

С.В. Кукобко<sup>1</sup>, Р.В. Місценко<sup>1</sup>, А.М. Пінчук<sup>1</sup>, Б.В. Гайбадулов<sup>2</sup>, Ю.В. Коробков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси

<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

## ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БСНР 9С32 ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ В ЇЇ АНТЕННУ СИСТЕМУ ЕЛЕМЕНТІВ НА СУЧАСНІЙ ЕЛЕМЕНТНІЙ БАЗІ

Військові конфлікти останнього десятиріччя характеризуються широким застосуванням протиборчими сторонами повітряних засобів, в тому числі малорозмірних та (або) безпілотних. В сучасних умовах одним з ефективних заходів по боротьбі з ними є підвищення точності координатної інформації, що надається бойовим (або вогневим) засобом. Підвищення точності координатної інформації обумовлює: можливість безпошукового виявлення та (або) захвату повітряних цілей вогневими засобами, збільшення живучості комплексів протиповітряної оборони за рахунок зменшення робітного часу (в тому числі часу на "випромінювання") та швидкої зміни їх позицій після виконання поставленого завдання.

Сучасний розвиток науки та техніки дозволяє створювати ефективні засоби протиповітряної оборони для боротьби з існуючими та перспективними засобами повітряного нападу, але їх розробка та постановка на озброєння потребує великих витрат. В зв'язку з цим набуває актуальності питання покращення характеристик існуючих комплексів без істотних капітальних вкладень.

В роботі запропоновано використання замість штатних антенних елементів БСНР 9С32 їх аналогів на сучасній елементній базі. Оцінки характеристик фазованої антенної решітки при впровадженні перспективних прохідних феритових фазообертачів (зокрема збільшення точності вимірювання кутових координат та дальності виявлення повітряних цілей) отримані з використанням методів математичного моделювання та розрахункових методів. Отримані співвідношення, що дозволяють провести відповідну оцінку.

Отримані результати можуть бути використані при розробці пропозицій щодо впровадження до антенних систем багатоканальних радіотехнічних засобів зенітних ракетних комплексів сучасних антенних елементів (феритових фазообертачів).

**Ключові слова:** вимірювання координат, діаграма направленості, зенітний ракетний комплекс, прохідний феритовий фазообертач, фазована антенна решітка.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Досвід ведення бойових дій на території України під час відбиття повномасштабної агресії з боку російської федерації підтверджує величезне значення засобів протиповітряної оборони (ППО) у протистоянні. На цей час об'єднання інформації від кількох джерел, застосування новітніх алгоритмів обробки, комплексування отриманих даних [1–7] є перспективними шляхами розвитку засобів ППО. Але їх реалізація потребує великого обсягу часу та матеріальних витрат. В той же час, зенітні ракетні комплекси (ЗРК) та системи (ЗРС), що перебувають на озброєнні зенітних ракетних військ (ЗРВ) Повітряних Сил (ПС) Збройних Сил (ЗС) України, здебільшого радянського виробництва, мають недостатній ресурс та потребують модернізації з метою підвищення їх бойових, технічних та експлуатаційних характеристик. У багатоканальних ЗРК ПС ЗС України при наведенні зенітних керованих ракет за методом пропорційного наближення використовується інформація про кутові швидкості обертання лінії ракета-ціль та вектору швидкості ракети. В роботах [8–11] показано, що точність кутових вимірювань також суттєво впливає на подальшу траєкторну обробку отриманої інформації, тому від них залежить і особливості траєкторії польоту ракети при обстрілі цілі, та, як наслідок, імовірність її ураження. В зв'язку з чим питання, присвячені дослідженням підвищення характеристик антенних систем ЗРК, є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Після зменшення або усунення похибок топоприв'язки та орієнтування, як показано в [12], в ЗРК суттєвий вплив на його функціонування мають похибки вимірювання кутових координат повітряних об'єктів.

Роздільна здатність та точність вимірювання по кутових координатах суттєво залежить від побудови антенної системи та особливостей формування амплітудно-фазового розподілу (АФР) на її апертурі. При формуванні АФР на характеристики діаграми направленості впливає згасання сигналу в антенних елементах та дискретність встановлення його початкової фази в них [1–7]. При цьому зменшення дискретності дає можливість програмно реалізувати сучасні алгоритми обробки, що дозволяють підвищити точність вимірювання та роздільну здатність по кутових координатах [7; 11; 13–14], спростити технічну діагностику [15–18], збільшити можливості ЗРК щодо боротьби як з аеродинамічними, так і балістичними цілями [1; 3; 7–10; 19], а зниження згасання сигналу в антенних елементах повинно покращити точність вимірювання координат за рахунок збільшення відношення “сигнал-шум” [7–11; 13–15]. Одним з можливих шляхів реалізації даної ідеї може бути впровадження сучасних елементів (феритових фазообертачів) до антенних систем багатоканальних станцій, що виконують функції виявлення та супроводження повітряних цілей з наступним наведенням на них зенітних керованих ракет [19; 20]. У зв’язку з наведеним, розглянемо можливість підвищення характеристик багатоканальних радіотехнічних засобів ЗРК при впровадженні в їх антенну систему елементів на сучасній елементній базі на прикладі багатоканальної станції наведення ракет (БСНР) 9С32 ЗРК С-300В.

**Мета статті** – оцінка можливості підвищення характеристик багатоканальної станції наведення ракет 9С32 при впровадженні в її антенну систему сучасних елементів.

### Виклад основного матеріалу

За принципом роботи антенна решітка (АР) БСНР 9С32 представляє собою лінзову систему з оптичним збудженням сферичним фронтом хвилі, має розкрив у формі восьмикутника. АР еквідистантна, з однакових елементів, які розміщені за стільниковою (шестикутною) схемою при міжелементній відстані близько трьох четвертин робочої довжини хвилі. Фокусування енергії від опромінювачів здійснюється за допомогою однотипних фазообертачів. У режимі прийому енергії, відбитої від цілі, енергія фокусується АР в одному з опромінювачів, сигнали з якого через хвилеводний тракт надходять до приймальних пристроїв сумарного і двох різницевих каналів. З метою спрощення системи керування променем прийнятий метод керування по двом координатам. У відповідності з прийнятим рядково-стовбцевим методом керування обмотки фазообертачів з’єднані послідовно у системі рядків і стовбців.

Елементами АР є прилади 71-10М2. Конструкція антенного елемента феритового фазообертача 6СЧ1 наведена на рис.1.

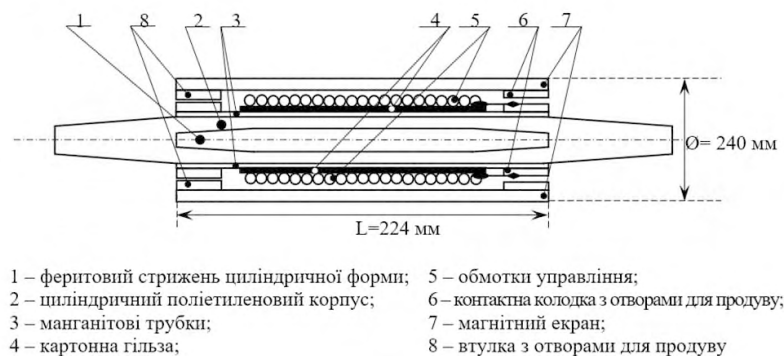


Рис.1. Конструкція антенного елемента феритового фазообертача 6СЧ1

Елемент 71-10М2 конструктивно з’єднує феритовий фазообертач з опромінювачами, які розміщені на освітлюваній та тінювій сторонах решітки (по відношенню до

опромінювачів). В якості опромінювачів у фазованій антенній решітці (ФАР) застосовані діелектричні стрижневі антени, які добре компонуються з феритовим фазообертачем, що працює на хвилі з круговою поляризацією. Діелектричний стрижневий опромінювач у решітці має діаграму направленості (ДН), яка дозволяє на освітленій стороні решітки ефективно перехоплювати енергію від опромінювача, а на тіньовій стороні решітки – забезпечити потрібний сектор сканування ( $\pm 42^\circ$ ) зі спадом підсилення на краю сектору не більш 3 дБ по відношенню до невідхиленого положення променя. Феритовий фазообертач призначений для роботи у приладі 71-10М2 у якості керованої ланки. Повний комплект фазообертачів служить для створення у розкритті блоку 71-1М потрібного фазового розподілу. У залежності від створеного фазового розподілу формується ДН блоку 71-1М. Параметри феритового фазообертача наведені у табл.1.

Таблиця 1

Параметри феритового фазообертача 6СЧ1

| Параметр                              | Величина                | Примітка                                                                                              |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Марка фериту                          | 6СЧ1                    |                                                                                                       |
| Диференційний фазовий зсув            | 700°                    |                                                                                                       |
| Втрати енергії НВЧ (середнє значення) | 1,2 дБ<br>1,3 дБ        | В інтервалі температур від мінус 10°С до +70°С<br>В інтервалі температур від мінус 50°С до мінус 10°С |
| Інтервал робочих температур           | від мінус 50°С до +70°С |                                                                                                       |
| Довжина (без опромінювачів)           | 224 мм                  |                                                                                                       |
| Діаметр (по екрану)                   | 24 мм                   |                                                                                                       |
| Маса (з опромінювачами)               | 185 г                   |                                                                                                       |

Робота фазообертача заснована на взаємодії хвилі з намагніченим феритом, в якому вона поширюється. Параметри фериту залежать від величини зовнішнього магнітного поля, створюваного струмом в обмотках управління. Керування фазообертачем здійснюється роздільно по рядках і стовбцях за допомогою незалежних обмоток, кожна з яких забезпечує зміну фази на  $\Delta=360^\circ$ . Фазообертач виконаний за принципом аналогової зміни фази, але керується дискретними струмами, тому зміна фази носить дискретний характер. Величина дискрети встановлення фази  $\Delta\varphi=11,25^\circ$ .

З метою покращення характеристик ФАР пропонується впровадити до її складу прохідний феритовий фазообертач ФТСК.467711.001 ТУ (дозволяє забезпечувати додатковий фазовий зсув від  $0^\circ$  до  $700^\circ$ ) має ефективну діелектричну проникність, яка забезпечує покращення характеристик антенно-хвильоводної системи (АХС). Фазообертач ФТСК.467711.001 ТУ конструктивно зображено на рис.2 [19–20].



Рис.2. Конструкція перспективного феритового фазообертача з ефективною діелектричною проникністю

Параметри феритового фазообертача ФТСК.467711.001 ТУ наведені у табл.2.

Таблиця 2

Параметри феритового фазообертача ФТСК.467711.001 ТУ

| Параметр                                           | Величина                | Примітка                                            |
|----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|
| Марка фериту                                       | ФТСК.46771              | Марганець-цинковий ферит                            |
| Диференційний фазовий зсув                         | 700°                    | Обмотки управління з'єднані послідовно              |
| Втрати енергії НВЧ (середнє значення)              | 1,0 дБ                  | В інтервалі температур від мінус 10°С до +65°С      |
|                                                    | 1,1 дБ                  | В інтервалі температур від мінус 40°С до мінус 10°С |
| Інтервал робочих температур                        | від мінус 40°С до +65°С |                                                     |
| Час встановлення фази, $\Delta t$                  | $\leq 90$ мкс           |                                                     |
| Величина дискрети встановлення фази, $\Delta \phi$ | 5,625°                  |                                                     |
| Діапазон робочих частот                            | 6,5...9,5 ГГц           |                                                     |
| Довжина (без опромінювачів)                        | 110,5 мм                |                                                     |
| Діаметр (по екрану)                                | 200 мм                  |                                                     |
| Маса (з опромінювачами)                            | 132 г                   |                                                     |

Для аналізу характеристик антенної системи БСНР 9С32 було проведено математичне моделювання на ПЕОМ при наступних вихідних даних:

- геометричні розміри антенної решітки БСНР (висота – 3 255 мм, ширина – 3 080 мм, глибина – 1 444 мм);
- розташування випромінювачів (фазообертачів) у вузлах антенної решітки, що представляє собою еквідистантну конструкцію з однакових елементів, які розташовані за стільниковою (шестикутною) схемою при міжелементній відстані близько  $3/4 \times \lambda$  ( $\lambda$  – робоча довжина хвилі);
- характеристики встановлених фазообертачів та фазообертачів, що пропонуються до використання.

Розрахунок ДН антенної решітки було проведено методами геометричної оптики, з використанням даних щодо побудови та розташування елементів антенної решітки, геометричних розмірів та орієнтації у просторі [21]. Для розрахунку амплітудно-фазового розподілу на апертурі системи було враховано, що в якості опромінювача в ФАР використовується пірамідальний рупор, ДН якого описується виразом:

$$F_E(\delta) = \frac{1 + \cos(\delta)}{2} \cdot \frac{\sin(\psi_E)}{\psi_E}, \quad \psi_E = \frac{\pi \cdot L_E}{\lambda} \cdot \sin(\delta),$$

$$F_H(\delta) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1 + \cos(\delta)}{2} \cdot \left[ \frac{\sin(\psi_H + \pi/2)}{\psi_H + \pi/2} + \frac{\sin(\psi_H - \pi/2)}{\psi_H - \pi/2} \right], \quad \psi_H = \frac{\pi \cdot L_H}{\lambda} \cdot \sin(\delta), \quad (1)$$

де  $L_E$ ,  $L_H$  – геометричні розміри стінок рупору у відповідній площині;  $\lambda$  – довжина хвилі;

$\delta$  – кут розповсюдження хвилі відносно елементу ФАР, що відраховується відносно нормалі до площини антени.

Враховуючи, що

$$R \gg 2 \frac{(L_E)^2}{\lambda}, \quad R \gg 2 \frac{(L_H)^2}{\lambda}, \quad (2)$$

було визначено, що всі елементи ФАР знаходяться у дальній зоні опромінювача, тому початкова початкова фаза сигналу визначається виразом:

$$\Delta\varphi_i = 2\pi \frac{\Delta R_i}{\lambda}. \quad (3)$$

Відповідно, при компенсації сферичності фазового фронту задача знаходження амплітудно-фазового розподілу на апертурі ФАР була вирішена. Для аналізу впливу амплітудного розподілу на множник системи, було зафіксовано розподілення фази, яке дорівнює  $\varphi_i = 0$ , тобто розглядалися синфазні системи (всі елементи антени збуджені з однаковою початковою фазою). Амплітудний розподіл у відносних координатах було задано у вигляді:

$$A(x) = \Delta + (1 - \Delta) \cos \frac{\pi x}{2}, \quad 0 \leq \Delta \leq 1. \quad (4)$$

У випадку проведення заміни величини  $\Delta$ , можливо отримати різні вигляди амплітудного розподілу – від рівномірного ( $\Delta = 1$ ) до косинусоїдального ( $\Delta = 0$ ). Для проведення розрахунків амплітудний розподіл моделювався функціями, які описують рівномірний розподіл, та розподіл, який спадає до країв (табл.3).

Таблиця 3

Результати розрахунку основних параметрів

| Закон амплітудного розподілу                | Ширина ДН ( $2\theta_{0,5p}$ ) | Рівень першої бічної пелюстки |
|---------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| $A(x) = 1; (\Delta = 1)$                    | $51 \frac{\lambda}{L}$         | 21% (мінус 13,3 дБ)           |
| $A(x) = \cos \frac{\pi x}{2}; (\Delta = 0)$ | $67 \frac{\lambda}{L}$         | 7% (мінус 23 дБ)              |

Результати розрахунку нормованого амплітудного розподілу на апертурі ФАР наведено на рис.3 штриховою лінією ( $A_1(x)$ ). Апроксимований розподіл для  $\Delta=0,34$  наведений на рис.3

крапковою лінією ( $A_1(x)$ ).

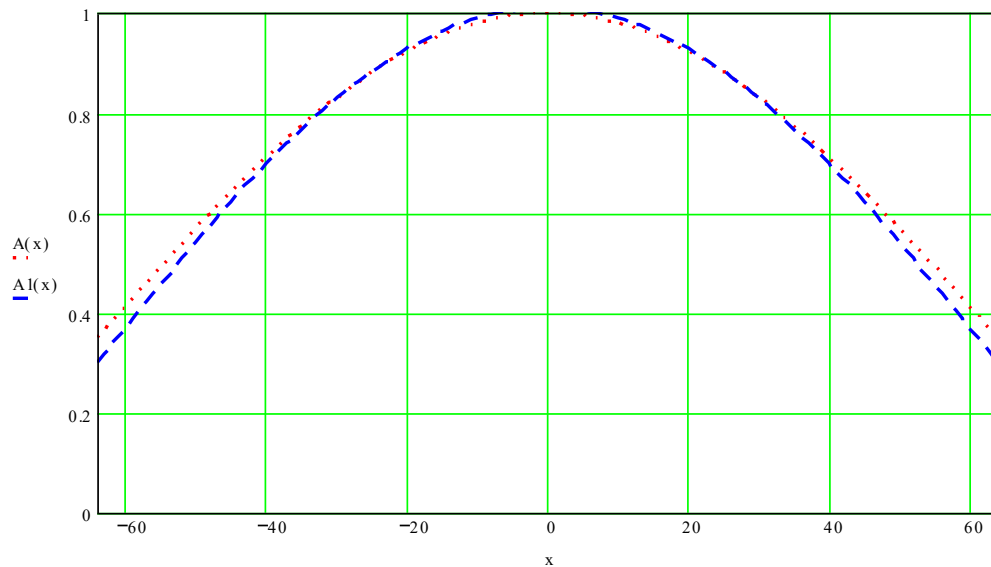


Рис.3. Амплітудні розподіли:  $A_1(x)$  – розрахунковий,  $A(x)$  – апроксимований

Порівняння відношень розрахункового та апроксимованого розподілів показує, що при використанні апроксимуючої функції виду (4) максимальна похибка не буде перевищувати 5 %, що, враховуючи рівень потужності в цих елементах, суттєво не вплине на результуючу ДН.

Результати моделювання ДН антенної решітки в горизонтальній площині наведені на рис.4.

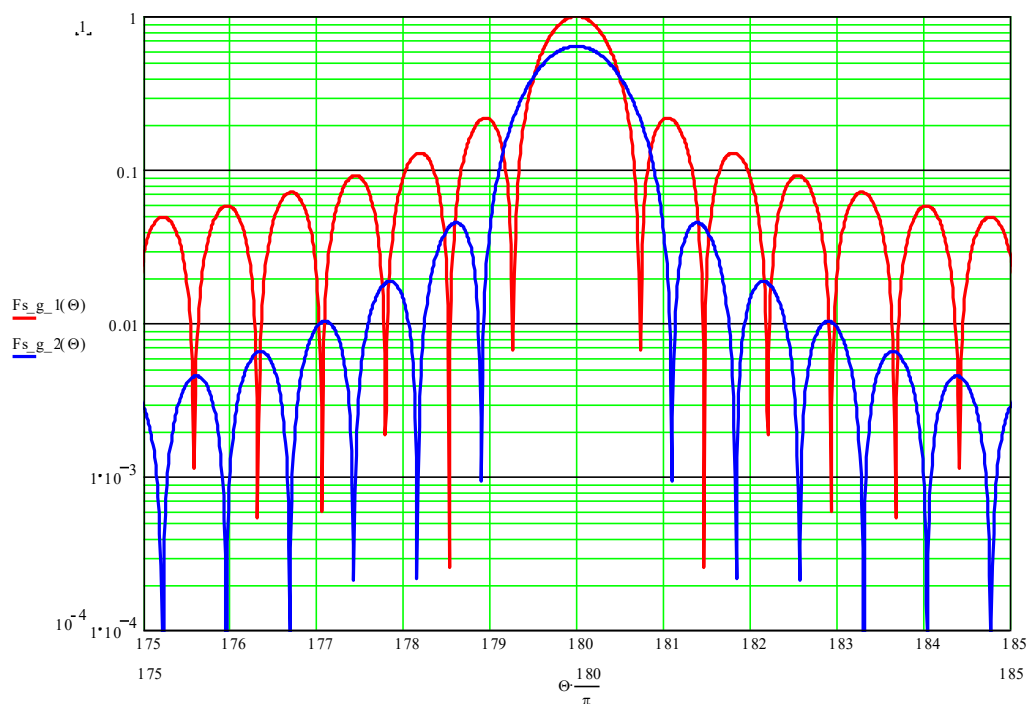


Рис.4. Результат розрахунків ДН антенної решітки при безперервному фазовому розподілі:  $Fs\_g\_1(\Theta)$  – рівномірний амплітудний розподіл;  $Fs\_g\_2(\Theta)$  – спадаючий до країв (косінусний) амплітудний розподіл

Аналіз результатів розрахунків наведених на рис.4 дозволяє зробити висновок, що амплітудний розподіл, який спадає до країв антени, призводить до зменшення рівня бічних

пелюсток. Розрахунки були виконані для випадку безперервного (аналогового) електричного управління фазовим зсувом. Порівняння отриманих результатів з паспортними даними показали їх високу збіжність.

У проведених раніше розрахунках рядково-стовбцевого методу управління для перевірки розрахункової моделі було зроблено припущення, що в модулях ФАР використовуються фазообертачі з безперервним (аналоговим) електричним управлінням, що реалізує будь-який фазовий зсув, сигнал випромінювання вважався монохромним.

На практиці в АР реалізоване дискретне управління фазовим розподілом, а сигнал, що випромінюється, є квазібезперервним.

Дискретність установки фази, як було наведено раніше, складає  $22,5^\circ$ , що обумовлює похибку, максимальне значення якої  $\delta\varphi = 11,25^\circ$ . В цьому випадку похибка розподілена за рівномірним законом розподілу на інтервалі від  $0^\circ$  до  $11,25^\circ$  з математичним очікуванням  $6,125^\circ$  та середньоквадратичним відхиленням  $3,248^\circ$ .

Квазібезперервний сигнал, що випромінюється, має крім несучої частоти у своєму спектрі додаткові спектральні складові, які при відомих характеристиках сигналу однозначно обраховуються за допомогою перетворення Фур'є:

$$S(\omega) = \int_{-t/2}^{\tau/2} U(t) \exp(j\omega t) dt. \quad (5)$$

Для отримання адекватних результатів розрахунків було враховано як ширину спектру сигналу, що випромінюється, так і дискретність установки потрібних фазових зсувів.

Розрахунки було проведено шляхом моделювання амплітудно-фазового розподілу для окремих режимів роботи з урахуванням параметрів сигналів, що випромінюються, та осередненням отриманих результатів.

Для моделювання дискретного фазового розподілу на апертурі решітки фазовий зсув фазообертачів покладался випадковою величиною, рівномірно розподіленою біля величини потрібного фазового зсуву (моделювалась рівномірно розподілена похибка з математичним очікуванням  $6,125^\circ$  та середньоквадратичним відхиленням  $3,248^\circ$ ). Для моделювання дискретного фазового розподілу на апертурі решітки до потрібного фазового зсуву фазообертачів додавалась випадкова похибка з математичним очікуванням  $M_{x_i}$ , яке розраховується за формулою:

$$M_{x_i} = \frac{a_i + b_i}{2}, \text{ де } a_i + b_i = \Delta\varphi_i \quad (6)$$

та дисперсією  $\sigma_i^2$ , що відповідає закону розподілу похибки, розподіленої за рівномірним законом розподілу.

Квазібезперервність сигналів випромінювання враховувалась шляхом розрахунку діаграми направленості ФАР на окремих спектральних складових та їх наступним сумуванням. Результати, отримані при моделюванні, осереднювались.

Результати моделювання ДН ФАР по полю при квазібезперервному випромінюванні та дискретному управлінні фазовим зсувом наведені на рис.5 (крапковою лінією нанесена розрахункова ДН при безперервному управлінні фазовим зсувом, штриховою лінією нанесені результати моделювання при дискретному фазовому розподілі).

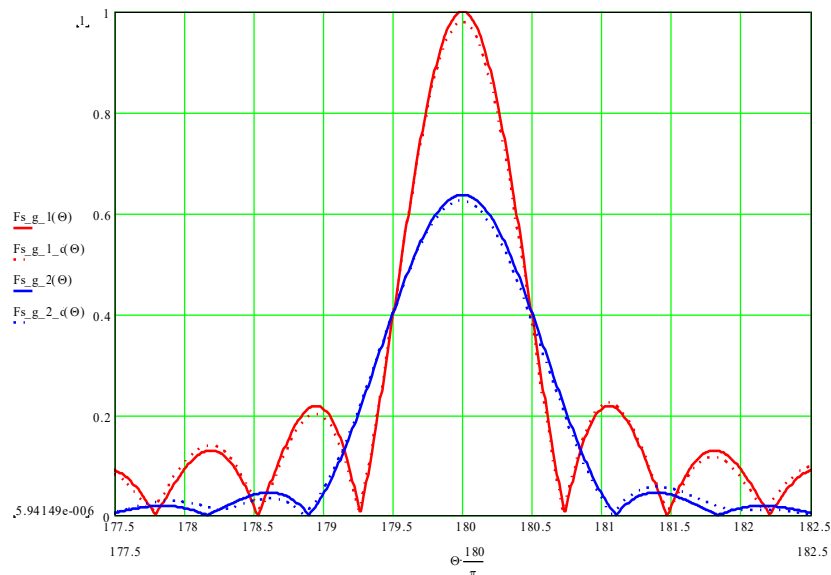


Рис.5. Результат розрахунків ДН антенної решітки при квазібезперервному випромінюванні та дискретному управлінні фазовим зсувом:

$Fs\_g\_1(\Theta)$  – рівномірний амплітудний розподіл, безперервний фазовий зсув;

$Fs\_g\_1\_d(\Theta)$  – рівномірний амплітудний розподіл, дискретний фазовий зсув;

$Fs\_g\_2(\Theta)$  – спадаючий до країв (косінусний) амплітудний розподіл, безперервний фазовий зсув;

$Fs\_g\_2\_d(\Theta)$  – спадаючий до країв (косінусний) амплітудний розподіл, дискретний фазовий зсув.

Як показали результати моделювання, ширина спектрів сигналів випромінювання незначно (близько 1%) впливає на характеристики ДН антени.

Значно більший вплив мають похибки, що вносяться дискретним фазовим розподілом. Дискретність фазового розподілу призводить як до розширення головної пелюстки ДН, так і до її викривлення, що погіршує характеристики виявлення та вимірювання координат повітряних об'єктів. Наведені явища особливо критичні при локації об'єктів, що рухаються під малими кутами місця – в цьому випадку за рахунок зменшення електричної довжини антени наведені недоліки сильніше впливають на характеристики точності.

З аналізу результатів моделювання, наведених на рис.5, можна зробити висновки, що при дискретному способі зміна фаз проходить стрибкоподібно з дискретою  $\Delta\varphi = 2\pi/M_\varphi$ , де  $M_\varphi$  – розрядність фазообертача. Основною перевагою дискретного методу є значно більша стабільність параметрів дискретних фазообертачів, які працюють тільки при фіксованих показниках характеристик, але при дискретному способі керуванням фази в розкритті антени виникають фазові похибки, які приводять до спотворення ДН – зниження коефіцієнту направленої дії, збільшення бічних пелюсток та стрибкоподібного сканування.

Надалі проведемо оцінку підвищення точності вимірювання кутових координат повітряних цілей при впровадженні в антенну систему БСНР 9С32 елементів на сучасній елементній базі. Кутовий напрямок приходу сигналу  $\nu$  є неенергетичним параметром. Під час проведення оцінювання була застосована методика оцінки одного неенергетичного параметру сигналу  $s(t, \nu)$  за методом максимуму функціоналу правдоподібності. При цьому дисперсія оцінки параметра  $\nu$  визначається наступним виразом:

$$\sigma_\nu^2 = \frac{1}{2E/N_0} \left[ \frac{\partial^2}{\partial \nu_1 \partial \nu_2} S(\nu_1 - \nu_2) / S''^2(\nu) \right]_{\nu=\nu_0} = - \frac{1}{(2E/N_0) S''^2(\nu_0)}, \quad (7)$$

де  $2E/N_0$  – відношення сигнал/шум,  $S(v_1 - v_2)$  – кореляційна функція корисного сигналу за оцінюваним параметром,  $v_0$  – істинне значення параметру.

Кінцевий вигляд виразу (7) може бути представлений у наступному вигляді

$$\sigma_\lambda^2 = -1/q_s''(v_0), \quad (8)$$

$$\text{де } q_s''(v_0) = \left[ \frac{2}{N_0} \int_0^T s(t, v_0) \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} s(t, v) dt \right]_{v=v_0}. \quad (9)$$

$\frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} s(t, v)$  може бути розрахована методом кінцевих прирощень за відомою ДН ФАР при використанні в якості антенних елементів штатних виробів та виробів, що пропонуються. Як показали розрахунки, відношення крутизни пеленгаційних характеристик ФАР  $\frac{S_{2v_0}''}{S_{1v_0}''} = 1,035$ .

Знайдемо відношення дисперсій похибок вимірювання кутових координат  $\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$  при використанні в якості антенного елементу штатного ( $\sigma_1^2$ ) та пропонованого ( $\sigma_2^2$ ) приладів:

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{\frac{1}{\frac{2E_1}{N_0} \times S_{1v_0}''}}{\frac{1}{\frac{2E_1}{N_0} \times S_{1v_0}''}} = \frac{\frac{1}{2E_1 \times S_{1v_0}''}}{\frac{1}{2E_2 \times S_{2v_0}''}} = \frac{E_2 \times S_{2v_0}''}{E_1 \times S_{1v_0}''}. \quad (10)$$

Врахуємо, що  $E_i = P_i \times \Delta t_i$ , де  $P_i$  – відповідна потужність сигналу,  $\Delta t_i$  – час його обробки (або тривалість) сигналу.

Тоді вираз (9) можна представити у наступному вигляді:

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{E_2 \times S_{2v_0}''}{E_1 \times S_{1v_0}''} = \frac{P_2 \times \Delta t_2 \times S_{2v_0}''}{E_1 \times \Delta t_1 \times S_{1v_0}''}. \quad (11)$$

Припустимо, що з опромінювача випромінюється потужність  $P_0$ . Тоді потужність, що проходить через ФАР в прямому напрямку за рахунок втрат в штатних антенних елементах зменшується в  $K_1$  разів. Тоді потужність, що випромінюється може бути описана співвідношенням:

$$P_{\text{випр1}} = P_0 \times K_1. \quad (12)$$

Потужність, що приймається, послаблюється як за рахунок умов розповсюдження радіохвиль (в  $K_{\text{pp}}$  разів), так і за рахунок проходження ФАР у зворотному напрямку (в  $K_1$  разів):

$$P_{\text{пр1}} = K_{\text{pp}} \times K_1 \times K_1 \times P_0, \quad P_{\text{прi}} = K_{\text{pp}} \times K_i \times K_i \times P_0. \quad (13)$$

Аналогічно маємо втрати на передачу і прийом при впровадженні запропонованих антенних елементів:

$$P_{\text{випр2}} = P_0 \times K_2, P_{\text{пр2}} = K_{\text{пр}} \times K_2 \times K_2 \times P_0. \quad (14)$$

З урахуванням наведеного, враховуючи (12-14), отримаємо:

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{P_2 \times \Delta t_2 \times S_{2\nu_0}''}{E_1 \times \Delta t_1 \times S_{1\nu_0}''} = \frac{[K_{\text{пр}} \times K_2 \times K_2 \times P_0] \times \Delta t_2 \times S_{2\nu_0}''}{[K_{\text{пр}} \times K_1 \times K_1 \times P_0] \times \Delta t_1 \times S_{1\nu_0}''} = \frac{K_2^2}{K_1^2} \times \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \times \frac{S_{2\nu_0}''}{S_{1\nu_0}''}. \quad (15)$$

З аналізу залежності (15) можна зробити висновок, що відношення похибок вимірювання кутових координат залежить від втрат в антенних елементах, можливих часів обробки сигналу штатним та пропонованим пристроями та крутизни пеленгаційних характеристик для двох випадків.

Проведемо відповідні розрахунки для кожного з наведених трьох факторів. Результати розрахунків наведені у табл.4.

Можливі часи обробки сигналу штатним та пропонованим пристроями обчислювались наступним чином. З технічної документації відомо, що БСНР 9С32 одночасно супроводжує до 12 цілей. Час звертання до кожної з цілей при супроводженні 10 та 40 Гц, що складає 0,1 с та 0,025 с відповідно. Було зроблено припущення, що весь вказаний час за винятком часу встановлення відповідних фазових розподілів в елементах ФАР, можливо використати для локації цілі (припущення максимально можливого часу). В табл.4 наведені розрахунки для частоти 40 Гц.

Таблиця 4

Розрахунок відношення вимірювання кутових координат, можливих часів обробки та крутизн пеленгаційних характеристик для двох випадків

| Інтервал робочих температур  | $\frac{K_2^2}{K_1^2}$ | $\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$ | $\frac{S_{2\nu_0}''}{S_{1\nu_0}''}$ | $\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$ |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| від мінус 10°C до +70°C      | 1,097                 | 1,039                           | 1,035                               | 1,18                            |
| від мінус 50°C до мінус 10°C | 1,095                 |                                 |                                     | 1,17                            |

З аналізу результатів розрахунку, наведених у табл.3, можна зробити висновок, що найбільш вагомим у підвищенні точності вимірювання кутових координат є зниження втрат при проходженні сигналів у прямому та зворотному напрямку. Загальний вииграш описується співвідношенням (14). З аналізу даних, наведених у табл.4, видно, що реалізація запропонованих рішень дає вииграш у точності вимірювання кутових координат близько 17 %.

Разом з тим, збільшення потужності випромінювання за рахунок зменшення втрат повинно крім зменшення похибок вимірювання кутових координат привести і до збільшення дальності виявлення цілі. Відомо, що в загальному випадку потужність радіосигналу, що приймається, задається рівнянням:

$$P_r = P_t \times \frac{G_t}{4\pi R_t^2} \times F_{\text{пер}}^2 \times \sigma \times F_{\text{пр}}^2 \times \frac{A_r}{4\pi R_r^2}, \quad (16)$$

де  $P_r$  – потужність сигналу прийомної антени,  $P_t$  – потужність радіопередавача,  $G_t$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени,  $A_r$  – ефективна площа (апертура) приймальної антени (визначається через коефіцієнт посилення приймальної антени  $G_r$  та довжина хвилі  $\lambda$  з рівняння  $A_r = G_r \lambda^2 / 4\pi$ ),  $\sigma$  – ефективна площа розсіювання цілі в даному ракурсі,  $F_{\text{пер}}^2$  та  $F_{\text{пр}}^2$  – нормовані діаграми спрямованості антени при передавальній та приймальній антен відповідно,  $R_t$  – відстань від передавальної антени до цілі,  $R_r$  – відстань від цілі до

приймальної антени.

У нашому випадку (коли передавальна і приймальна антени суміщені), вираз (16) спрощується за рахунок  $R_t = R_r = R$ ,  $F_{\text{пер}}^2 = F_{\text{пр}}^2 = F^2$ :

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R^4}. \quad (17)$$

Таким чином, дальність дії радіолокатора з пасивною відповіддю визначається співвідношенням:

$$D_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 P_{r \text{ min}}}} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 k T \Delta f_r k_n k_d}} = \sqrt[4]{\frac{P_t \Delta t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 k T k_n k_d}}. \quad (18)$$

У формулі 18 враховано, що  $\frac{1}{\Delta f_r} = \Delta t$ .

Знайдемо відношення дальності у першому та другому випадку.

$$\frac{D_2}{D_1} = \sqrt[4]{\frac{P_2 \times \Delta t_2}{P_1 \times \Delta t_1}} = \sqrt[4]{\frac{P_2}{P_1}} \times \sqrt[4]{\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \sqrt[4]{\frac{K_2^2}{K_1^2}} \times \sqrt[4]{\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}. \quad (19)$$

Результати розрахунків відповідних складових (19) наведені у табл.5.

Таблиця 5

Результати розрахунків відношення складових відношень дальностей для двох типів антенних елементів ФАР

| Інтервал робочих температур  | $\sqrt[4]{\frac{K_2^2}{K_1^2}}$ | $\sqrt[4]{\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$ | $\frac{D_2}{D_1}$ |
|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|-------------------|
| від мінус 10°C до +70°C      | 1,0234                          | 1,0096                                    | 1,0332            |
| від мінус 50°C до мінус 10°C | 1,0230                          |                                           | 1,0328            |

З аналізу результатів розрахунку, наведених у табл.5, можна зробити висновок, що найбільш вагомим у збільшенні дальності виявлення цілі є зниження втрат при проходженні сигналів у прямому та зворотному напрямку. Результуючий вииграш збільшення дальності виявлення цілей згідно виразу (19) буде складати 1,03 рази або 3 %.

Розрахуємо зниження ваги антенної системи при впровадженні нових елементів у порівнянні зі штатними. З порівняння даних про вагу приладів, наведених в табл.1, 2, отримаємо зниження ваги на один елемент 53 г. З урахуванням загальної кількості елементів – 10 612, загальне зниження ваги становитиме 562,4 кг. При загальній масі БСНР 45 000 кг це дозволить знизити вагу станції приблизно на 1,3 %, що дозволить зменшити: витрату палива, навантаження на шасі, механізми підйому та обертання антени.

Недоліком запропонованого рішення є необхідність внесення відповідних змін до системи управління променем [20] у частині, що стосується збільшення розрядності фазообертача, додаткових ліній управління обмотками та алгоритмів перевірки фаз, інших додаткових заходів при проведенні технічного обслуговування та перевірки ФАР не потребується.

При прийнятті рішення щодо доцільності реалізації запропонованого рішення внесення змін потребує як технічна документація, так і тренажні імітаційні комплекси та моделі, що використовуються для проведення розрахунків та підготовки персоналу [23–27]. В залежності

від потрібного обсягу партії виробів їх придбання може здійснюватись оптимальним методом при здійсненні закупівель комплектуючих виробів [28].

### Висновки

У статті авторами розглянуті питання впливу впровадження до антенної системи багатоканальної станції наведення ракет 9С32 сучасних елементів на її характеристики.

Реалізація запропонованих рішень дає вигоду як в точності вимірювання кутових координат, так і в дальності виявлення повітряних цілей, тобто призводить до підвищення характеристик БСНР 9С32.

Підвищення характеристик БСНР 9С32 пов'язано зі зменшенням втрат в антенних елементах, зменшенням часу перемикання фазообертачів (збільшенням можливого часу обробки сигналу), зменшенням похибок (дисперсії) пеленгаційної характеристики.

Найбільш вагомим у підвищенні точності вимірювання кутових координат і дальності виявлення є зниження втрат при проходженні сигналів у прямому та зворотному напрямках.

Реалізація запропонованого рішення дає загальний вигоду у точності вимірювання кутових координат близько 17 %, загальне збільшення дальності виявлення на 3,3 %.

Недоліком запропонованого рішення є необхідність внесення відповідних змін до СУП у частині, що стосується збільшення розрядності фазообертачів, необхідності додаткових ліній керування обмотками та внесення змін в алгоритми перевірки встановлених фаз.

### Список літератури

1. Brytov O. Analysis of modern methods and means of electronic intelligence for special purposes for monitoring threatening stationary and mobile objects. Proceedings of the 3 rd International Scientific and Practical Conference: *International scientific discussion: problems, tasks and prospects*, October 21-22, 2021. Brighton, Great Britain: A.C.M. Webb Publishing Co Ltd., 2021. № 81. P. 249–264. <https://doi.org/10.51582/interconf.21-22.10.2021.032>.
2. Brytov O. Trends in the development of unmanned aviation complexes and their radio equipment. International Scientific Journal “Grail of science” with the proceedings of the: II Correspondence International Scientific and Practical Conference “*Modern Science: Concepts, Theories and Methods of Basic and Applied Research*”, November 19th, 2021. Vinnytsia, Ukraine: NGO European Scientific Platform, Vienna, Austria: LLC International Centre Corporate Management, 2021. P. 248–256. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.11.2021.047>.
3. Artikula A. The method of evaluating the operation of radio technicians of special purpose in extreme (crisis) situations. Proceedings of the 2 nd International Scientific and Practical Conference: *Scientific trends and trends in the context of globalization*, September 19-20, 2021. Umeå, Sweden: Mondial, 2021. P. 247–259. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.09.2021.030>.
4. Рошупкін Є. Постановка проблеми створення та експлуатації багатопозиційних систем інформаційного забезпечення та шляхи її розв'язання. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції*. Вінниця: ГРААЛЬ НАУКИ, 2021. Вип. №4. С. 243–252. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.07.05.2021.047>.
5. Artikula A. Measurement errors affecting the characteristics of multi-position systems, and ways to reduce them. Proceedings of the 1 st International Scientific and Practical Conference: *Scientific trends and trends in the context of globalization*, June 7-8, 2021. Umeå, Sweden: Mondial, 2021. P. 333–346. <https://doi.org/10.51582/interconf.7-8.06.2021.035>.
6. Brytov O. Justification of the method of evaluation of the efficiency of air reconnaissance by unmanned aviation of ground (sea) objects. Proceedings of the 3 rd International Scientific and Practical Conference: *Scientific trends and trends in the context of globalization*, December 21-22, 2021. Umeå, Sweden: Mondial, 2021. P. 471–485. <https://doi.org/10.51582/interconf.21-22.12.2021.050>.
7. Великоапертурна (рознесена) радіолокаційна система: пат. на корисну модель 148518 Україна: МПК G01S 7/42 H01Q 21/00; заяв. 29.01.2021; опубл. 18.08.2021, Бюл. № 33. URL: <https://iprop-ua.com/inv/qnptergc>.
8. Герасимов С.В., Ізосімов Д.М., Рошупкін Є.С., Богдановський О.М. Оцінка параметрів руху повітряних об'єктів при об'єднанні результатів незалежних первинних вимірювань в активній багатопозиційній системі радіолокації. *Системи озброєння і військова техніка*. Х.: ХУПС, 2010. № 3(23). С. 110–113. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt\\_2010\\_3\\_28](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2010_3_28).
9. Герасимов С.В., Рошупкін Є.С., Федак Г.А., Бабий Я.В. Оценка параметров движения маневрирующих воздушных объектов в активной некогерентной системе при обработке информации от нескольких неравноточных источников с разным темпом обзора пространства. *Військово-технічний збірник*. Львів: АСВ, 2012. № 1(6). С. 18–26. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vtzb\\_2012\\_1\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vtzb_2012_1_6).
10. Асавалюк А.В., Герасимов С.В., Рошупкін Є.С. Похибки визначення повного вектора швидкості в єдиній

- прямокутній системі координат системою оглядових станцій радіолокації з різною точністю. *Системи озброєння і військова техніка*. Х.: ХНУПС, 2017. № 2(50). С. 53–56. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt\\_2017\\_2\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2017_2_13).
11. Dzhus V., Roshchupkin Y., Kukobko S., Herasymov S., Drob N., Trofymova M. Estimation of noise radiance point sources multichannel direction finding systems resolution by linear prediction method. *Системи обробки інформації*. Вип. 4 (167). Х.: ХНУПС, 2021. С. 19–26. <https://doi.org/10.30748/soi.2021.167.02>.
12. Джус В., Гайбадулов Б., Калугін Д., Титаренко Р., Кукобко С. Вплив похибок топоприв'язки та орієнтування радіотехнічних засобів контролю повітряного простору на оцінки координатної інформації, що видаються ними. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Чернігів: ДНДІ ВС ОБТ, 2021. Вип. № 2(8), С. 31–43. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.8.2021.04>.
13. Маслов А.Ф., Рошупкин Е.С., Хмелевский С.И., Селевко В.Н. Потенциальная точность измерения времени запаздывания путем учета фазовой структуры принимаемых разнесенными аппертурами сигналов. *Збірник наукових праць Харківського військового університету*. 2002. Вип. № 3(41), С. 83–85. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5525818>.
14. Маслов А.Ф., Рошупкин Е.С., Колодей О.П. Ошибки измерения координат источника излучения при обработке пространственной фазовой структуры принимаемого разнесенной корреляционно-базовой системой сигнала. *Системи обробки інформації*. Х.: ХВУ, 2003. Вип. № 1(23). С. 125–138. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi\\_2003\\_1\\_21](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2003_1_21).
15. Herasimov S., Roshchupkin E., Kutsenko V., Riazantsev S. and. Nastishin Yu. Statistical analysis of harmonic signals for testing of Electronic Devices. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. Vol. 8. is. 7. 2020. P. 3791–3798. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/143872020>.
16. Герасимов С.В., Кукобко С.В., Рошупкін Є.С., Расстригін О.О. Синтез вимірювальних сигналів для визначення технічного стану систем автоматичного управління. *Озброєння та військова техніка*. К.: ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2016. Вип. № 4(12). С. 32–36. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ovt\\_2016\\_4\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ovt_2016_4_7).
17. Герасимов С.В., Гречка А.В., Рошупкин Е.С., Рошупкина А.Е., Кукобко С.В. Адаптивный метод технической диагностики системы разнесенных радиотехнических устройств. *Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy*. Baku: ASMA, 2020. № 2. P. 129–137. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5035853>.
18. Кукобко С.В., Ветошкин О.Г., Рошупкін Є.С., Джус В.В. Автоматизоване технічне обслуговування рознесених електронних інформаційних систем. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2020: зб. тез доп. П'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції, 29 червня – 01 липня 2020 р. Чернігів: ЧНТУ, 2020. С. 335–339. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5067687>.*
19. Крючков Д.М., Рошупкін Є.С., Титаренко Р.В., Шулежко В.В. Шляхи підвищення можливостей засобів протиповітряної оборони при роботі з об'єктами, що рухаються по балістичній траєкторії. *Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів: зб. тез доп. VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції. м. Харків, 31 жовтня 2019 р. С. 104–105. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5651545>.*
20. Кузьменко Д.В., Рошупкін Є.С., Джус В.В. Удосконалення системи управління променем багатоканальної радіолокаційної станції спеціального призначення. *Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців: зб. тез доп. XV Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів, 01-03 грудня 2021 року. Х.: НТУ “ХПІ”, 2021. С. 183. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6791224>.*
21. Меленті Є.О., Сухаревський О.І., Кукобко С.В., Рошупкін Є.С. Розрахунок поля електричного диполя в тропосферному хвилеводі. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Х.: ХНУПС, 2012. Вип. 4(33). С. 93–98. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS\\_2012\\_4\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2012_4_19).
22. Гайбадулов Б.В., Крючков Д.М., Рошупкін Є.С., Джус В.В., Коробков Ю.В. Тренажні імітаційні комплекси зенітного ракетного озброєння – досвід використання, проблемні питання та пропозиції щодо їх розв'язання. *Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи: зб. тез доп. Міжнародної науково-практичної конференції, 12-13 вересня 2019 р. Одеса: Військова академія (м. Одеса). С. 340. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5067126>.*
23. Крючков Д.М., Рошупкін Є.С., Джус В.В., Титаренко Р.В. Удосконалення підготовки персоналу для обслуговування радіотехнічних засобів контролю повітряного простору шляхом урахування питань технічної експлуатації в тренажних імітаційних комплексах. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, Вип. 3. С. 89–93. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/adinsys\\_2020\\_4\\_3\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/adinsys_2020_4_3_14).
24. Петрук С.М., Крючков Д.М., Джус В.В., Чміль Ю.О. Вдосконалення технічної експлуатації при проведенні тренувань, відпрацюванні питань використання за призначенням та підтриманні технічного стану радіотехнічних засобів протиповітряної оборони бойовими обслугами. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: зб. тез доп. VIII міжнародної науково-технічної конференції, 2020. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. С. 174–175. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5651579>.*
25. Мирюгін В.І., Заріцький М.В., Крючков Д.М., Титаренко Р.В., Чміль Ю.О. Пропозиції щодо удосконалення існуючих тренажних імітаційних комплексів вогневих засобів ураження протиповітряної оборони. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: зб. тез доп. XX науково-технічної конференції, 03-04 вересня 2020 р. Чернігів: Видавець Брагинець О.В., 2020. С. 169.*

26. Djus V., Reznichenko A., Chmil Yu., Skopintsev O., Zaberezhniy D. Software model of the workplace of the operator of radar means of the antiaircraft missile complex of average range at work on the single purpose. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: зб. тез доп. Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків, 15 березня 2021 р. Харків, 2021. С. 32–33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5649200>.

27. Кукобко С.В., Павленко М.А., Рошупкін Є.С. Структура спеціального математичного забезпечення імітації повітряної обстановки в підсистемі тренажу АСУ спеціального призначення. *Системи озброєння і військова техніка*. Х.: ХУПС, 2008. Вип. № 2. С. 44–48. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt\\_2008\\_2\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2008_2_16).

28. Герасимов С.В., Ізосімов Д.М., Рошупкін Є.С., Старцев В.В. Підвищення боєготовності зенітних ракетних військ шляхом оптимальної закупівлі комплектуючих виробів зенітних ракетних комплексів. *Системи озброєння і військова техніка*. Х.: ХУПС, 2010. № 1(21). С. 55–59. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt\\_2010\\_1\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2010_1_13).

Надійшла до редколегії 30.11.2022

Схвалена до друку 12.12.2022