

DOI: 10.20535/1970.69(1).2025.331801

УДК 623.438:623.746-519

МЕТОДИКА ВРАХУВАННЯ ПОХИБОК ПРИЦІЛУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЖИВУЧОСТІ БОЙОВОЇ МАШИНИ¹⁾Баган В. Р., ²⁾Микитенко В. І.¹⁾Науковий центр Сухопутних військ Національної академії Сухопутних військ ім. Гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна²⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: volodymyrbagan@gmail.com, v.mykytenko@kpi.ua

Стаття присвячена підвищенню надійності та точності прицілювання озброєння, встановленого на борту бойової машини та оснащеного автоматизованими засобами обчислення положення прицільної марки, що формується з використанням колімаційного прицілу. Для забезпечення надійності конструкція прицілу має бути максимально простою і не містити складних об'єктивів. Найкращими варіантами в такій ситуації є використання об'єктивів на базі дублетів або товстої одиночної лінзи. При цьому відомі способи стрільби бойової машини не враховують того факту, що комп'ютерно-інтегрованому колімаційному прицільному пристрою притаманні похибки формування лінії візування, обумовлені остаточною абераціями об'єктиву. Це призводить до того, що при довільному положенні ока в межах вихідної зіниці прицільного пристрою в процесі спостереження прицільної мітки на кутах візування її колімоване зображення змінює кутове положення відносно віддаленої цілі. В типових умовах роботи на дальності 1000 м промах може досягати 10 м.

Метою роботи є розроблення алгоритмів врахування паралактичних похибок, які виникають в коліматорних прицілах на базі об'єктиву-дублету або товстої одиночної лінзи при обчисленні положення лінії візування. Показані особливості формування зображень в прицілі і джерела виникнення паралаксу. На основі теорії формування зображення в таких оптичних системах запропоновано два варіанти виключення похибок прицілювання. Перший варіант передбачає формування в полі зору оператора зображення миттєвого поля зору оптичної системи у вигляді кола діаметром, розрахованим за розробленою методикою. За другим варіантом конструкція прицілу має передбачати примусове розміщення центру зіниці ока оператора в розрахованій безабераційній точці. Обидва рішення дозволяють повністю усунути паралактичну похибку прицілювання.

Ключові слова: бойова машина; живучість; комп'ютерно-інтегрований прицільний пристрій; паралактична похибка; лінія візування.

Вступ

Як показує досвід російсько-української війни, бойові машини (БМ) залишаються одним з основних засобів забезпечення ведення наземних бойових дій [1, 2]. Але з'явилась нова потужна технологія ураження БМ з використанням безпілотних літальних апаратів – багаторазових і одноразових (дронів-камікадзе) [3 - 5]. Продовжуються активні зусилля розробників щодо зниження помітності БМ засобами спостереження [6], але все ж таки найбільш дієвим засобом протидії повітряним загрозам залишається її знищення членом екіпажу БМ. Більшість відомих способів стрільби бойової машини по рухомій цілі містить операцію автоматизованого формування зображення прицільної мітки на куті упередження цілі [7 - 9]. При цьому враховуються поправки на рух цілі і носія, час польоту $t_{\text{пол}}$, дальність стрільби $D_{\text{стр}}$, балістичні поправки: кут прицілювання α , деривація $\beta_{\text{дер}}$, поправки на швидкість бокового W_z і повздовжнього W_x балістичного вітру, на паралакс зброї і прицілу тощо, а також на суміщення прицільної мітки з

ціллю і стрільбу. Реалізація цих способів передбачає використання комп'ютерно-інтегрованих оптико-електронних колімаційних прицільних пристроїв (КПП) з матричним формувачем зображення прицільної інформації. Для забезпечення високої надійності КПП має бути біноклярним найпростішої конструкції. Таким вимогам задовольняє, наприклад, конструктивне рішення з об'єктивом у вигляді тонкого дублету, в фокальній площині якого встановлено дисплей з блоком керування [8, 10]. В цьому разі оператор одним оком спостерігає колімоване зображення, сформоване на дисплеї, а другим оком – оточуючий простір з ціллю. Суміщення двох зображень відбувається автоматично в мозку людини. Поле зору КПП має дорівнювати діапазону кутів упередження цілі 2ψ , який визначається залежністю [8]:

$$2\psi = 2000V_u \sin q / V_{\text{к.сер}}, \text{ мрад} \quad (1)$$

де V_u – швидкість цілі, q – курсовий кут (ракурс) цілі, $V_{\text{к.сер}}$ – середня швидкість боєприпасів, що застосовуються.

Згідно з (1) максимальне значення поля зору $2\psi^{max}$ має місце при $q = 90^\circ$. Наприклад, при стрільбі з АКМ на дальність 760 м ($V_{к.сер} = 414$ м/с) по дрону-камікадзе «Шахед-136» ($V_{ц} = 45$ м/с) поле зору КПП по горизонталі $2\psi_r^{max}$ має бути не менше 218 мрад ($12,5^\circ$). При стандартному форматі дисплею 3:4 вертикальна складова поля зору КПП $2\psi_v^{max}$ має бути не менше 163,5 мрад ($9,4^\circ$). Тобто сумарне поле зору КПП $2\psi^{max} \geq 15,64^\circ$ (272,5 мрад). При збільшенні швидкості цілі поле зору відповідно зростатиме.

Постановка задачі

Попри суттєву перевагу в експлуатаційних характеристиках використання об'єктива у вигляді тонкого дублету в задачах прицілювання призводить до зниження точності. Особливістю тонкого дублету є принципово непереборний астигматизм і пов'язана з ним кривизна поверхні зображення: третя сума Зейделя $S_{III} = 1$, четверта - $S_{IV} \approx 0,67$ [11]. Із врахуванням цього координати відхилення меридіональної x'_m та сагітальної x'_s складових фокальної поверхні від Гаусової площини, в якій розміщується дисплей, при нормованому значенні фокусної відстані об'єктива $f' = 1$, визначаються відомими формулами [12]:

$$x'_m = -0,5tg^2\psi(3S_{III} + S_{IV}) = -1,835tg^2\psi; \quad (2)$$

$$x'_s = -0,5tg^2\psi(S_{III} + S_{IV}) = -0,835tg^2\psi, \quad (3)$$

де ψ – кут візування прицільної мітки.

Тоді при $2\psi^{max} = 272,5$ мрад згідно (2) і (3) маємо: $x'_m = -0,034$, $x'_s = -0,0155$ умовних одиниць.

Якщо врахувати, що дисплей має пласку поверхню формування зображення, то x'_m і x'_s обумовлюють наявність паралактичної похибки лінії візування при довільному положенні ока в межах вихідної зіниці КПП. Тобто при переміщенні ока в межах вихідної зіниці КПП при спостереженні прицільної мітки її колімоване зображення змінює видиме кутове положення відносно віддаленої цілі. Це призводить до того, що суміщення прицільної мітки з ціллю відбувається з похибкою, яка є еквівалентною паралактичній похибці. Така неточність прицілювання у підсумку зменшує живучість бойової машини.

Мета даної статті полягає у розробленні методики врахування паралактичної похибки при прицілюванні задля підвищення живучості бойової машини.

Методика врахування паралактичної похибки

На рис. 1 зображена схема формування лінії візування в КПП за наявності меридіональної складової паралактичної похибки.

Лінія візування в КПП за наявності сагітальної складової паралактичної похибки формується аналогічно.

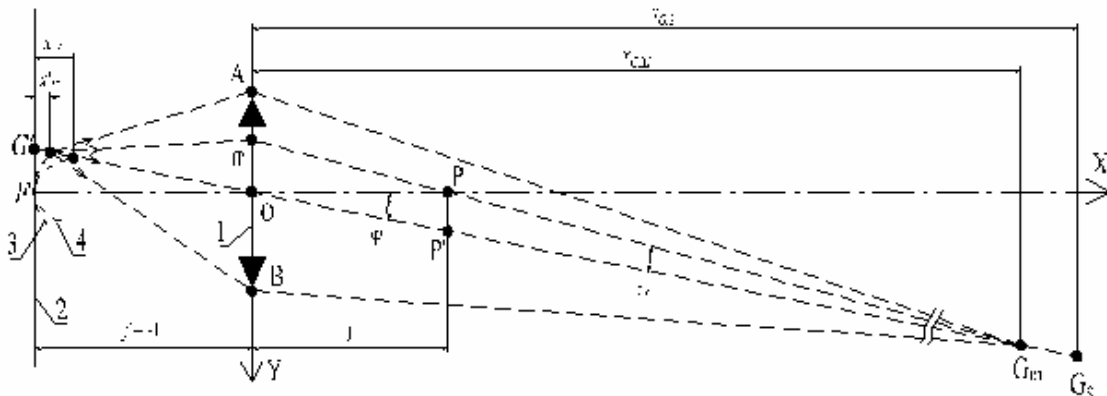


Рис. 1. Схема формування лінії візування: 1 – об'єктив, передній фокус якого позначено як F ; 2 – площина розміщення дисплея; 3 – меридіональна складова фокальної поверхні; 4 – сагітальна складова фокальної поверхні; O – центр вихідної зіниці; P – точка, в якій знаходиться око оператора при прицілюванні

При відомій відстані l ока оператора від вихідної зіниці об'єктива 1, для того, щоб поле зору КПП спостерігалось повністю, діаметр вихідної зіниці $D = |AB|$ при проектуванні розраховують за формулою

$$D = 2ltg\psi^{max}. \quad (4)$$

При колімації центральної точки прицільної марки на довільному куті візування ψ (на дисплеї 2 позначена як G') за наявності астигматизму координати її зображення в меридіональній G_m і сагітальній G_s площинах визначаються залежностями:

динати її зображення в меридіональній G_m і сагітальній G_s площинах визначаються залежностями:

$$x_{G,m(s)} = 1 + 1/x'_{m(s)}; \quad y_{G,m(s)} = x_{G,m(s)}tg\psi \cdot (5)$$

В такому разі, згідно схеми на рис. 1 меридіональна ρ_m і сагітальна ρ_s складові паралактичної похибки визначаються залежністю:

$$\rho_{m(s)} = \arctg[(y_{G,m(s)} + m)/(1 + x_{G,m(s)})] - \psi, \quad (6)$$

де m – висота перетину лінії візування з вихідною зіницею об'єктива.

Для наведеного вище прикладу ($f' = 1$, а $2\psi^{max} = 272,5$ мрад) і $l \approx 2$ із (4) отримуємо $m = D/2 = 0,2725$. Згідно (5) маємо: $x_{G,m} = 29,4$; $x_{G,s} = 64,5$; $y_{G,m} = 4,142$; $y_{G,s} = 8,924$. Згідно (6) максимальні значення складових паралактичної похибки становлять: $\rho_m = 9$ мрад, $\rho_s = 4,2$ мрад. Отже сумарна паралактична похибка може сягати 10 мрад. На дальності 1000 м, якщо похибку не враховувати, промах становитиме 10 м, що звісно не є прийнятним для ураження малорозмірної цілі.

На нашу думку, можливі два підходи до врахування паралактичної похибки.

Перший підхід. Як видно з рис. 1, головний промінь $G'OP'$ пучка променів (показаний пунктиром), що виходять колінеарними з об'єктиву у вигляді тонкого дублету 1, не має паралактичної похибки. Відстань $|PP'| = t$ цього променю від точки P становить $t = l \tan \psi$.

Отже задача проектувальника зводиться до того, як допомогти оператору швидко знайти цю точку P' . Це можна зробити, якщо відобразити в полі зору оператора миттєве поле зору з точки P' .

Миттєве поле зору (рис. 2) формується крайніми променями $P'A$ і $P'B$.

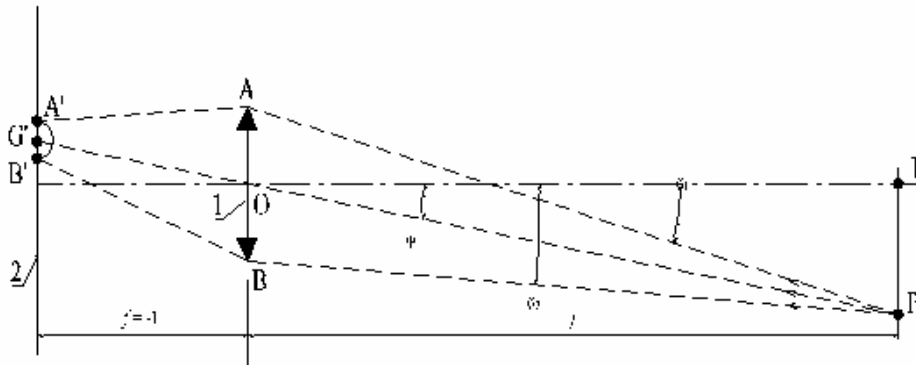


Рис. 2. Схема формування зображення миттєвого поля зору: 1 – об'єктив, 2 – площина розміщення дисплею

Промінь $P'A$ нахилений до оптичної осі на кут $\varphi_1 = \arctg[(D/2 + t)/l]$, а промінь $P'B$ нахилений до оптичної осі на кут $\varphi_2 = \arctg[(D/2 - t)/l]$. Якщо D визначається формулою (4), то $\varphi_1 = \arctg(\tan \psi^{max} + \tan \psi)$, $\varphi_2 = \arctg(\tan \psi^{max} - \tan \psi)$, і в фокальній площині об'єктиву цим променям відповідають точки A' і B' з координатами $y_{A'} = \tan \psi^{max} + \tan \psi$, $y_{B'} = \tan \psi^{max} - \tan \psi$. Тоді миттєве поле зору відображається у фокальній площині колом діаметру $(y_{A'} - y_{B'}) = 2 \tan \psi$ з центром в точці G' . За-

уважимо, що при малому значенні кута ψ кутовий розмір миттєвого поля зору знаходиться за спрощеною формулою $(\varphi_1 - \varphi_2) \approx (D \cos \psi)/l$.

Дещо інакше визначаються координати точок A' і B' , якщо об'єктив 1 виконано у вигляді лінзи завтовшки d [13] (рис. 3). Такий об'єктив не має повітряних проміжків і характеризується підвищеною надійністю у жорстких умовах експлуатації бойової машини.

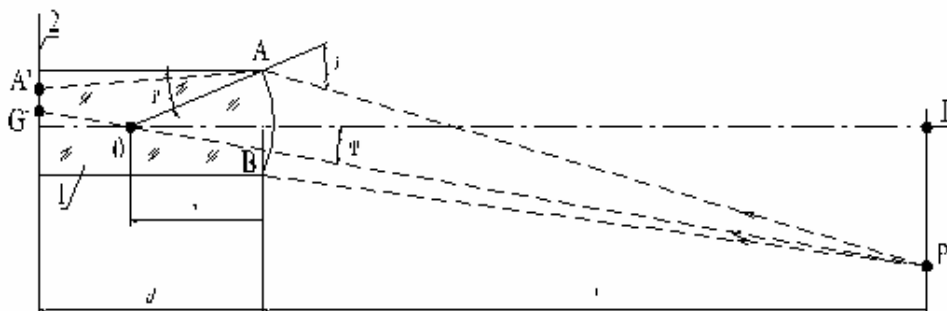


Рис. 3. Схема формування зображення миттєвого поля зору: 1 – товста лінза, 2 – площина розміщення дисплею

Як видно з рис. 3, головний промінь $G'OP'$ (показаний пунктиром) пучка променів, що виходять колінеарними з об'єктиву у вигляді товстої плоско-опуклої лінзи 1 під кутом ψ , не матиме паралактичної похибки, якщо точка O є центром кривизни заломлюючої поверхні лінзи.

Відстань $|PP'| = t$ цього променю від точки P становить $t = (l + r) \tan \psi$, де r – радіус кривизни опуклої поверхні. При нормованому значенні фокусної відстані лінзи $f' = 1$ радіус дорівнює $r = (n - 1)$, де n – показник заломлення матеріалу лінзи.

Миттєве поле зору (рис. 3) формується крайніми променями $P'A$ і $P'B$. В площині 2 променю $P'A$ відповідає точка A' з координатою

$$y_{A'} \approx D/2 - dtg(\varphi - i'), \quad (7)$$

де допоміжні кути φ і i' визначаються формулами

$$\varphi = \arcsin(D/2r);$$

$$i' = \arcsin[(\sin i)/n],$$

де $i = \varphi + \arctg[(t+d/2)/l]$.

З урахуванням (7), радіус кола з центром в точці G' , що відповідає миттєвому полю зору з точки P' , знаходиться за формулою

$$|G'A'| = y_{A'} - (d-r)tg\psi.$$

В обох випадках, при спостереженні прицільної марки з точки P оператор бачить її центральну точку G' і частину кола. Інтуїтивно оператор переміщує око, щоб побачити коло цілком. Таким чином око оператора переміщується в точку P' , де паралактична похибка відсутня.

Другий підхід. Центр зіниці ока оператора постійно знаходиться в точці P . Це можна забезпечити, наприклад, за допомогою використання начника. Тоді при відомому значенні кута ψ бортовий комп'ютер розраховує висоту перетину лінії візування з вихідною зіницею об'єктиву за формулою $m = ltg\psi$.

Далі при відомих характеристиках КПП (фокусній відстані, діаметрі об'єктиву та полі зору) бортовий комп'ютер розраховує складові паралактичної похибки за формулами (2), (3), (5) та (6) і враховує їх при наведенні зброї.

Приклади реалізація методики

В процесі реалізації класичного способу стрільби бойової машини, що передбачає виявлення, розпізнавання і супроводження цілі, визначення швидкості зближення цілі з бойовою машиною, обчислення абсолютної початкової швидкості боеприпасів, часу польоту і дальності упередження, визначення кутових поправок стрільби: кут прицілювання ψ і кут деривації β_0 , а також поправки на швидкість бокового W_z і повздовжнього W_x балістичного вітру, на паралакс прицілу і зброї, додатково визначають паралактичні похибки прицілу для поточного положення ока оператора. Після цих обчислень сумують усі поправки і паралактичні похибки по горизонтальному і вертикальному каналах з врахуванням кута нахилу та відхиляють стволи кулеметів відносно лінії візування з врахування цих поправок і виконують стрільбу.

При реалізації способу стрільби бойової машини по повітряній цілі з використанням турельної кулеметної установки передбачається приведення турельної кулеметної установки у бойову готовність шляхом нівелювання вертикальної осі її обертання, виявлення та розпізнавання цілі, визначення азимуту β_1 і кута місця α_1 цілі, а також ви-

значення дальності D_1 за допомогою лазерного далекоміру. Через певний час t після визначення параметрів β_1 , α_1 , D_1 виконують повторне визначення азимуту β_2 і кута місця цілі α_2 , а також дальності до неї D_2 за допомогою лазерного далекоміру. Час t встановлюється шляхом запуску лічильника часу сигналом лазерного далекоміру в момент визначення D_1 і зупинки лічильника часу сигналом лазерного далекоміру в момент визначення D_2 , а швидкість V_u і ракурс q цілі знаходять з математичних виразів:

$$V_u = s/t,$$

$$q = 180^\circ - \arccos((D_2^2 + s^2 - D_1^2)/2sD_2),$$

де

$$s = [(D_1 \cos \alpha_1)^2 + (D_2 \cos \alpha_2)^2 - 2D_1 D_2 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos(\beta_2 - \beta_1)]^{1/2}.$$

Після цього в бортовий процесор вводиться швидкість V_u і ракурс q розпізнаної цілі. Знаходиться кут упередження цілі за формулою

$$\psi = 1000(V_u/V_0) \sin q, \text{ мрад},$$

де V_0 – середня швидкість застосованих боеприпасів.

Далі цей кут відображається на дисплеї КПП у вигляді прицільної точки і додатково навколо цієї точки формується зображення кола діаметром $(D \cos \psi)/l$. Оператор зміщує око в положення, при якому коло спостерігається повністю, суміщає зображення прицільної точки з ціллю і відкриває стрільбу.

Висновки

1. Підвищення надійності комп'ютерно-інтегрованих оптико-електронних колімаційних прицільних пристроїв бойової машини можливе шляхом використання в них об'єктивів у вигляді тонкого дублету або товстої лінзи. Але таке рішення призводить до появи похибки прицілювання внаслідок паралаксу. Розроблена методика визначення і виключення цієї паралактичної похибки при розрахунках положення зброї.

2. Впровадження розробленої методики збільшить живучість бойової машини завдяки підвищенню точності стрільби по малогабаритним цілям.

3. Подальші дослідження доцільно спрямувати на пошук шляхів підвищення ймовірнісних характеристик цілодобового виявлення цілей.

Література

- [1] Combat vehicles. The Brithish Army. [Online]. Available: <https://www.army.mod.uk/learn-and-explore/equipment/combat-vehicles>
- [2] Lynx – The New-gen Combat Vehicle. [Online]. Available: <https://www.rheinmetall.com/en/products/tracked-vehicles/tracked-armoured-vehicles/lynx-infantry-fighting-vehicle>

- [3] S. Daley, What is a drone? Built In. [Online]. Available: <https://builtin.com/drones>
- [4] Grigore, Laurențiu & Cristescu, Cristian. "The Use of Drones in Tactical Military Operations in the Integrated and Cybernetic Battlefield", *Land Forces Academy Review*, vol. 29, no. 2, pp. 269-273, 2024. DOI: 10.2478/raft-2024-0029.
- [5] D. Kunertova, "The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game", *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 79, is. 2, pp. 95–102, 2023. DOI: 10.1080/00963402.2023.2178180
- [6] Kent E. Andersson, "Key requirements in the procurement of future low observable combat vehicles: A European perspective", *Systems Engineering*, vol. 21, is. 1, 2017. DOI: 10.1002/sys.21410.
- [7] В. Р. Баган, В. В. Костюк, О. М. Купріненко та ін., «Науково-методичний підхід визначення ступеня небезпеки повітряної цілі розрахунком бойової машини з турельною кулеметною установкою», *Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОБТ*, вип. 3(21), с. 14-22, 2024. DOI: 10.37701/dndivsovt.21.2024.02.
- [8] В. М. Сенаторов, А. В. Гурнович, Б. О. Мельник та ін., "Застосування стрілецької зброї для знищення дрона-камікадзе «Шахед-136»", *Наука і оборона*, № 4, с. 41-47, 2023. DOI: 10.33099/2618-1614-2023-23-4-41-47.
- [9] В. І. Микитенко, В. М. Сенаторов, О. Д. Мельник, *Оптичні системи наземних роботизованих комплексів*. Монографія. Київ. Україна: Інтерсервіс, 2023.
- [10] R. Kingslake, R. B. Johnson, *Lens Design Fundamentals*. Second Edition. Elsevier Inc. 2010.
- [11] І. Г. Чиж, *Теорія оптичних систем: підручник*. Київ, Україна: Вид-во «Політехніка», 2021.
- [12] В. Н. Сенаторов, «Повышение точности сканирования зеркалом в пространстве изображений», *Оптико-механическая промышленность*, № 5, с. 60-61, 1988.
- [13] Н. В. Сенаторов, В. И. Микитенко, «Сопоставительный анализ оптических схем коллиматорных прицелов», *Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник*, вып. 7, с. 11-19, 2003.

UDC 623.438:623.746-519

Volodymyr Bagan, Volodymyr Mykytenko*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***ACCOUNTING METHODOLOGY OF THE SIGHT ERRORS FOR COMBAT VEHICLE SURVIVABILITY INCREASING**

The article is devoted to increasing the reliability and accuracy of aiming weapons installed on board a combat vehicle and equipped with automated means of calculating the position of the aiming mark, which is formed using a collimation sight. To ensure reliability, the sight design should be as simple as possible and not contain complex lenses. The best options in such a situation are the use of lenses based on doublets or a thick single lens. At the same time, the known methods of firing a combat vehicle do not take into account the fact that the computer-integrated collimation sighting device is inherent in errors in the formation of the sighting line, due to the final aberrations of the lens. This leads to the fact that with an arbitrary position of the eye within the exit pupil of the sighting device during the observation of the aiming mark at the angles of sighting, its collimated image changes its angular position relative to the distant target. Under typical operating conditions at a range of 1000 m, the miss can reach 10 m.

The aim of the work is to develop algorithms for taking into account parallax errors that arise in collimator sights based on a doublet lens or a thick single lens when calculating the position of the sighting line. The features of image formation in the sight and the sources of parallax are shown. Based on the theory of image formation in such optical systems, two options for eliminating sighting errors are proposed. The first option involves the formation in the operator's field of view of an image of the instantaneous field of view of the optical system in the form of a circle with a diameter calculated using the developed method. According to the second option, the design of the sight should provide for the forced placement of the center of the operator's pupil in the calculated aberration-free point. Both solutions allow for the complete elimination of the parallax sighting error.

Keywords: combat vehicle; survivability; computer-integrated sighting device; parallax error; sighting line*Надійшла до редакції
21 лютого 2025 року**Рецензовано
28 березня 2025 року*

© 2025 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).