

МЕТОДИЧНА ПОХИБКА ПЕЛЕНГУВАННЯ ЦІЛІ СИСТЕМОЮ ЗВУКОВОЇ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ РОЗВІДКИ

METHODICAL ERROR OF TARGETS BEARING BY SOUND ARTILLERY INTELLIGENCE SYSTEM

*Кочан Р. В., д-р техн. наук, проф., Трембач Б. Р., аспір.,
Кочан О. В., канд. техн. наук, доц.
Національний університет "Львівська політехніка", Україна*

*Roman Kochan, Dr. Sc., Prof., Bohdan Trembach, Assistant, Orest Kochan, Ph. D., As.-Prof.
Lviv Polytechnic National University, Ukraine; e-mail:*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.010>

Анотація. Проаналізовано методику використання звукометричних комплексів, які прийняли на озброєння Збройні сили України. З використанням геометричної моделі акустичної бази показано природу виникнення методичної похибки вимірювання кута напрямку (пеленгу) на ціль за допомогою звукометричних станцій та виведено математичну залежність, що її описує. Під час аналізу залежності методичної похибки пеленгування цілі від її координат та просторової орієнтації акустичної бази виявлено граничні мінімальні значення відношення координати цілі до довжини акустичної бази, за яких забезпечується домінування інструментальної похибки звукометричних станцій над методичною похибкою. Отримані результати дають змогу здійснити оцінку методичної похибки пеленгування цілей під час звукової артилерійської розвідки.

Ключові слова: звукова артилерійська розвідка, методична похибка, похибка лінеаризації.

Abstract. The analysis of implementation methodology of sound metric stations AZK-5 and AZK-7, which are adopted by the Armed Forces of Ukraine and some other countries, shows that this methodology provides an approximation of the second-order curve – hyperbola, which describes the location of the target by its asymptotic rays. This approximation provides simplification of algebraic and geodesic computing. Nevertheless, it causes the emergence of methodology error of target bearing process.

The implementation of the geometrical model for acoustic base description provides the development of a mathematical model, which analytically describes the mentioned above error. Analysis of this mathematical model of methodic error envisages that its value can significantly exceed an instrumental error of involved sound metric stations if the distance to the target slightly exceeds the distance between sound receivers. The correction of this error is not provided by active methodology of sound metric station implementation. Also, analysis of error shows that it is systematical. Therefore, measurement of the target coordinates and counter-battery fire correction by the same sound metric stations provides significantly decreasing its influence on target hitting.

However, this error complicates the compatibility of measurement results both with other sound metric stations and with other types of intelligence. Providing the compatibility of measurement results by sound metric stations with other stations and other types of intelligence demands the correction of the error of measurement method for the distances to the target less than 6–7 lengths of acoustic base or implementation of other, most exact methods of angle computation.

Key words: Artillery sound intelligence, Methodic error, Linearization error.

Вступ

Звукова артилерійська розвідка є видом інформаційного забезпечення артилерійських підрозділів Збройних сил України (ЗСУ). Її завдання – визначення координат місцезнаходження цілей за звуком їхніх пострілів чи вибухів. Цілями можуть бути як засоби артилерії противника, що використовується для цілевказання своїм засобам протидії, так і місця фактичного влучення снарядів і мін, що використовують для коригування вогню цих засобів протидії [1]. Засобами, прийнятими на озброєння ЗСУ, що реалізують звукову артилерійську розвідку, є звукометричні комплекси АЗК-7 “Мезотрон” [2] та АЗК-5 “Тембр” [3]. Ці станції розроблені в 70-ті роки ХХ ст., вони ґрунтуються на аналоговій дискретній елементній базі й, здебільшого, вичер-

пали свій технічний ресурс. Як наслідок, на початку антитерористичної операції на Сході України стан технічної готовності цих комплексів не давав змогу ефективно проводити звукову артилерійську розвідку [4, 5]. Сьогодні ці комплекси здебільшого відновлено [6], але їхні характеристики, зумовлені напівавтоматичним режимом обміну даними та розрахунком координат цілі, не відповідають сучасним вимогам. Крім того, доведено ефективність методів звукової артилерійської розвідки для вирішення загальновійськових завдань, наприклад контрснайперської боротьби [7], що істотно розширює коло споживачів розвідувальної інформації, збільшує вимоги до площі покриття такими засобами за умови меншої потужності джерел акустичних сигналів, що актуалізує розроблення ефективних засобів звукової артилерійської розвідки.

Мета роботи

Мета роботи – пошук способів мінімізації методичної похибки під час вимірювання кута напрямку на ціль у системах звукової артилерійської розвідки в результаті аналізу джерел її виникнення.

1. Визначення методичної похибки пеленгації цілі

АБ складається із двох звукоприймачів, розміщених на деякій відстані між собою, які здійснюють моніторинг акустичних хвиль навколишнього середовища. Принцип роботи АБ схематично відображено на рис. 1 [1]. В точках А та В розташовані звукоприймачі, довжину відрізка АВ називають довжиною акустичної бази – L . Нехай в точці D розміщена ціль. Тоді від цієї точки у всіх напрямках поширюється звукова хвиля, фронт якої описує коло з центром у точці D. Швидкість поширення цієї хвилі дорівнює швидкості поширення звуку в повітрі. Тоді справджується співвідношення

$$\begin{cases} DB = V \times t_{DB} \\ DA = V \times t_{DA} \end{cases}, \quad (1)$$

де V – швидкість поширення звуку в повітрі, t_{DA} та t_{DB} – часи проходження акустичними хвилями відстані DB та DA відповідно.

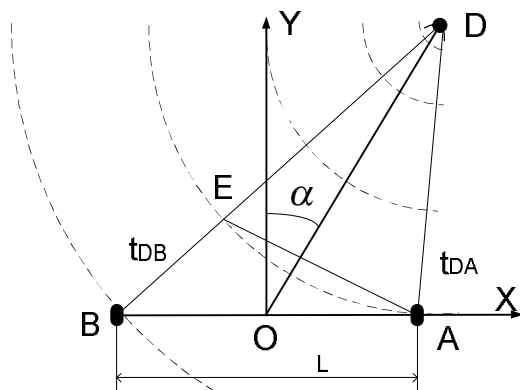


Рис. 1. Схема розташування елементів акустичної бази

Fig. 1. Schematic layout of the elements of the acoustic base

Якщо розмістити точку E на відрізку DB так, що $DE = DA$, тобто фронт звукової хвилі одночасно досягає точок A та E, то різниця часу Δ_t проходження фронту звукової хвилі відрізків DB та DA становить $\Delta_t = t_{DB} - t_{DA} = t_{EB}$ (t_{EB} – час проходження акустичними хвилями відстані EB). Її можна виміряти, запустивши таймер в момент реєстрації фронту звукової хвилі цілі в точці A і зупинити в момент реєстрації в точці B. Тоді точка D

належить гіперболі (рис. 2) [10], у фокусах якої розташовані звукоприймачі, а різниця віддалей до фокусів від будь-якої точки – довжина відрізка BE. Якщо побудувати декартову систему координат так, що вісь OX проходить через звукоприймачі, а початок координат – посередині відрізка AB, то рівняння цієї гіперболи можна записати так

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

де x та y – координати точок гіперболи, a та b – дійсна велика та уявна мала півосі гіперболи відповідно.

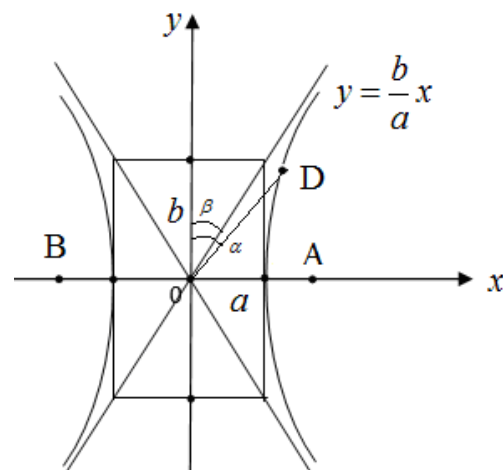


Рис. 2. Гіперболи, яким належить місце розміщення цілі

Fig. 2. Hyperbolas that are responsible for the target's location

При цьому справджується співвідношення [10]

$$a^2 + b^2 = c^2, \quad (3)$$

де $2c$ – відстань між фокусами гіперболи.

У поданій на рис. 1 геометричній моделі акустичної бази справджується співвідношення:

$$\begin{cases} 2a = V \times \Delta_t \\ 2c = L \end{cases}, \quad (4)$$

де L – довжина акустичної бази.

Підставивши (3) та (4) в (2) та спростивши, отримаємо:

$$\frac{x^2}{(V \times \Delta_t)^2} - \frac{y^2}{L^2 - (V \times \Delta_t)^2} = 4. \quad (5)$$

Звівши до традиційного представлення функції, отримаємо:

$$y = \pm \sqrt{\left(\frac{x^2}{(V \times \Delta_t)^2} - 4 \right) \times (L^2 - (V \times \Delta_t)^2)}. \quad (6)$$

Дійсний кут α напрямку на ціль – кут між віссю OY та відрізком OD – можна розрахувати як:

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg}(\alpha) &= \frac{y}{x} = \pm \frac{1}{x} \sqrt{\left(\frac{x^2}{(V \times \Delta_t)^2} - 4 \right) \times \left(L^2 - (V \times \Delta_t)^2 \right)} = \\ &= \pm \sqrt{\left(\frac{1}{(V \times \Delta_t)^2} - \frac{4}{x^2} \right) \times \left(L^2 - (V \times \Delta_t)^2 \right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Методика розрахунку кута напрямку на ціль, подана в [1, 20], передбачає апроксимацію гіперболи її асимптотами і розрахунок вимірюваного кута напрямку на ціль β як:

$$\operatorname{ctg}(\beta) = \frac{b}{a} = \pm \sqrt{\frac{L^2 - (V \times \Delta_t)^2}{(V \times \Delta_t)^2}} = \pm \sqrt{\left(\frac{L}{V \times \Delta_t} \right)^2 - 1}. \quad (8)$$

Тоді методична похибка вимірювання кута напрямку на ціль Δ_M дорівнює:

$$\Delta_M = \alpha - \beta. \quad (9)$$

Її можна розрахувати, використовуючи елементарні тригонометричні перетворення:

$$\operatorname{ctg}(\Delta_M) = \frac{\operatorname{ctg}(\alpha) \times \operatorname{ctg}(\beta) + 1}{\operatorname{ctg}(\beta) - \operatorname{ctg}(\alpha)}. \quad (10)$$

Підставивши (7) та (8) у (10) та спростивши, одержимо:

$$\begin{cases} (V \times \Delta_t)^2 = \frac{L^2}{\operatorname{ctg}^2(\beta) + 1} \\ \operatorname{ctg}(\Delta_M) = \frac{1 + \operatorname{ctg}(\beta) \times \sqrt{\left(\operatorname{ctg}^2(\beta) + 1 - \frac{4 \times L^2}{x^2} \right) \times \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ctg}^2(\beta) + 1} \right)}}{\operatorname{ctg}(\beta) - \sqrt{\left(\operatorname{ctg}^2(\beta) + 1 - \frac{4 \times L^2}{x^2} \right) \times \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ctg}^2(\beta) + 1} \right)}} \end{cases} \quad (11)$$

Графік залежності похибки Δ_M від β та $\frac{x}{L}$ для $\beta \in [0^\circ, 90^\circ]$ та $\frac{x}{L} \in [2, 5]$ подано на рис. 3. Об-

ласть визначення цієї функції $\beta \in [-180^\circ, 180^\circ]$,

$\frac{x}{L} \in \left[\frac{V \times \Delta_t}{L}, \infty \right)$. Надалі розглядаємо лише перший квадрант графіка гіперболи, оскільки значення Δ_M для $\beta \in [-90^\circ, 0^\circ]$ дорівнюють значенням першого квадранта з від'ємним знаком, а значення для $\beta \in [90^\circ, 270^\circ]$ повторюють значення $\beta \in [-90^\circ, 90^\circ]$. Максимальне значення методичної

похибки досягається за мінімальних значень $\frac{x}{L}$, а зі

збільшенням $\frac{x}{L}$ похибка монотонно зменшується і асимптотично прямує до нуля. Максимальне значення методичної похибки для фіксованого відношення досягається для $\beta = 62^\circ$. Перерізи графіка, наведеного на рис. 3 по осях максимального значення методичної похибки, подано на рис. 4 та 5. Рис. 4 – залежність Δ_M від β для $\frac{x}{L} = 2$, а рис. 5 –

залежність максимального значення Δ_M від $\frac{x}{L}$ для

$\beta = 62^\circ$. Як видно з графіка, апроксимація гіперболи її асимптотами призводить до появи значної методичної похибки. Ця похибка домінує над інструментальною похибкою звукометричних комплексів АЗК-5 та АЗК-7, яка становить 0.3° , коли відношення $\frac{x}{L}$ не перевищує 11 разів.

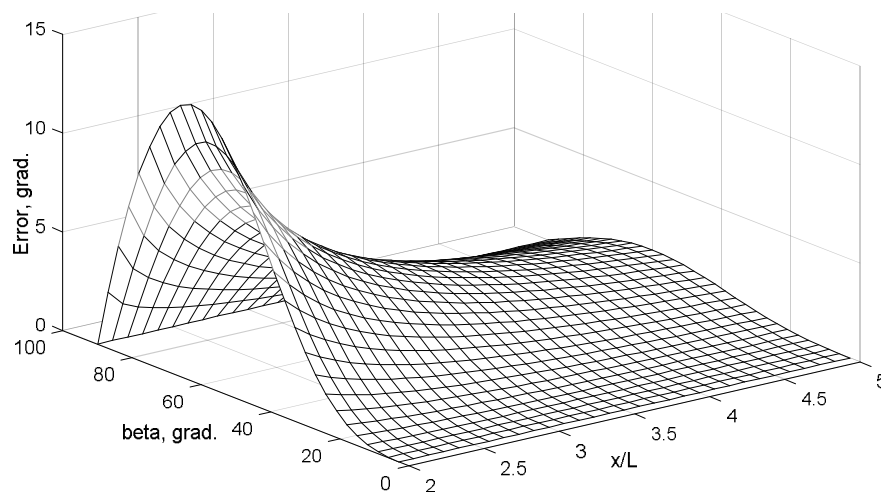


Рис. 3. Графік залежності методичної похибки кута напрямку на ціль від β та $\frac{x}{L}$

Fig. 3. The dependency graph of the methodical error of angle to the target from β and $\frac{x}{L}$

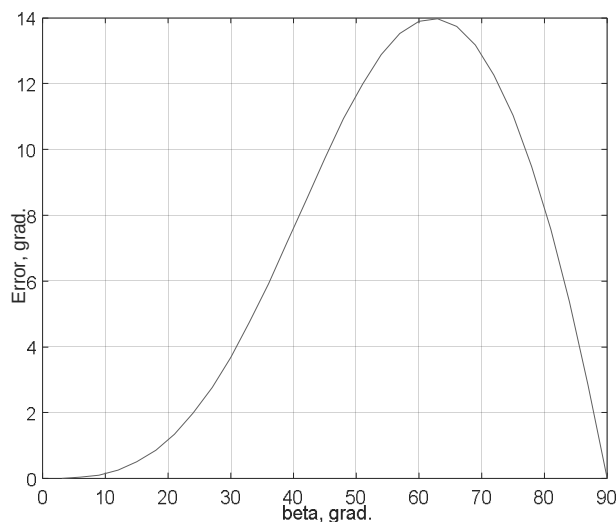


Рис. 4. Графік залежності Δ_M від β для $\frac{x}{L} = 2$

Fig. 4. The dependency graph of Δ_M from β for $\frac{x}{L} = 2$

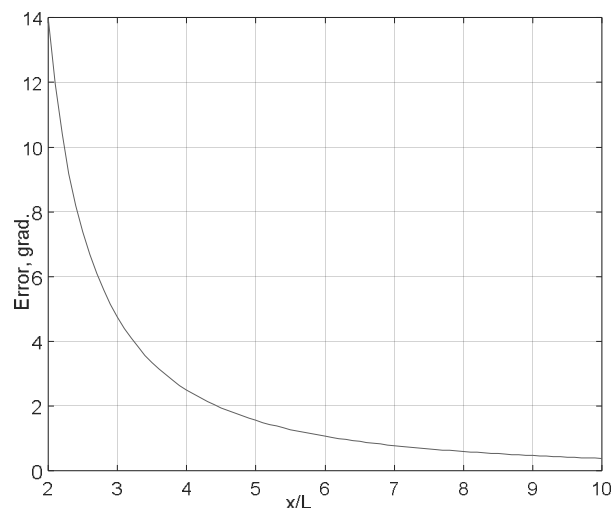


Рис. 5. Графік залежності Δ_M від $\frac{x}{L}$ для $\beta = 62^\circ$

Fig. 5. The dependency graph of Δ_M from $\frac{x}{L}$ for $\beta = 62^\circ$

Залежність відношення $\frac{x}{L}$ від кута напрямку цілі для випадку рівності методичної та інструментальної похибок для звукометричних комплексів АЗК-5 та АЗК-7 у полярній системі координат подано на рис. 6. Видно, що під час вимірювання кутів напрямку на ціль у межах $\pm 20^\circ$ та $160^\circ \dots 200^\circ$ методичною похибкою можна нехтувати для будь-яких відстаней до цілі. Під час вимірювання інших кутів методичною похибкою можна нехтувати, якщо відстань до цілі перевищує довжину акустичної бази не менше ніж у 11 разів.

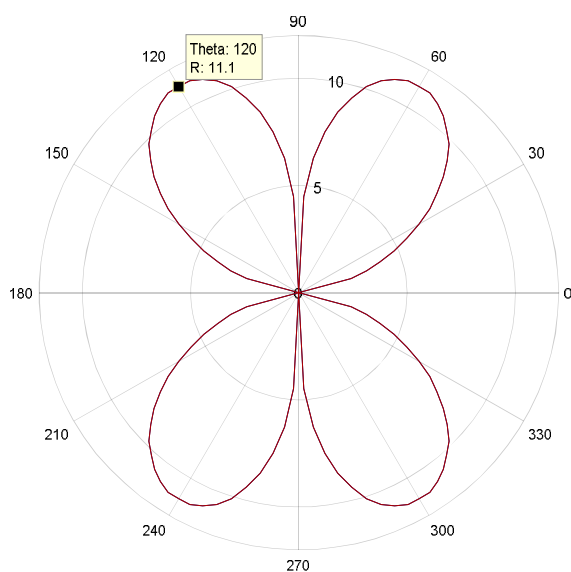


Рис. 6. Графік залежності $\frac{x}{L}$ від β для $\Delta_M = 0.3^\circ$

Fig. 6. The dependency graph of $\frac{x}{L}$ from β for $\Delta_M = 0.3^\circ$

2. Обговорення результатів

Оцінка або корекція методичної похибки вимірювання кута напрямку на ціль не передбачена чинною методикою використання звукометричних комплексів [1]. Методика її коригування, подана в [8], виводиться з використанням наближених обчислень і потребує дослідження її ефективності. Ця методична похибка є систематичною, тому під час вимірювання координат цілей та корекції вогню артилерії в разі їх ураження одним і тим самим звукометричним комплексом, її вплив нівелюється. Але наявність цієї методичної похибки ускладнює сумісність результатів вимірювання як з іншими звукометричними комплексами, так і з іншими видами розвідки. Для забезпечення єдності результатів вимірювання координат цілі засобами звукової артилерійської розвідки та їх сумісності з іншими видами розвідки необхідно здійснювати коригування методичної похибки для випадку, коли відношення відстані до цілі до довжини акустичної бази не перевищує 11 разів, або використовувати інші, точніші методи розрахунку кута напрямку на ціль. Використання спрощених методів розрахунку було доцільним, коли розробляли прийняті на озброєння звукометричні комплекси. Сучасні елементна база та засоби телекомунікації дають змогу автоматизувати вимірювальні та обчислювальні операції [11], які виконують, використовуючи звукометричні комплекси, зокрема: топографічну прив'язку, моніторинг акустичних сигналів, зв'язок між компонентами системи [12] та агрегацію даних із використанням довільних алгоритмів у реальному масштабі часу [13], а також їхнє перепрограмування із використанням робочих комунікаційних інтерфейсів, навіть під час експлуатації [14]. Вказані публікації, хоча і не

стосуються безпосередньо звукової артилерійської розвідки, відображають відповідні аспекти реалізації розподілених вимірювальних систем.

Висновки

Аналіз методики використання звукометричних комплексів типу АЗК-5 та АЗК-7, що сьогодні на озброєнні Збройних сил України та деяких інших країн, показав, що ця методика передбачає кусково-лінійну апроксимацію кривої другого порядку. Така апроксимація дає змогу спростити як арифметичні, так і геодезичні розрахунки, але призводить до появи методичної похибки вимірювання кута наряду на ціль. Аналіз цієї похибки засвідчив, що її значення можуть істотно перевищувати інструментальну похибку самих звукометричних комплексів, коли відстань до цілі приблизно дорівнює довжині акустичної бази.

Подяка

Автори висловлюють глибоку вдячність колективу кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Національного університету "Львівська політехніка" за допомогу в підготовці статті.

Конфлікт інтересів

Конфлікту інтересів під час написання, підготовки та опублікування статті не виникало.

Література

- [1] А. М. Кривошеєв, В. М. Петренко, А. І. Приходько, *Основи артилерійської розвідки*. Суми, Україна: Сумський держ. ун-т, 2014.
- [2] Р. І. Шуляченко, В. І. Кривоносенко, *Артиллерийская звуковая разведка*. Москва, Россия: Военное издательство, 1993.
- [3] П. Є. Трофименко, Ю. Г. Філіпенко, "Звукометричний станції розвідки – 100 років", *Вісник СумДУ, Серія "Технічні науки"*, вип. 3, 2009.
- [4] О. В. Устименко, "Перспективи щодо створення розвідувально-ударних комплексів на базі існуючих РСЗВ", у *мат. наук.-техн. конф. "Перспективи розвитку ракетних військ і артилерії Сухопутних військ"*, Україна, с. 203–206, 2014.
- [5] О. І. Петлюк, І. В. Петлюк, "Особливості застосування підрозділів артилерійської розвідки під час ведення бойових дій в ході АТО", у *мат. наук.-техн. конф. "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ"*, Україна, с. 114–115, 2015.
- [6] І. Махно, "Офіцер України", *Журнал академії сухопутних військ ім. Петра Сагайдачного*, вип. 6, 2014.
- [7] О. О. Фуртес, О. О. Погоцький, В. Б. Рій, "Перспективи розвитку контрснайперської боротьби підрозділів Сухопутних військ Збройних сил України", у *мат. наук.-техн. конф. "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ"*, Україна, с. 114, 2017.
- [8] Р. І. Шуляченко, *Звуковая разведка в артиллерии*. СПб., 1993.
- [9] Р. В. Кочан, Б. Р. Трємбач, "Оцінка похибки вимірювання кута наряду на ціль розподіленою системою звукової артилерійської розвідки", *Вимірювальна техніка та метрологія*, вип. 77, с. 177–182, 2016.
- [10] S. K. Stein, *Calculus and Analytic Geometry*. McGraw-Hill Companies, 1987.
- [11] A. Stepanenko et al., "Development of a minimal IEEE 1451.1 model for microcontroller implementation", in *Proc. Sensors Appl. Symp.*, pp. 88–93, 2006.
- [12] V. Hrusha et al., "Distributed Web-based measurement system", *IEEE Intel Data Acq. and Adv. Comp. Systems: Techn and Appl.*, IDAACS, IEEE, pp. 355–358, 2005.
- [13] N. Vasyukiv et al., "The control system of the profile of temperature field", *IEEE Intel Data Acq. and Adv. Comp. Systems: Techn and Appl.*, IDAACS, IEEE, pp. 201–206, 2009.
- [14] V. Kochan et al., "Approach to improvement the network capable application processor compatible with IEEE 1451 standard", *IEEE Intel Data Acq. and Adv. Comp. Systems: Techn and Appl.*, IEEE, pp. 437–441, 2003.
- [1] A. Kryvosheev, V. Petrenko, A. Pryhodko, *The basics of artillery intelligence*. Sumy, Ukraine: Sumy State university, 2014.
- [2] R. I. Shuliachenko, V. I. Kryvonosenko, *The sound artillery ranging*. Military publish house, Moscow, 1993.
- [3] P. E. Trofimenko, U. H. Filipenko, "The sound intelligence station – 100 years", *Journal of SumySU, The series of technical sciences*, iss. 3, 2009.
- [4] O. V. Ustumenko, "Perspectives on the creation of reconnaissance and shock systems based on existing RSVF", in *Prosp. for development of missile troops and Artillery of the Ground Forces: Sc.Tech. Conf.*, pp. 203–206, 2014.
- [5] O. I. Petliuk, I. V. Petliuk, "Features of the use of units of artillery intelligence during combat operations during ATO", in *Prosp. for development of missile troops and Artillery of the Ground Forces: Sc.Tech. Conf.*, 2015. pp 114–115.
- [6] I. Makhno, "The officer of Ukraine", *Journal of the national land forces academy of Petro Sahaidachny*, iss. 6, 2014.
- [7] O. O. Furtes, O. O. Pototskiy, V. B. Riy, "Prospects for the development of the counter-naive struggle of the Army Forces Army units", in *Prosp. for development of missile troops and Artillery of the Ground Forces: Sc.Tech. Conf.*, p. 114, 2017.
- [8] R. I. Shuliachenko, "The sound ranging in the artillery". SPb, 1993.
- [9] R. V. Kochan, B. R. Trembach, "Estimation of the error of measurement of the angle to the target by the distributed system of sound artillery intelligence", *Measuring equipment and metrology*, iss. 77, pp. 177–182, 2016.
- [10] S. K. Stein, *Calculus and analytic geometry*. McGraw-Hill Companies, 1987.
- [11] A. Stepanenko et al., "Development of a minimal IEEE 1451.1 model for microcontroller implementation", in *Proc. Sensors Appl. Symp.*, pp. 88–93, 2006.
- [12] V. Hrusha et al., "Distributed Web-based measurement system", *IEEE Intel Data Acq. and Adv. Comp. Systems: Techn and Appl.*, IDAACS, IEEE, pp. 355–358, 2005.
- [13] N. Vasyukiv et al., "The control system of the profile of temperature field", *IEEE Intel Data Acq. and Adv. Comp. Systems: Techn and Appl.*, IDAACS, IEEE, pp. 201–206, 2009.
- [14] V. Kochan et al. "Approach to improvement the network capable application processor compatible with IEEE 1451 standard", *IEEE Intel Data Acq. and Adv. Comp. Systems: Techn and Appl.*, IEEE, pp. 437–441, 2003.