

# Збройна боротьба: теорія, забезпечення, досвід

УДК 355.58

О.В. Коломійцев, В.Є. Кудряшов, О.О. Адамовський, А.А. Коротя

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## УМОВНА ЙМОВІРНІСТЬ УРАЖЕННЯ ЦІЛІ З ВРАХУВАННЯМ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ КОМПЛЕКСУ І ПРОТИДІЇ СТРІЛЬБИ РАКЕТАМИ

Надаються результати математичного моделювання ймовірностей входу та не входу цілі з зон ураження та пуску комплексу. Запропоновано варіант визначення значень пристосованості комплексу при стрільбі по цілі, що маневрує. Приводиться підхід до розрахунку середніх квадратичних відхилень помилок наведення ракет в умовах завад. Обґрунтовані коефіцієнти завадостійкості станцій та системи комплексу. Представлені величини умовних ймовірностей ураження цілі з обліком надійності елементів комплексу, дії завад і маневру цілі та вогневої протидії противника. Це дозволяє забезпечити моделювання значень ефективності стрільби ракетами в залежності від технічних характеристик комплексу та протидії противника. Показані отримані аналітичні вирази для математичного моделювання та графічний матеріал.

**Ключові слова:** ймовірність входу цілі у зону ураження та пуску, параметр цілі та її дальність, систематична складова і середнє квадратичне відхилення помилок наведення ракет, коефіцієнти завадостійкості станцій і системи комплексу, умовна ймовірність ураження цілі.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Постійне вдосконалення індивідуальних та колективних систем захисту від засобів повітряного нападу (ЗПН) потребує визначення показників ефективності стрільби ракетами [7, 10 – 13].

У теперішній час відсутня математична модель, яка побудована на основі технічних характеристик зенітного ракетного комплексу (ЗРК), заради визначення вказаних показників ефективності стрільби. Тому задача обґрунтування варіанту математичної моделі розрахунку оцінок ефективності стрільби є важливою та актуальною.

**Аналіз публікацій** не надає можливості визначення показників ефективності стрільби ракетами на основі технічних характеристик ЗРК [1 – 3, 7]. У цих ґрунтовних трудах є підходи до вирішення цієї задачі, але відсутні її приклади розв'язання.

**Метою статті** є обґрунтування підходу до отримання оцінок ефективності стрільби ракетами в умовах протидії противника з врахуванням надійності елементів ЗРК та технічних характеристик станцій і систем комплексу.

### Виклад основного матеріалу

Припустимо, у склад комплексу входить станція виявлення цілі (СВЦ) і її супроводження (ССЦ), станція передачі команд (СПК) і візування ракет (СВР), лічильне – вимірювальний прилад, зенітна керована ракета (ЗКР).

І. Ймовірності входу цілі у зони пуску та ураження комплексу.

Відношення сигнал-шум  $q$  у радіолокаційному каналі СВЦ, при якому здійснюється виявлення цілі, згідно з [4, 11] дорівнює:

$$q = \sqrt{\frac{2[1 - (\log P_B / \log F)]}{(\log P_B / \log F)}}, \quad (1)$$

де  $P_B$  – умовна ймовірність вірного виявлення цілі (0,5 тут і надалі використовуємо типові параметри та технічні характеристики комплексу);  $F$  – умовна ймовірності помилкової тривоги ( $6 \cdot 10^{-3}$ ).

При моделюванні, обмежуємо поточне значення сигнал-шум  $q_{\text{п}} \leq 27$  дБ на основі границь Крамера-Рао для великих значень  $q$  та інших джерел помилок [5, 6]. Тоді, середнє квадратичне відхилення (СКВ) помилки вимірювання кута азимуту цілі  $\sigma_{\beta}$  СВЦ знаходимо, гідно з виразом [11]:

$$\sigma_{\beta} = \sqrt{2} \Theta_{0,5\beta} D^2 / (180 D_{\text{п}}^2 q_{\text{п}}), \quad (2)$$

де  $\Theta_{0,5\beta}$  – на півширина діаграми спрямованості (ДС) випромінювання антени СВЦ у азимутальній площині ( $4,5^0$ );  $D$ ,  $D_{\text{п}}$  – відповідно дальність до цілі при  $P_B = 0,5$  та поточна дальність, причому  $q_{\text{п}} = (D_{\text{п}}/D)^2 q$ .

Проміжок часу  $\tau$  між  $n$  відмітками від цілі при відомій логіці огляду простору антеною СВЦ буде дорівнювати [1]:

$$\tau = j\Gamma(60/V_a), \quad (3)$$

де  $\Gamma$  – вид огляду простору у ізовисотній площині антени СВЦ (1, 2, ..., 10), або кількість ДС випромінювання фазової антенної решітки (ФАР) СВЦ по куту місця;  $V_a$  – швидкість обертання антени (2, ..., 12 об/хв).

Джерелом помилок виміру параметру цілі  $P$  є помилки визначення її координат та помилки метода екстраполяції руху цілі. При прямолінійній траєкторії польоту цілі випадкова величина  $P$  розподілена за нормальним законом з математичним очікуванням (МОЧ)  $m_p$  та СКВ  $\sigma_p$ , де згідно [1, 10, 11]:

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{2} \sigma_\beta}{(j-1) V \tau} \left[ D - \frac{(j-1) V \tau}{2} \right]^2, \quad (4)$$

де  $D$  – дальність до цілі у момент першого вимірювання її координат ( $D = 10^3, \dots, 6,5 \cdot 10^4$  м);  $V$  – швидкість цілі ( $V = 10, \dots, 800$  м/с).

Причому, коли  $j=2$ ,  $\Gamma=2$  (або 4),  $V_a=12$ ,  $V=250$  (або 500) м/с та  $D=3,3 \cdot 10^4$  м (дальня границя зони пуску ракети) отримуємо:  $\sigma_{p \max} \leq 173$  м,  $\sigma_{p \min} \leq 24$  м, якщо  $D=2 \cdot 10^4$  м (дальня границя зони ураження ракетою) –  $\sigma_{p \max} \leq 9$  м,  $\sigma_{p \min} \approx 1$  м.

Граничний (найбільший) параметр цілі  $P_{гр}$ , при якому забезпечується ураження цілі з ймовірністю не менш заданого значення визначається [1–3, 11]:

$$P_{гр} = \sqrt{(14,5 \cdot 10^3 - 11,2 V)^2 - H^2}, \quad (5)$$

де  $H$  – висота польоту цілі ( $10, \dots, 10^4$  м).

СКВ помилки щільності ймовірності входу цілі у зони пуску та ураження  $\sigma_b$  дорівнює [1, 7, 11]:

$$\sigma_b = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_\eta^2}, \quad (6)$$

де  $\sigma_\eta$  – СКВ помилки лінійного відхилення, яка розподілена за нормальним законом та дорівнює  $P_{гр}/3$ .

Ймовірність входу цілі у зони пуску та ураження комплексом  $\Psi$  на самперед необхідна для якісного цілерозподілу при управлінні вогнем, так [1, 7, 11]:

$$\Psi = \int_{-P_{гр}}^{P_{гр}} \left\{ \frac{\exp \left[ -\frac{(Z-P)}{(2\sigma_b^2)} \right]}{\sqrt{2\pi} \sigma_b} \right\} dZ. \quad (7)$$

Результати розрахунку за виразом (7) представлені на рис. 1.

Вхідні дані наступні:  $j=2$ ,  $\Gamma=4$ ,  $V_a=12$ ,  $V=250$  м/с,  $P_{гр}=11,7 \cdot 10^3$  м,  $P$  змінювався у межах від 0 м до  $10^5$  м та  $D$  – від  $2,5 \cdot 10^3$  м до  $10^5$  м.

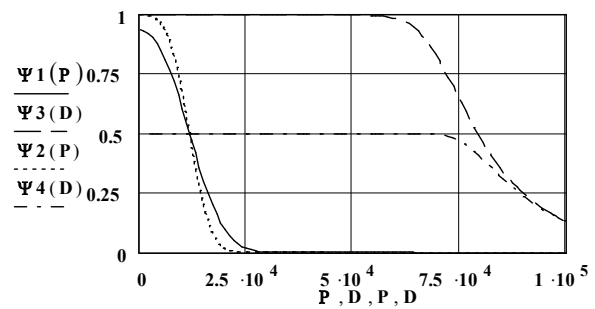


Рис. 1. Ймовірність входу цілі у зони пуску та ураження комплексу  $\Psi_1$  в залежності від величин параметру цілі  $P$  та дальності до неї  $D$

Перша (I) крива, на рис. 1  $\Psi_1(P)$ , безперервна. Вона здобута коли ціль знаходиться на дальній границі зони виявлення СВЦ, тобто коли  $D=6,5 \cdot 10^4$  м. Значення  $\Psi_1(P)$  відображають ймовірності входу цілі у зону пуску комплексу.

III крива, показана крапками  $\Psi_2(P)$ , побудована, якщо ціль підлетіла до дальньої границі зони пуску ЗКР,  $D=3,3 \cdot 10^4$  м. Ймовірність входу цілі у зону ураження визначається за величиною  $\Psi_2(P)$ .

Крива II  $\Psi_3(D)$ , показана тире, та крива IV  $\Psi_4(D)$  – точка-тире, визначенні коли  $P=0$  та  $P=P_{гр}$  відповідно. В залежності від величини  $D$ , значення  $\Psi_3(D)$  та  $\Psi_4(D)$  вказують на ймовірності входу цілі у зону пуску ЗКР або у зону ураження комплексу.

Збільшення  $D$  з  $3,3 \cdot 10^4$  м до  $6,5 \cdot 10^4$  м не суттєво впливає на вказані ймовірності навіть при зміні  $P$  з 0 м до  $P_{гр}$ . Хоча, якщо  $D$  збільшується до  $9 \cdot 10^4$  м ймовірності  $\Psi_1(D) < 0,25$ , що треба враховувати при цілерозподілу (рис. 1).

II. Ймовірності не виходу цілі з зон пуску та ураження комплексу після пуску ракети.

Ймовірність того, що після пуску ЗКР ціль не вийде з зони пуску (ураження) визначаємо близько до формул (1) – (7). СКВ помилки вимірювання азимуту цілі  $\sigma_\beta$  при її супроводженні ССЦ визначається за виразом (2). За відомими технічними характеристиками ССЦ  $\Theta_{0,5\beta} \sim 1^0$  і  $q \sim 6,93$ , причому на рубежі узяття цілі на автоматичне супроводження (АС) з ймовірністю 0,5,  $D \sim 4,6 \cdot 10^4$  м.

При моделюванні обмежуємо найбільше поточне значення сигнал-шум (2) в ССЦ, яке  $q_{п} \sim 32$  дБ [6, 10, 11].

Кількість луно-сигналів цілі  $k$  при супроводженні її ССЦ знаходимо з виразу:

$$k = \tau_k / T, \quad (8)$$

де  $\tau_k$  – const контуру управління комплексу ( $\sim 0,8$ с);  $T$  – період слідування радіоімпульсів ССЦ ( $\sim 0,7$ мс).

Якщо ціль здійснює односторонній круговий віраж у горизонтальній площині її польоту то половина кута розвороту цілі  $\varphi_M$  буде дорівнювати [1, 11]:

$$\varphi_M = g n \tau_k / (2V), \quad (9)$$

де  $g$  – нормальне прискорення;  $n$  – перевантаження з яким ціль маневрує.

З врахуванням виду щільності ймовірності для нормального закону розподілу  $\varphi_M$  отримали СКВ помилки визначення азимуту  $\sigma_M$  цілі, яка маневрує:

$$\sigma_M = g n \tau_k / (6V). \quad (10)$$

СКВ помилки виміру параметра цілі  $\sigma_{PM}$ , яка маневрує визначається, як [11, 13]:

$$\sigma_{PM} = \frac{\sigma_\beta + \sigma_M}{(k-1)VT} \left[ D - \frac{(k-1)VT}{2} \right]^2. \quad (11)$$

СКВ помилки щільності ймовірності  $\sigma_{VM}$  за аналогією з (6) знаходимо з виразу  $\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{PM}^2 + \sigma_\eta^2}$ . Ймовірності не виходу цілі з зон пуску (ураження) комплексу після пуску ракети дорівнює [11, 13]:

$$Y = \int_{-P_{гр}}^{P_{гр}} \left\{ \frac{\exp \left[ -(Z-P) / (2\sigma_{VM}^2) \right]}{\sqrt{2\pi} \sigma_{VM}} \right\} dZ, \quad (12)$$

де  $P_{гр}$  – визначається за виразом (5);  $\sigma_\eta = P_{гр}/3$ .

Результати математичного моделювання за (12) представлені на рис. 2.

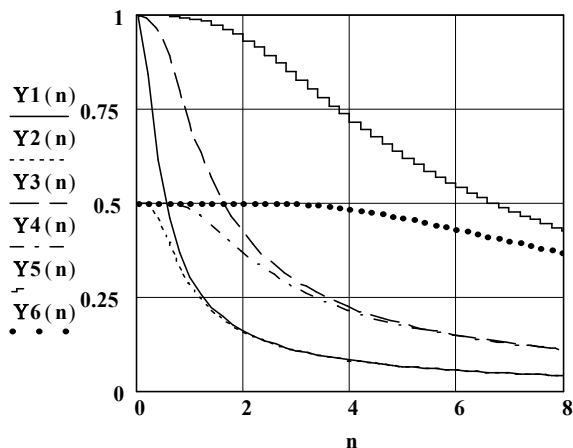


Рис. 2. Ймовірність не виходу цілі з зони пуску та ураження комплексу  $Y_i$  в залежності від величин параметру цілі  $P$  та дальності до неї  $D$

Крива I безперервна відображає зміну значень  $Y_1(n)$  при  $P = 0$  м і ціль знаходиться на дальній границі зони пуску ( $D = 3,3 \cdot 10^4$  м).

Якщо  $P = P_{гр}$  отримуємо криву II,  $Y_2(n)$  – показана крапками, також для  $D = 3,3 \cdot 10^4$  м. Вже при  $n = 4$  вказані ймовірності практично співпадають і дорівнюють  $\sim 0,08$ . Тобто ціль з середніми перевантаженнями залишає зону пуску комплексу.

Криві III і IV,  $Y_3(n)$  і  $Y_4(n)$ , тире і крапка-тире відповідно, здобуті як і попередні, але для дальньої границі зони ураження комплексу ( $D = 2 \cdot 10^4$  м). При  $n = 4$   $Y_3(4) \approx 0,22$  та  $Y_4(4) \approx 0,21$ , що є неприйнятним при застосуванні комплексу за призначенням. Заради підвищення  $Y_i(n)$  точку зустрічі ракети з ціллю треба перенести у середину зони ураження комплексу ( $D = 10^4$  м).

Криві V і VI,  $Y_5(n)$  і  $Y_6(n)$ , відмічені символами  $\square$  і  $***$  відповідно, отримані при  $D = 10^4$  м. Якщо  $n = 4$ , то  $Y_5(4) \approx 0,71$ ,  $Y_6(4) \approx 0,48$ , що в цілому задовольняє.

Заради підвищення ймовірності не виходу цілі, яка маневрує, з зони ураження комплексу після пуску ракети треба реалізувати точку зустрічі ракети з ціллю у середині зони ураження комплексу. У цьому випадку вказана ймовірність може підвищитись приблизно від 0,22 (0,21) до 0,71 (0,48).

III. Показник пристосованості комплексу при стрільбі по цілі, яка маневрує.

У процесі стрільби систематична складова динамічної помилки наведення ракети (ПНР)  $m_d$  збільшується за рахунок маневру цілі.

Приблизно можливо розрахувати  $m_d$  за виразом (13) [2, 3, 11], де:

$$m_d(t) = \begin{cases} 0,5 n g t^2 & \text{при } t < \tau_k \\ 0,5 n g \left[ t^2 - \frac{n_p (t - \tau_k)^2}{n} \right] & \text{при } t \geq \tau_k, \\ m_d(t) \geq 0 & \end{cases} \quad (13)$$

де  $n_p$  – перевантаження ракети у момент зустрічі з ціллю (від 12 до 28),  $t$  – час, який відраховується від початку маневру.

У зв'язку з не відомим моментом зустрічі  $t$  визначаємо середнє значення  $\overline{m_d(t)}$  [9, 11, 13]:

$$\overline{m_d(t)} = t_0^{-1} \int_0^{t_0} m_d(t) dt, \quad (14)$$

де  $t_0$  – час, коли  $m_d(t) = 0$  і  $t_0 = \tau_k / (1 - \sqrt{n/n_p})$  [3].

Припустимо, систематичні складові у картинній площині стрільби  $Y0Z$  однакові, тобто  $m_y \approx m_z$  та  $m$  ПНР дорівнює [1, 11]:

$$m = \sqrt{m_y^2 + m_z^2}.$$

Тоді, апроксимація систематичної складової ПНР з врахуванням дальності до точки зустрічі ракети з ціллю  $D$  і її маневру  $m_D$  дорівнює:

$$m_D = \sqrt{0,5(D\chi)^2 + \left[ \sqrt{0,5(D\chi)^2 + \overline{m_d(t)}} \right]^2}, \quad (15)$$

де  $\chi = 2,3 \cdot 10^{-4}$ .

У цьому випадку СКВ ПНР  $\sigma$  буде відповідати [1]:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_i^2 + \sigma_\phi^2}, \quad (16)$$

причому  $\sigma_d, \sigma_i, \sigma_\phi$  – відповідно СКВ динамічної, інструментальної та флуктуаційної ПНР ( $\sim 1,93'$ ,  $\sim 0,41'$ ,  $\sim 1,26'$ ).

В залежності від дальності до точки зустрічі СКВ ПНР комплексу  $\sigma_D$  визначається, як [11]:

$$\sigma_D \approx D \operatorname{tg}(\sigma \pi / 10,8 \cdot 10^3). \quad (17)$$

Умовна ймовірність ураження цілі при стрільбі одною ракетою  $R_1$  знаходимо з виразу [1, 10 – 13]:

$$R_1 = \frac{\beta_0^2}{\beta_0^2 + 2\sigma_D^2} \exp\left(-\frac{m_D^2}{\beta_0^2 + 2\sigma_D^2}\right) P_T, \quad (18)$$

де  $\beta_0$  – параметр колового закону ураження типової цілі ( $\sim 37$  м);  $P_T$  – умовна ймовірність проходження ракети у «трубці» радіусу  $\rho_{\max}$ , де:

$$P_T = \int_0^{\rho_{\max}} \frac{\rho}{\sigma_D^2} \exp\left(-\frac{\rho^2 + m_D^2}{2\sigma_D^2}\right) I_0\left(\frac{\rho m_D}{\sigma_D^2}\right) d\rho, \quad (19)$$

$\rho_{\max} = m + 3\sigma_D$  (осереднені значення за зоною ураження  $m = 2,3$  м,  $\sigma_D = 9$  м);  $\rho$  – часткове значення промаху ракети;  $I_0(Z)$  – функція Бесселя першого роду нульового порядку від чисто уявного аргументу.

Співвідношення  $R_1$  з врахуванням маневру цілі та без нього є показником пристосованості комплексу при стрільбі по цілі, яка маневрує  $\alpha(n)$ , так [1, 11]:

$$\alpha(n) = R_1(n) / R_1. \quad (20)$$

Причому, значення  $R_1$  визначаються коли у (15)  $\overline{m_d(t)} = 0$ , а  $R_1(n)$  якщо  $\overline{m_d(t)} > 0$ .

Результати математичного моделювання показника  $\alpha_i(n)$  представлені на рис. 3.

I крива, безперервна,  $\alpha(n)$  здобута для точки зустрічі у середині зони ураження ( $D = 10^4$  м).

II крива, відмічена крапкам,  $\alpha_1(n)$  – при  $D = 1,5 \cdot 10^4$  м.

Вказані криві відрізняються між собою.

Заради зменшення часу на моделювання вводим апроксимації  $\mu_i(n)$ .

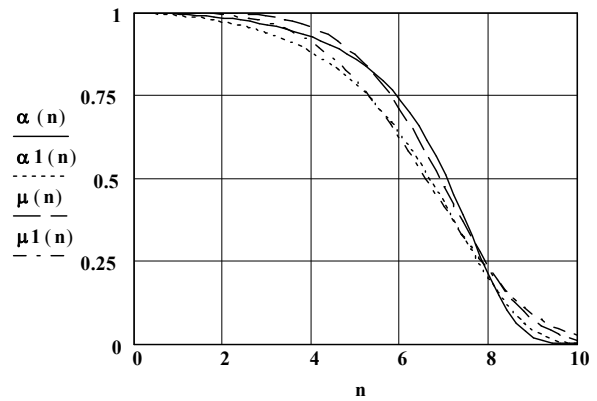


Рис. 3. Показник пристосованості комплексу при стрільбі по цілі, яка маневрує  $\alpha_i(n)$  та його апроксимації  $\mu_i(n)$

Так для  $D = 10^4$  м отримуємо [11, 13]:

$$\mu(n) = \exp\left[-(n/7.4)^5\right]. \quad (21)$$

Крива III,  $\mu(n)$  – тире, розрахована за (21).

Якщо точка зустрічі ракети з ціллю на  $D = 1,5 \cdot 10^4$  м, то пропонуємо таку апроксимацію показника  $\alpha_1(n)$ :

$$\mu_1(n) = \exp\left[-(n/7.2)^4\right]. \quad (22)$$

Значення  $\mu_1(n)$  представлені IV кривою, крапка-тире.

В залежності від дальності до точки зустрічі змінюється хід величин показника пристосованості комплексу при стрільбі по цілі, яка маневрує. Заради підвищення якості моделювання розглянути апроксимації впроваджувати лише при визначеній дальності до точки зустрічі ракети з ціллю.

**IV.** Коефіцієнти завадостійкості станцій та системи комплексу.

Будемо вважати, що на усі станції та системи комплексу діють активні шумові завади (АШЗ) з рівномірним спектром щільності. Спектр частот завад обмежений смугами пропускання  $\Pi_1$ , це дозволяє допустити нормальний закон розподілу миттєвих значень коливань. Потужність особистих шумів, перерахована на вхід радіолокаційного (р/л) каналу ССЦ  $P_{\text{ош ссц}}$  дорівнює [4, 5, 10]:

$$P_{\text{ош ссц}} = k T_0 \Pi_{\text{ссц}} (K_{\text{ш ссц}} - 1 + T_{\text{а ссц}} / T_0), \quad (23)$$

де  $k$  – const Больцмана;  $\Pi_{\text{ссц}}$ ,  $K_{\text{ш ссц}}$  – смуга пропускання р/л каналу ССЦ та його коефіцієнт шуму відповідно;  $T_{\text{а ссц}}$  – антена температура ( $\sim 120$  К);  $T_0$  – абсолютна температура, температура матеріалу антени ( $\sim 300$  К).

Потужність АШЗ на вході р/л каналу ССЦ знаходимо з виразу:

$$P = \frac{P_3 G_3 G_{\text{ССЦ}} \lambda_{\text{ССЦ}}^2 \text{В} \Pi_{\text{ССЦ}} / 10^6}{(4\pi^2) v_{\text{ССЦ}} D_3^2}, \quad (24)$$

де  $P_3, G_3, D_3$  – потужність постановника АШЗ (вт/МГц), коефіцієнт підсилення його антени та дальність до нього відповідно;  $G_{\text{ССЦ}}, \lambda_{\text{ССЦ}}$  – коефіцієнт підсилення антени і довжина хвилі ССЦ відповідно;  $\text{В}$  – осереднений рівень перших бокових пелюсток (ДС) антени ССЦ;  $v_{\text{ССЦ}}$  – результуючий коефіцієнт розрізнення.

Відношення завада – особистий шум р/л каналу ССЦ буде дорівнювати:

$$L(P) = 10 \log(P/P_{\text{ОШ ССЦ}}). \quad (25)$$

Враховуємо, що дія АШЗ збільшує лише  $\sigma_{\phi}$  ПНР [1], тоді вираз (16) змінюється та СКВ ПНР під впливом завад  $\sigma_3$  має вигляд:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_i^2 + \left\{ \sigma_{\phi} 10^{\frac{L(P)}{20}} \right\}^2}. \quad (26)$$

Систематичну складову  $m_D$  (15) знаходимо, коли  $\overline{m_d(t)} = 0$ . Використання формул (18) і (19) надає коефіцієнт завадостійкості ССЦ  $\xi(P)$ :

$$\xi(P) = R_{13} / R_1. \quad (27)$$

Значення  $R_{13}$  визначаємо при наявності завад, а  $R_1$ , якщо  $P = 0$ .

Результати розрахунку  $\xi_i(P)$  представлені на рис. 4.

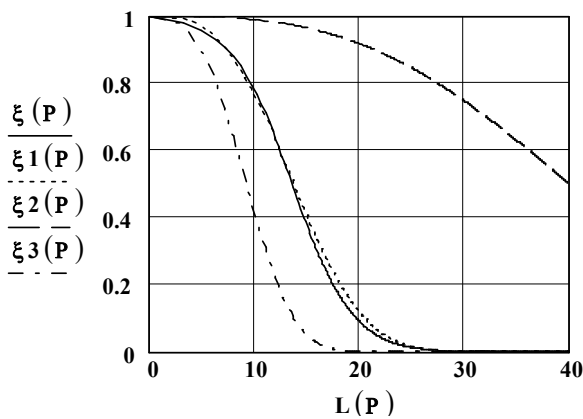


Рис. 4. Коефіцієнти завадостійкості станцій та системи комплексу в залежності від рівня завад  $L(P)$ , дБ

При моделювання використовувались наступні технічні характеристики ССЦ і завадопостановника:

$$\Pi_{\text{ССЦ}} = 9 \cdot 10^6 \text{ Гц}; K_{\text{ССЦ}} \approx 6,4; G_3 = 20;$$

$$P_3 = 0, \dots, 10^3 \text{ вт/МГц}; G_{\text{ССЦ}} = 3,6 \cdot 10^4; \text{В} = 10^{-2};$$

$$\lambda_{\text{ССЦ}} = 0,02; v_{\text{ССЦ}} \approx 28,8; D_3 = 10^5 \text{ м}.$$

Крива I, безперервна, відображає значення  $\xi(P)$  ССЦ. Так, коли  $L(P) = 10$  дБ, то  $\xi(P) \approx 0,76$ , а при  $L(P) = 20$  дБ, відповідно  $\xi(P) \approx 0,1$ . Заради зменшення часу на моделювання впровадимо апроксимацію показника  $\xi(P)$  за допомогою [13]:

$$\xi_1(P) = \exp\left\{-\left[L(P)/15,5\right]^3\right\}. \quad (28)$$

Крива II, показана точками –  $\xi_1(P)$ , приблизно співпадає з величинами  $\xi(P)$ .

По аналогії з приведеним знайдемо коефіцієнти завадостійкості радіоліній СПК – ракета  $\xi_{\text{с-р}}(P)$  і ракета – СВР  $\xi_{\text{р-с}}(P)$  на основі їх технічних характеристик. Їх добуток означимо через  $\xi_2(P)$ , крива III, тире, де [10, 13]:

$$\xi_2(P) = \exp\left\{-\left[\frac{L(P)}{52,3}\right]^3\right\} \exp\left\{-\left[\frac{L(P)}{63,7}\right]^3\right\}. \quad (29)$$

Як і попереднє здобуто коефіцієнт завадозахисності системи підриву бойової частини ракети  $\xi_3(P)$ , так [10, 11, 13]:

$$\xi_3(P) = \exp\left\{-\left[L(P)/10,4\right]^3\right\}. \quad (30)$$

Крива IV,  $\xi_3(P)$  – точка-тире, вказує на систему, яка має найгіршу завадозахисність у комплексі. При дії АШЗ по всім станціям та системі комплексу на рівні середніх 7 дБ (сильні 12 дБ) [1, 10, 13] добуток коефіцієнтів завадостійкості дорівнює  $\sim 0,67$  ( $\sim 0,14$ ).

Отримане, показує на суттєву знижку ефективності стрільби ракетами в умовах завад та ставить задачу підвищення завадостійкості станцій і системи комплексу.

V. Умовна ймовірність ураження цілі з врахуванням надійності елементів комплексу і ракети та всіх видів протидії стрільби.

Умовна ймовірність ураження цілі при стрільбі одною ракетою  $R_1^*$  з врахуванням усіх факторів, які знижують ефективність стрільби дорівнює [1, 10 – 13]:

$$R_1^* = \xi_1(P) \xi_2(P) \xi_3(P) \mu(n) \prod_{i=1}^3 K_i \eta_i \prod_{i=1}^3 P_i \zeta_i R_1, \quad (31)$$

де  $K_1, K_2, K_3$  – коефіцієнти бойової готовності системи наведення (СН), пускової установки (ПУ) та ракети відповідно;  $P_1, P_2, P_3$  – коефіцієнти надійності бойової роботи СН, ПУ та ракети відповідно;  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  – умовні ймовірності не ураження елементів комплексу (СН, ПУ, ракети) при підготовці до стрільби;  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  – теж саме, що і попереднє, тільки під час стрільби ракетою;  $R_1$  – ймовірність ураження цілі при стрільбі одною ракетою (у середині зони ураження  $\sim 0,93$ ).

З досвіду експлуатації  $K_{\text{бг}} \approx 0,4$  і  $P_{\text{бп}} \approx 0,95$ , де  $K_{\text{бг}} = K_1 K_2 K_3$  і  $P_{\text{бп}} = P_1 P_2 P_3$ .

Якщо комплекс веде роботу в русі з швидкістю 30 км/г з регламентацією випромінювання, умовна ймовірність не ураження елементів комплексу та ракети  $Q$  ( $\sim 0,9$ ), при підготовці і під час стрільби буде дорівнювати [12]:

$$Q = (\eta_1 \eta_2 \eta_3)(\zeta_1 \zeta_2 \zeta_3). \quad (32)$$

Значення  $Q$  підвищується, коли комплекс знаходиться на стартовій позиції, так  $Q \approx 0,58$ . З врахуванням ймовірності  $Y(n)$  (12) та стрільби  $N$  ракетами ( $N = 2$ ), величину  $R_N^*$  знаходимо з виразу [1, 11]:

$$R_N^* = Y(n) \left[ 1 - (1 - R_1^*)^N \right]. \quad (33)$$

Результати розрахунку  $R_2^*$  за виразом (33) представлені на рис. 5.

Крива I, безперервна –  $R_1(D)$ , побудована при умові, що комплекс знаходиться у русі, коли  $V = 30$  км/г,  $K_{\text{бг}} \approx 0,4$ ,  $P_{\text{бп}} \approx 0,95$ , а завади та маневрування цілі відсутні.

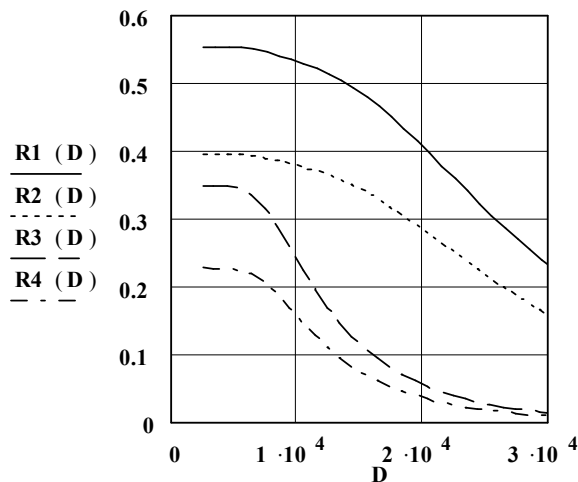


Рис. 5. Умовні ймовірність ураження цілі з врахуванням надійності елементів комплексу та усіх видів протидії стрільби в залежності від дальності до точки зустрічі  $D$

Крива II,  $R_2(D)$  – відмічена точками, теж саме, що і попереднє, але при дії завад по усім станціям та системі підриву комплексу на рівні середніх,  $L(P) = 7$  дБ. При цьому спостерігаємо зниження умовних ймовірностей  $R_1(10^4)$  з 0,54 до  $R_2(10^4)$  0,38.

III крива, тире –  $R_3(D)$ , надає значення  $R_2^*$  з врахуванням  $V$ ,  $K_{\text{бг}}$ ,  $P_{\text{бп}}$ ,  $L(P)$  та ще вплив середнього маневру цілі,  $n = 4$ .

Остання крива IV, точки тире –  $R_4(D)$ , визначена як і попередня крива III, але комплекс знаходиться на стартовій позиції, тобто  $Q \approx 0,58$ . Величини  $R_3(10^4)$ ,  $R_4(10^4)$  відповідно дорівнюють 0,24 і 0,15.

Значення  $R_2^*$  на рис. 5 надають основний показник ефективності стрільби ракетами у різних умовах його використання за призначенням.

## Висновки

Таким чином, ймовірність входу цілі у зону пуску (ураження) комплексу практично не залежить при зміні дальності до цілі від 65 км до 33 км. Якщо цілі має граничний параметр, то вказана ймовірність дорівнює 0,5.

Для розглянутого варіанту треба врахувати означену ймовірність при цілерозподілу, яка  $\sim 0,23$  на відстані у 90 км.

З аналізу значень ймовірностей не виходу цілі з зони пуску (ураження) комплексу, після пуску ракети, здобуті найкращі точки зустрічі ракети з ціллю.

Так, для дальньої границі зони ураження вказана ймовірності дорівнюють 0,22 (0,23). Якщо реалізується точка зустрічі ракети з ціллю у середині зони ураження то ймовірність підвищується до 0,7 (0,48).

На основі технічних характеристик комплексу та ракети і проведеного математичного моделювання обґрунтовані показники пристосованості комплексу для стрільби по цілі, що маневрує. Показано різну залежність вказаного показника від точки зустрічі ракети з ціллю. При середньому маневрі з переваженнями цілі у 4g (8g) ефективність комплексу знижується приблизно на 0,1 (0,8).

Визначені відношення завади – особистий шум у р/л каналах комплексу та ракети з врахуванням їх технічних характеристик. Розглянута дія АШЗ, при умові що зростає лише флуктуаційна складова закону ПНР. Визначені значення СКВ і систематичних складових ПНР під дією АШЗ з врахуванням технічних характеристик комплексу та ракети. Обґрунтовані апроксимації коефіцієнтів завадостійкості станцій комплексу та системи підриву бойової частини ракети.

Так при дії АШЗ на рівні середніх, 7 дБ (сильних 12 дБ) ефективність стрільби знижується приблизно на 0,33 (0,86).

Визначені значення умовних ймовірностей ураження цілі з врахуванням надійності елементів комплексу і ракети та всіх видів протидії стрільби  $R_N^*$ . Показана перевага реалізації точки зустрічі ракети з ціллю у середині зони ураження при використанні комплексу за призначенням у русі, з швидкістю не менше 30 км/г.

Аналіз величин  $R_2^*$  дозволяє доопрацювати способи стрільби, розробляти рекомендації до правил стрільби та настанов по управлінню вогнем, на працювати вимоги до озброєння та до напрямків його удосконалення.

## Список літератури

1. Основы стрельбы и управления огнем войсковых зенитных ракетных комплексов. Ч. 1 / В.З. Казачинский, А.А. Каипецкий, Л.Г. Нестеренко, Г.В. Семенов, Н.Д. Солодовников. – К.: КВАИУ, 1971. – 468 с.
2. Неупоков Ф.К. Стрельба зенитными ракетами / Ф.К. Неупоков. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Воениздат, 1980. – 294 с.
3. Ковтуненко А.П. Основы теории построения и моделирования функционирования сложных систем вооружения / А.П. Ковтуненко, Н.А. Шершнев. – Х.: ВИРТА, 1992. – 233 с.
4. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
5. Справочник по радиолокации / под ред. М. Сколника.; Том. 1. Основы радиолокации / под ред. Я.С. Ицхоки. – М.: Сов. радио, 1978. – 456 с.
6. Моделирование в радиолокации / А.И. Леонов, В.Н. Васильев, Ю.И. Гайдуков и др.; под ред. А.И. Леонова. – М.: Сов. радио, 1979. – 264 с.
7. Довідник з протиповітряної оборони / А.Я. Торочин, І.О. Романенко, Ю.Г. Даник, Р.Е. Пащенко та ін. – К.: МО України, 2003. – 368 с.
8. Левин Б.Р. Теория случайных процессов и её применение в радиотехнике / Б.Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1957. – 496 с.
9. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука. – 721 с.
10. Часткова апаратно – програмна модель визначення умовної ймовірності ураження цілі та ймовірності виконання вогневої задачі ЗРК / В.Е. Кудряшов, А.В. Чеканов // VI наукова конф. ХУ ПС ім. І. Кожедуба: наук.-техн. конф., 14 – 15 квіт. 2010 р.: тези доп. – Х.: ХУПС, 2010. – С. 154-155.
11. Часткова апаратно-програмна модель розрахунку значень ймовірності входу цілі у зону ураження ЗРК та умовної ймовірності ураження цілі, яка маневрує / В.Е. Кудряшов, А.В. Чеканов // VIII наукова конф. ХУПС ім. І. Кожедуба: наук.-техн. конф., 18 – 19 квіт. 2012 р.: тези доп. – Х.: ХУПС, 2012. – С. 207.
12. Часткова апаратно- програмна модель визначення значень умовної ймовірності ураження елементів ВТЗ та БМ ЗРК / В.Е. Кудряшов, І.Я. Загоруйко // VIII наукова конференція ХУПС ім. І.Кожедуба: наук.-техн. конф., 18 – 19 квіт. 2012 р.: тези доп. – Х.: ХУПС, 2012. – С. 208.
13. Ефективність цілерозподілу при протидії противника стрільбі та управлінню вогнем / В.Е. Кудряшов, А.В. Чеканов // IX наукова конф. ХУ ПС ім. І. Кожедуба: наук.-техн. конф., 17 – 18 квіт. 2013 р.: тези доп. – Х.: ХУПС, 2013. – С. 220.

Надійшла до редколегії 15.01.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Є.Л. Казаков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## УСЛОВНАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ЦЕЛИ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЛЕКСА И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СТРЕЛЬБЕ РАКЕТАМИ

А.В. Коломийцев, В.Е. Кудряшев, О.А. Адамовский, А.А. Корота

Приводятся результаты математического моделирования вероятностей входа и не выхода цели из зон поражения и пуска комплекса. Предложен вариант определения значений приспособленности комплекса к стрельбе по маневрирующей цели. Сформирован подход к расчету средних квадратичных отклонений ошибок наведения ракет в условиях помех. Обоснованы коэффициенты помехоустойчивости станций и системы комплекса. Приведены величины условных вероятностей поражения цели с учетом надежности элементов комплекса, действия помех и маневра цели, а также огневого противодействия противника. Это позволяет обеспечить моделирование значений эффективности стрельбы ракетами в зависимости от технических характеристик комплекса и противодействия противника. Показаны полученные аналитические выражения для математического моделирования и графический материал.

**Ключевые слова:** вероятность входа цели в зону поражения и пуска, параметр цели и ее дальность, систематическая составляющая и среднее квадратное отклонение ошибок наведения ракет, коэффициенты помехоустойчивости станций и системы комплекса, условная вероятность поражения цели.

## CONDITIONAL HIT OF AIM PROBABILITY TAKING INTO ACCOUNT RELIABILITY OF WORK OF ELEMENTS OF COMPLEX AND COUNTERACTION TO FIRING BY ROCKETS

O.V. Kolomitsev, V.E. Kudrjachow, O.O. Adamovski, A.A. Korotja

Results over of mathematical design of probabilities of entrance and keeping indoors of aim are brought from the zones of defeat and starting of complex. The variant of determination of values of adjusted of complex is offered to firing on a manoeuvrable aim. Going near the calculation of standard deviations of errors of missile-guidance is formed in the conditions of hindrances. The coefficients of antijammingness of the stations and system of complex are reasonable. Sizes over of conditional hit of aim probabilities are brought taking into account reliability of elements of complex, action of hindrances and manoeuvre of aim, and also fire counteraction of opponent. It allows to provide the design of values of efficiency of firing rockets depending on technical descriptions of complex and counteraction of opponent. The got analytical expressions for a mathematical design and graphic material are shown.

**Keywords:** probability of entrance of aim in the zone of defeat and starting, parameter of aim and her distance, systematic constituent and mean square deviation of errors of missile-guidance, coefficients of antijammingness of the stations and system of complex, conditional hit of aim probability.