

УДК 623.465.5:623.438:[623.746+623.462.12-519]
DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).48-56](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).48-56)

О. С. КАРПЕНКО, ад'юнкта

<https://orcid.org/0000-0002-7655-4363>

(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОЇ СИСТЕМИ ПОСТАНОВКИ ПЕРЕШКОД ЗАСОБАМ УРАЖЕННЯ З ТЕЛЕВІЗІЙНОЮ СИСТЕМОЮ НАВЕДЕННЯ

У статті розглянуто задачу протидії засобам ураження з телевізійною системою наведення лазерною системою постановки перешкод у складі системи захисту бойових броньованих машин. На основі формалізації умов функціонування досліджуваної системи та аналізу вхідних і вихідних параметрів, що визначають процес зриву наведення, сформовано просторово-енергетичну модель лазерного випромінювання та отримано узагальнені аналітичні залежності для кількісного опису фотонно-електронних і теплових процесів в оптичному сенсорі. Отримані залежності утворюють математичний апарат методики, яка забезпечує перехід від формалізованих умов застосування до обґрунтування раціональних параметрів лазерної системи постановки перешкод та кількісного оцінювання технічної можливості її інтеграції до складу системи захисту бойових броньованих машин.

Ключові слова: озброєння і військова техніка, бойова броньована машина, захищеність, система захисту, лазерне випромінювання, засоби ураження, безпілотний літальний апарат, телевізійна система наведення.

ВСТУП

Досвід бойового застосування бойових броньованих машин (ББМ) під час відсічі збройної агресії російської федерації проти України свідчить про стале зростання загрози з боку безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що застосовуються в якості засобів ураження (ЗУ) озброєння та військової техніки (ОВТ). Аналіз, проведений в [1], дозволяє стверджувати, що на сучасному етапі розвитку ОВТ відсутні ефективні технічні рішення, здатні забезпечити гарантований захист ББМ від таких засобів.

ЗУ зазначеного типу використовують телевізійну камеру (ТК) для формування та передачі відеозображення, на основі якого оператор або автоматизована система наведення (на основі штучного інтелекту, тощо) здійснює

наведення на ціль, тобто, в них реалізовано телевізійну систему наведення (ТВСН). Критичним елементом їх функціонування є оптичний сенсор (ОС) ТК, порушення роботи якого призведе до зриву процесу наведення і, як наслідок, промаху по цілі [1, 2]. В той же час відомо, що лазерне випромінювання, направлене в апертуру ТК, здатне як засліпити її (порушити функціонування на час впливу випромінювання), так і призвести до безповоротного припинення її функціонування. Це зумовлює підґрунтя для створення системи захисту ББМ від ЗУ з ТВСН на основі лазерного випромінювання (надалі використовується абревіатура ЛСПП – лазерна система постановки перешкод). Цільовою функцією такої системи є зрив наведення ЗУ з ТВСН шляхом дистанційного ураження (пригнічення) його оптико-електронної системи лазерним випромінюванням [3]. Актуальним науковим завданням є створення аналітичного апарату опису взаємодії лазерного випромінювання з ОС ТК ЗУ з ТВСН як теоретичної основи параметричного синтезу характеристик ЛСПП.

Метою статті є розроблення аналітичних залежностей, які описують взаємодію лазерного випромінювання з оптичним сенсором ЗУ з ТВСН в умовах функціонування ЛСПП в складі системи захисту ББМ.

Досягнення поставленої мети зумовлює необхідність розв'язання таких завдань:

1. Формалізація умов функціонування системи «ББМ з ЛСПП – ЗУ з ТВСН» та визначення сукупності вхідних та вихідних параметрів, що впливають на процес впливу лазерного випромінювання на ОС ТК.

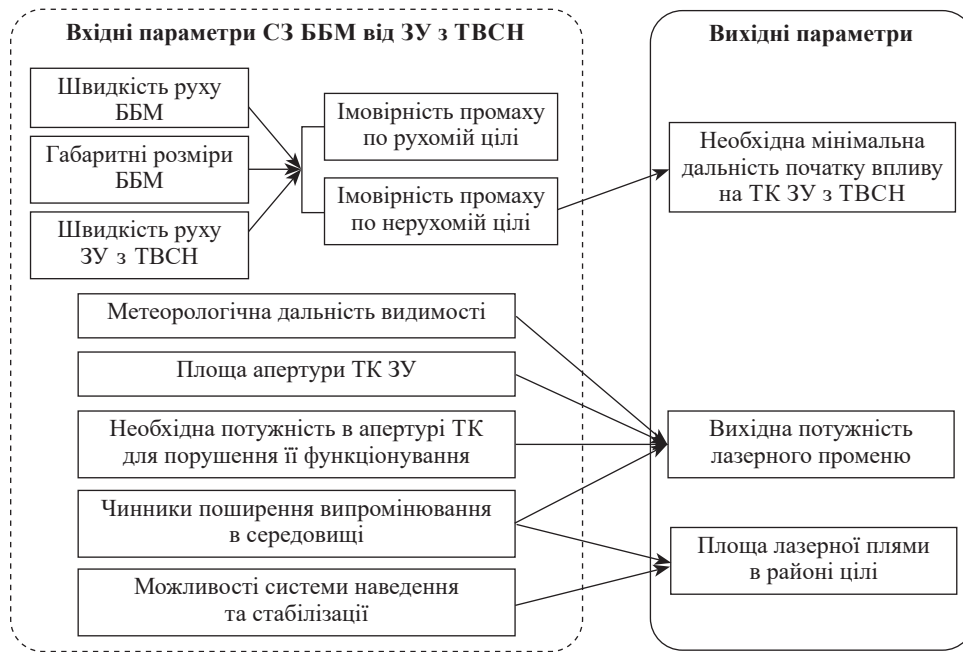
2. Формування просторово-енергетичної моделі лазерного випромінювання з урахуванням фізичних, геометричних та атмосферних чинників, що визначають рівень опромінення ОС ТК ЗУ з ТВСН.

3. Розроблення узагальнених аналітичних моделей взаємодії лазерного випромінювання з ОС ТК ЗУ з ТВСН та на їх основі отримання розрахункових залежностей фотонно-електронних і теплових процесів у фоточутливому шарі з урахуванням геометричних, кінематичних та атмосферних чинників, що визначаються умовами функціонування ЛСПП у складі системи захисту ББМ.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ефективне застосування лазерного випромінювання для впливу на ТК ЗУ з ТВСН потребує врахування сукупності взаємопов'язаних чинників, зумовлених як умовами застосування ЛСПП у складі ББМ, так і характеристиками ТК ЗУ та середовища поширення випромінювання. Результати декомпозиції процесу функціонування ЛСПП та аналізу чинників, які визначають умови взаємодії лазерного випромінювання з ТК ЗУ з ТВСН дозволили сформулювати систему вхідних і вихідних параметрів, що характеризують процес зриву наведення ЗУ з ТВСН. Структурну взаємозалежність зазначених параметрів наведено на рис. 1.

Наведена структурна схема дає змогу розглядати ЛСПП як об'єкт параметричного синтезу, для якого визначаються аналітичні залежності між вхідними параметрами, що характеризують умови функціонування ЛСПП у складі системи захисту ББМ та вихідними



Р и с . 1. Структурна взаємозалежність вхідних та вихідних параметрів системи захисту ББМ від ЗУ з ТВСН

параметрами лазерного випромінювача. Значення цих параметрів повинні забезпечувати виконання цільової функції ЛСПП, а саме порушення формування інформативності відеозображення, достатнє для зриву наведення на ціль. Розв'язання зазначеної задачі передбачає послідовне формування просторово-енергетичної моделі поширення лазерного випромінювання та моделі його взаємодії з ОС ТК ЗУ з ТВСН.

Вплив лазерного випромінювання на ОС ТК, на оптичні системи приладів прицілювання і спостереження та чутливі елементи приладів нічного бачення досліджується науковцями тривалий час. Результати досліджень [4–6] свідчать, що ОС ТК різних типів (CCD, FSI CMOS та BSI CMOS) характеризуються високою чутливістю до лазерного опромінення. Встановлено, що ступінь пошкодження сенсора визначається його типом та просторово-енергетичними характеристиками випромінювання, зокрема довжиною хвилі, тривалістю та режимом впливу (імпульсне або безперервне випромінювання), енергією імпульсу або щільністю потужності. Водночас в роботах [7–8] показано, що засліплення ОС настає при рівнях опромінення, нижчих за поріг фізичного пошкодження, та зумовлюється перенасиченням пікселів фотонами. Необхідна для засліплення щільність потужності залежить від довжини хвилі опромінення, спектральної чутливості сенсора, ємності насичення його пікселів та наявності інфрачервоних фільтрів в оптичній системі ТК. Таким чином, припинення формування інформативного відеозображення ТК досягається засліпленням ОС (перенасиченням фотонним потоком) або його ураженням, що може реалізовуватися як імпульсним, так і безперервним випромінюванням. Засліплення пов'язане з перевищенням ємності насичення пікселів за час інтеграції, тоді як ураження обумовлюється тепловим руйнуванням фоточутливого шару внаслідок перевищення порогового значення теплової енергії, що формується під дією флюенсу імпульсного або щільнос-

ті потужності безперервного випромінювання. Механізм впливу на ОС визначається типом випромінювання, довжиною хвилі лазерного випромінювання, рівнем його просторової концентрації в районі цілі, параметрами формування пучка, умовами поширення випромінювання та часовими характеристиками впливу. У безперервному режимі ці параметри характеризуються щільністю потужності в апертурі ТК, а в імпульсному – щільністю енергії. Так, відомо, що щільність потужності безперервного випромінювання та щільність енергії імпульсного випромінювання визначаються як відношення потужності (енергії імпульсу) до площі лазерної плями діаметром d та визначаються залежностями:

- для безперервного випромінювання (щільність потужності)

$$I = \frac{P}{S} = \frac{4P}{\pi d^2}; \quad (1)$$

- для імпульсного випромінювання (щільність енергії, флюенс)

$$F = \frac{E}{S} = \frac{4E}{\pi d^2}, \quad (2)$$

де I – щільність потужності випромінювання, Вт/м²;
 F – флюенс (енергетична щільність опромінення), Дж/м²;
 P – потужність випромінювання, Вт;
 E – енергія одного імпульсу, Дж;
 $S = \pi \frac{d^2}{4}$ – площа лазерної плями, м².

Наведені залежності свідчать про те, що визначення діаметру лазерної плями в районі цілі є ключовою передумовою для розрахунку щільності потужності (флюенсу) та вибору параметрів випромінювача ЛСПП.

Слід зазначити, що застосування ЛСПП в складі ББМ обумовлює необхідність врахування динамічних чинників руху об'єкта-носія. У зв'язку з цим формування необхідного рівня опромінення апертури ТК ЗУ

з ТВСН визначається характеристиками системи наведення та стабілізації випромінювача ЛСПП. Значення середньоквадратичної похибки стабілізації приймається відповідно характеристик зразка та використовується як вихідний параметр просторово-енергетичної моделі. Мінімумально необхідний розмір лазерної плями, який забезпечує компенсацію автоколивань променя, зумовлених похибками стабілізації, визначається залежністю:

$$d_{\text{стаб}} = 2L\theta, \quad (3)$$

де L – дальність до цілі, м;

θ – середньоквадратична похибка наведення/стабілізації, рад.

Мінімальна дальність початку впливу лазерного випромінювання, на якій припинення формування зображення забезпечує зрив наведення ЗУ з ТВСН як по стаціонарній, так і по рухомій цілі, визначається за методикою [3] та приймається як вихідний параметр моделі. На цій дальності необхідний рівень щільності випромінювання має забезпечуватися в межах діаметра плями, не меншого за $d_{\text{стаб}}$.

Більшість лазерів формують пучок із гауссівським розподілом інтенсивності, за якого її значення зменшується від осі до країв. Для забезпечення рівномірної щільності випромінювання в межах заданого діаметра плями доцільно застосовувати пучок з плоскою вершиною, що формується дифракційними або фазовими оптичними елементами типу π Shaper. Такі елементи, працюючи з однододововими лазерами, забезпечують колімований пучок, який після фокусування формує пляму з рівномірним або кільцевим розподілом інтенсивності [9].

Відомо, що лазерне випромінювання характеризується вузькою діаграмою спрямованості, що визначається кутовим розходженням променя. Розходження залежить від довжини хвилі та діаметра апертури випромінювача і формує просторово-енергетичний розподіл випромінювання на цілі. Для круглої апертури кутове розходження, зумовлене дифракцією, описується функцією типу «диск Ейрі» та визначається емпіричною залежністю [10].

$$\theta_{\text{пром}} = 1,22 \frac{\lambda}{D_0}, \quad (4)$$

де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання, м;

D_0 – діаметр ефективною оптичної діафрагми лазерного випромінювача, м;

1,22 – коефіцієнт першого мінімуму функції Ейрі,

тоді повний діаметр плями випромінювання на цілі на відстані L буде визначатися залежністю

$$d(L) = d_0 + 2L\theta_{\text{пром}} = d_0 + 2L \left(1,22 \frac{\lambda}{D_0} \right), \quad (5)$$

де d_0 – початковий діаметр колімованого пучка на виході формуючої оптики (на виході з апертури), м.

Залежність (5) свідчить, що збільшення діаметра апертури випромінювача зменшує кутове розходження променя. У межах габаритів БМ можливий вибір такого діаметра апертури, який забезпечує необхідний розмір плями в районі цілі з мінімальним зниженням щільності опромінення внаслідок розходження, тому для подальших розрахунків прийнято, що $d_0 = D_0$.

Враховуючи залежності (3)–(5), для компенсації автоколивань лазерного променя та покриття всієї зони можливих відхилень лінії візування внаслідок похибок стабілізації системи наведення повинна виконуватися умова

$$D_0 + 2L \left(1,22 \frac{\lambda}{D_0} \right) \geq 2L\theta = d_{\text{еф}}, \quad (6)$$

де $d_{\text{еф}}$ – ефективний розмір лазерної плями в районі цілі, м.

Слід також зазначити, що окрім кутового розходження на просторово-енергетичні характеристики в районі цілі впливає атмосферне поглинання випромінювання та турбулентність. Відомо [11], що ослаблення електромагнітних хвиль в атмосфері обумовлено розсіюванням та поглинанням енергії випромінювання, а функціонування лазерних систем можливе лише у «вікнах прозорості». До них відноситься діапазон видимого світла та ділянки інфрачервоного діапазону з довжинами хвиль 0,95–1,05; 1,15–1,35; 1,5–1,8; 2,1–2,4; 3,3–4,2; 4,5–5,1; 8–13 мкм.

Ослаблення електромагнітних хвиль середовищем, яке має коефіцієнт ослаблення α , км⁻¹, на дальності L , км, характеризується законом Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha L} = \Phi_0 \tau, \quad (7)$$

де Φ – потік на виході з середовища;

Φ_0 – потік на вході в середовище;

$\tau = e^{-\alpha L}$ – коефіцієнт пропускання середовища.

Коефіцієнт ослаблення потоку α для певної довжини хвилі визначається емпіричною залежністю

$$\alpha = \frac{3,91}{\gamma} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-0,585\gamma^3}, \quad (8)$$

де γ – метеорологічна дальність видимості, км;

λ – довжина хвилі, мкм.

Для розрахунку коефіцієнта пропускання середовища приймається значення метеорологічної дальності видимості, що відповідає несприятливим погодним умовам, характерним для граничних режимів застосування ЗУ з ТВСН. Згідно міжнародної шкали видимості [12], таким умовам відповідають атмосферні явища, пов'язані з інтенсивними опадами або підвищеною запиленістю та серпанком. Врахування зазначених умов дозволяє оцінювати поширення лазерного випромінювання у середовищі, близькому до граничного за прозорістю для ОС, що функціонують у видимому спектрі електромагнітного випромінювання.

Турбулентність атмосфери проявляється розширенням пучка, блуканням осі пучка та часово-просторовими флуктуаціями інтенсивності (сцинтиляціями) [13]. Для опису впливу турбулентності на поширення колімованого пучка у приземному шарі атмосфери використовують параметр Фріда $r_0(\lambda, L)$, який характеризує ступінь турбулентного спотворення хвильового фронту та визначається виразом [14],

$$r_0(\lambda, L) = \left(0,423k^2 C_n^2 \right)^{-3/5}, \quad (9)$$

де $r_0(\lambda, L)$ – параметр Фріда (діаметр когерентності) на відрізьку довжиною L ;

C_n^2 – структурна характеристика показника заломлення атмосфери, згідно з [13] для умов слабкої та сильної турбулентності $C_n^2 = (10^{-17} \dots 10^{-13}) \text{ м}^{-2/3}$;

L – довжина траси лазерного випромінювання;

$k = \frac{2}{\lambda}$ – хвильове число;

λ – довжина хвилі лазерного випромінювання.

У роботі [15] для оцінювання впливу турбулентності на поперечний розмір лазерної плями використано математичну залежність для довготривалого радіуса колімованого гауссівського пучка:

$$W_{LT}^2 = W_0^2 \left(1 + \frac{L^2}{Z_0^2} \right) + 2 \left(\frac{4L}{kr_0} \right)^2, \quad (10)$$

де W_{LT} – довготривалий радіус пучка в площині цілі;

W_0 – початковий радіус пучка;

Z_0 – параметр Релея;

$2 \left(\frac{4L}{kr_0} \right)^2$ – доданок, який описує додаткове розширення пучка внаслідок впливу турбулентності; його величина визначається значенням параметра Фріда r_0 .

Оскільки залежність (10) отримана для колімованого гауссівського пучка, у межах цієї статті її використано як наближений аналітичний вираз для оцінювання впливу турбулентності на поперечний розмір лазерної плями також і у випадку пучка з рівномірним розподілом інтенсивності. Таким чином, для прийнятих умов моделювання вплив турбулентності на розширення лазерної плями оцінюється за співвідношеннями (9) – (10) та за результатами цієї оцінки приймається рішення щодо доцільності урахування додаткового розширення пучка під час розрахунку ефективного розміру лазерної плями в районі цілі.

Блукання осі пучка в площині цілі визначається за середньоквадратичним зміщенням центра пучка залежністю

$$\sigma_r = \sqrt{\langle r_c^2 \rangle}, \quad (11)$$

де σ_r – середньоквадратичне зміщення осі пучка відносно заданого напрямку;

$\langle r_c^2 \rangle$ – математичне очікування квадрата зміщення осі пучка, для колімованого променя визначається як [13]

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,42 C_n^2 L^3 \omega_0^{-1/3}, \quad (12)$$

де ω_0 – радіус променя на виході з випромінювача.

Для прийнятих умов моделювання значення σ_r визначається за співвідношеннями (11) – (12) та за результатами оцінювання встановлюється доцільність урахування блукання осі пучка при визначенні ефективного розміру лазерної плями в районі цілі. Часово-просторові флуктуації інтенсивності лазерного випромінювання в турбулентній атмосфері описуються дисперсією Ритова [13]:

$$\sigma_R^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (13)$$

де σ_R^2 – дисперсія Ритова.

У режимі слабких флуктуацій, при якому нормована дисперсія інтенсивності (сцинтиляційний індекс) σ_I^2 наближено дорівнює σ_R^2 , а миттєве відносне середньоквадратичне відхилення інтенсивності визначається як

$$\sigma_I \approx \sqrt{\sigma_R^2}, \quad (14)$$

де σ_I – миттєве відносне відхилення інтенсивності.

Згідно з [16], у приземному шарі атмосфери характерна частота турбулентних флуктуацій інтенсивності становить близько 100 Гц. Це відповідає оцінці часу кореляції сцинтиляцій порядку $t_{\text{кор}} \sim 10^{-2}$ с. Цей часовий масштаб визначає характерну тривалість зміни структури інтенсивності лазерної плями в районі цілі. Таким чином, вплив сцинтиляцій визначається співвідношенням між часом опромінення ОС ТК та часом кореляції турбулентності. Якщо протягом часу інтеграції реалізується $N \approx t_{\text{інт}}/t_{\text{кор}}$ статистично незалежних станів турбулентності, то ефективний рівень флуктуацій середньої інтенсивності визначається як

$$\sigma_{I_{\text{еф}}} \approx \frac{\sigma_I}{\sqrt{N}} = \sigma_I \sqrt{\frac{t_{\text{кор}}}{t_{\text{інт}}}}, \quad (15)$$

де $\sigma_{I_{\text{еф}}}$ – відносне середньоквадратичне відхилення середньої інтенсивності за час інтеграції;

σ_I – миттєве відносне середньоквадратичне відхилення інтенсивності;

$t_{\text{кор}}$ – характерний час кореляції сцинтиляцій;

$t_{\text{інт(впл)}}$ – час опромінення (інтеграції) ОС ТК.

Так, для ураження ОС безперервним випромінюванням при тривалості $t_{\text{впл}} \gg t_{\text{кор}}$ реалізується велика кількість статистично незалежних станів турбулентності, отже, ефективне відхилення середньої інтенсивності зменшується пропорційно $\sqrt{t_{\text{кор}}/t_{\text{впл}}}$. За таких умов флуктуації інтенсивності статистично усереднюються, а їх впливом на інтегральну теплову енергію можна знехтувати.

Водночас для ураження ОС імпульсним випромінюванням, де $t_{\text{імпл}} \sim 10^{-8} \dots 10^{-9}$ с та для засліплення ОС безперервним випромінюванням, де визначальним є час інтеграції одного кадру (умовами моделювання приймаємо мінімальну електронну витримку сучасних CMOS-сенсорів $t_{\text{інт}} = 10^{-5}$ с [17]) виконується умова $t_{\text{інт}} \ll t_{\text{кор}}$, отже усереднення інтенсивності відсутнє. В такому випадку фактичний флюенс (щільність потужності) може відхилятися від розрахункового середнього значення, що потребує введення коефіцієнта запасу пікової інтенсивності $K_{\text{турб}}$, величина якого визначається на основі оціненого значення миттєвого відносного відхилення інтенсивності σ_I .

Разом з тим варто врахувати, що на рівень опромінення ОС ТК ЗУ з ТВСН, окрім ослаблення випромінювання внаслідок атмосферного поглинання та турбулентності, впливає такий чинник, як відношення площі лазерної плями в районі цілі до ефективної приймальної апертури ТК. Тоді, з урахуванням (1), (2), потужність випромінювання (енергія імпульсу), що потрапляє в апертуру ТК, виражається як $P_{\text{ап}} = I(\lambda, L, d_{\text{еф}}) S_{\text{ап,еф}}$ та $E_{\text{ап}} = F(\lambda, L, d_{\text{еф}}) S_{\text{ап,еф}}$ відповідно.

Також відомо, що у разі надходження випромінювання в апертуру ТК під певним кутом відносно її оптичної осі ефективна збиральна площа апертури зменшується пропорційно косинусу цього кута [18]. Тоді збиральна площа апертури визначається як проекція її геометрич-

ної площі на напрямок поширення випромінювання та описується співвідношенням $S_{\text{ан,еф}} = S_{\text{ан}} \cos \varphi$. З урахуванням наведених вище чинників, потужність випромінювання (флюенсу) в апертурі ТК визначатиметься залежностями

$$P_{\text{ан}} = \frac{4P\tau(\lambda, L)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ан}} \cos \varphi; \quad (16a)$$

$$E_{\text{ан}} = K_{\text{турб}} \frac{4E\tau(\lambda, L)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ан}} \cos \varphi, \quad (16b)$$

де $P_{\text{ан}}$ – потужність випромінювання в апертурі ОС ТК, Вт;

$E_{\text{ан}}$ – енергія імпульсу в апертурі ОС ТК, Дж;

Сформовані залежності (16a) та (16b) дозволяють визначити потужність безперервного випромінювання та енергію імпульсу, що надходять в апертуру ТК ЗУ з ТВСН, з урахуванням геометричних параметрів пучка, кута надходження випромінювання, похибок стабілізації та атмосферних чинників.

Відомо [19], що ОС ТК функціонують за принципом перетворення енергії фотонів у електричний сигнал. Водночас, з урахуванням квантової природи світла та принципу функціонування лазера як джерела когерентного випромінювання [20], лазерний промінь розглядається як організований потік фотонів, а енергія випромінювання визначається кількістю фотонів та енергією одного фотона і описується залежністю [21]:

$$E_{\text{лаз}} = NE_{\text{ф}} = N \frac{hc}{\lambda}, \quad (17)$$

де $E_{\text{лаз}}$ – енергія лазерного випромінювання, Дж;

$E_{\text{ф}}$ – енергія одного фотона, Дж;

N – кількість фотонів;

$h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка;

$c = 3 \times 10^8$ м/с – швидкість світла;

λ – довжина хвилі випромінювання, м,

а потужність випромінювання рівнянням

$$P = \frac{E_{\text{лаз}}}{t}, \quad (18)$$

де P – потужність випромінювання, Вт

t – тривалість випромінювання. Тоді при сталому значенні потужності кількість фотонів, що випромінюється за одиницю часу визначається як

$$N = \frac{P}{E_{\text{ф}}} = \frac{P\lambda}{hc}. \quad (19)$$

Для імпульсного режиму енергія імпульсу визначається залежністю

$$E_{\text{імп}} = P_{\text{імп}} t_{\text{імп}}. \quad (20)$$

Розглядаючи можливість зриву наведення ЗУ з ТВСН шляхом засліплення (ураження) його ОС слід зазначити, що кількість електронів, що генерується піксемом, визначається його квантовою ефективністю. Квантова ефективність $QE(\lambda)$ визначає частку фотонів, що спричиняють утворення електронів у фоточутливому шарі, тому кількість електронів, згенерованих унаслідок фото-ефекту, пропорційна кількості фотонів, що надходять на

сенсор, та $QE(\lambda)$, що у загальному вигляді описується залежністю [22]:

$$N_e(\lambda) \propto QE(\lambda) N_{\text{ф}}(\lambda), \quad (21)$$

де $N_e(\lambda)$ – кількість електронів, згенерованих у фоточутливому шарі;

$N_{\text{ф}}(\lambda)$ – кількість фотонів, що надходять на сенсор за заданий інтервал часу. Оскільки кількість фотонів при сталій потужності виражається виразом (19), кількість фотонів, що припадає на одиницю часу, змінюється пропорційно до довжини хвилі

$$N_{\text{ф}}(\lambda) \propto \lambda. \quad (22)$$

В той же час відомо, що під час взаємодії електромагнітного випромінювання з фоточутливим шаром ОС поглинута енергія розподіляється між генерацією електрон-діркових пар і тепловими втратами [23]. Частка фотонів, пропорційна $QE(\lambda)$, бере участь у фотоелектричному ефекті, причому на генерацію одного електрона витрачається енергія, рівна енергії забороненої зони E_g . Надлишкова енергія фотона ($E_{\text{ф}}(\lambda) - E_g$), а також енергія фотонів, що не спричиняють генерацію електронів (при $QE(\lambda) < 1$ або поза спектральною чутливістю), переходять у тепло через коливання кристалічної решітки. Частка енергії фотона, що витрачається на генерацію електрона, визначається виразом [23]

$$\eta_{\text{ген}}(\lambda) = \frac{E_g}{E_{\text{ф}}(\lambda)}, \quad (23)$$

де $\eta_{\text{ген}}(\lambda)$ – частка енергії одного фотона, що витрачається на генерацію електрона;

E_g – енергія забороненої зони матеріалу фоточутливого шару, тоді частка енергії фотона, що переходить у тепло, відповідно

$$\eta_{\text{тепл}}(\lambda) = 1 - \eta_{\text{ген}}(\lambda) = 1 - \frac{E_g}{E_{\text{ф}}(\lambda)} = 1 - \frac{E_g \lambda}{hc}. \quad (24)$$

Враховуючи те, що лише частка поглинутих фотонів $QE(\lambda)$ бере участь у фотоелектричному ефекті, узагальнений вираз для теплової енергії, що виділяється у фоточутливому шарі сенсора від кількості фотонів, що надходять на сенсор за заданий інтервал часу, має вигляд

$$E_{\text{тепл}}(\lambda) = N_{\text{ф}}(\lambda) E_{\text{ф}}(\lambda) (1 - QE(\lambda) \eta_{\text{ген}}(\lambda)), \quad (25)$$

де $E_{\text{тепл}}(\lambda)$ – сумарна енергія, що переходить у тепло при поглинанні $N_{\text{ф}}(\lambda)$ фотонів, Дж;

$N_{\text{ф}}(\lambda)$ – кількість фотонів, що потрапляють на сенсор за одиницю часу, визначається за залежністю (19).

З урахуванням співвідношень (16a), (16b), (21) та (23) – (25) формуються узагальнені залежності кількості згенерованих електронів і теплової енергії в ОС як функцій довжини хвилі та параметрів поширення променя. Оскільки фотонний потік, що надходить на ОС, додатково обмежується пропусканням оптичної системи ТК $\tau_{\text{опт}}(\lambda)$ [24], енергія, що потрапляє на сенсор за час інтеграції, визначається виразом

$$E_{\text{сенс}} = \frac{4P\tau(\lambda) \tau_{\text{опт}}(\lambda)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ан}} \cos \varphi t_{\text{інт}} K_{\text{турб}}. \quad (26)$$

де $E_{\text{сенс}}$ – енергія випромінювання, що потрапляє на сенсор, Дж;

$S_{\text{ап}}$ – площа апертури телевізійної камери, м^2 ;

$t_{\text{інт}}$ – час інтеграції ОС ТК (застосовується для оцінювання кількості фотонів), с;

$\tau_{\text{опт}}(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання оптичної системи ТК;

$K_{\text{турб}}$ – коефіцієнт запасу на турбулентні флуктуації інтенсивності: у режимі засліплення, коли $t_{\text{інт}} \ll t_{\text{кор}}$, приймається $K_{\text{турб}} > 1$ (визначається на основі оціненого значення σ_I); для функціонування ЛСПП в режимі ураження ОС ТК ЗУ з ТВСН безперервним випромінюванням, коли $t_{\text{впл}} \gg t_{\text{кор}}$, приймається $K_{\text{турб}} = 1$, адже флуктуації інтенсивності усереднюються.

Кількість фотонів, які надходять на ОС за $t_{\text{інт}}$, становить

$$N_{\text{ф}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = \frac{E_{\text{сенс}}(\lambda, L, d_{\text{еф}})}{E_{\text{ф}}(\lambda)} = E_{\text{сенс}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) \frac{\lambda}{hc}. \quad (27)$$

Тоді з урахуванням (26) отримуємо

$$N_{\text{ф}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = \frac{4P\tau(\lambda)\tau_{\text{опт}}(\lambda)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)}, \quad (28)$$

$$S_{\text{ап}} \cos \varphi_{i_{\text{інт}}} \frac{\lambda}{hc} K_{\text{турб}}$$

Кількість електронів, згенерованих у фоточутливому шарі сенсора з урахуванням квантової ефективності $QE(\lambda)$, визначається виразом (21). Тоді, з врахуванням залежності (28), визначатиметься виразом

$$N_e(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = QE(\lambda) N_{\text{ф}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) =$$

$$= QE(\lambda) \frac{4P\tau(\lambda)\tau_{\text{опт}}(\lambda)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ап}} \cos \varphi_{i_{\text{інт}}} \frac{\lambda}{hc} K_{\text{турб}}. \quad (29)$$

Кількість енергії, що виділяється у фоточутливому шарі сенсора за час впливу випромінювання у вигляді тепла, визначається виразом (25), тоді теплова енергія, що виділяється у фоточутливому шарі сенсора за час впливу, визначається як

$$E_{\text{тепл}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = \left(1 - QE(\lambda) \frac{E_g \lambda}{hc}\right) E_{\text{сенс}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}), \quad (30)$$

а з урахуванням (26):

$$E_{\text{тепл}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = \left(1 - QE(\lambda) \frac{E_g \lambda}{hc}\right) \frac{4P\tau(\lambda)\tau_{\text{опт}}(\lambda)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ап}} \cos \varphi_{i_{\text{впл}}}, \quad (31)$$

де $t_{\text{впл}}$ – час впливу випромінювання на ОС (застосовується в тепловій моделі впливу на ОС).

Отримані залежності (29) та (31) дозволяють кількісно оцінювати число електронів, згенерованих ОС ТК, а також теплову енергію, що виділяється у фоточутливому шарі під дією лазерного випромінювання в умовах функціонування ЛСПП в складі системи захисту ББМ. Урахування чинників, які впливають на надходження випромінювання в апертуру ТК, дозволяє виконувати моделювання як фотонно-електронних процесів, так і теплових навантажень в ОС.

ВИСНОВКИ

У статті розроблено узагальнений аналітичний апарат опису взаємодії лазерного випромінювання з ОС ТК ЗУ з ТВСН в умовах функціонування ЛСПП у складі системи захисту ББМ.

У межах проведеного дослідження формалізовано умови функціонування системи «ББМ з ЛСПП – ЗУ з ТВСН» як об'єкта параметричного синтезу та визначено сукупність взаємопов'язаних вхідних і вихідних параметрів, що визначають процес зриву наведення. Встановлено, що для зриву наведення ЗУ з ТВСН вихідні енергетичні характеристики випромінювача ЛСПП мають визначатися з урахуванням просторово-енергетичних параметрів пучка, геометрії взаємного розташування об'єктів, похибок наведення та стабілізації, атмосферного ослаблення, чинників впливу турбулентності та характеристик оптичної системи та ОС ТК ЗУ.

Отримані залежності (29) та (31) утворюють математичний апарат методики, яка забезпечує перехід від формалізованих умов функціонування в системі «ББМ з ЛСПП – ЗУ з ТВСН» до кількісної оцінки фотонно-електронних та теплових процесів в ОС. Застосування розроблених моделей дає змогу обґрунтувати раціональні параметри ЛСПП для формування ефективних оптичних перешкод телевізійним системам наведення ЗУ та здійснювати кількісне оцінювання технічної можливості інтеграції ЛСПП до складу системи захисту ББМ з врахування сукупності взаємопов'язаних чинників, зумовлених як умовами застосування ЛСПП у складі ББМ, так і характеристиками ТК ЗУ та середовища поширення випромінювання.

Сформований аналітичний апарат є теоретичною основою параметричного синтезу характеристик випромінювача ЛСПП у складі системи захисту ББМ та створює підґрунтя для обґрунтування раціональних значень параметрів системи захисту ББМ від ЗУ з ТВСН з урахуванням реальних умов застосування.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Karpenko, O.S. Analysis of the effectiveness of armored combat vehicles protection systems against destruction means with a television guidance. *Озброєння та військова техніка*. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2024. № 4(44). С. 19–25. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4\(44\).19-25](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4(44).19-25).
2. Карпенко О.С., Кучинський А.В. Аналіз особливостей функціонування засобів ураження з телевізійною системою наведення та їх можливостей щодо ураження бойових броньованих машин. *Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України*. 2024. № 2(93). С. 85–93.
3. Карпенко О.С. Методика визначення мінімальної дальності дії лазерної системи постановки перешкод засобам ураження з телевізійною системою наведення. *Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України*. 2025. № 2(97). С. 34–42. Інв. 6210цт.
4. Visible-Band Nanosecond Pulsed Laser Damage Thresholds of Silicon 2D Imaging Arrays. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2526> (accessed 20.11.2024).
5. Laser-induced damage threshold of camera sensors and micro-opto-electro-mechanical systems. Available at:

- <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9987/1/Laser-induced-damage-threshold-of-camera-sensors-and-micro-opto/10.1117/12.2241057.full> (accessed 20.11.2024).
6. Damage thresholds of silicon-based cameras for in-band and out-of-band laser exposures. Available at: <https://opg.optica.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-61-10-2473&id=470599> (accessed 20.11.2024).
 7. Visible and near-infrared laser dazzling of CCD and CMOS cameras. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10797/107970S/Visible-and-near-infrared-laser-dazzling-of-CCD-and-CMOS/10.1117/12.2325631.full> (accessed 23.04.25).
 8. Comparison of 632nm laser dazzling effect on CCD and CMOS image sensors. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13283/1328340/Comparison-of-632nm-laser-dazzling-effect-on-CCD-and-CMOS/10.1117/12.3037275.full> (accessed 23.04.25).
 9. Мачехін Ю. П., Гнатенко О. С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 2. Параметри лазерного випромінювання: монографія. Харків: Факт. 2021. 145 с.
 10. Конончук Ю. М. Вступ до Фур'є-оптики : навч. посіб. Київ : Київський нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. 2021. 128 с.
 11. Боллошин И. А., Быков В. В., Васин В. В. и др. Справочник по радиоэлектронным системам : в 2 т. / под ред. Б. Х. Кривицкого. М. : Энергия. 1979. Т. 2. С. 262—264.
 12. Бурштинська Х. В., Бабушка А. В. Вплив атмосфери на послаблення лазерного променя при скануванні місцевості. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2013. Вип. 78. С. 49—53.
 13. Andrews, L. C. & Phillips, R. L. (2005). Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham: SPIE Press. 782 p.
 14. Methods of Atmospheric Coherence Length Measurement. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/6/2980> (accessed 29.09.25).
 15. Dios, F., Rubio, J. A., Rodriguez, A. & Comeron, A. (2004). Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink. Applied Optics. Vol. 43. No. 19. Pp. 3866–3873. Available at: https://www.researchgate.net/publication/8457996_Scintillation_and_beam-wander_analysis_in_an_optical_ground_station-satellite_uplink (accessed 01.10.25). <https://doi.org/10.1364/AO.43.003866>.
 16. Nicolas Perlot & Daniel Fritzsche. Aperture averaging: theory and measurements. <https://doi.org/10.1117/12.528901> (accessed 30.10.25).
 17. DH-IPC-HFW4431E-SE 4MP WDR IR Mini Bullet Network Camera. Available at: https://www.dahuasecurity.com/asset/upload/download/DH-IPC-HFW4431E-SE_Datasheet_201707181.pdf (accessed 17.12.2025).
 18. Назаренко Л. А., Сорокін В. М. Основи радіометрії та фотометрії : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2014. 352 с.
 19. Елементна база електронних апаратів. Ч. 5. Оптоелектронні компоненти / Філінюк М. А., Лазарєв О. О., Войцеховська О. В. та ін.; під заг. ред. М. А. Філінюка, О. О. Лазарєва. Вінниця : ВНТУ. 2018. 116 с.
 20. Тимчик Г.С. Лазерні технології. Конспект лекцій: навч. посіб. Київ: КПІ ім. І. Сікорського. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/23410748-deb0-49e1-91d4-cbfa4503eec8/content> (дата звернення: 30.10.25).
 21. Тимчик Г.С., Богатирьова Г.В., Мамута М.С. Лазерні технології. Практикум : навч. посіб. Київ: КПІ ім. І. Сікорського. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a33f1d3b-8a95-44e0-851a-1fbc47389bec/content> (дата звернення: 30.10.25).
 22. EMVA1288 Standard. Available at: <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.0.pdf> (accessed 17.12.25).
 23. Царенко О.М. Основи фізики напівпровідників і напівпровідникових приладів: навч. посіб. Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка. 2011. 243 с.
 24. Edmund Optics. TECHSPEC® Lens Transmission Data (400–700 nm). Available at: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/lens-coatings/> (accessed 17.12.2025).

REFERENCES

1. Karpenko, O.S. (2024). Analysis of the effectiveness of armored combat vehicles protection systems against destruction means with a television guidance. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. K.: CSRI AME AFU. № 4(44). Pp. 19—25. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4\(44\).19-25](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4(44).19-25).
2. Karpenko, O.S. & Kuchynskyi, A.V. (2024). “Analiz osoblyvostei funktsionuvannia zasobiv urazhennia z televiziinoiu systemoiu navedennia ta yikh mozhlyvostei shchodo urazhennia boiovykh bronovanykh mashyn” [Analysis of the functional features of weapons equipped with television guidance systems and their capabilities to engage armored fighting vehicles], *zb. nauk. pr. K.: CSRI AME AFU*. № 2(93). Pp. 85—93. Inv. 6119tst.
3. Karpenko, O.S. (2025). “Metodyka vyznachennia minimalnoi dalnosti dii lazernoi systemy postanovky pereshkod zasobam urazhennia z televiziinoiu systemoiu navedennia” [Method for determining the minimum operating range of a laser countermeasure system against weapons with a television guidance system], *zb. nauk. pr. K.: CSRI AME AFU*. № 2(97). Pp. 34—42. Inv. 6210tst.
4. Visible-Band Nanosecond Pulsed Laser Damage Thresholds of Silicon 2D Imaging Arrays. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2526> (accessed 20.11.2024).
5. Laser-induced damage threshold of camera sensors and micro-opto-electro-mechanical systems. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9987/1/Laser-induced-damage-threshold-of-camera-sensors-and-micro-opto/10.1117/12.2241057.full> (accessed 20.11.2024).
6. Damage thresholds of silicon-based cameras for in-band and out-of-band laser exposures. Available at: <https://opg.optica.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-61-10-2473&id=470599> (accessed 20.11.2024).
7. Visible and near-infrared laser dazzling of CCD and CMOS cameras. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10797/107970S/>

- Visible-and-near-infrared-laser-dazzling-of-CCD-and-CMOS/10.1117/12.2325631.full (accessed 23.04.25).
8. Comparison of 632nm laser dazzling effect on CCD and CMOS image sensors. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13283/1328340/Comparison-of-632nm-laser-dazzling-effect-on-CCD-and-CMOS/10.1117/12.3037275.full> (accessed 23.04.25).
 9. Machehkin, Yu.P. & Hnatenko, O.S. (2021). "Lazerni, optyko-elektronni prylady ta systemy. Ch. 2. Parametry lazernoho vyprominiuvannia: monohrafiia" [Laser, optoelectronic devices and systems. P. 2. Parameters of laser radiation: monograph]. Kharkiv: Fakt. 145 p.
 10. Kononchuk, Yu.M. (2021). "Vstup do Furie-optyky: navch. posib" [Introduction to Fourier optics: Study guide]. K.: Kyivskiy nats. un-t im. Tarasa Shevchenka. 128 p.
 11. Boloshin, I.A., Bykov, V.V., Vasin, V.V. i dr. (1979). "Spravochnik po radioelektronnym sistemam: v 2 t. / pod red. B.Kh. Krivitskogo" [Handbook of radioelectronic systems: in 2 vols. / ed. by B. Kh. Krivitsky]. M.: Energiia. Vol. 2. Pp. 262—264.
 12. Burshtynska, Kh.V. & Babushka, A.V. (2013). "Vplyv atmosfery na poslablennia lazernoho promenia pry skanuvanni mistsevosti. Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznmannia" [Influence of the atmosphere on the attenuation of a laser beam during terrain scanning. Geodesy, cartography and aerial photography]. Vyp. 78. Pp. 49—53.
 13. Andrews, L. C. & Phillips, R. L. (2005). Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham: SPIE Press. 782 p.
 14. Methods of Atmospheric Coherence Length Measurement. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/6/2980> (accessed 29.09.25).
 15. Dios, F., Rubio, J. A., Rodriguez, A. & Comeron, A. (2004). Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink. Applied Optics. Vol. 43. No. 19. Pp. 3866—3873. Available at: https://www.researchgate.net/publication/8457996_Scintillation_and_beam-wander_analysis_in_an_optical_ground_station-satellite_uplink (accessed 01.10.25). <https://doi.org/10.1364/AO.43.003866>.
 16. Nicolas Perlot & Daniel Fritzsche. Aperture averaging: theory and measurements. <https://doi.org/10.1117/12.528901> (accessed 30.10.25).
 17. DH-IPC-HFW4431E-SE 4MP WDR IR Mini Bullet Network Camera. Available at: https://www.dahuasecurity.com/asset/upload/download/DH-IPC-HFW4431E-SE_Datasheet_201707181.pdf (accessed 17.12.2025).
 18. Nazarenko, L.A. & Sorokin, V.M. (2014). "Osnovy radiometrii ta fotometrii: monohrafiia" [Fundamentals of radiometry and photometry: monograph]. Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova. 352 p.
 19. Filyniuk, M.A., Lazariiev, O.O., Voitsekhovska, O.V. ta in. (2018). "Elementna baza elektronnykh aparativ. Ch. 5. Optoelektronni komponenty" [Electronic components of devices. P. 5. Optoelectronic components]; pid zah. Red. M.A. Filyniuka, O.O. Lazariieva. Vinnytsia: VNTU. 116 p.
 20. Tymchyk, H.S. "Lazerni tekhnolohii. Konspekt lektsii: navch. posib." [Laser technologies. Lecture notes: study guide]. K.: KPI im. I. Sikorskoho. Available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/23410748-deb0-49e1-91d4-cbfa4503eccc8/content> (available at: 30.10.2025).
 21. Tymchyk, H.S., Bohatyrova, H.V. & Mamuta, M.S. "Lazerni tekhnolohii. Praktykum: navch. posib" [Laser technologies. Practical course: study guide]. K.: KPI im. I. Sikorskoho. Available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a33f1d3b-8a95-44e0-851a-1fbc47389bec/content> (accessed 30.10.2025).
 22. EMVA1288 Standard. Available at: <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.0.pdf> (accessed 17.12.25).
 23. Tsarenko, O.M. (2011). "Osnovy fizyky napivprovodnykiv i napivprovodnykovykh pryladiv: navchalnyi posibnyk" [Fundamentals of semiconductor physics and semiconductor devices: study guide]. Kirovohrad: RVV KDPU im. V. Vynnychenka. 243 p.
 24. Edmund Optics. TECHSPEC® Lens Transmission Data (400–700 nm). Available at: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/lens-coatings/> (accessed 17.12.2025).

Karpenko O.S.

**METHODOLOGY FOR DETERMINING
THE ENERGY PARAMETERS OF A LASER
COUNTERMEASURE SYSTEM AGAINST
WEAPON SYSTEMS WITH A TELEVISION
GUIDANCE SYSTEM**

The article proposes a methodology for determining the energy characteristics of a laser countermeasure system against weapon systems equipped with a television guidance system as part of the protection system of armored combat vehicles. The objective of the study is to develop an analytical framework that enables the justification of the parameters of a laser countermeasure system required to ensure the disruption of the guidance process. To achieve this objective, the following tasks were addressed: formalization of the system operating conditions "armored combat vehicle with a laser countermeasure system – a weapon system with a television guidance system"; identification of a set of interrelated input and output parameters that determine the requirements for the laser countermeasure system; and establishment of an analytical relationship between the spatial and energy characteristics of the laser beam, the parameters of the aiming and stabilization system, the relative geometry between the interacting objects, atmospheric conditions, the characteristics of the receiving optical system, and the quantitative indicators of photoelectric and thermal processes in the optical sensor.

Based on the generalized description of the interaction between laser radiation and the television camera of a weapon system, analytical relationships were obtained for determining the energy delivered to the sensor, the number of generated electrons, and the thermal energy in the photosensitive layer. The proposed relationships form the computational core of the methodology and enable the transition from formalized operating conditions to the

justification of rational energy parameters of the laser countermeasure system and to the quantitative assessment of the feasibility of its integration into the protection system of armored combat vehicles.

Keywords: *armament and military equipment, armored combat vehicle, survivability, protection system, laser radiation, weapon systems, unmanned aerial vehicle, television guidance system.*

Відомості про автора:

Карпенко Олександр Сергійович

ад'юнк

Центральний науково-дослідний інститут озброєння

та військової техніки Збройних Сил України

м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-7655-4363>

e-mail: karpo.tank@ukr.net

Information about the author:

Karpenko Oleksandr

PhD Candidate

Central Scientific Research Institute of Armament and

Military Equipment

of Armed Forces of Ukraine.

Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-7655-4363>

e-mail: karpo.tank@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 04.02.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.