






# MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

 DOI 10.51582/interconf.19-20.05.2024.067

## Основні закономірності процесу виявлення цілей імпульсними радіолокаційними станціями при забезпеченні безпеки об'єктів критичної інфраструктури

**Азаренко Олена Василівна<sup>1</sup>** , **Гончаренко Юлія Юрївна<sup>2</sup>** ,  
**Дівізінюк Михайло Михайлович<sup>3</sup>** ,  
**Землянський Олександр Миколайович<sup>4</sup>** ,  
**Фаррахов Олександр Володимирович<sup>5</sup>** 

<sup>1</sup> доктор фізико-математичних наук, професор, заступник керівника;  
Науково-дослідний лабораторно-експериментальний центр «БРАНД ТРЕЙД»; Україна

<sup>2</sup> доктор технічних наук, доцент, професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації;  
Європейський університет; Україна

<sup>3</sup> доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник;  
Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної  
енергетики Національної академії наук України; Україна

<sup>4</sup> кандидат технічних наук, доцент, начальник наукового відділу;  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету  
цивільного захисту України; Україна

<sup>5</sup> кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник;  
Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної  
енергетики Національної академії наук України; Україна

### Анотація.

Аналізуються основні закономірності процесу виявлення цілей імпульсними станціями радіолокації при забезпеченні безпеки об'єктів критичної інфраструктури. Спочатку розглянуто типову структуру імпульсної радіолокаційної станції, принцип її функціонування та основні технічні характеристики. Потім дано характеристику математичних закономірностей процесу радіолокаційного виявлення цілей. Після чого зроблено висновок про ключові фактори, що визначають виявлення цілей радіолокації при забезпеченні безпеки об'єктів критичної інфраструктури.

Proceedings of the 8th International  
Scientific and Practical Conference  
«International Scientific Discussion:  
Problems, Tasks and Prospects»

(May 19-20, 2024).  
Brighton, United Kingdom

No  
201



# MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

**Ключові слова:**

*об'єкт критичної інфраструктури  
терористичний вплив  
станція радіолокації  
безпілотний літальний апарат  
радіолокаційна ціль*

---

## MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

### **Вступ**

Охорона та захист об'єктів критичної інфраструктури держави від різних видів терористичних загроз – одна із складових частин державної безпеки України [1]. До цих об'єктів входять атомні (АЕС), теплові (ТЕС) і гідроелектричні станції (ГЕС), гірничо-збагачувальні та нафтохімічні комбінати, металургійні заводи та інші підприємства, які є стратегічними об'єктами [2,3]. Сьогодні одним із ключових завдань забезпечення безпеки є протидія безпілотним літальним апаратам (БПЛА), що завдають ударних терористичних впливів по стратегічних об'єктах та об'єктах критичної інфраструктури (ОКІ) [4,5]. Відомо [6,7], що на сьогоднішній день, основним засобом для виявлення повітряних цілей є імпульсні станції радіолокації (РЛС), використання яких необхідно оптимізувати в залежності від конкретних факторів, що забезпечують вирішення завдань забезпечення безпеки ОКІ.

Мета роботи – проаналізувати основні закономірності процесу виявлення цілей імпульсними станціями радіолокації при забезпеченні безпеки об'єктів критичної інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання. Спочатку розглянути типову структуру імпульсної РЛС, принцип її функціонування та основні технічні характеристики. Потім дати характеристику математичним закономірностям процесу радіолокаційного виявлення цілей. Після чого зробити висновок про ключові фактори, що визначають виявлення цілей радіолокації при забезпеченні безпеки об'єктів критичної інфраструктури.

### **Виклад основного матеріалу**

#### **Типова структура імпульсної РЛС, принцип її функціонування та основні технічні характеристики**

В основі пристрою станції радіолокації (РЛС) ґрунтуються три компоненти: передавач, антена і приймач.

Передавач (передавальний пристрій) є джерелом електромагнітного сигналу високої потужності який є потужним імпульсним генератором. Для імпульсних РЛС сантиметрового діапазону зазвичай використовується магнетрон. Він працює в імпульсному режимі, формуючи короткі потужні електромагнітні імпульси, що повторюються.

Антена виконує фокусування випроміненого сигналу та

## MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

формування діаграми спрямованості, а також прийом відображеного від цілі сигналу та трансляцію його до приймача. Оскільки передача та прийом поєднані в одній антені, ці дві дії виконуються по черзі. Щоб потужний сигнал не потрапляв від передавального пристрою в приймач і не засліплював його при прийомі слабкого відображення, перед приймачем розміщують спеціальний пристрій, що закриває вхід приймача в момент випромінювання зондуєчого сигналу.

Приймач (приймальний пристрій) виконує посилення та обробку прийнятого сигналу. У найпростішому випадку результуючий сигнал подається на електронно-променеу трубку (екран радіолокатора), що транслює зображення, синхронізоване з рухом антени.

Імпульсний радар передає випромінюючий сигнал коротким імпульсом (зазвичай від частки до одиниць мікросекунди), після чого переключається в режим прийому, тоді як випромінений імпульс поширюється у просторі. Оскільки імпульс поширюється від радара з постійною швидкістю, то відстань до цілі визначається часом, що минув з моменту випромінювання імпульсу до моменту отримання відображення. Проміжок часу між випромінюванням імпульсів називають частотою повторення імпульсів, що визначає робочу шкалу дальності станції. Типова структурна схема імпульсної РЛС представлена на рис.1.

Перевага імпульсного методу полягає в тому, що він дозволяє створювати РЛС з однією антеною і досить простим і ергономічним індикаторним пристроєм. Він дозволяє вимірювати дальність до кількох цілей та створювати відносно прості конструкції РЛС.

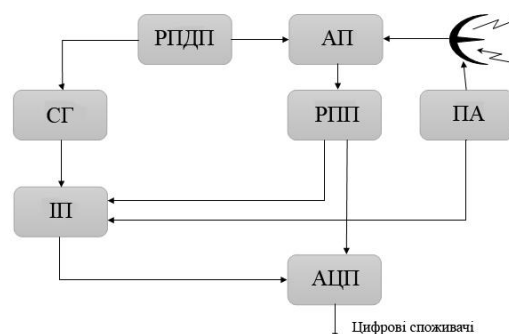


Рисунок 1

Типова структурна схема імпульсної РЛС

## MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

Недоліком цього методу є необхідність використання великих потужностей імпульсного передавача. Крім цього, у всіх імпульсних РЛС є мертва зона.

Функціонування імпульсної РЛС показано на діаграмах, представлених на рис.2.

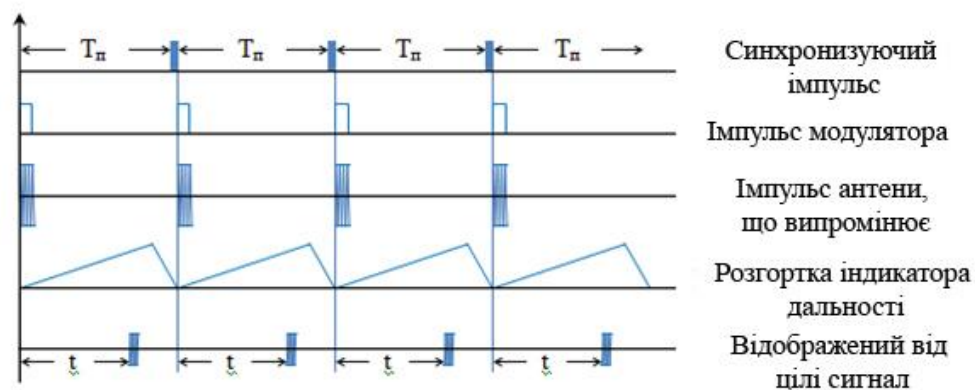


Рисунок 2

Діаграма сигналів при роботі імпульсної РЛС

Синхронізуючий імпульс від синхронізуючого генератора (СГ) з певною періодичністю  $T_n$  одночасно надходить на вхід радіопередавального пристрою (РПДП) та індикаторного пристрою (ІП). У радіопередавачі формується сигнал модулятора, який визначає форму та інші параметри випромінюючого імпульсу. Магнетрон за сигналом модулятора генерує височастотний радіосигнал заданої потужності, який через антенний перемикач (АП) хвилеводами транслюється в антену.

Антену за рахунок своєї спеціальної конструкції випромінює радіосигнал у певний тілесний кут простору, що залежить від параметрів і характеристик спрямованості антени. Синхронізуючий імпульс запускає розгорнення індикаторів дальності РЛС. В індикаторний пристрій надходять сигнали від приводів антени (ПА), які забезпечують сканування характеристик її спрямованості.

Відображений імпульс від виявленої цілі приходить в антену, обробляється та посилюється радіоприймачем (РПП) і транслюється в індикаторний пристрій. Відображений сигнал надходить через проміжок часу  $t$ , який і визначатиме дистанцію

## MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

до цілі. У свою чергу сигнали з радіоприймального та індикаторного пристроїв надходять в аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) для передачі отриманої інформації в цифровому вигляді іншим споживачами [7-9].

Виходячи з цього, головними технічними характеристиками імпульсних радіолокаційних станцій є несуча частота, імпульсна потужність, коефіцієнт підсилення антени в режимах випромінювання і прийому, чутливість приймача і коефіцієнт розпізнавання сигналу.

Несуча частота  $f$ , Гц, – частота гармонійних електричних або електромагнітних коливань, що служать переносником інформації при її передачі за допомогою модуляції цих коливань сигналами, що відповідають повідомленню, яке передається. Вона вимірюється в герцах і пов'язана з довжиною хвилі, що випромінюється  $\lambda$ , співвідношенням  $C = f \cdot \lambda$ , де  $C = 3 \cdot 10^8$  км/с – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль.

Випромінювана потужність в імпульсі або імпульсна потужність  $P_i$ , Вт, – середня за час імпульсу потужність. Це значення потужності використовують для характеристики імпульсів прямокутної, дзвоноподібної та іншої форми.

Коефіцієнт посилення антени дорівнює  $K_{\text{нідА}} = G_{i(n)} \cdot \eta_{i(n)}$ , де  $\eta_{i(n)} = 0,7 \div 0,8$

– коефіцієнт корисної дії антенно-фідерного тракту приймальної (передаючої) антени. Коефіцієнт спрямованої дії антени (КСД)  $G_{i(n)}$ , дБ, – відношення квадрату напруженості поля, створюваного антеною в даному напрямку, до середнього значення квадрата напруженості поля в усіх напрямках. КСД є безрозмірною величиною і позначається у децибелах.

Чутливість приймального пристрою  $P_{\text{пр}}$ , Вт, характеризує здатність приймача приймати слабкі сигнали та визначається як мінімальний рівень вхідного сигналу пристрою, необхідний для забезпечення необхідної якості отриманої інформації.

Коефіцієнт розпізнавання сигналу (пороговий коефіцієнт) – параметр будь-якого радіотехнічного пристрою, що визначає таке мінімальне співвідношення сигналу та перешкоди, при якому даний приймальний пристрій та індикатор можуть зареєструвати корисний сигнал із заданими ймовірностями правильного виявлення і помилкової тривоги.

## MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

### Математичні закономірності процесу радіолокаційного виявлення цілей

В основі оптимального виявлення електромагнітних сигналів лежить перевищення рівня (величини або інтенсивності) прийнятого корисного сигналу  $I_{\text{сигн}}$  над рівнем перешкод  $I_{\text{прш}}$ , діючих на вхід приймального пристрою [10–12], тобто має виконуватися умова:

$$I_{\text{сигн}} \geq \delta \cdot I_{\text{прш}}, \quad (1)$$

де  $\delta$  – коефіцієнт розпізнавання, безрозмірна величина, що визначається в результаті обробки сигналу в приймальному пристрої РЛС.

Права частина цього рівняння визначається чутливістю приймального пристрою –  $P_{\text{пр}}$ . Це значення зменшується за рахунок спрямованого прийому антени РЛС на величину, рівну коефіцієнту підсилення антени –  $K_{\text{під}}$ . В результаті права частина рівняння (1) набуде вигляду:

$$\delta \cdot \frac{P_{\text{пр}}}{K_{\text{під}}}. \quad (2)$$

Ліва частина рівняння (1) визначається потужністю  $P_i$  електромагнітного імпульсу, випромінюваного у простір. Електромагнітна хвиля поширюється за сферичним законом. Її фронт розширюється, і інтенсивність хвилі зменшується пропорційно квадрату поточної відстані, тобто пропорційно  $(4\pi D)^2$ .

Оскільки антена РЛС має спрямованість, що характеризується коефіцієнтом підсилення антени –  $K_{\text{під}}$ , то поточне значення інтенсивності електромагнітної хвилі буде збільшено на величину, що дорівнює коефіцієнту підсилення антени.

Поширюючись у просторі, інтенсивність електромагнітної хвилі зменшується не тільки за рахунок розширення фронту хвилі, а й за рахунок об'ємного згасання, величина якого визначається коефіцієнтом об'ємного згасання  $\beta$ . Його значення

## MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

залежить від частоти електромагнітних коливань, що поширюються у просторі, і знаходиться емпіричним шляхом. Отже, поточне значення інтенсивності електромагнітної хвилі матиме вигляд:

$$\frac{P_i \cdot K_{\text{нід}} \cdot 10^{-0,1 \cdot \beta \cdot D_{\text{км}}}}{(4\pi D)^2} \quad (3)$$

Ціль, що опромінюється електромагнітною хвилею, відображає тільки частину енергії, що падає на неї, яка визначається площею поверхні, що відображає. У ряді випадків вона характеризується еквівалентною сферою, що має площу поверхні, рівну площі поверхні, що відображає. Еквівалентна сфера визначається радіусом  $R_e$ , а площа її поверхні дорівнює  $4\pi R_e^2$ .

Оскільки електромагнітну хвилю відображає не вся поверхня еквівалентної сфери, а лише її половина, величина відображеної електромагнітної енергії буде рівна  $2\pi R_e^2$  від поточного значення інтенсивності, що визначається формулою (3).

Відображена електромагнітна хвиля, що поширюється в зворотному напрямку, загасатиме за рахунок розширення фронту хвилі і об'ємного згасання. Значення її інтенсивності зменшуватиметься пропорційно квадрату поточної відстані, вираженого в метрах  $(4\pi D)^2$  і в кілометрах  $10^{-0,1 \cdot \beta \cdot D_{\text{км}}}$ .

З урахуванням вищевикладеного, інтенсивність відображеної від цілі електромагнітної хвилі набуде вигляду:

$$\frac{P_i \cdot K_{\text{нід}} \cdot 10^{-0,1 \cdot \beta \cdot D_{\text{км}}} \cdot 2\pi \cdot R_e^2 \cdot 10^{-0,1 \cdot \beta \cdot D_{\text{км}}}}{(4\pi D)^2 \cdot (4\pi D)^2} \quad (4)$$

Виконавши перетворення, підставляючи (2) і (4) в (1), отримаємо:

$$\frac{P_i \cdot K_{\text{нід}} \cdot 2\pi \cdot R_e^2}{(4\pi D)^4} \cdot 10^{-0,2 \cdot \beta \cdot D_{\text{км}}} \geq \delta \cdot \frac{P_{\text{нр}}}{K_{\text{нід}}} \quad (5)$$



## MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

Прологарифмувавши нерівність (5), помноживши обидві частини на 20, отримаємо:

$$\begin{aligned} 20 \cdot \lg P_i + 20 \cdot \lg K_{ni\delta} + 20 \cdot \lg(2\pi R_e^2) - 40 \cdot \lg(4\pi D)^2 - 4\beta D_{KM} &\geq \\ &\geq 20 \cdot \lg \delta + 20 \cdot \lg P_{np} - 20 \cdot \lg K_{ni\delta}. \end{aligned}$$

Переносячи в ліву частину доданки, що містять поточне значення дистанції, а в праву доданки, що містять технічні параметри РЛС, отримаємо:

$$\begin{aligned} 2 \cdot [20 \cdot \lg(4\pi D)^2 + 2\beta D_{KM}] &\leq \\ &\leq 20 \cdot \lg \delta + 20 \cdot \lg P_{np} - 40 \cdot \lg K_{ni\delta} - 20 \cdot \lg P_i - 20 \cdot \lg(2\pi R_e^2). \end{aligned}$$

З урахуванням властивостей логарифму:

$$\begin{aligned} 2 \cdot [40 \cdot \lg 4\pi + 40 \cdot \lg D + 2\beta D_{KM}] &\leq \\ &\leq 20 \cdot \lg \delta + 20 \cdot \lg P_{np} - 40 \cdot \lg K_{ni\delta} - 20 \cdot \lg P_i - 20 \cdot \lg(2\pi R_e^2). \end{aligned}$$

Поділивши нерівність на 2 та виконавши перегрупування, отримаємо:

$$\begin{aligned} 40 \cdot \lg 4\pi + 40 \cdot \lg D + 2\beta D_{KM} &\leq \\ &\leq 10 \cdot \lg \delta + 10 \cdot \lg P_{np} - 20 \cdot \lg K_{ni\delta} - 10 \cdot \lg P_i - 10 \cdot \lg(2\pi) - 20 \cdot \lg R_e, \\ 40 \cdot \lg 4\pi + 10 \cdot \lg(2\pi) + 40 \cdot \lg D + 2\beta D_{KM} &\leq \\ &\leq 10 \cdot \lg \delta + 10 \cdot \lg P_{np} - 20 \cdot \lg K_{ni\delta} - 10 \cdot \lg P_i - 20 \cdot \lg R_e. \end{aligned}$$

Виходячи з того, що число  $\pi$  є константою, позначимо суму  $40 \cdot \lg 4\pi + 10 \cdot \lg(2\pi)$  через  $2K$ . Після нескладних перетворень остаточно отримаємо:

$$\begin{aligned} 20 \cdot \lg D + \beta D_{KM} + K &\leq \\ &\leq \frac{1}{2} (10 \cdot \lg \delta + 10 \cdot \lg P_{np} - 20 \cdot \lg K_{ni\delta} - 10 \cdot \lg P_i - 20 \cdot \lg R_e), \end{aligned} \quad (6)$$

## MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

де  $K \approx 10,98$  дБ.

Вираз (6) прийнято називати несурою нерівністю дальності дії РЛС. У його правій частині шість доданків, що в децибельній формі виражають значення головних технічних характеристик РЛС, а саме: коефіцієнта розпізнавання  $\delta$ , чутливості приймального пристрою  $P_{пр}$ , коефіцієнта підсилення антени РЛС –  $K_{під}$ , потужності випромінювання  $P_i$  і головного параметра опромінюваної радіолокаційної цілі – радіуса еквівалентної поверхні, що відбиває  $R_e$ .

### Висновки

Таким чином, ключові фактори, що визначають виявлення радіолокаційних цілей при забезпеченні безпеки об'єктів критичної інфраструктури, облік яких дозволить оптимізувати процес виявлення повітряних цілей імпульсними станціями радіолокації, це закономірності відображення електромагнітного сигналу (хвилі) від різних цілей та закономірності поширення, згасання та спаду інтенсивності електромагнітних хвиль у приземних шарах атмосфери. Це вплив рельєфу місцевості, рослинності, забудов на формування зон радіолокаційної освітленості і тіні та чинники, що впливають на процес виділення корисного сигналу на фоні перешкод.

### References:

- [1] Офіційне інтернет-представництво Президента України. (2024). *Ключове завдання нашої держави... Промови та звернення*. Вилучено з: <https://www.president.gov.ua/news/speeches>
- [2] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Шевченко Р.І., Шевченко О.С. (2023). Характеристика об'єктів критичної інфраструктури держави (особливості ядерних та інших стратегічних об'єктів). *Комунальне господарство міст*. Том 1, випуск 175. С.160-168. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-160-168>
- [3] Портал «Все про бухгалтерський облік». (2024). *Постанова КМУ від 04.03.2015р. № 83 «Про затвердження переліку об'єктів державної власності, що мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави»*. (Редакція від 26.08.2021р.). Вилучено з: <https://document.vobu.ua/doc/7863>
- [4] «Вікіпедія». (2024). *Перелік атак БПЛА Shahed 136*. Вилучено з: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Перелік\\_атак\\_БПЛА\\_Shahed\\_136](https://uk.wikipedia.org/wiki/Перелік_атак_БПЛА_Shahed_136)
- [5] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Камишенцев Г.В., Фаррахов О.В. (2024). Аналіз деяких аспектів терористичних вплив ударними дронами. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends: Collection of scientific papers «ЛОГОС» with*

## MILITARY AFFAIRS AND NATIONAL SECURITY

- Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Oxford, February 2, 2024. «P.C. Publishing House», United Kingdom. P.128–133. <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.202>*
- [6] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дивизинюк М.М., Камишенцев Г.В., Фаррахов О.В. (2024). Деякі аспекти класифікації безпілотних літальних апаратів в інтересах захисту об'єктів критичної інфраструктури. *Scientific Collection «InterConf+», 43(193): with the Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Scientific Goals and Purposes in XXI Century» (March 19–20, 2024; Seattle, USA) / comp. by LLC SPC «InterConf». Seattle: ProQuest LLC. С.624–637. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.03.2024.060>*
- [7] Електронна версія «Велика українська енциклопедія». (2024). *Радіолокаційна станція*. Вилучено з: <https://vue.gov.ua/Радіолокаційна станція>
- [8] P Rohde & Schwarz. (2024). *Pocket guide: Radar and electronic warfare*. Вилучено з: [https://www.rohde-schwarz.com/ua/solutions/test-and-measurement/aerospace-defense/radar-ew-test/radar-and-electronic-warfare-pocket-guide\\_255695.html?cid=010\\_com\\_dsp\\_123\\_rt\\_22-10\\_int\\_\\_radar-pocketguide\\_ros\\_banner](https://www.rohde-schwarz.com/ua/solutions/test-and-measurement/aerospace-defense/radar-ew-test/radar-and-electronic-warfare-pocket-guide_255695.html?cid=010_com_dsp_123_rt_22-10_int__radar-pocketguide_ros_banner)
- [9] Дивизинюк, М.М., Азаренко, Е.В., Гончаренко, Ю.Ю., Лазаренко, С.В., Ожиганова, М.И. (2019). *Информационно-технические методы предотвращения чрезвычайных ситуаций террористического характера на объектах критической инфраструктуры. Часть 1. С использованием активных импульсных радиолокационных средств*. Монографія. Київ. ДУ «ІГНС НАН України».
- [10] Азаренко Е.В., Бородина Н.А., Дивизинюк М.М., Касаткина Н.В., Лазаренко С.В., Рыбка Е.А. (2017). Математическая модель выявления нештатных ситуаций террористического характера с использованием образов людей, находящихся около объектов критической инфраструктуры. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. Хмельницький. Хмельницький національний університет, № 3 (59). С.141–145.
- [11] Азаренко Е.В., Бородина Н.А., Гончаренко Ю.Ю., Касаткина Н.В., Лазаренко С.В., Рыбка Е.А. (2017). Разработка математической модели радиолокационного обнаружения и идентификации людей и других опасных целей на подходах к охраняемым объектам критической инфраструктуры в стандартных условиях. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. Хмельницький. Хмельницький національний університет. № 4 (60). С.161–165.
- [12] Гончаренко Ю.Ю., Коноваленко Н.В., Камышенцев Г.В., Лазаренко С.В. (2017). Методика оценки эффективности радиолокационного поиска опасных целей. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. Хмельницький. Хмельницький національний університет. № 1(57). С.132–135.