

Формування моделей оцінки ефективності стрільби зенітними керованими ракетами з урахуванням ймовірностей ураження повітряних цілей

Development of Evaluation Models for Surface-to-Air Missile Firing Effectiveness with Consideration of Air Target Kill Probabilities

Павло Опенько ^A

Corresponding author: к.т.н. старший дослідник, Заслужений винахідник України, начальник кафедри, e-mail: pavel.openko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7777-5101

Олександр П'явчук ^A

доктор філософії, старший викладач кафедри, e-mail: pjawa0905@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5623-1866

Юрій Целіщев ^A

к.т.н., доцент, доцент кафедри, e-mail: pjawa0905@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3739-9567

Віктор Кудряшов ^B

к.т.н., старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу нелінійної динаміки електронних систем інституту, e-mail: victor.e.kudryashov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7055-5357

Олексій Коломійцев ^C

д.т.н., професор, Заслужений винахідник України, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, e-mail: alexus_k@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8228-8404

Валерій Воїнов ^D

к.т.н., доцент, заступник начальника факультету з навчальної та наукової роботи, e-mail: Vvoinov80@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5732-5960

Pavlo Openko ^A

Corresponding author: Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Honored Inventor of Ukraine, Head of the Department, e-mail: pavel.openko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7777-5101

Oleksandr Piavchuk ^A

PhD, Senior Lecturer of the Department, e-mail: pjawa0905@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5623-1866

Yurii Tselishev ^A

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, e-mail: pjawa0905@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3739-9567

Viktor Kudriashov ^B

Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Senior Research Fellow Department, e-mail: victor.e.kudryashov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7055-5357

Oleksii Kolomiitsev ^C

Dr of Engineering Science, Professor, Professor of the Department, e-mail: alexus_k@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8228-8404

Voinov Valerii ^D

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Dean of Army Air Defence Faculty, e-mail: Vvoinov80@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5732-5960

^A Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

^B Інститут радіофізики та електроніки НАН України ім. О. Я. Усікова, м. Харків, Україна

^C Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна

^D Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, м. Харків, Україна

^A National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

^B O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

^C National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

^D Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

Received: August 7, 2025 | Revised: August 19, 2025 | Accepted: August 31, 2025

УДК: 519.2-623.1/.7

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.4.8>

Мета роботи. Розробити часткову модель для розрахунку значень умовних ймовірностей ураження цілі, для формування найкращих варіантів відбиття удару повітряного противника, а також обґрунтування загальних напрямків удосконалення елементів системи управління вогнем.

Метод. основними методами дослідження є: статистичного аналізу, чисельний метод, порівняльного аналізу.

Результати дослідження. В цілому приведена залежність величин умовних ймовірностей ураження цілей від дев'яти основних параметрів, які описують стрільбу зенітними керованими ракетами та управління вогнем. Отримані практичні результати часткової моделі необхідні для ефективного застосування озброєння за призначенням.

Теоретична цінність дослідження. В статті приведено розрахунки, які дозволяють завчасно розробити декілька варіантів дій самохідних вогневих одиниць (бойових машин), підрозділів при відбитті повітряного удару противника.

Purpose. To develop a partial model for calculating the values of conditional probabilities of target engagement, to generate optimal options for countering enemy air strikes, and to justify the general directions for improving elements of the fire control system.

Method. The main research methods are: statistical analysis, numerical methods, and comparative analysis.

Findings. A relationship is presented between the values of conditional probabilities of target engagement and nine key parameters that characterize surface-to-air missile firing and fire control. The practical results obtained from the partial model are essential for the effective employment of weapon systems as intended.

Theoretical implications. The article provides calculations that make it possible to pre-plan several courses of action for self-propelled fire units (combat vehicles) and subunits in repelling enemy air strikes. The model takes into account the

При цьому враховано параметри удару повітряного противника по бойових порядках військ (сил). У теперішній час відсутня часткова модель, яка визначить значення ефективності стрільби з врахуванням ймовірностей входу повітряних цілей в зону цілерозподілу. Також проведена оцінка ймовірності не виходу повітряних цілей з зони пуску та зони ураження зенітного ракетного комплексу, після пуску зенітних керованих ракет, при цьому враховано вплив ефективної поверхні розсіювання цілей, рівень перешкод і перевантажень цілі, при її маневруванні. Тому задача розробки варіантів дій самохідних вогневих одиниць (бойових машин), підрозділів при відбитті удару противника є важливою та актуальною.

Тип статті. Науково-практична.

parameters of the enemy air strike against the combat formations of friendly forces. Currently, there is no existing partial model that determines the effectiveness of missile firing while considering the probabilities of air targets entering the target allocation zone. The study also includes an assessment of the probability that air targets will not exit the missile launch and engagement zones of the surface-to-air missile system after launch. This assessment considers factors such as the effective radar cross-section (RCS) of targets, the level of jamming, and target overload during maneuvering. Therefore, the task of developing response options for self-propelled fire units and subunits in countering enemy strikes is both important and timely.

Paper type. Scientific and practical.

Ключові слова: відношення сигнал-шум, ймовірності вірного виявлення, ймовірності входу цілей у зони цілерозподілу, ймовірності не виходу цілей з зон пуску (ураження) комплексу, параметри першого та другого родів стрільби ракетами, умовні ймовірності ураження цілей, цілерозподіл.

Key words: signal-to-noise ratio, probabilities of correct detection, probabilities of target entry into target allocation zones, probabilities of target retention within missile launch (engagement) zones, first- and second-type missile firing parameters, conditional probabilities of target engagement, target allocation.

Вступ

Управління вогнем (УВ) підрозділів протиповітряної оборони (ППО) передбачає завчасно розробку декількох варіантів дій самохідних вогневих одиниць (бойових машин), підрозділів (батареї) при відбитті удару повітряного противника. При цьому необхідно враховувати параметри удару повітряного противника по бойових порядках військ (сил) [1-5]. У теперішній час відсутня часткова модель, яка визначить значення ефективності стрільби з врахуванням ймовірностей входу цілей в зону цілерозподілу (ЦР). Також потрібно оцінювати ймовірності не виходу цілей з зони пуску (ЗПу) та зони ураження (ЗУ) зенітного ракетного комплексу, після пуску зенітних керованих ракет. Необхідно враховувати вплив ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) цілей, рівень перешкод і перевантажень цілі, при її маневруванні. Тому задача розробки варіантів дій самохідних вогневих одиниць (бойових машин), підрозділів (батареї) при відбитті удару противника є важливою та актуальною. В якості показника ефективності УВ застосовуємо значення умовних ймовірностей ураження цілей [1-3].

Теоретичні основи дослідження

Відомо, що УВ підрозділами військ ППО полягає у цілеспрямованій діяльності командирів (начальників), штабів, бойових розрахунків сумісних командних пунктів авіації і протиповітряної оборони (СКП А і ППО), командних пунктів (КП), пунктів управління (ПУ) по підтримці бойової готовності військових частин (підрозділів) ППО, підготовці бойових дій (операцій) і управління ними при відбитті ударів засобів повітряного нападу (ЗПН) противника. Метою УВ підрозділами військ ППО є повне використання вогневих можливостей підрозділів військ ППО для надійного прикриття та захисту підрозділів (угруповань) військ та інших об'єктів від ударів ЗПН противника, для знищення засобів повітряної розвідки, носіїв високоточної зброї, повітряних десантів та повітрянодесантних військ противника в повітрі.

На сьогодні основними видами цілерозподілу (ЦР) є: централізований, децентралізований, автономний та змішаний ЦР повітряних цілей (ПЦ). Взагалі, ЦР ПЦ між вогневими засобами підрозділів (угруповання) військ ППО, які прикривають підрозділи (угруповання) військ та інші об'єкти з повітря, вимагає витрати часу, пов'язаного з обробкою інформації про повітряну обстановку. Автоматизація даного процесу прямо пов'язана з необхідністю вдосконалення цього елемента контуру управління, завдяки впровадженню методу ефективного ЦР при УВ підрозділу. Вибір методу дає можливість прискорити прийняття рішення командиром будь-якої ланки по ефективному розподілу цілей при УВ підрозділу і уникнути збитки об'єктам, які прикриваються.

Проблема вдосконалювання УВ підрозділами військ ППО полягає у вирішенні протиріччя між вже досягнутими та всезростаючими можливостями вогневих засобів з одного боку, та, з іншого – з можливостями системи управління по використанню вогню зенітних засобів для надійного прикриття та захисту підрозділів (угруповань) та об'єктів. Проведений для цього аналіз публікацій, котрі представлені у літературі [1-6] не дають можливості визначати показники ефективності стрільби по різних цілях, в умовах протидії противника, та в відповідності до технічних характеристик елементів схеми УВ. В вказаній літературі приведені загальні підходи до рішення даної задачі.

Постановка проблеми

На підставі вищевикладеного, можливо стверджувати, що пошук рішення для отримання централізації та децентралізації функцій управління КП і ПУ різних рівнів для використання достоїнств кожного з видів ЦР, установлення залежності ефективності застосування самохідних вогневих одиниць (бойових машин), підрозділів (батареї) від цього співвідношення та на даній основі – розробка оптимальних управляючих алгоритмів та визначення напрямків удосконалювання технічних засобів і структури системи УВ – одне з найважливіших завдань теорії і практики УВ підрозділами (угрупованнями) військ ППО при веденні бойових дій (операцій). Удосконалення управління самохідними вогневими одиницями (бойовими машинами), підрозділами (угрупованнями) військ ППО та його найважливішої складової частини – УВ, поряд з якісним удосконалюванням зенітних ракетних комплексів, є основним напрямком підвищення бойових можливостей підрозділів (угруповань) військ ППО по відбиттю ударів ЗПН противника.

Метою статті є розробка часткової моделі для розрахунку значень умовних ймовірностей ураження цілі, для формування найкращих варіантів відбиття удару повітряного противника, а також обґрунтування загальних напрямків доробки елементів системи УВ.

Результати

Для досягнення мети статті розглянемо спрощену схему УВ, яка зазвичай реалізується. Спрощена схема УВ складається з послідовно з'єднаних радіолокаційних станцій (РЛС) старшого начальника, командного пункту полка (КПП), батареїного командного пункту (БКП) та самохідних вогневих одиниць (бойових машин), підрозділу (батареї) [1-6].

1. Визначення дальнього та ближнього рубежів постановки вогневих завдань, дальньої та ближньої межі зони повітряної обстановки [1, 2].

Для типової цілі (ТЦ) обрали осереднену швидкість підльоту V у 230 м/с та висоту польоту H в 10^3 м.

$$\begin{aligned} D_{\text{ДПЗ}} &= \left\{ \{d_d + V[\tau_{\text{КПП}} + \tau_{\text{БКП}} + \tau_{\text{ППС}} + \tau_{\text{БПС}} + \tau_{\text{СТ}} + \tau_{\text{РД}}]\}^2 + H^2 \right\}^{0,5}, \\ D_{\text{БПЗ}} &= \left\{ \{d_b + V[\tau_{\text{КПП}} + \tau_{\text{БКП}} + \tau_{\text{ППС}} + \tau_{\text{БПС}} + \tau_{\text{СТ}} + \tau_{\text{РБ}}]\}^2 + H^2 \right\}^{0,5}, \quad h_{\text{ЦР}} = VT_{\text{Ц.стр.}}, \\ D_{\text{ДПО}} &= D_{\text{ДПЗ}} + 2h_{\text{ЦР}}, \quad D_{\text{БПО}} = D_{\text{ДПЗ}} + h_{\text{ЦР}}, \end{aligned} \quad (1)$$

- де $D_{\text{ДПЗ}}, D_{\text{БПЗ}}$ – відповідно дальній та ближній рубежі постановки вогневих завдань самохідними вогневими одиницями (бойовими машинами);
- d_d, d_b – горизонтальні дальності до дальньої та ближньої границі зони ураження (ЗУ);
- $\tau_{\text{КПП}}, \tau_{\text{БКП}}$ – робітні часи КПП та БКП відповідно;
- $\tau_{\text{ППС}}, \tau_{\text{БПС}}$ – відповідно часи попередньої та безпосередньої підготовки стрільби самохідними вогневими одиницями (бойовими машинами);
- $\tau_{\text{СТ}}$ – час затримки старту зенітної керованої ракети;

- $\tau_{рд}, \tau_{рб}$ – часи польоту ракети до дальньої межі зони ураження (ДМЗУ) та ближньої межі зони ураження (БМЗУ) відповідно;
- $D_{дпо}, D_{бпо}$ – дальня та ближня межі повітряної обстановки відповідно;
- $h_{цр}, T_{ц.стр.}$ – відповідно глибина ЦР та час циклу стрільби самохідної вогневої одиниці (бойової машини); причому час польоту ракети до i точки ЗУ дорівнює: $\tau_{pi} = 2,5 + 1,75 \cdot 10^3 D$.

Якщо $d_d = 10^4$ м, $\tau_{кпп} \approx \tau_{бкп} \approx 31$ с в умовах перешкод середньої щільності, $\tau_{ппс} = 218$ с, $\tau_{бпс} = 55$ с, $\tau_{ст} \approx 1,5$ с, $\tau_{рд} \approx 20$ с, $d_b = 1,5 \cdot 10^3$ м, $\tau_{рб} \approx 5,1$ с, $T_{ц.стр.} \approx 90$ с в умовах перешкод середньої щільності. Отримали при готовності самохідної вогневої одиниці (бойової машини) № 2 $D_{дпз} \approx 92 \cdot 10^3$ м, $D_{бпз} \approx 80 \cdot 10^3$ м, а з готовності № 1 – $D_{дпз} \approx 41,9 \cdot 10^3$ м, $D_{бпз} \approx 30 \cdot 10^3$ м та $h_{цр} \approx 20,7 \cdot 10^3$ м. Причому при готовності самохідної вогневої одиниці (бойової машини) № 1 маємо: $D_{дпо} \approx 83,3 \cdot 10^3$ м та $D_{бпо} \approx 62,6 \cdot 10^3$ м.

Відмічаємо достатньо значні дальності рубежів постановки вогневих завдань та меж повітряної обстановки при лише завадах середньої щільності та роботі по ТЦ.

2. Відношення сигнал/шум (с/ш) у радіолокаційному каналі РЛС старшого начальника та імовірності вірного виявлення цілей у різноманітних умовах застосування [4, 6-8].

В якості технічних характеристик РЛС старшого начальника обрали умовні характеристики евентуальної РЛС, наближені до характеристик РЛС П-18. Відношення с/ш $q_v(D, \sigma, \Delta)$ і імовірності вірного виявлення $P_v(D, \sigma, \Delta)$ при дії активних шумових перешкод (АШП) дорівнюють:

$$q_v(D, \sigma, \Delta) = \sqrt{(2,016 \cdot 10^{20} \sigma) / [D^4 (1 + \Delta)]},$$

$$P_v(D, \sigma, \Delta) = F\{1 / [1 + 0,5 q_v(D, \sigma, \Delta)^2]\}, \quad (2)$$

- де σ, D – відповідно ЕПР цілі (ЕПР ТЦ $\sigma_{ТЦ} = 1$ м²) та дальність до неї;
- Δ – відношення потужності АШП до потужності власних шумів радіолокаційного (РЛ) каналу РЛС, які залишилися після відповідної компенсації (для середньої щільності $\Delta = 7$ дБ (5 разів));
- F – фіксований рівень помилкової тривоги РЛ каналу (обрали $\sim 10^{-2}$).

Одержали $q_v(65 \cdot 10^3; 1; 0) \approx 3,36$ рази, $q_v(65 \cdot 10^3; 1; 5) \approx 1,37$ рази і відповідно $P_v(65 \cdot 10^3; 1; 0) = 0,5$ і $P_v(65 \cdot 10^3; 1; 5) \approx 0,1$. Результати розрахунків за виразами (1), (2) приведені на рис. 1.

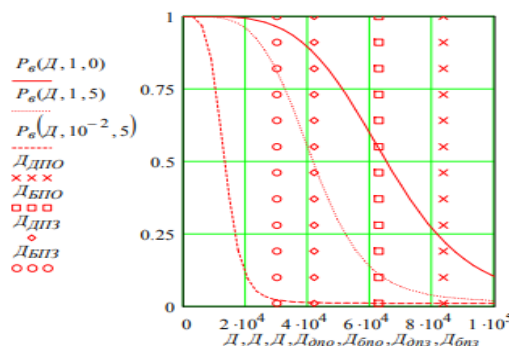


Рисунок 1 – Імовірності вірного виявлення $P_v(D, \sigma, \Delta)$ та меж зон повітряної обстановки $D_{дпо}$, $D_{бпо}$ і рубежі постановки вогневих завдань $D_{дпз}$ і $D_{бпз}$

Джерело: розроблено авторами

Перша крива $P_{в1}(D)$ позначена безперервною лінією, побудована при роботі по ТЦ і відсутності перешкод. Друга крива $P_{в2}(D)$ (точки) відображає значення імовірностей виявлення ТЦ при наявності АШП середньої щільності ($\Delta = 5$ разів). Третя крива $P_{в3}(D)$ (тире) отримана для випадку виявлення безпілотного літального апарату (БпЛА) на фоні перешкод $\Delta = 5$ разів. Четверта ($\times \times \times$) та п'ята ($\square \square \square$) прямі показують відповідно дальню $D_{дпо}$ і ближню $D_{бпо}$ межі зон повітряної обстановки. Шоста ($\diamond \diamond \diamond$) та сьома ($\circ \circ \circ$) прямі відображають дальній $D_{дпз}$ і ближній $D_{бпз}$ рубежі постановки вогневих завдань. При прийнятих технічних характеристиках РЛС старшого начальника на $D_{дпо}$ маємо $P_{в}(83,3 \cdot 10^3; 1; 5) \approx 0,03$, а на $D_{бпо}$ $P_{в}(62,6 \cdot 10^3; 1; 5) \approx 0,11$, що не уможливорює проведення централізованого ЦР (ЦЦР) у підрозділі. Внаслідок цього застосовується не ЦЦР, а децентралізований ЦР (ДЦР). Лише на $D_{дпз}$ отримали $P_{в}(41,9 \cdot 10^3; 1; 5) \approx 0,49$, що теж не задовольняє. При роботі по БпЛА (третя крива, рис. 1) самохідні вогневі одиниці (бойові машини) в змозі проводити стрільбу по цілях, які раптово з'являються. В цілому відмітимо не значний енергетичний потенціал РЛС старшого начальника та її перешкодостійкість.

3. Імовірності входу цілей в зони ЦР у різноманітних умовах [1, 2, 6, 7].

Визначення ймовірностей входу в зони ЦР передбачає розрахунок: а) середнє квадратичне відхилення (СКВ) помилки вимірювання азимуту цілі при відсутності викривлень пачки при флуктуації корисних сигналів $\sigma_{\beta}(D, \sigma, \Delta)$; б) часу $\tau_1(n)$ між n відмітками по цілі при огляду простору РЛС старшого начальника 6 об/хв.; в) СКВ помилки параметру цілі $\sigma_p(D, \sigma, \Delta, n, V)$. Так:

$$\begin{aligned}\sigma_{\beta}(D, \sigma, \Delta) &= \frac{\sqrt{\pi} \theta}{q_{\beta}(D, \sigma, \Delta) 180}, \\ \tau_1(n) &= n(60/6), \\ \sigma_p(D, \sigma, \Delta, n, V) &= \frac{\sqrt{2} \sigma_{\beta}(D, \sigma, \Delta)}{(n-1)V\tau_1(n)} \cdot \\ &\quad \left[D - \frac{(n-1)V\tau_1(n)}{2} \right]^2, \quad (3)\end{aligned}$$

де θ – напівширина діаграми спрямованості антени РЛС старшого начальника (прийняли 6°).

Також потрібно знайти граничний параметр цілі $P(V, H)$ для пари двох самохідних вогневих одиниць (бойових машинах) (наприклад відстань між ними ~ 3 км), СКВ помилки лінійного відхилення цілі $\sigma_{\eta}(V, H)$ і СКВ помилки щільності імовірності входу цілі у зону ЦР $\sigma_{вх}(D, \sigma, \Delta, n, V, H)$.

$$\begin{aligned}P(V, H) &= 2 \cdot 10^3 + \sqrt{(8,7 \cdot 10^3 - 8V)^2 - H^2}, \\ \sigma_{\eta}(V, H) &= \left[\frac{2P(V, H)}{6} \right], \\ \sigma_{вх}(D, \sigma, \Delta, n, V, H) &= [\sigma_p(D, \sigma, \Delta, n, V)^2 + \sigma_{\eta}(V, H)^2]^{0,5}.\end{aligned} \quad (4)$$

У підсумку значення ймовірностей входу цілей у зони ЦР знаходимо з виразу:

$$\Psi_{вх}(D, \sigma, \Delta, n, V, H, P) = \int_{-P(V, H)}^{P(V, H)} \left\{ \frac{\exp - \left[\frac{(Z-P)^2}{2\sigma_{вх}(D, \sigma, \Delta, n, V, H)^2} \right]}{\sqrt{2\pi} \sigma_{вх}(D, \sigma, \Delta, n, V, H)} \right\} dZ, \quad (5)$$

де P – параметр повітряної цілі.

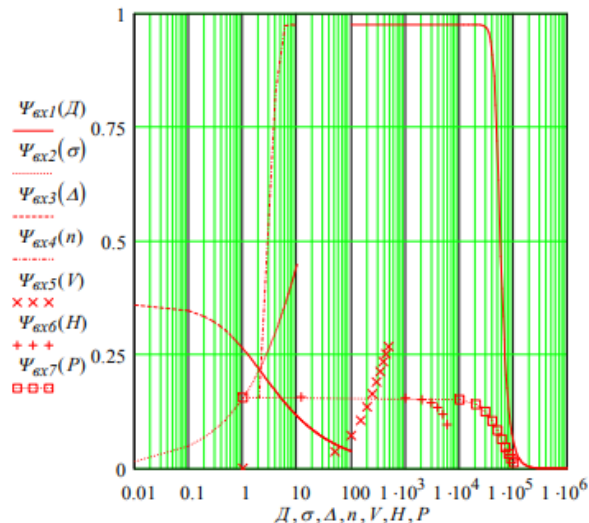


Рисунок 2 – Імовірності входу цілей в зони ЦР (ЗПу) $\Psi_{vx}(D, \sigma, \Delta, n, V, H, P)$

при зміні $D, \sigma, \Delta, n, V, H$ та P

Джерело: розроблено авторами

Результати розрахунку за виразами (3) – (5) приведені на рис. 2 для $D_{\text{БПО}}$ у 62,6 км. Перша крива $\Psi_{vx1}(D)$ (безперервна) побудована при $\sigma = 1 \text{ м}^2$, $\Delta = 0$, $n = 2$, $V = 230 \text{ м/с}$, $H = 10^3 \text{ м}$, $P = 3 \cdot 10^3 \text{ м}$. Друга крива $\Psi_{vx2}(\sigma)$ (точки, $D_{\text{БПО}} = 62,6 \cdot 10^3 \text{ м}$, $\Delta = 0$, $n = 2$, $V = 230 \text{ м/с}$, $H = 10^3 \text{ м}$, $P = 3 \cdot 10^3 \text{ м}$) відображає значення ймовірностей входу цілей у зону ЦР при зміні їх ЕПР σ . Низькі ймовірності входу, за другою кривою, пов'язані з не виявленням даних цілей РЛС старшого начальника. Вплив перешкод Δ і тривалість спостереження за ТЦ представлені відповідно третьою $\Psi_{vx3}(\Delta)$ (тире) та четвертою $\Psi_{vx4}(n)$ (точки і тире) кривими. Перешкоди Δ не дають можливостей своєчасно виявляти ТЦ, хоча при $n \geq 3$ якісно вимірюється РЛС параметр цілі. Третя крива здобута, якщо $D_{\text{БПО}} = 62,6 \cdot 10^3 \text{ м}$, $\sigma = 1 \text{ м}^2$, $n = 2$, $V = 230 \text{ м/с}$, $H = 10^3 \text{ м}$, $P = 3 \cdot 10^3 \text{ м}$, а четверта – $D_{\text{БПО}} = 62,6 \cdot 10^3 \text{ м}$, $\sigma = 1 \text{ м}^2$, $\Delta = 5$, $V = 230 \text{ м/с}$, $H = 10^3 \text{ м}$, $P = 3 \cdot 10^3 \text{ м}$. П'ята крива $\Psi_{vx5}(V)$ ($\times \times \times$), шоста $\Psi_{vx6}(H)$ ($+++$) та сьома $\Psi_{vx7}(P)$ ($\square \square \square$) криві показують зміну ймовірностей входу на $D_{\text{БПО}}$ залежно від V, H і P . Вхідні дані для $\Psi_{vx5}(V)$ ($\times \times \times$) $D_{\text{БПО}} = 62,6 \cdot 10^3 \text{ м}$, $\sigma = 1 \text{ м}^2$, $\Delta = 5$, $n = 2$, $H = 10^3 \text{ м}$, $P = 3 \cdot 10^3 \text{ м}$, а для кривої шостої $\Psi_{vx6}(H)$ ($+++$) – $D_{\text{БПО}} = 62,6 \cdot 10^3 \text{ м}$, $\sigma = 1 \text{ м}^2$, $\Delta = 5$, $n = 2$, $V = 230 \text{ м/с}$, $P = 3 \cdot 10^3 \text{ м}$ та для сьомої $\Psi_{vx7}(P)$ ($\square \square \square$) – $D_{\text{БПО}} = 62,6 \cdot 10^3 \text{ м}$, $\sigma = 1 \text{ м}^2$, $\Delta = 5$, $n = 2$, $V = 230 \text{ м/с}$, $H = 10^3 \text{ м}$. З останніх трьох кривих слідує недостатні ймовірності входу ТЦ, що ускладнює проведення ЦР у підрозділі. Треба відмітити покращення результатів чисельного моделювання значень ймовірностей коли $D_{\text{ДПЗ}}$ дорівнює 41,9 км. Тобто при відпрацюванні цілевказівки (ЦВ) особовим складам (о/с) самохідної вогневої одиниці (бойової машини) імовірніші стрільба буде проведена. Так $\Psi_{vx}(62,6 \cdot 10^3; 1; 5; 2; 230; 10^3; 3 \cdot 10^3) \approx 0,16$ і $\Psi_{vx}(41,9 \cdot 10^3; 1; 5; 2; 230; 10^3; 3 \cdot 10^3) \approx 0,64$.

4. Імовірності не виходу цілей в ЗПу та ЗУ комплексу, після пуску ракет, при стрільбі по цілі, яка маневрує [1-4, 6-9].

Відношення с/ш у РЛ каналі станції супроводження цілей (ССЦ) самохідної вогневої одиниці (бойової машини) на дальній межі ЗПу (ДМЗПу) $q_c(D, \sigma, \Delta)$, СКВ помилки вимірювання азимуту цілі $\sigma_{\text{Бс}}(D, \sigma, \Delta)$ ССЦ та кількість луно – сигналів k_i по даній цілі на ДМЗПу дорівнює:

$$q_c(D, \sigma, \Delta) = \sqrt{(1,434 \cdot 10^{20} \sigma) / [D^4 (1 + \Delta)]},$$

$$\sigma_{\beta c}(D, \sigma, \Delta) = \frac{\sqrt{\pi} \Theta_c}{q_c(D, \sigma, \Delta) 180}, \quad k_i = \tau_k T^{-1}, \quad (6)$$

де Θ_c, τ_k – відповідно напівширина діаграми спрямованості (ДС) антени станції супроводження цілі (ССЦ) самохідної вогневої одиниці (бойової машини) (обрали $1,23^\circ$) та const контуру управління (прийняли $\sim 0,8$ с);
 T – період слідування радіоімпульсів ССЦ (взяли 390 мкс).

СКВ помилки виміру азимуту цілі, яка проводить односторонній коловий віраж у горизонтальній площині польоту без зміни $V \sigma_m(n_{\text{ц}}, V)$, СКВ помилки параметру цілі $\sigma_{\text{рм}}(D, \sigma, \Delta, n_{\text{ц}}, V)$, СКВ помилки щільності імовірності не виходу цілі з ЗПу (ЗУ) комплексу, а $P(V, H)$ і $\sigma_{\eta}(V, H)$ находимо з виразів (4), так:

$$\sigma_m(n_{\text{ц}}, V) = (\tau_k n_{\text{ц}} g) / (3V),$$

$$\sigma_{\text{рм}}(D, \sigma, \Delta, n_{\text{ц}}, V) = \frac{\sqrt{2} [\sigma_{\beta c}(D, \sigma, \Delta) + \sigma_m(n_{\text{ц}}, V)]}{(k_i - 1) V T} \cdot \left[D - \frac{(k_i - 1) V T}{2} \right]^2, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{вм}}(D, \sigma, \Delta, n_{\text{ц}}, V, H) = [\sigma_{\text{рм}}(D, \sigma, \Delta, n_{\text{ц}}, V)^2 + \sigma_{\eta}(V, H)^2]^{0,5},$$

де $n_{\text{ц}}$ – перевантаження ПЦ, з якими вона маневрує;
 g – прискорення вільного падіння ($\sim 9,81$ м/с²).

Для спрощення прийняли, що ДМЗПу комплексу $D \sim 15$ км. Безумовно бажано мати імовірності не виходу цілей з ЗПу (ЗУ), після пуску ракет, не менше 0,5, для отримання необхідної ефективності стрільби та УВ.

Значення ймовірностей не виходу цілей з ЗПу (ЗУ) комплексу після пуску ракети дорівнює:

$$\Psi_H(D, \sigma, \Delta, n_{\text{ц}}, V, H, P) =$$

$$= \int_{-P(V, H)}^{P(V, H)} \left\{ \frac{\exp \left[-\frac{(Z - P)^2}{2 \sigma_{\text{вм}}(D, \sigma, \Delta, n_{\text{ц}}, V, H)^2} \right]}{\sqrt{2} \pi \sigma_{\text{вм}}(D, \sigma, \Delta, n_{\text{ц}}, V, H)} \right\} dZ. \quad (8)$$

За аналогією з результати на рис. 2 отримали значення, які приведені на рис. 3. Перша $\Psi_{H1}(D)$ (безперервна), друга $\Psi_{H2}(\sigma)$ (точки), третя $\Psi_{H3}(\Delta)$ (тире) криві показують значення імовірності, яка досліджується при різних D, σ і Δ . В цілому хід вказаних кривих задовольняє якості стрільби ракетами. Вхідні данні для $\Psi_{H1}(D)$ наступні: $\sigma = 1$ м², $\Delta = 0$, $n_{\text{ц}} = 0$, $V = 230$ м/с, $H = 10^3$ м, $P = 3 \cdot 10^3$ м, а для кривої $\Psi_{H2}(\sigma)$ – $D = 15 \cdot 10^3$ м, $\Delta = 0$, $n_{\text{ц}} = 0$, $V = 230$ м/с, $H = 10^3$ м, $P = 3 \cdot 10^3$ м. Відповідно вхідні данні для $\Psi_{H3}(\Delta)$ і $\Psi_{H4}(n_{\text{ц}})$: $D = 15 \cdot 10^3$ м, $\sigma = 1$ м², $n_{\text{ц}} = 0$, $V = 230$ м/с, $H = 10^3$ м, $P = 3 \cdot 10^3$ м та $D = 15 \cdot 10^3$ м, $\sigma = 1$ м², $\Delta = 5$, $V = 230$ м/с, $H = 10^3$ м, $P = 3 \cdot 10^3$ м. Коли $n_{\text{ц}} \geq 1$ четверта крива $\Psi_{H4}(n_{\text{ц}})$ (точки і тире), п'ята $\Psi_{H5}(V)$ ($\times \cdot \times \cdot$), шоста $\Psi_{H6}(H)$ ($\square \cdot \square \cdot$) та сьома $\Psi_{H7}(P)$ ($\diamond \cdot \diamond \cdot$) криві надали малі значення не виходу цілі, при її маневруванні. Вхідні данні для $\Psi_{H5}(V)$: $D = 15 \cdot 10^3$ м, $\sigma = 1$ м², $\Delta = 5$, $n_{\text{ц}} = 3$, $H = 10^3$ м, $P = 3 \cdot 10^3$ м, та для $\Psi_{H6}(H)$ – $D = 15 \cdot 10^3$ м, $\sigma = 1$ м², $\Delta = 5$, $n_{\text{ц}} = 3$, $V = 230$ м/с, $P = 3 \cdot 10^3$ м і для $\Psi_{H7}(P)$ – $D = 15 \cdot 10^3$ м, $\sigma = 1$ м², $\Delta = 5$, $n_{\text{ц}} = 3$, V

$= 230$ м/с, $H = 10^3$ м. Останнє вкрай негативно буде проявлятися при застосуванні озброєння. Треба відмітити, що на ДМЗПу комплексу $\Psi_H(15 \cdot 10^3; 1; 5; 3; 400; 10^3; 3 \cdot 10^3) \approx 0,27$, хоча на ДМЗУ – $\Psi_H(10^4; 1; 5; 3; 400; 10^3; 3 \cdot 10^3) \approx 0,56$.

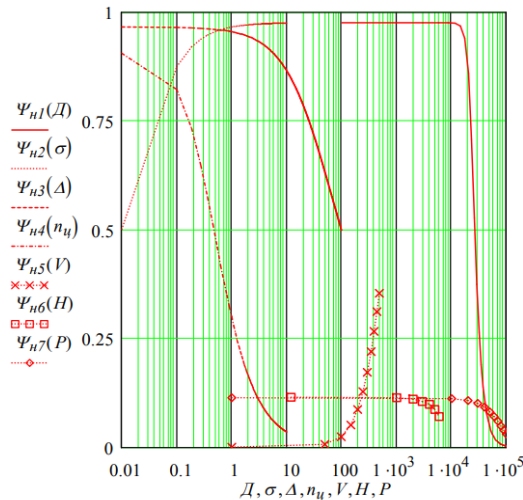


Рисунок 3 – Імовірності не виходу цілей з ЗПу (ЗУ) комплексу $\Psi_H(D, \sigma, \Delta, n_u, V, H, P)$ у різних умовах застосування

Джерело: розроблено авторами

5. Визначення першого роду помилок стрільби ракетами, а саме імовірності проходження ракети у “трубці” радіусу ρ [1 – 5, 10 – 13].

Розрахунок значень систематичної складової помилок наведення ракет (ПНР) $m_H(n_u)$ та СКВ ПНР $\sigma_H(\Delta)$ залежно від точки зустрічі ракети з ціллю (ТЗРЦ) у ЗУ комплексу.

Перший вираз в (9) показує зростання систематичної складової ПНР при маневруванні цілі, коли $v_H(n_u, t) \geq 0$. Другий вираз $t_1(n_u)$ вказує на час коли $v_H(n_u, t) = 0$, а третій вираз $m_c(n_u)$ – середнє значення систематичної складової ПНР.

$$v_H(n_u, t) \approx \begin{cases} 0,5n_u g \left\{ t^2 - \left[\frac{n_p}{n_u} (t - \tau_K)^2 \right] \right\}, & t \geq \tau_K, \\ 0,5n_u g t^2, & t < \tau_K, \end{cases}$$

$$t_1(n_u) = \tau_K \left(1 - \frac{n_p}{n_u} \right)^{-1},$$

$$m_c(n_u) = \frac{1}{t_1(n_u)} \int_0^{t_1(n_u)} v_H(n_u, t) dt,$$

$$m_H(n_u) = \{ (0,87r_\partial 10^{-4})^2 + [0,87r_\partial 10^{-4} + m_c(n_u)]^2 \}^{0,5}. \quad (9)$$

де n_p, t – відповідно перевантаження ракети у ТЗРЦ та час від початку маневру цілі до ТЗРЦ;
 $m_c(n_u)$ – усереднене значення систематичної складової ПНР при маневруванні цілі;
 r_∂ – похила дальність до ДМЗУ комплексу (прийняли 10^4 м).

За виразами (9) отримали: $m_c(3) \approx 5,7$ м, $m_c(5) \approx 12,4$ м та $m_H(3) \approx 6,6$ м, $m_H(5) \approx 13,3$ м, хоча без маневру – $m_H(0) \approx 1,2$ м. Значення $m_H(5)$ у ~ 13 м сумірні з відстанню де стійко спрацьовує радіопідричник (РП) ракети.

Вважають, що при дії АШП зростає лише флуктаційна складова ПНР $\sigma_{\Phi Z}(\Delta)$ [1, 3] та СКВ

ПНР находимо залежно від дальності до ТЗРЦ, так:

$$\begin{aligned}\sigma_{\phi z}(\Delta) &= \sigma_{\phi z} 10^{\Delta/20}, \\ \sigma_H(\Delta) &= \sqrt{\sigma_{dz}^2 + \sigma_{iz}^2 + \sigma_{\phi z}^2(\Delta)}, \\ \sigma_H(\Delta) &= r_d \operatorname{tg} \left\{ [\sigma_H(\Delta) \pi] / (180 \cdot 60) \right\},\end{aligned}\quad (10)$$

де $\sigma_{dz}, \sigma_{iz}, \sigma_{\phi z}$ – відповідно динамічна, інструментальна та флуктуаційна складові ПНР (прийняли усереднені значення $\sigma_{dz} \approx 1,9$ кутових хвилин (кут. хв.), $\sigma_{iz} \approx 0,4$ кут. хв., $\sigma_{\phi z} \approx 1,3$ кут. хв.), причому завжди $\sigma_H(\Delta) \geq 3$ м.

За виразами (10) маємо: $\sigma_H(0) \approx 6,8$ м і $\sigma_H(5) \approx 8,8$ м. Результати розрахунку систематичної складової ПНР $m_H(n_u)$ та СКВ ПНР $\sigma_H(\Delta)$ приведені на рис. 4. Перша крива залежно $m_H(n_u)$ (безперервна) побудована, якщо перевантаження цілі n_u змінюються до $10g$. Друга крива $\sigma_H(\Delta)$ (точки) отримана при практично відсутності АШП та її наявності до рівня щільності переважної перешкоди ($\Delta = 10^2$ разів).

Відмітимо суттєве зростання складових ПНР при протидії стрільбі у вигляді маневрування цілі та дії перешкод. Вказане приводить до зниження ефективності бойового застосування комплексу.

Імовірності проходження ракети у "трубці" радіусу ρ $P(\rho, \Delta, n_u)$ дорівнює:

$$\begin{aligned}P(\rho, \Delta, n_u) &= \\ &= \int_0^\rho \left\{ \frac{\rho \exp \left\{ -\frac{\rho^2 + m_H(n_u)^2}{2\sigma_H^2(\Delta)} \right\} I_0 \left[\frac{\rho^2 m_H(n_u)}{\sigma_H^2(\Delta)} \right]}{\sigma_H^2(\Delta)} \right\} d\rho.\end{aligned}\quad (11)$$

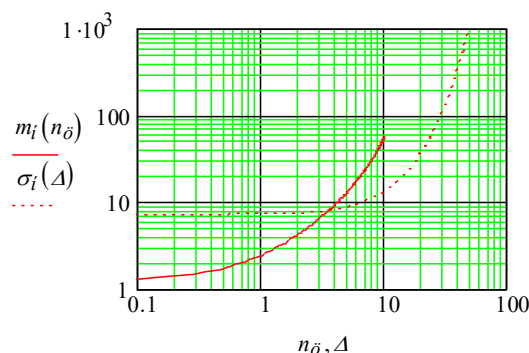


Рисунок 4 – Систематичної складової ПНР $m_H(n_u)$ та СКВ ПНР $\sigma_H(\Delta)$ залежно від перевантажень цілі n_u та рівня перешкод Δ

Джерело: розроблено авторами

Результати обчислень наведені на рис. 5. Перша крива $P(\rho, 0, 0)$ (безперервна) побудована при роботі по ТЦ і відсутності маневру цілі та перешкод.

Друга крива $P(14, \Delta, 0)$ (точки) та третя $P(14, 5, n_u)$ (тире) відповідно розраховані для випадків дії АШП та маневрування ТЦ на фоні перешкод середньої щільності ($\Delta = 5$ разів).

Вплив АШП та маневрування цілі знижує імовірності проходження ракет у "трубці" радіусу стійкого спрацювання РЗ ($\rho = 14$ м), отримали: $P(14; 0; 0) \approx 0,9$ та $P(14; 5; 0) \approx 0,7$ і $P(14; 5; 3) \approx 0,6$.

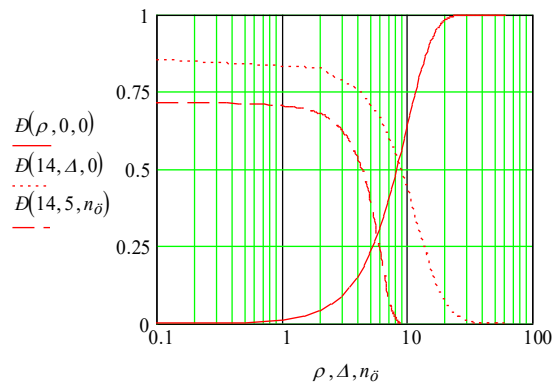


Рисунок 5 – Імовірності проходження ракети у “трубці” радіусу ρ $P(\rho, \Delta, n_\delta)$ залежно від промаху ракети ρ , рівня перешкод Δ та перевантажень цілі n_δ

Джерело: розроблено авторами

6. Визначення другого роду помилок стрільби ракетами, а саме імовірності спрацювання РП (системи підриву БЧ ракети) [1-3, 6-13].

Вводимо апроксимацію ширини ДС приймальної антени РП $\theta(\rho)$ [2, 9, 10] та знаходимо СКВ помилок РП ракети $\sigma_p(\rho)$ і математичне сподівання (МС) випадкової величини радіусу спрацювання РП ракети $m_p(\sigma)$.

На основі аналізу скалярного поля дифракції Френеля – Кірхгофа отримали наступне:

$$\begin{aligned} \theta(\rho) &= 0,5 \left\langle 0,0074 + 0,611 \left\{ 1 - e^{-[1,33 \sin(\varepsilon_a)/\rho]} \right\} \right\rangle, \\ \sigma_p(\rho) &= \frac{\rho \sin[\theta(\rho)]}{3 \sin(\varepsilon_a)} \left\{ \frac{1}{\sin[2,531 - \theta(\rho)]} + \frac{1}{\sin[0,611 - \theta(\rho)]} \right\}, \\ m_p(\sigma) &= \begin{cases} \rho_{\max} \sqrt[4]{\sigma/\sigma_{\text{ТЦ}}}, & \sigma \geq 0,1 \text{ м}^2, \\ \sqrt[3]{\frac{\rho_{\max}^4 \sigma \lambda}{\sigma_{\text{ТЦ}} L^2 \sin(\varepsilon_a + 3 \sigma_{\varepsilon a})}}, & \sigma < 0,1 \text{ м}^2, \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

- де ε_a – кут нахилу приймальної антени РП ракети (прийняли $\sim 1,05$ рад.);
 $\rho_{\max}$ – найбільший промах ракети коли РП спрацьовує з імовірністю 0,5 при роботі по ТЦ ($\rho \sim 15,5$ м);
 λ, L – довжина хвилі РП ракети ($\sim 0,03$ м) та довжина її приймальної антени ($\sim 0,6$ м) відповідно;
 $\sigma_{\varepsilon a}$ – СКВ помилки спрацювання РП ракети ($\sim 0,062$ рад.).

Результати числового моделювання наведені на рис. 6. Перша крива $\sigma_p(\rho)$ (безперервна) побудована при роботі по ТЦ. Друга крива $m_p(\sigma)$ (точки) вказує на лінійне зростання МС випадкової величини радіусу спрацювання РП, при збільшенні ЕПР цілі, по якій здійснюється обстріл.

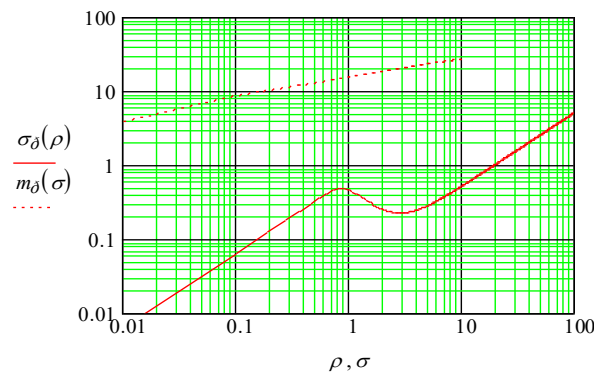


Рисунок 6 – Середнє квадратичне відхилення помилок радіопідrivника ракети $\sigma_p(\rho)$ та математичного сподівання випадкової величини радіусу спрацювання радіопідrivника ракети $m_p(\sigma)$ залежно від промаху ракети ρ та ефективної поверхні розсіювання цілі σ

Джерело: розроблено авторами

Одержали $m_p(1) = 15,5$ м та $m_p(10^{-2}) = 3,9$ м.

Імовірності спрацювання РП $P_{сп}(\rho, \sigma, k)$ – другий рід помилок стрільби ракетами.

$$P_{сп}(\rho, \sigma, k) = 1 - \text{snorm} \left[\frac{\rho - m_p(\sigma)}{k \sigma_p(\rho)} \right], \quad (13)$$

де $\text{snorm}[Z]$ – функція розподілу нормального та центрованого нормального розподілення у середовищі MathCAD;

k – рівень перешкод по РЛ каналу РП ракети (без перешкод $k = 1$, перешкоди слабкої щільності $k = 2$ рази, середньої – $k = 5$ разів, сильної – $k = 16$ разів та щільності перешкоди, що подавляє – $k = 10^2$ разів).

Підсумки розрахунків за виразами (12), (13) приведені на рис. 7. Перша крива $P_{сп}(\rho, 10^{-2}, 1)$ (безперервна) та друга крива $P_{сп}(\rho, 10^{-2}, 10^2)$ (точки) розраховані при обстрілі малорозмірної цілі ($\sigma = 10^{-2} \text{ м}^2$) при відсутності та наявності АШП щільності перешкоди, що подавляє по РЛ каналу РП ракети відповідно.

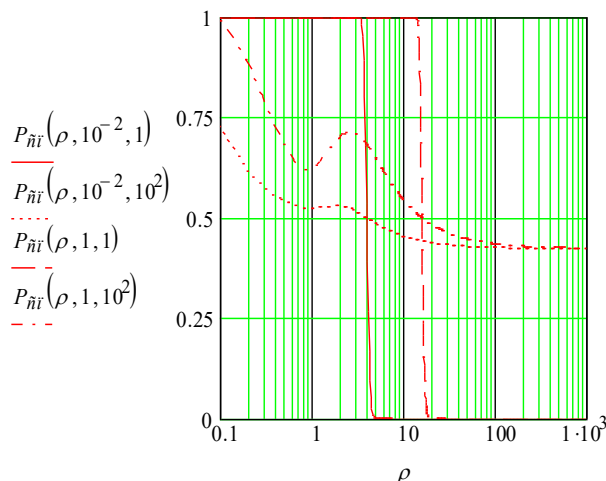


Рисунок 7 – Імовірності спрацювання радіопідrivника ракети $P_{сп}(\rho, \sigma, k)$ залежно від промаху ракети ρ

Джерело: розроблено авторами

Третя крива $P_{сп}(\rho, 1, 1)$ (тире) та четверта крива $P_{сп}(\rho, 1, 10^2)$ (точки і тире) отримані для тих же самих умов, що і попередні, але при роботі по ТЦ ($\sigma_{ТЦ} = 1 \text{ м}^2$). Одержали $P_{сп}(15,5; 1; 0) =$

0,5 та надвеликі відстані спрацювання РП, коли цілі не будуть уражені вузьким потоком осколків бойової частини ракети. Так при АШП сильної щільності $P_{сп}(40; 1; 16) \approx 0,23$ та $P_{сп}(10^2; 1; 10^2) \approx 0,44$. Дане підтверджує необхідність забезпечення необхідної завадостійкості РЛ каналу радіопідривника ракети.

7. Розрахунок колового закону ураження ТЦ та умовних ймовірностей ураження різних цілей при стрільбі двома ракетами [1-3, 9, 12, 13].

Значення колового закону ураження ТЦ $G(\rho)$ та умовні імовірності ураження різних цілей при стрільбі двома ракетами $R_2(\rho, D, \sigma, \Delta, n_{ц}, V, H, P, k)$ у різноманітних умовах бойового застосування визначаємо з наступних виразів:

$$\begin{aligned} G(\rho) &= \exp(-\rho^2 / \beta_0^2), \\ R_2(\rho, D, \sigma, \Delta, n_{ц}, V, H, P, k) &= \\ &= \Psi_H(D, \sigma, \Delta, n_{ц}, V, H, P) \cdot \\ &\cdot \left\{ 1 - [1 - P(\rho, \Delta, n_{ц}) P_{сп}(\rho, \sigma, k)]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (14)$$

де β_0 – параметр колового закону ураження ТЦ з врахуванням механічної, запалювальної та ініційованої дії осколків БЧ ракети (прийняли ~ 21 м).

За першим виразом (14) отримали при середньому промаху ракети $G(6) \approx 0,92$ та з СКВ промаху ракети $G(9) \approx 0,83$. При підриві БЧ ракети під впливом АШП ураження ТЦ не можливо – $G(50) \approx 3,4 \cdot 10^{-3}$. Зміна значень $G(\rho)$ показана першою, безперервною кривою на рис. 8.

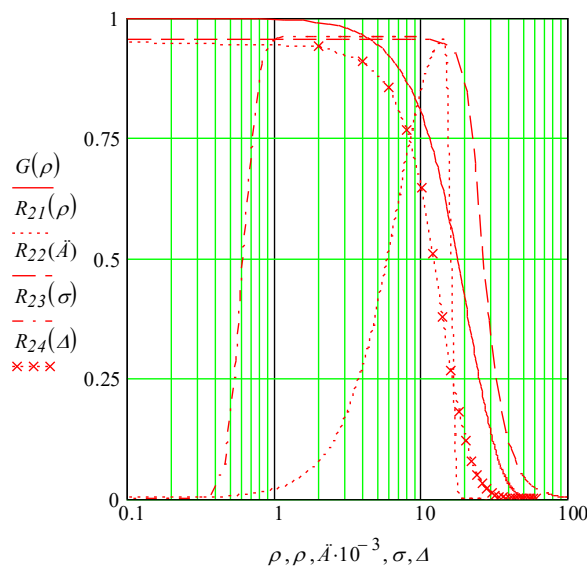


Рисунок 8 – Коловий закону ураження типової цілі $G(\rho)$ та умовні імовірності ураження цілей R_{2ij} при стрільбі двома ракетами
Джерело: розроблено авторами

Друга крива $R_{21}(\rho)$ (точки) та третя крива $R_{22}(\Delta)$ (тире) відображають значення умовних ймовірностей ураження цілей при зміні ρ та Δ відповідно. Причому $R_{21}(14)$ дорівнює на ДМЗУ комплексу $R_2(14; 10^4; 1; 0; 0; 230; 10^3; 3 \cdot 10^3; 1) \approx 0,96$, коли імовірність входу цілі на ДБПО (позначимо через $\Psi_{вх\ БПО}$) лише $\sim 0,36$ і імовірності вірного виявлення РЛС старшого начальника (позначимо через $P_{в\ БПО}$) $\sim 0,54$. На $\Delta_{ДПЗ}$ результати кращі – $\Psi_{вх\ ДПЗ} \sim 0,89$ і $P_{в\ ДПЗ} \sim 0,87$. Значення для третьої кривої $\Psi_{вх\ БПО}$, $P_{в\ БПО}$, $\Psi_{вх\ ДПЗ}$ та $P_{в\ ДПЗ}$ ті самі, що і для другої кривої. Для кращої візуалізації результатів моделювання величина Δ , за віссю абсцис, зменшена у 10^3 .

разів. Четверта крива $R_{24}(\sigma)$ (точки і тире) та п'ята $R_{25}(\Delta)$ ($\cdot \times \cdot$) показують значення умовних ймовірностей ураження цілей при зміні σ і Δ відповідно. Розрахунки надали на ДМЗУ $R_2(14;10^4;0,5;0;0;230;10^3;3 \cdot 10^3;1) \approx 0,15$, при $\Psi_{\text{вх БПО}} \sim 0,26$ і $P_{\text{в БПО}} \sim 0,34$, або малорозмірна ціль може і не вийти на $D_{\text{БПО}}$, не буде охоплена ЦР. На $D_{\text{ДПЗ}}$ маємо $\Psi_{\text{вх БПО}} \sim 0,82$ і $P_{\text{в БПО}} \sim 0,77$. При роботі по ТЦ на рівні АСП середньої щільності отримали $R_2(14;10^4;0,5;0;0;230;10^3;3 \cdot 10^3;1) \approx 0,89$, коли $\Psi_{\text{вх БПО}}$ лише $\sim 0,16$ і $P_{\text{в БПО}} \sim 0,11$. Тобто ЦЦР у підрозділі не реалізується, залишається ДЦР, так як недостатня $P_{\text{в БПО}}$ РЛС старшого начальника.

Вплив маневру ТЦ показано кривою $R_{25}(n_u)$ (тире) на рис. 9.

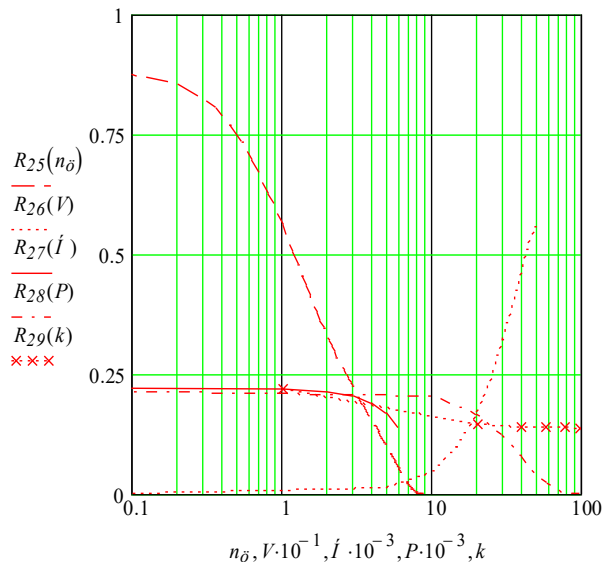


Рисунок 9 – Умовні ймовірності ураження цілей R_{2ij} при стрільбі ракетами у різних умовах застосування

Джерело: розроблено авторами

Перевантаження цілі у $n_u = 3$ надали $R_2(14;10^4;1;5;3;230;10^3;3 \cdot 10^3;1) \approx 0,22$, коли $\Psi_{\text{вх БПО}} \sim 0,16$ і $P_{\text{в БПО}} \sim 0,11$. При цьому знижується, від попереднього, ймовірність не виходу ТЦ з ЗУ комплексу (позначимо через $\Psi_{\text{нзу}}$) з $\sim 0,97$ до $\sim 0,26$. Тобто ТЦ в змозі покинути ЗУ комплексу. Друга крива $R_{26}(V)$ (точки) та третя $R_{27}(H)$ (безперервна) надають значення умовних ймовірностей ураження цілей при зміні V та H відповідно. Для кращої візуалізації розрахунків на рис. 9 значення V , за віссю абсцис, зменшена у 10 разів, а величини H і P зменшили у 10^3 разів. За другою кривою збільшення V до 400 м/с приводе до підвищення $\Psi_{\text{вх БПО}}$ з $\sim 0,16$ до $\sim 0,24$, а також поліпшується $\Psi_{\text{нзу}}$ з $\sim 0,26$ до $\sim 0,56$. При цьому покращуються умовні ймовірності ураження з $\sim 0,22$ до $\sim 0,48$, так $R_2(14;10^4;1;5;3;400;10^3;3 \cdot 10^3;1) = 0,476$. Останнє пояснюється зменшенням часу на входження цілі на $D_{\text{БПО}}$ і можливим не виходом з ЗУ комплексу. При підвищенні H до 5 км отримали зниження ефективності ЦР і стрільби двома ракетами – $R_2(14;10^4;1;5;3;230;5 \cdot 10^3;3 \cdot 10^3;1) \approx 0,17$, при $\Psi_{\text{вх БПО}} \sim 0,12$, $P_{\text{в БПО}} \sim 0,11$ та $\Psi_{\text{нзу}}$ лише $\sim 0,2$. Четверта крива $R_{28}(P)$ (точки і тире) та п'ята крива $R_{29}(k)$ ($\cdot \times \cdot$) приведені для різних P та k . Наприклад коли $P \sim 2 \cdot 10^4$ м то умовна ймовірність ураження дорівнює $R_2(14;10^4;1;5;3;230;10^3;2 \cdot 10^4;1) \approx 0,17$ і $\Psi_{\text{вх БПО}} \sim 0,14$ та $\Psi_{\text{нзу}} \sim 0,2$. Залишається можливість стрільби по цілям, які раптово з'являються і ДЦР у підрозділі. Перешкоди середньої щільності по РЛ каналу РП ракети знижують умовні ймовірності ураження (п'ята крива) до $R_2(14;10^4;1;5;3;230;10^3;3 \cdot 10^3;5) \approx 0,17$. При цьому $\Psi_{\text{вх БПО}}$, $P_{\text{в БПО}}$ та $\Psi_{\text{нзу}}$ такі самі, що і для випадку першої крива на рис. 9.

Отримані показники ефективності стрільби і УВ у різноманітних умовах з врахуванням

значень ймовірностей входу цілей у зону ЦР. Показані межі застосування ЦЦР у підрозділі, та обмеження, які зв'язані, з величинами ймовірностей вірного виявлення РЛС старшого начальника. Показано необхідність поліпшення енергетичного потенціалу РЛС та підвищення її перешкодостійкості [8, 12, 13]. Оптимізація системи УВ, впровадження мульті радарних систем виявлення та шумові радары [14-19] покращать показники ефективності стрільби ракетами.

Висновки

Таким чином, на основі існуючих технічних характеристик системи УВ знайдені рубежі постановки вогневих завдань і межі повітряної обстановки. Проведено порівняння рубежів та меж з відповідними ймовірностями вірного виявлення РЛС старшого начальника. Визначенні умови при яких вони відповідають вимогам до ЦР. Здобуті значення умовних ймовірностей ураження різних цілей з означеними величинами ймовірностей входу цілей в зони ЦР. Останнє не є достатнім, що може привести до хибного ЦР у підрозділі. Враховані ймовірності не виходу цілей з зон пуску та ураження комплексу при маневруванні цілей. Означені межі впровадження ЦЦР і ДЦР у підрозділі. В цілому приведена залежність величин умовних ймовірностей ураження цілей від дев'яти основних параметрів, які описують стрільбу ракетами та УВ. Отримані практичні результати часткової моделі необхідні для ефективного застосування озброєння за призначенням.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Основы стрельбы и управления огнем войсковых зенитных ракетных комплексов. Часть 1. Казачинский В.З., Каипецкий А.А., Нестеренко Л.Г., Семенов Г.В., Солодовников Н.Д. – К.: КВАИУ, 1971. – 468с.
2. Основы стрільби та керування вогнем: навч. посіб. /В.Є. Кудряшов, С.Г. Леушин, В.І. Самоквіт. – Х. : ХУПС, 2016. – 232 с.
3. Пушкорис В. П. Управление огнем войск ПВО Сухопутных войск: Учебник. – К.:ВА ПВО СВ, 1989. – 556 с.
4. A private model for determining the efficiency of target distribution / М.С. Пискунов., В.Є. Кудряшов, В.Є., Філіппенков О.В. // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХНУПС, 2021. – Вип. 1 (65) – С. 107 – 113.
5. Довідник з протиповітряної оборони. Торопчин А.Я., Романенко І.О., Даник Ю.Г., Пашенко Р.Е. та ін. – К.: МО України, Х.: 2003. – 368 с.
6. Модель протиповітряного бою як елемент системи управління вогнем підрозділами військ ППО Сухопутних військ/ О. В. Коломійцев, В. Є. Кудряшов, В.В. Машталір, П. В. Опенько, Р. М. Олійник // Збірник наукових праць ДНДІ ВС озброєння та військової техніки. – Чернівці: ДНДІ ВС ОБТ. – 2019. – Вип. № 1(1). – С. 94-101.
7. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Ширман Я.Д., Манжос В.Н. – М.; Радио и связь, 1981. – 416с.
8. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2 – е, перераб. и доп. / Под. ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. 512с.
9. Справочник по радиолокации/ под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. Под ред. Я.С. Ицхоки: – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.

10. Другий рід помилок стрільби ракетами по нетиповим цілям ЗРК малої дальності / О.В. Коломійцев, В.Є. Кудряшов, І.Я. Загоруйко, С.С. Ворошилов // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУ ПС. – 2011.- Вип. 1(27) – С. 86 – 90.
11. Умовна імовірність ураження нетипової цілі ЗРК малої дальності / О.В. Коломійцев, В.Є. Кудряшов, І.Я. Загоруйко, С.С. Ворошилов // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУ ПС. – 2012.- Вип. 2(30) – С. 170 – 174.
12. Кудряшов В.Є., Литовченко Д.М. Чисельне моделювання з основ стрільби ракетами та управління вогнем комплексів малої дальності: навч. посіб. Х. : ХНУПС, 2023. – 533 с.
13. Литовченко Д.М., Кудряшов В.Є. Чисельне моделювання з основ стрільби озброєння ближньої дії та інформаційного забезпечення військ: навч. посіб. Х. : ХНУПС, 2025. – 268 с.
14. Піскунов С.М. Перспективна структура системи управління силами і засобами протиповітряної оборони Сухопутних військ Збірник наукових праць ХУПС. – Х. : ХУПС, 2013. – Вип. 2(35) –С. 6-10.
15. Shevchenko, A.F., (2014) A comparative analysis of directional properties of phased ring arrays to be used in multi-static active/passive radars, Data processing systems, 9(125), pp.65-72, (in Ukrainian).
16. Kudriashov V.V., A Modified Maximum Likelihood Method for Estimation of Mutual Delay and Power of Noise Signals by Bistatic Radiometer, Comptes Rendus – L'Académie Bulgare des Sciences, 68(5), pp. 631-640.
17. Модель застосування мобільних комплексів/ О.С. Балабұха, К.Ю. Дергачов К.Ю., В.Ф. Слободенюк // Збірник наукових праць ЦНДІНУ. – К. ЦНДІНУ. – 2007. – Вип. 2. – С. 31 – 33.
18. Lukin, K. A. "Millimeter wave noise radar applications: theory and experiment", Fourth International Kharkov Symposium 'Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves'. Symposium Proceedings (Cat. No.01EX429), Kharkov, Ukraine, 2001, pp. 68-73, doi: 10.1109/MSMW.2001.946748.
19. Savci, K., Stove, A.G., De Palo, F., Erdogan, A.Y., Galati, G., Lukin, K.A., Lukin, S. Noise radar—overview and recent developments IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, Vol.35 (9), pp.8-20.

References

1. Osnovy strel'by i upravleniya ognem voyskovykh zenitnykh raketnykh kompleksov. Chast' 1. Kazachinskiy V. Z., Kaipetskiy A. A., Nesterenko L. G., Semenov G. V., Solodovnikov N. D. – Kyiv: KVAIU, 1971. – 468s.
2. Osnovy stril'by ta keruvannya vohnem: navch. posib. /V.YE. Kudryashov, S.H. Leushyn, V.I. Samokvit. – Kharkov : KHUPS, 2016. – 232 s.
3. Pushkoris V. P. Upravleniye ognem voysk PVO Sukhoputnykh voysk: Uchebnik. – Kyiv:VA PVO SV, 1989. – 556 s.
4. A private model for determining the efficiency of target distribution / M.S. Piskunov., V.YE. Kudryashov, V.YE., Filippenkov O.V. // Systemy ozbroynnya i viys'kova tekhnika. – Kharkov: KHNUPS, 2021. – Vyp. 1 (65) – S. 107 – 113.
5. Dovidnyk z protypovitryanoyi oborony. Toropchyn A.YA., Romanenko I.O., Danyk YU.H., Pashchenko R.E. ta in. – Kyiv: MO Ukrainy, KH.: 2003. – 368 s.
6. Model' protypovitryanoho boyu yak element systemy upravlinnya vohnem pidrozdilamy viys'k PPO Sukhoputnykh viys'k/ O. V. Kolomiytsev, V. YE. Kudryashov, V.V. Mashtalir, P. V. Open'ko, R. M. Oliynyk // Zbirnyk naukovykh prats' DNDI VS ozbroynnya ta viys'kovoyi tekhniky. – Chernihiv: DNDI VS OVT. – 2019. – Vyp. № 1(1). – S. 94-101.
7. Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh / Shirman YA.D., Manzhos V.N. – Moscow; Radio i svyaz', 1981. – 416 s.

8. Radioelektronnyye sistemy: Osnovy postroyeniya i teoriya. Spravochnik. Izd. 2 – ye, pererab. i dop. / Pod. red. YA. D. Shirmana. – Moscow: Radiotekhnika, 2007. 512s.
9. Spravochnik po radiolokatsii/ pod obshchey red. K.N. Trofimova. Tom 1. Osnovy radiolokatsii. Pod red. YA.S. Itskhoki: – Moscow: Sov. radio, 1976. – 456 s.
10. Druhyy rid pomyl'ok stril'by raketamy po netypovym tsilyam ZRK maloyi dal'nosti / O.V. Kolomiytsev, V.YE. Kudryashov, I.YA. Zahoruyko, S.S. Voroshylov // Zbirnyk naukovykh pratsi KHU PS. – Kharkov: KHU PS. – 2011.- Vyp. 1(27) – S. 86 – 90.
11. Umovna imovirnist' urazhennya netypovoyi tsili ZRK maloyi dal'nosti / O.V. Kolomiytsev, V YE. Kudryashov, I.YA. Zahoruyko, S.S. Voroshylov // Zbirnyk naukovykh pratsi KHU PS. – Kharkov: KHU PS. – 2012.- Vyp. 2(30) – S. 170 – 174.
12. Kudryashov V.YE., Lytovchenko D.M. Chysel'ne modelyuvannya z osnov stril'by raketamy ta upravlinnya vohnem kompleksiv maloyi dal'nosti: navch. posib. Kharkov : KHNUPS, 2023. – 533.
13. Lytovchenko D.M., Kudryashov V.YE. Chysel'ne modelyuvannya z osnov stril'by ozbroynennya blyzhn'oyi diyi ta informatsiynoho zabezpechennya viys'k: navch. posib. Kharkov : KHNUPS, 2025. – 268 s.
14. Piskunov S. M. Perspektyvna struktura systemy upravlinnya sylamy i zasobamy protypovitryanoyi oborony Sukhoputnykh viys'k Zbirnyk naukovykh prats' KHUPS. – Kharkov : KHUPS, 2013. – Vyp. 2(35) –S. 6-10.
15. Shevchenko, A.F., (2014). A comparative analysis of directional properties of phased ring arrays to be used in multi-static active/passive radars, Data processing systems, 9(125), pp.65-72, (in Ukrainian).
16. Kudriashov V.V., A Modified Maximum Likelihood Method for Estimation of Mutual Delay and Power of Noise Signals by Bistatic Radiometer, Comptes Rendus – L'Académie Bulgare des Sciences, 68(5), pp. 631-640.
17. Model' zastosuvannya mobil'nykh kompleksiv/ O.S. Balabukha, K.YU. Derhachov K.YU., V.F. Slobodenyuk// Zbirnyk naukovykh prats' TSNDINU. – Kyiv. TSNDINU. – 2007. – Vyp. 2. – S. 31 – 33.
18. Lukin, K. A. "Millimeter wave noise radar applications: theory and experiment", Fourth International Kharkov Symposium 'Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves'. Symposium Proceedings (Cat. No.01EX429), Kharkov, Ukraine, 2001, pp. 68-73, <https://doi.org/10.1109/MSMW.2001.946748>.
19. Savci, K., Stove, A.G., De Palo, F., Erdogan, A.Y., Galati, G., Lukin, K.A., Lukin, S. Noise radar—overview and recent developments IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, Vol.35 (9), pp.8-20.