

## РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОВТ

УДК 621.396.96:623.54

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.3-9>В.І. Грабчак<sup>1</sup>, А.Ю. Косовцов<sup>2</sup>, З.М. Грабчак<sup>1</sup><sup>1</sup>Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів<sup>2</sup>Військова частина А4465

Article history: Received 24 March 2023; Revised 28 March 2023; Accepted 31 March 2023

### ОЦІНКА ВПЛИВУ РОЗРЯДНОСТІ АЦП КОГЕРЕНТНОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ПОЛЬОТУ СНАРЯДА

У статті наведені математичні моделі формування повної фази радіолокаційного сигналу відбитого від снаряда, що рухається в повітрі, для триканальної та чотирьоканальної РЛС, розв'язуючи які, отримано координати польоту снаряда. Показано, що важливою складовою похибкою розрахунків координат польоту є похибка округлення, яка виникає за рахунок обмеження розрядності АЦП. Проведено оцінку впливу розрядності АЦП когерентної радіолокаційної станції на точність визначення координат польоту снаряда. Показано, що похибка визначення координат зростає нелінійно від часу польоту снаряда та незначно залежить від початкової швидкості та кута кидання снаряда, водночас суттєво залежить від розрядності АЦП. Найбільш прийнятні результати траєкторних вимірювань для визначення координат польоту снаряда отримують при використанні АЦП з розрядністю не менше 24 біт; при цьому можна забезпечити значно більшу тривалу початкову ділянку траєкторії польоту снаряда.

**Ключові слова:** координати снаряда, аеродинамічні сили (моменти), радіолокатор, математична модель, кут кидання, швидкість польоту, розрядність, косинусна та синусна квадратури, АЦП, абсолютна похибка.

#### Вступ

**Постановка проблеми в загальному вигляді та аналіз літератури.** Теоретичною основою зовнішньої балістики снаряда є система двох векторних диференціальних рівнянь динаміки руху абсолютно твердого тіла у тривимірному просторі, які пов'язують основні характеристики руху і конкретні (для цього снаряда) параметри, що входять до рівняння, – маса, лінійні розміри, моменти інерції, аеродинамічні сили та моменти тощо [1–3].

Одним із головних невирішених завдань зовнішньої балістики є визначення із заданою точністю всіх складових аеродинамічних сил (моментів), що діють на снаряд, який рухається у повітряному просторі. Точка зору, що встановилася на сьогодні, полягає в тому, що для снаряда достатньо враховувати лише залежність аеродинамічних сил (моментів) від швидкості польоту (точніше від числа Маха) і кута нутації снаряда (кута між вектором швидкості та віссю власного обертання снаряда). Розкладаючи величини аеродинамічних сил (моментів) у ряд Тейлора за кутом нутації, одержують набір функцій – аеродинамічних

коефіцієнтів, що залежать тільки від числа Маха [2–4]. У такому випадку система двох векторних диференціальних рівнянь динаміки, після підстановки результатів розкладання Тейлора всіх сил і моментів сил, містить, крім інерційно-вагових і габаритних параметрів снаряда, лише відповідний набір аеродинамічних коефіцієнтів. Зазначені рівняння визначають усі траєкторні характеристики польоту снаряда за умови, що всі аеродинамічні коефіцієнти відомі. Якщо інерційно-вагові та габаритні параметри снаряда достатньо легко виміряти з високою точністю, то точність вимірювання та визначення аеродинамічних коефіцієнтів усіма відомими методами не задовольняє необхідної точності, яка повинна бути не гірше [5]:

- лобовий опір повітря – 0.7% ;
- піднімальна сила, перекидний момент – (3 ÷ 5)% ;
- решта сил, моментів – (10 ÷ 15)% .

У низці робіт [6, 7] авторами запропоновано методи визначення аеродинамічних коефіцієнтів, які засновані на вирішенні оберненої задачі зовнішньої балістики. Суть методів полягає в тому, що за

відомими відліками координат польоту снаряда (або відліками складових швидкості), вимірними у вільному польоті як функції від часу польоту, можна відновити аеродинамічні коефіцієнти для конкретного типу снаряда. Точність відновлення залежить від точності вимірювання траєкторних даних польоту снаряда. Наприклад, обґрунтовано, що для точності відновлення аеродинамічних коефіцієнтів  $(0.5 \div 0.7)\%$  потрібна точність вимірювання координат не гірше порядку  $(10^{-4} \div 10^{-5})\%$  м.

У роботах [8–10] запропоновані методи визначення координат на основі використання повної фази, а точніше квадратурних складових сигналу, отриманих за допомогою когерентної радіолокаційної станції (РЛС) (прототипом якої може бути РЛС MFTR-2100/45 фірми Weibel). Показано, що запропоновані методи не мають фундаментальних обмежень на точність вимірювання квадратурних складових радіолокаційного сигналу і відповідно на точність визначення координат снаряда  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , а використання багатоканальних та багаточастотних схем дозволяє вирішити проблему початкової фази при використанні РЛС сантиметрового діапазону. Тобто, у принциповому плані чим точніше вимірюються квадратурні складові радіолокаційних сигналів і геометричних характеристик антени, тим точніше визначаються координати снаряда на початковій ділянці польоту снаряда.

Реальний експеримент завжди супроводжується наявністю похибок, причиною яких є обмежені точності реєстрації всіх параметрів, що входять до процесу вимірювання. Тому для неідеалізованої постановки завдання необхідно дослідити вплив усіх факторів, які роблять помітний внесок у

похибку кожного з вимірюваних величин. Зазначимо, що у реальному експерименті не завжди вдається встановити внесок того чи іншого чинника на підсумкову похибку. Якщо ж прийняти за основу цього дослідження чисельний експеримент, то нескладно оцінити внесок кожного фактора у загальну похибку отриманого результату, а також оцінити їхній сукупний вплив. Важливо зазначити, що точність отриманого внаслідок чисельного моделювання результату в основному визначається похибками трьох джерел [11]:

- прийнята математична модель;
- вихідні дані;
- похибки округлення.

На сьогодні практично не накладаються обмеження на кількість чисел значущих цифр на сучасних обчислювальних машинах, водночас, збільшення їх кількості призводить до додаткових вимог до АЦП, який є одним із найважливіших електронних компонентів РЛС.

**Метою статті** є дослідження похибок вимірювання координат польоту снаряда, що викликані обмеженою розрядністю АЦП та які можна трактувати як випадкові похибки округлення.

## Основна частина

**1. Триканальна одночастотна РЛС з безперервним монохроматичним випромінюванням.** Для вимірювання квадратурних складових радіолокаційного сигналу і розрахунку координат просторового руху снаряда  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , РЛС повинна мати один передавальний та три приймальних канали [8]. Так у загальному випадку схема прив'язки приймачів антени РЛС та снаряда, що рухається в повітрі, наведена на рис. 1.

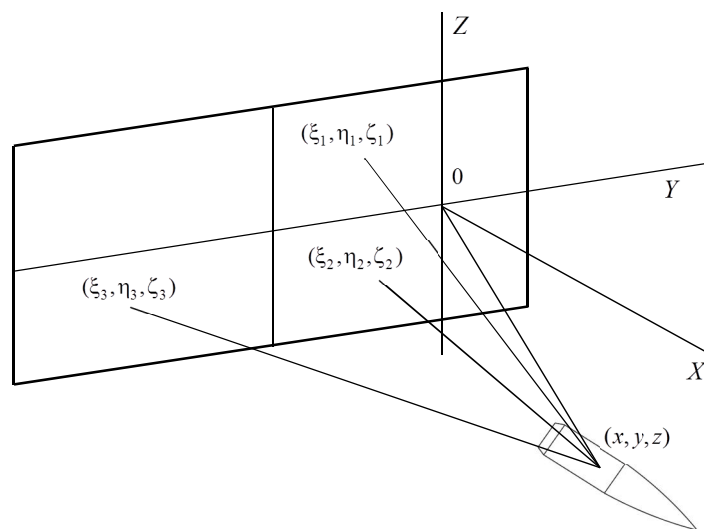


Рис. 1. Схема прив'язки систем координат приймачів антени РЛС та снаряда:

$x$ ,  $y$ ,  $z$  – координати снаряда в системі координат, пов'язаної з антеною, м;

$\xi_i$ ,  $\eta_i$ ,  $\zeta_i$  – координати  $i$ -го приймача в площині антени, м

Повна фаза сигналу в  $i$ -му приймачі залежить від координат польоту снаряда та координат розташування фазових центрів антени

$$\Phi_i = k\sqrt{x(t)^2 + (y(t) - \eta_i)^2 + (z(t) - \zeta_i)^2} + k\sqrt{x(t)^2 + y(t)^2 + z(t)^2}, \quad (1)$$

де  $k$  – хвильове число;  $t$  – час польоту снаряда.

Повні фази відновлюються на основі реєстрованих квадратурних складових кожного каналу:

$$\begin{aligned} C_i(t) &= R_i(t)\cos(\Phi_i(t)); \\ S_i(t) &= R_i(t)\sin(\Phi_i(t)), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $R(t)$  – обвідна сигналу;  $\Phi(t)$  – повна фаза сигналу;  $C(t)$  та  $S(t)$  – відповідно, косинусна та синусна квадратури.

Зазначимо, що якщо повні фази та координати приймачів на площині антени відомі, то три рівняння (1), для кожного приймача ( $i = \overline{1, 3}$ ), однозначно розв'язуються відносно координат снаряда  $x, y, z$ .

Для отримання координат польоту  $x, y, z$ , використаємо математичну модель польоту снаряда ОФ-540Ж 152-мм СГ 2С3М, яка реалізована програмно на основі стандартної підпрограми чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, написаною в програмному середовищі Maple з табличними (розрахунковими) геометричними, інерційно-ваговими характеристиками і аеродинамічними коефіцієнтами сил та моментів снаряда [12, 13].

Вихідними даними для моделювання квадратурних складових приймемо:

- час реєстрації траєкторії – до 2,0, с;
- число відліків на траєкторії – 5000;
- початкові швидкості – [190, 650], м/с;
- початкові кути кидання – [10, 1000], тис.

На основі отриманих координат польоту  $x, y, z$  за допомогою виразів (1) та (2) моделюємо «точні» квадратурні компоненти трьох приймальних каналів. Далі обчислюються значення квадратур (аналогічні експериментальним), що відповідають розрядності АЦП 16, 24 і 32 біт та за їх значеннями

відновлюємо повні фази всіх приймальних каналів. Підставляючи «zareєстровані» значення квадратур до (1) і розв'язуючи його, отримуємо значення координат снаряда  $x, y, z$ . Для оцінки точності визначення координат польоту снаряда  $x, y, z$  проведений розрахунок абсолютної похибки як різниці координат снаряда, що отримані за допомогою математичної моделі польоту снаряда, і координат, відновлених за квадратурними складовими сигналу.

Зазначимо, що за винятком пункту «округлення» квадратур, для інших розрахунків використані обчислення з 15 значущими цифрами, щоб уникнути появи додаткових похибок округлення. Це не впливає на остаточні результати, оскільки «радіолокаційна частина» реального експерименту закінчується реєстрацією квадратур і подальша їх обробка може проводитися поза полігоном, на основі потужних обчислювальних можливостей сучасних ЕОМ.

**2. Результати точності визначення координат польоту снаряда одночастотним триканальним методом.** Похибка визначення координат польоту снаряда обчислюється розузгодженням координат снаряда, розрахованих за математичною моделлю польоту снаряда ОФ-540Ж 152-мм СГ 2С3М, які в чисельному експерименті є еталонними координатами

$$((x, y, z)_1, t_1), ((x, y, z)_2, t_2), \dots, ((x, y, z)_i, t_i)$$

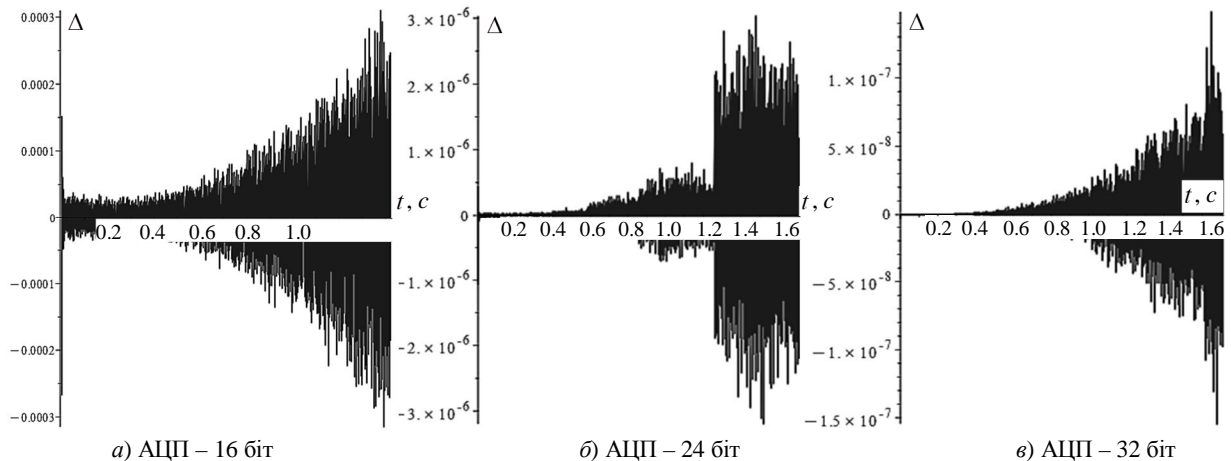
та даними, отриманими за результатами розрахунку координат снаряда, розрахованих за квадратурами радіолокаційного сигналу за різної розрядності АЦП

$$((x, y, z)_1^*, t_1), ((x, y, z)_2^*, t_2), \dots, ((x, y, z)_i^*, t_i),$$

за умови

$$\Delta = ((x, y, z)_i, t_i) - ((x, y, z)_i^*, t_i). \quad (3)$$

На рис. 2 а–г представлені результати розрахунку абсолютної похибки визначення координати  $x$  за швидкості польоту – 190 м/с та кути кидання снаряда – 10 тис.



а) АЦП – 16 біт

б) АЦП – 24 біт

в) АЦП – 32 біт

Рис. 2. Графіки залежності від часу абсолютної похибки визначення координати  $x$  снаряда за умови  $V_0 = 190$  м/с,  $\theta_0 = 10$  тис





## Висновки

По-перше, зазначимо, що похибка завжди зростає нелінійно залежно від часу польоту снаряда. Тому точні вимірювання значень квадратурних складових радіолокаційного сигналу для визначення координат снаряда слід проводити на початкових ділянках траєкторії його польоту.

По-друге, точність визначення координат снаряда слабо залежить від початкової швидкості та кута кидання у всіх розглянутих випадках. Але точність визначення координат снаряда суттєво залежить від розрядності АЦП та прийнятого методу визначення повної фази радіолокаційного сигналу – одночастотного триканального або одночастотного чотириканального. Якщо для одночастотного триканального методу 16-бітова розрядність АЦП знаходиться на межі вимог до точності визначення координат, то для одночастотного чотириканального методу задовільний результат забезпечується лише на дуже короткому початковому інтервалі траєкторії польоту снаряда.

Найбільш прийнятні результати траєкторних вимірювань для визначення координат польоту снаряда отримують при використанні АЦП з розрядністю не менше 24 біт. При цьому можна забезпечити значно більш тривалу початкову ділянку траєкторії.

Тим не менш, результати для одночастотного чотириканального методу навіть при мінімальній з розглянутих розрядностей АЦП можуть забезпечити абсолютну похибку визначення координат на початковій ділянці траєкторії значно меншу, ніж довжина хвилі випромінювання, яка використовується в сантиметровому діапазоні, що дозволяє вирішити проблему початкової фази для одночастотного триканального методу.

Наприкінці необхідно зазначити, що в статті проводилась оцінка саме потенційної точності розрахунку координат польоту снаряда за різної розрядності АЦП. Під потенційною точністю розуміється максимально можлива точність, яка закладається безпосередньо в запропонований метод відновлення координат польоту снаряда та математичний апарат, який є основою методу. В статті не розглядалося питання зовнішніх та внутрішніх завад, які супроводжують процес вимірювання і перетворення сигналів у РЛС та впливають на точність розрахунку координат польоту снаряда. Немає сумнівів, що зазначені обмеження суттєво впливають на абсолютну похибку розрахунку, водночас введені обмеження дають можливість абстрагуватися та оцінити важливу складову похибки, яка залежить від розрядності АЦП РЛС.

Оцінка впливу зовнішніх та внутрішніх завад на точність розрахунків координат польоту снаряда є

подальшими напрямками досліджень авторів і плануються до опублікування в наступних випусках наукових збірників.

## Список літератури

1. STANAG 4355 (Edition 3), The modified point mass and five degrees of freedom trajectory models: NSAI0454(2009)-JAIS/4355, dated 17 April 2009. 95 p. (NATO Standardization Agency).
2. Ткачук П. П., Грабчак В. І., Корольов В. М. та ін. Теорія польоту та зовнішня балістика : навч. посіб. Львів : НАСВ, 2018. 196 с.
3. McCoy R. L. Modern Exterior Ballistics. Atglen, PA : Schiffer Military History, 2012. 328 p.
4. Carlucci D. E., Jacobson S. S. Ballistics, theory and design of guns and ammunition : book. London, New York: Taylor & Francis Group, 2007. 514 p.
5. Грабчак В. І. Відновлення аеродинамічних коефіцієнтів снаряда з використанням апроксимаційних методів. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки*: тези доп. ІV МНТК. 12-13 жовтня 2016 р., Київ. С. 105–107.
6. Грабчак В. І. Задача оцінювання аеродинамічних коефіцієнтів снаряда за даними траєкторних вимірювань. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: зб. тез доп. МНТК. 17-18 травня 2018 р., Львів. С. 141–142.
7. Грабчак В. І., Стеців С. В. Методологічні основи визначення функції лобового опору повітря за даними вимірювання параметрів польоту снаряда. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: зб. тез доп. наук.-практ. конф. 16 листопада 2017 р., Львів. С. 50.
8. Грабчак З. М., Олійник Б. О. Моделювання квадратурних складових сигналу когерентної радіолокаційної станції. *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса)*. Одеса, 2022. Вип. 1 (17). С. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2022.17.54-63>
9. Косовцов Ю. М., Грабчак З. М. Теоретичні та практичні положення розширення інтервалу однозначності відновлення початкової фази сигналу когерентної РЛС. *Науково-технічний журнал*. Київ, 2022. № 2 (34). С. 70–76. DOI: <https://doi.org/1034169/2414-0651>
10. Грабчак З. М., Косовцов Ю. М. Розширення інтервалу однозначності відновлення початкової фази сигналу триканальної двочастотної когерентної РЛС. *Військово-технічний збірник*. Львів, 2022. № 26. С. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.26.2022.16-22>
11. Kincaid D. Numerical analysis. Brooks : Cole Publishing Company. 1991. 690 p.
12. Грабчак В. І., Бондаренко С. В., Стеців С. В. Математична модель руху центру мас снаряда з гіроскопічною стабілізацією. *Військово-технічний збірник*. Львів, 2014. № 11. С. 7–12. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.11.2014.7-12>
13. Грабчак В. І., Бондаренко С. В., Стеців С. В. Математична модель руху снаряда з гіроскопічною стабілізацією навколо його центру мас. *Системи озброєння і військова техніка*. Київ, 2014. № 4 (40). С. 21–27.

## References

1. STANAG 4355 (Edition 3), The modified point mass and five degrees of freedom trajectory models: NSAI 0454 (2009) – JAIS/4355, dated 17 April 2009. 95 p. (NATO Standardization Agency).



2. Tkachuk P. P., Hrabchak V. I., Korol'ov V. M. ta in. (2018), "Teoriya pol'otu ta zovnishnyha balistyka" [Theory of flight and external ballistics]: navch. posib. Lviv : NASV, 196 p. [in Ukrainian].
3. McCoy R. L. (2012), *Modern Exterior Ballistics*. Atglen, PA. : Schiffer Military History, 328 p.
4. Carlucci D. E. and Jacobson S. S. (2007), *Ballistics, theory and design of guns and ammunition* : book. London, New York : Taylor & Francis Group, 514 p.
5. Hrabchak V. I. (2016), "Vidnovlennya aerodynamichnykh koefitsiyentiv snaryada z vykorystanniam aproksymatsiynykh metodiv" [Recovery of projectile aerodynamic coefficients using approximation methods]. *Problems of coordination of military-technical and defense-industrial policy in Ukraine. Prospects for the development of weapons and military equipment*: theses add. IV International science and practice conf., Kyiv. pp. 105–107. [in Ukrainian].
6. Hrabchak V. I. (2018), "Zadacha otsinyuvannya aerodynamichnykh koefitsiyentiv snaryada za danymy trayektornykh vymiryuvan" [The task of estimating the aerodynamic coefficients of a projectile based on the data of trajectory measurements]. *Prospects for the development of armaments and military equipment of the Ground Forces*: coll. theses add. International science and technology conf., Lviv. pp. 141–142. [in Ukrainian].
7. Hrabchak V. I. and Stetsiv S. V. (2017), "Metodolohichni osnovy vyznachennya funktsiyi lobovoho oporu povitrya za danymy vymiryuvannya parametriv pol'otu snaryada" [Methodological basis for determining the frontal air resistance function based on the data of projectile flight parameters measurement]. *The use of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine in modern conflicts*: coll. theses add. science and practice conf., Lviv. pp. 50. [in Ukrainian].
8. Hrabchak Z. M. and Oliyaryk B. O. (2022), "Modelyuvannya kvadraturnykh skladovykh syhnalu koherentnoyi radiolokatsiyanoi stantsiyi" [Modeling of quadrature components of a coherent radar station signal]. *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa)*. Odessa, 2022. Issue 1 (17). pp. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2022.17.54-63> [in Ukrainian].
9. Kosovtsov Yu. M. and Hrabchak Z. M. (2022), "Teoretychni ta praktychni polozhennya rozshyrennya intervalu odnoznachnosti vidnovlennya pochatkovoyi fazy syhnalu koherentnoyi RLS" [Theoretical and practical provisions for expanding the unambiguousness interval of restoring the initial phase of a coherent radar signal]. *Scientific and technical journal*. Kyiv. Issue 2 (34). pp. 70–76. DOI: <https://doi.org/1034169/2414-0651> [in Ukrainian].
10. Hrabchak Z. M. and Kosovtsov Yu. M. (2022), "Rozshyrennya intervalu odnoznachnosti vidnovlennya pochatkovoyi fazy syhnalu trykanal'noyi dvochastotnoyi koherentnoyi RLS" [Expansion of the interval of unequivocal recovery of the initial phase of the three-channel two-frequency coherent radar signal]. *Military and technical collection*. Lviv. Issue 26. pp. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.26.2022.16-22> [in Ukrainian].
11. Kincaid D. (1991), *Numerical analysis*. Brooks : Cole Publishing Company. 690 p.
12. Hrabchak V. I., Bondarenko S. V. and Stetsiv S. V. (2014), "Matematychna model rukhu tsentru mas snaryada z hiroskopichnoiu stabilizatsiieiu" [Mathematical model of motion of the center of mass of a projectile with gyroscopic stabilization]. *Military Technical Collection*, Issue № 11, pp. 7–12. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.11.2014.7-12> [in Ukrainian].
13. Hrabchak V. I., Bondarenko S. V. and Stetsiv S. V. (2014), "Matematychna model rukhu snaryada z hiroskopichnoiu stabilizatsiieiu navkolo yoho tsentru mas" [Mathematical model of projectile motion with gyroscopic stabilization around its center of mass]. *Weapons Systems and Military equipment*, Issue № 4 (40), pp. 21–27. [in Ukrainian].

#### ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE ADC RESOLUTION OF THE COHERENT RADAR ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE COORDINATE OF THE PROJECTILE FLIGHT

V. Hrabchak, A. Kosovtsov, Z. Hrabchak

The article considers the development of a heavy-class robotic ground combat system based on the BTR-4E armored personnel carrier. Analysis of samples the heavy class combat robotic ground complexes showed that they can be developed on the basis of serial crewed military vehicles HMMWV (AM General), M-ATV (Oshkosh), BMP-3 (Russia), T-72 (Russia), M113 (Israel), Patria AMV (Finland) or create a new design MDARS (AM General), Black Knight (BAE Systems), "Uran-9" (Russia), TYPE-X (Milrem Robotics). They are made on a tracked or wheeled platform. What unites this class of robotic ground combat systems is a remotely controlled combat module with a 25-30 mm cannon, anti-tank guided missiles, a machine gun and a grenade launcher, which can be controlled from a distance.

A comparative analysis of the tactical and technical characteristics the BTR-4E armored personnel carrier with military vehicles with a 30 mm cannon in service with the Armed Forces of Ukraine has been performed. As a result, the choice of BTR-4E armored personnel carrier as the basic crew unit for the construction of a heavy class robotic ground combat system has been substantiated. The analysis of the design of control drives of the power plant, transmission, braking system, steering system and combat module installed on the BTR-4E armored personnel carrier was carried out in terms of the possibility of implementing remote control of movement and fire.

The structure of a combat ground robotic complex based on the BTR-4E armored personnel carrier with different variants of remote control panels, means of establishing communication channels and construction of a remote control station is proposed.

For example, the driver's remote control panel may be designed on the basis a tablet or on the basis a simulator for full simulation of control commands. Remote controls for the commander and gunner can be designed on the basis of regular controls and be similar to them for quick training of the crew to work.

Communication between remote control units and the controlled armored personnel carrier can be arranged using ultrashort-wave radios or via the 4G, 5G mobile network.

The remote control point can also be developed on the basis a BTR-4E armored personnel carrier, a military vehicle or deployed on the ground. It depends on the concept of application of the heavy class combat ground robotic complex.

**Keywords:** combat robotic ground complex, remote control, armored personnel carrier, combat module, remote control.