О.В., Галкін Ю.О., Оборонов М.І., Оборонов Ю.М. // *36. наук. пр. Харківського національного університету Повітряних Сил*. – Вип. № 4(66). – 2020. – С. 7-18.
11. Kriukov O. Modeling of the process of the shot based on the numerical solution of the equations of internal ballistics / O. Kriukov, R. Melnikov, O. Bilenko at el. // *Applied physics. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 1/5 (97). – 2019. – Pp. 40-46. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155357>.
12. Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітніми цілями (оцінка можливостей, тенденції розвитку засобів протиповітряної оборони) / І.С. Романченко, О.М. Загорка, С.Г. Бутенко, О.В. Дейнега. – Житомир: “Полісся”, 2011. – 344 с.
13. Ярош С.П. Аналіз тактики бойового застосування крилатих ракет при нанесенні ударів по важливим державним об'єктам та угрупованням військ / С.П. Ярош, О.В. Рогуля // *36. наук. пр. Харківського національного університету Повітряних Сил*. – 2019. – № 3(61). – С. 35-44. – DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.61.06>.
14. Zhuravlev O. Method for determining coefficient power error of front resistance missile by means station outwardly trajectory measurements / O. Zhuravlev, O. Kolomyitsev, S. Herasimov // *Scientific Works of Kharkiv National University of the Air Force*. – 2017. – Вип. 3 (52). – С. 72-76.

REFERENCES

1. Tkachenko, V.I., Ryapolov, Ye.I., Smirnov, E.B. at el. (2016), *Boiove zastovsuvannia vysokotochnykh zasobiv porazhennia i osoblyvosti borotby z nymy*, [Fighting the use of high-precision means of damage and the peculiarities of combating them], Kharkiv, 272 p.
2. Horodnov, V.P., Drobakha, H.A., Yermoshyn, M.O. (2004), *Modeliuvannia y otsinka efektyvnosti boiovykh dii viisk (syl) protypovitrianoi oborony: teoriia, praktyka, istoriia rozvytku: monohrafiia* [Modeling and evaluation of the effectiveness of combat operations of forces (forces) of air defense: theory, practice, history of ro-flight], KhMU, Kharkov, 410 p.
3. Kovalenko, S.P., Tsvihun, V.M., Konyeva, I.V., Leushyn, S.H. (2004), “Metod avtomatyzovanoi obrobky informatsii na PU PPO mekhanizovanoi (tankovoi) bryhady pry paralelnykh ta poslidovnykh potokakh informatsii” [The method of automated information processing on the PU of an air defense mechanized (tank) brigade with parallel and successive streams of information], *Information Processing Systems*, №7 (35), pp. 71-76.
4. Yarosh, S.P., Ryabukha, B.M., Solomonovych, P.A. (2020), “Substantiation of the organization of anti-aircraft missile and artillery cover of groups of troops with the use of interspecific mobile fire units of air defense”, *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, № 2 (39), pp. 77-82, DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.39.09>.
5. Drobakha, H.A., Henov, B.A. and Zubrytskyi, H.M. (2014), “Vzaiemodiia taktyko-vohnevykh pidrozdiliv zenitnykh raketnykh viisk ta protypovitrianoi oborony sukhoputnykh viisk pry vyryshenni zavdan protypovitrianoi oborony” [Interaction of tactical-firing units of anti-aircraft missile troops and air defense of ground forces in solving the tasks of air defense], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(14), pp. 90-93.
6. Borisenko, M.V., Herasimov, S.V., Kostenko, O.I., Makarchuk, D.V. (2018), “Development of optimum navigation information processing algorithm”, *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 3(32), pp. 38-44, DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.32.06>.
7. Kovalenko, S.P., Kolomyitsev, O.V., Levahin, H.A (2010), “Efektyvnyi rozpodil tsilei mizh pidrozdilamy PPO SV – pokaznyk vidverneno zbitku viiskam” [Effective distribution of goals between the units of Air Defense Ground Forces – an indicator of the deflected damage to troops], *Systems of Arms and Military Equipment*, №2 (22), pp. 211-215.
8. Kutsenko, V.V., Kovalenko, S.P., Dobrowolski, D.D. (2017), “Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distance measuring passive location method”, *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, №1 (26), pp. 82-84, DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>.
9. Kovalenko, S.P., Куценко, V.V., Kravchenko, C.O. (2019), “The method of excluding redundant and erroneous information in the control algorithms on the PU PPO”, *Weapons systems and military equipment*, №1 (57), pp. 20-26.
10. Korsunov, S.I., Kovalenko, S.P., Lezik, O.V. at el. (2020), “Analysis of the application of the grouping of air and space forces of the Russian Federation in the Syrian Arab Republic”, *Scientific Works of Kharkiv National University of the Air Force*, № 4 (66), pp. 7-18.
11. Kriukov, O., Melnikov, R., Bilenko, O. at el. (2019), “Modeling of the process of the shot based on the numerical solution of the equations of internal ballistics”, *Applied physics. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/5 (97), pp. 40-46, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155357>.
12. Romanchenko, I.S., Zagorka, O.M., Butenko, S.G. and Deignega, O.V. (2011), *Teoriya i praktyka borotby z malorozmirnyimi nyzkolitnymi ciljamy (ocinka mozhlyvostej, tendenciji rozvytku zasobiv protypovitrianoi oborony): monograph* [Theory and practice of combating small-scale targets (assessment of capabilities, trends in the development of air defense)], Polissya, Zhytomyr, 344 p.
13. Yarosh, S.P., Rogulya, O.V. (2019), “Analyz taktyky boyovogo zastovsuvnnya krylatykh raket pri nanesenni udariv po vazhlyvym derzhavnym ob'ektam” [Analysis of the tactics of military use of cruise missiles in striking important state targets and groups of troops], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 3(61), pp. 35-44. DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.61.06>.

14. Zhuravlev, O., Kolomytsev, O., Herasimov, S. (2017), "Method for determining coefficient power error of front resistance missile by means station outwardly trajectory measurements", *Scientific Works of Kharkiv National University of the Air Force*, 3 (52), pp. 72-76.

Received (Надійшла) 26.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

- Коваленко Сергій Петрович** – кандидат військових наук, доцент, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Serhii Kovalenko – Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Serhii_Kovalenko@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5461-0125>.
- Герасимов Сергій Вікторович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Sergey Herasimov – Doctor of Technical Science, Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: sergeyg@i.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1810-0387>.
- Волков Андрій Федорович** – начальник кафедри, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Andriy Volkov – Chief of the Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Andriy_Volkov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4529-261X>.
- Корсунов Сергій Іванович** – старший викладач, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Serhii Korsunov – Senior Instructor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Serhii_Korsunov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5370-1375>.
- Оборонов Микола Іванович** – старший викладач, Національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Mykola Oboronov – Senior Instructor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Mykola_Oboronov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9769-4568>.

Модель оценки эффективности подразделений противовоздушной обороны

С. П. Коваленко, С. В. Герасимов, А. Ф. Волков, С. И. Корсунов, М. И. Оборонов

Аннотация. Актуальным вопросом современных локальных конфликтов является обоснование возможности подразделений противовоздушной обороны выполнять свои непосредственные задачи по прикрытию с воздуха действий наземных сил. Особенно актуально решение этого вопроса в локальных конфликтах, когда пространство, на котором необходимо выполнять поставленную задачу, растянуто по ширине и глубине. **Цель статьи** - разработка модели оценки эффективности прикрытия действия наземных сил подразделениями ПВО в новых позиционных районах, изменились в размерах по ширине и в глубину. **Результат.** В статье предлагается модель, которая позволяет оценивать эффективность прикрытия вооружения и военной техники и инфраструктуры наземных сил подразделениями противовоздушной обороны. **Выводы.** Разработанная модель поможет командиру подразделения противовоздушной обороны оценивать варианты своей структуры, выбирать из них рациональные, с лучшей эффективностью прикрытия и помогает ему принять правильное решение на отражение ударов с воздуха. Предложенная модель позволяет оценивать эффективность прикрытия наземных сил при различных входных данных и способность подразделений противовоздушной обороны прикрыть наземные силы в зависимости от местности и действий противника.

Ключевые слова: модель; расчет эффективности; локальные конфликты; противовоздушная оборона; граф возможных состояний; воздушное пространство.

Model for assessing the efficiency of departments anti-air defense

Serhii Kovalenko, Sergey Herasimov, Andriy Volkov, Serhii Korsunov, Mykola Oboronov

Abstract. An urgent issue of modern local conflicts is the substantiation of the ability of air defense units to carry out their immediate tasks of providing air cover for ground forces. The solution to this issue is especially relevant in local conflicts, when the space in which it is necessary to perform the assigned task is stretched in width and depth. **The purpose of the article** is to develop a model for evaluating the effectiveness of ground forces cover by air defense units in new positional areas, which have changed in size in width and depth. The article proposes a model that makes it possible to assess the effectiveness of covering weapons and military equipment and infrastructure of ground forces by air defense units. The model was developed using the theory of probability. **Conclusions.** The proposed model involves the choice of a typical composition of internal and external sources of radar information, the direction of data exchange, the composition of the tasks of data processing, the formation of recommendations on the composition of the air defense team and their management. The developed model helps the commander of the air defense unit to evaluate the options for his structure, choose rational ones, with the best cover efficiency, and helps him make the right decision to repel air strikes. The model is proposed to be used in decision-making systems to help the commander make the right decision to cover ground units from the air. The proposed model will also be effective in automated decision-making systems.

Keywords: model; calculation of efficiency; local conflicts; air defense; graph of possible states; airspace.