

DOI 10.36074/logos-24.01.2025.028

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗМІНИ ДАЛЬНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ЗАСОБІВ ТЕРОРИСТИЧНОГО ВПЛИВУ НА ОБ'ЄКТИ, ЩО ОХОРОНЯЮТЬСЯ, ЗАЛЕЖНО ВІД СТАНУ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА І ПАРАМЕТРІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

Азаренко Олена Василівна¹, Гончаренко Юлія Юріївна²,
Дівізінюк Михайло Михайлович³, Землянський Олександр Миколайович⁴,
Фаррахов Олександр Володимирович⁵

1. доктор фізико-математичних наук, професор, заступник керівника
Науково-дослідний лабораторно-експериментальний центр «БРАНД ТРЕЙД», УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0003-2927-5545

2. доктор технічних наук, доцент, професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації
Європейський університет, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0003-2045-0263

3. доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник
Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0002-5657-2302

4. кандидат технічних наук, доцент, начальник наукового відділу
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0002-1305-0387

5. кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник
Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0003-4988-126X

Анотація. У роботі пропонується нова модель зміни дальності виявлення повітряної цілі залежно від стану повітряного середовища і параметрів радіолокаційних станцій.



섹션 7.

MILITARY SCIENCES, NATIONAL SECURITY AND SECURITY OF THE STATE BORDER

Спочатку розглядається одна з моделей зміни дальностей виявлення малих повітряних цілей радіолокаційними станціями, і відмічаються її головні недоліки, зокрема відсутність врахування стану атмосфери. Потім дається опис чинників, що визначають стан приземних шарів атмосфери і порядок їх урахування. Після чого пропонується нова математична модель

Вступ

Одним із аспектів забезпечення безпеки України є захист критичної інфраструктури нашої держави від терористичного впливу [1]. До складу цієї інфраструктури входять атомні, теплові та гідроелектростанції, металургійні та нафтохімічні комбінати, та інші стратегічні об'єкти, що охороняються [2,3]. Об'єкти енергетики та інші об'єкти критичної інфраструктури постійно атакують повітряні засоби терористичного впливу [4-9]. Основним засобом виявлення цих ударних засобів та інших повітряних цілей є імпульсні станції радіолокації [10,11], які забезпечують вирішення завдань охорони та захисту об'єктів критичної інфраструктури.

Відома математична модель зміни дальностей виявлення безпілотних ударних засобів терористичного впливу на об'єкти критичної інфраструктури України, що охороняються, залежно від зондувальних характеристик станцій виявлення [12]. Її головним недоліком є відсутність врахування факторів повітряного середовища, що постійно змінюється, особливо в приземних шарах атмосфери, де маневрують засоби повітряного нападу, що атакують об'єкти критичної інфраструктури. У той же час врахування факторів стану приземних шарів атмосфери та особливостей виявлення малих повітряних цілей дозволить проводити точні розрахунки дальностей виявлення цих цілей радіолокаційними станціями [13-16] і, як наслідок, підвищить ступінь забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури та інших стратегічних об'єктів, що охороняються.

Мета роботи – розробка математичної моделі зміни дальності виявлення повітряних засобів терористичного впливу на об'єкти, що охороняються в залежності від стану повітряного середовища та параметрів радіолокаційних станцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання. Спочатку розглянути одну з моделей зміни дальностей виявлення малих повітряних цілей станціями радіолокації, і відзначити її головні недоліки, у тому числі відсутність врахування стану атмосфери. Потім дати опис факторів, що визначають стан приземних шарів атмосфери та порядок їх врахування. Після чого запропонувати нову математичну модель зміни дальності

виявлення повітряних засобів терористичного впливу на об'єкти, що охороняються, залежно від стану повітряного середовища та параметрів радіолокаційних станцій.

Виклад основного матеріалу

Математична модель зміни дальностей виявлення безпілотних ударних засобів терористичного впливу на об'єкти критичної інфраструктури України, що охороняються, залежно від зондувальних характеристик станцій виявлення являє собою систему з трьох математичних залежностей.

Перша з них описує закономірність спаду інтенсивності електромагнітної хвилі, що поширюється, визначається робочою частотою радіолокаційної станції (1).

$$\Psi(D, f) = -20 \cdot \lg D - 2\beta D_{\text{км}} - 2K \quad (1)$$

Залежність $\Psi(D, f)$ розглядається як функція двох змінних. А саме: D – поточної відстані від джерела випромінювання електромагнітних хвиль (тобто антени радіолокаційної станції), що вимірюється в метрах, і f – зондувальної частоти радіолокаційної станції, вимірюваної в Герцах. Формально вона є сумою трьох доданків. Перший доданок $20 \cdot \lg D$ – це добуток десяткової логарифмічної функції поточної відстані від джерела випромінювання електромагнітних хвиль на постійний коефіцієнт, що дорівнює 20. Говорячи іншими словами, це децибельне представлення поточної відстані від джерела випромінювання електромагнітних хвиль. Другий доданок $2\beta D_{\text{км}}$ – це подвоєний добуток коефіцієнта загасання електромагнітних хвиль у приземних шарах атмосфери β , що вимірюється в Децибелах на кілометр, і поточної відстані від антени радіолокаційної станції в кілометрах, тобто $D_{\text{км}}$. Третій доданок – це константа $2K$, яка дорівнює $20 \cdot \lg 4\pi$. Виходячи з того, що число π є константою, отримуємо, що $K \approx 10,98$ дБ.

Друга залежність у системі (2) дає змогу обчислити енергетичний потенціал радіолокаційної стації за цілком визначеною метою. Він (енергетичний потенціал) $P_{\text{ерлс}}$ визначається п'ятьма доданками в децибельній формі.

$$P_{\text{ерлс}} = 10 \cdot \lg \delta + 10 \cdot \lg P_{\text{пр}} - 20 \cdot \lg K_{\text{нід}} - 10 \cdot \lg P_i - 10 \cdot \lg S_{\text{РО}} \quad (2)$$

Перший доданок – це коефіцієнт розпізнавання δ . Це технічний параметр

섹션 7.

MILITARY SCIENCES, NATIONAL SECURITY AND SECURITY OF THE STATE BORDER

будь-якого радіотехнічного пристрою. Він характеризує обробку відбитого від цілі радіолокаційного сигналу в приймальному пристрої РЛС. Це безрозмірна величина, яка лежить в основі оптимального виявлення і показує, у скільки разів має бути перевищення рівня корисного сигналу над рівнем перешкод. Другий доданок – чутливість приймального пристрою P_{np} . Вона вимірюється у Ватах, у децибельній формі воно визначатиметься як десятиковий логарифм відношення фактичної чутливості приймача до порогового рівня, що дорівнює одному Ватту. Третій доданок – коефіцієнт підсилення антени РЛС – K_{pid} . Він є безрозмірною величиною і виражається в децибелах. Четвертий доданок – випромінювана потужність в імпульсі або імпульсна потужність P_i , вимірюється у Ватах, у децибельній формі воно визначатиметься як десятиковий логарифм відношення фактичної потужності до порогового рівня, що дорівнює одному Вату. П'ятий доданок – це головний параметр опромінюваної радіолокаційної цілі – її ракурсна поверхня, що відображає S_{RO} . Вона вимірюється у квадратних метрах і визначатиметься як десятиковий логарифм відношення фактичної поверхні, що відображає до порогового рівня, що дорівнює одному квадратному метру.

Третя залежність (3) визначає умову отримання максимальної дальності виявлення радіолокаційної цілі D_{max} , яка забезпечується рівністю значення закономірності спаду інтенсивності електромагнітної хвилі половині значення енергетичного потенціалу станції (внаслідок того, що хвиля проходить двічі відстань від станції до цілі).

$$\Psi(D_{max}, f) = \frac{1}{2} \Pi_{epлс}(\delta, P_{np}, K_{pid}, \lg P_i, S_{RO}) \quad (3)$$

У жодній із цих залежностей не враховуються фактори стану приземних шарів атмосфери. Тільки в першій залежності враховуються об'ємне загасання електромагнітної хвилі за нормальних умов у приземних шарах атмосфери.

Під нормальними умовами (нормальною атмосферою) у фізиці розуміють тиск 760 мм.рт.ст. і температуру 273,15K (0°C). Тому термін нормальність використовується з екологічних або природних позицій, за яких забезпечується оптимальна терморегуляція людини, що перебуває у спокої. Це температура повітря від 18 до 22°C і його вологості від 50 до 80%. З цих позицій виділяють п'ять основних чинників, що визначають об'ємне загасання електромагнітних хвиль в атмосфері, а саме f – частота електромагнітної хвилі, $S^{\%}$ – вологість, T^{0C} – температура повітря, P – атмосферний тиск, Q –

концентрація антропогенних домішок. Тоді коефіцієнт об'ємного загасання визначатиметься як (4)

$$\beta_{f,A} = \varphi(f, s^{\%}, T^{0C}, P, Q) \quad (4)$$

Під час розв'язання окремих задач можна розглядати коефіцієнт об'ємного загасання як залежність від трьох (5) або двох (6) параметрів, за умови, що інші параметри приземних шарів атмосфери залишаються незмінними.

$$\beta_{f,A} = \left(f, s^{\%}, T^{0C} \right) \Big|_{P=\text{const}, Q=\text{const}} \quad (5)$$

$$\beta_{f,A} = \left(f, s^{\%} \right) \Big|_{T=\text{const}, P=\text{const}, Q=\text{const}} \quad (6)$$

Тепер, об'єднуючи залежності (4), (1), (2) і (3) у систему (7), отримаємо нову математичну модель.

$$\left. \begin{aligned} \beta_{f,A} &= \varphi(f, s^{\%}, T^{0C}, P, Q) \\ \Psi(D, f) &= -20 \cdot \lg D - 2\beta_{f,A} D_{\text{км}} - 2K \\ \Pi_{\text{ерлс}} &= 10 \cdot \lg \delta + 10 \cdot \lg P_{np} - 20 \cdot \lg K_{\text{нід}} - 10 \cdot \lg P_i - 10 \cdot \lg S_{RO} \\ \Psi(D_{\text{max}}, f) &= \frac{1}{2} \Pi_{\text{ерлс}}(\delta, P_{np}, K_{\text{нід}}, \lg P_i, S_{RO}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Висновки

Таким чином, математична модель зміни дальності виявлення повітряних засобів терористичного впливу на об'єкти, що охороняються в залежності від стану повітряного середовища і параметрів радіолокаційних станцій є системою з чотирьох математичних залежностей. Перша з них визначає значення коефіцієнта об'ємного згасання електромагнітних хвиль в атмосфері, залежно від частоти хвилі, вологості та температури повітря, атмосферного тиску та концентрації антропогенних домішок. Друга з них описує закономірність спаду інтенсивності електромагнітної хвилі, що поширюється, визначається робочою частотою радіолокаційної станції і станом приземних шарів атмосфери. Третя залежність у системі дозволяє обчислити енергетичний потенціал станції радіолокації за цілком певною ціллю. Четверта

섹션 7.

MILITARY SCIENCES, NATIONAL SECURITY AND SECURITY OF THE STATE BORDER

залежність визначає умову отримання максимальної дальності виявлення радіолокаційної цілі, що забезпечується рівністю значення закономірності спаду інтенсивності електромагнітної хвилі половині значення енергетичного потенціалу станції

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [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] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Камишенцев Г.В., Фаррахов О.В. (2024). Аналіз деяких аспектів терористичних вплив ударними дронами. *Collection of scientific papers «Λ'ΟΓ Σ», (February 2, 2024; Oxford, UK)*. Р.128-133. <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.024>.
- [5] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Камишенцев Г.В., Фаррахов О.В. (2024). Аналіз деяких аспектів терористичних вплив ударними дронами у першому кварталі 2023 року. *Collection of Scientific Papers «Λ'ΟΓ Σ», (March 1, 2024; Paris, France)*. Р.108-113. <https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.027>.
- [6] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Камишенцев Г.В., Фаррахов О.В. (2024). Характер нанесення терористичних вплив ударними дронами у другому кварталі 2023 року. *International scientific journal «Grail of Science» №38*. Р.117-127. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.04.2024.018>.
- [7] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Камишенцев Г.В., Фаррахов О.В. (2024). Зміни характеру завдання терористичних вплив ударними дронами в третьому кварталі 2023 року. *Scientific Collection «InterConf+», 44(197)*. Р.656-669 <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.04.2024.062>.
- [8] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Камишенцев Г.В., Фаррахов О.В. (2025). Особливості деяких аспектів терористичних вплив ударними дронами у четвертому кварталі 2023 року. *International scientific journal «Grail of Science» №39*. Р.225-237. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.05.2024.032>.
- [9] Дівізінюк М.М., Фаррахов О.В., Марцева Л.А., Коцюбинський А.О., Власенко О.В. (2024). Аналіз сценаріїв використання безпілотних літальних апаратів проти об'єктів критичної інфраструктури. *Науковий журнал «Наука, технології інновації» №3(31)*. С.107-114. <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2024-3-12>.
- [10] Азаренко Е.В., Гончаренко Ю.Ю., Дивизинюк М.М., 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». 2019. - 164 с.

섹션 7.

MILITARY SCIENCES, NATIONAL SECURITY AND SECURITY OF THE STATE BORDER

- [11] Азаренко О.В. Гончаренко Ю.Ю. Дівізінюк М.М. Землянський О.М. Фаррахов О.В. (2024). Основні закономірності процесу виявлення цілей імпульсними радіолокаційними станціями при забезпеченні безпеки об'єктів критичної інфраструктури. *Scientific Collection «InterConf+»*, 45(201). P.650-660. <http://doi.org/10.51582/interconf.19-20.05.2024.067>.
- [12] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Мельник В.І., Фаррахов О.В. (2024). Розробка математичної моделі зміни дальностей визначення безпілотних ударних засобів терористичного впливу на об'єкти критичної інфраструктури України, що охороняються в залежності від зондуючих характеристик станцій виявлення *International scientific journal «Grail of Science» №43*. P.229-238. <http://doi.org/10.36074/grail-of-science.06.09.2024.029>.
- [13] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Землянський О.М., Фаррахов О.В. (2024). Закономірності поширення, згасання та спаду інтенсивності електромагнітних хвиль в атмосфері, що впливають на експлуатацію радіолокаційних станцій, які забезпечують безпеку об'єктів критичної інфраструктури *International scientific journal «Grail of Science» №40*. P.235-248. <http://doi.org/10.36074/grail-of-science.07.06.2024.036>.
- [14] Азаренко О.В. Гончаренко Ю.Ю. Дівізінюк М.М. Землянський О.М. Фаррахов О.В. (2024). Умови єдиності рішення задачі зворотного розсіювання для відновлення образу малої повітряної цілі. *Scientific Collection «InterConf+»*, 47(209). P.499-511. <http://doi.org/10.51582/interconf.19-20.07.2024.046>,
- [15] Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Землянський О.М., Фаррахов О.В. (2024). Вплив вологості повітря на дальність виявлення цілей, що атакують об'єкти критичної інфраструктури України *Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ», (September 20, 2024; Paris, France)*. P.87-93. <https://doi.org/10.36074/logos-20.09.2024.017>.
- [16] Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Землянський О.М., Фаррахов О.В. (2024). Математична модель зміни дальностей виявлення безпілотних ударних засобів терористичного впливу на об'єкти критичної інфраструктури України, що охороняються, залежно від ступеня згасання електромагнітних хвиль у приземних шарах атмосфери. *Scientific Collection «InterConf+»*, 49(217). P.272-287. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.09.2024.027>.