

УДК 004.942:[621.391.825:629.735.33](045)

<http://dx.doi.org/10.30970/vam.2026.36.14095>

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗАВАДИ В СИСТЕМАХ ПРОТИПОВІТРЯНОГО ЗАХИСТУ: ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА АЛГОРИТМІВ

П. Новіцький, М. Степаняк

Національний університет “Львівська політехніка”,

вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013,

e-mail: pavlo.s.novitskyi@lpnu.ua

Стрибок у розвитку безпілотних літальних апаратів (БпЛА) і повітряних систем став рушійною силою масштабних трансформацій у найрізноманітніших сферах – від логістики й комунікацій до дослідження навколишнього середовища, трансформації галузевих підходів. Ці технології покладаються на точні та складні електромагнітні сигнали для зв'язку та навігації. Однак ця залежність також робить їх вразливими до збоїв через електромагнітні завади (ЕМЗ). Використовуючи цю вразливість, захисні системи можуть нейтралізувати цілі системи, не вдаючись до фізичного знищення, зменшуючи побічний збиток і мінімізуючи ризик для людських життів. ЕМЗ, як форма електронного захисту, становить високоефективне та масштабоване рішення цієї проблеми. Це ускладнює їхню здатність отримувати та передавати сигнали, орієнтуватися у просторі чи виконувати потрібні операції, забезпечуючи надійний електронний захист. Систематизовано фізичні принципи впливу ЕМЗ на важливі підсистеми БпЛА – навігаційні приймачі GPS/GLONASS, канали командного зв'язку та радарні системи, – із залученням статистично-фізичної моделі Міддлтона для опису ймовірнісних характеристик завад. Проаналізовано технологічні рішення для створення ЕМЗ, зокрема застосування графен-полімерних композитів як екрануючих матеріалів, які забезпечують ефективність екранування понад 40 дБ у діапазоні 1–3 ГГц, а також спрямованих антенних систем для мінімізації побічного впливу на цивільну інфраструктуру. Розглянуто адаптивні алгоритми оптимізації параметрів завади, враховуючи методи градієнтного спуску, байєсівську оптимізацію та підходи на основі машинного навчання з підкріпленням, що дають змогу динамічно коригувати частоту, амплітуду та фазу сигналу перешкоди в реальному часі. Окремо висвітлено чисельні методи моделювання електромагнітних взаємодій – скінченно-різницева моделювання у часовій області (FDTD) і метод скінченних елементів (FEM), – а також технологію реверсування часу для високоточного фокусування електромагнітної енергії на цільових об'єктах. Визначено перспективні напрями подальших досліджень, серед яких масштабування систем для протидії великим роям БпЛА, інтеграція генеративного штучного інтелекту в системи електронної боротьби та розробка портативних енергоефективних рішень для польових умов.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БпЛА), електромагнітні завади (ЕМЗ), радіоелектронна боротьба, кіберфізичні системи, адаптивні алгоритми, обробка сигналів, чисельне моделювання.

1. ВСТУП

Ефективність ЕМЗ як протизаходу залежить від міждисциплінарного підходу, який поєднує обробку сигналів, матеріалознавство та алгоритмічний підхід для адаптації до змін у реальному часі. Теоретичні основи, такі як статистично-фізична модель Міддлтона, що дає змогу описати ймовірнісні характеристики завад та їхній вплив на роботу електронних пристроїв, забезпечують основу для розуміння впливу ЕМЗ на електронні системи [1]. Тоді як сучасні досягнення в адаптивних алгоритмах, екрануючих матеріалах на основі графену та спектральному аналізі в

реальному часі розширили потенційні можливості застосування ЕМЗ. Використовуючи ці розробки, системи захисту можуть досягати точного та цілеспрямованого знешкодження літальних об'єктів, знижуючи оперативну ефективність цих технологій, забезпечуючи мінімально можливі пошкодження.

Наша праця спирається на широкий спектр досліджень, щоб дослідити, які принципи та алгоритми ЕМЗ можуть бути розроблені й ефективно розгорнуті: від огляду основ ЕМЗ та його застосування як методу радіоелектронного захисту до аналізу сучасних технологічних рішень і перспектив їх практичного впровадження. Також розглядаються важливі компоненти розробки ЕМЗ, такі як методи інтерференції сигналу, розширені схеми модуляції, адаптивні механізми зворотного зв'язку та взаємодія між матеріалами, що екранують електромагнітні завади, та алгоритмами створення перешкод, пропонуючи зрозуміти, як ці технології можна оптимізувати для застосування проти БпЛА, дронів та інших літальних об'єктів, що можуть нести шкоду [14].

2. Фізичні принципи та вплив ЕМЗ

Електромагнітні завади – це явище, коли електромагнітне випромінювання порушує роботу електронних систем, вносячи небажані сигнали в їхнє середовище. Це стало потужною стратегією протидії та захисту проти систем, які значною мірою покладаються на точні електромагнітні сигнали для навігації, зв'язку і цілевказання. Важливість ЕМЗ полягає в здатності вводити руйнівні сигнали в електромагнітний спектр, який використовують цільові системи [11]. Роблячи це, ЕМЗ маскують, спотворюють або замінюють оригінальні сигнали. Наприклад, велика кількість сучасних БпЛА та дронів залежать від сигналів глобальної системи позиціонування (GPS) у діапазоні від 1,2 до 1,6 ГГц для навігації. ЕМЗ може спотворювати ці сигнали, змушуючи систему неправильно обчислювати своє положення чи взагалі втрачати орієнтування. Як продемонстровано в дослідженні [8], важливими підсистемами БпЛА, вразливими до сильних ЕМЗ, є система передачі даних, система управління польотом і навігації, а також система живлення. Лінії зв'язку, необхідні для операцій командування та управління, також є вразливими. ЕМЗ можуть заглушити ці сигнали шумом, позбавивши його можливості передавати сигнал і розриваючи зв'язок між операторами та їхніми пристроями. Радарні системи, критично важливі для ситуаційної обізнаності, також не захищені, оскільки вони можуть бути перевантажені хибним відлунням або засліплені постійними перешкодами. Основа цих стратегій часто сягає статистично-фізичних моделей Міддлтона, які пояснюють, як конкретні розподіли шуму взаємодіють з електромагнітними системами, прокладаючи шлях для цілеспрямованих збоїв. Зокрема, функція густини ймовірності (ФГЙ) моделі Міддлтона класу А описується виразом [2]

$$p(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^m}{m!} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_m^2}\right),$$

де A – параметр перекриття імпульсів; $\sigma_m^2 = \sigma^2 \left(\frac{m/A+\Gamma}{1+\Gamma}\right)$; $\Gamma = \sigma_G^2/\sigma_I^2$ – відношення потужності гауссового шуму σ_G^2 до потужності імпульсної складової σ_I^2 .

Особливим аспектом ЕМЗ є зосередженість на конкретних діапазонах частот, які використовуються цільовими системами. БпЛА та літальні об'єкти часто працюють у чітко визначених діапазонах частот, а системи електромагнітних перешкод роз-

роблені для точної ідентифікації та націлювання на ці частоти. Удосконалені алгоритми, такі як описані Чжан та іншими, динамічно аналізують електромагнітний спектр у режимі реального часу, адаптуючи свої перешкоди, відповідно до робочих шаблонів цілі [3]. Такі методи, як стрибкоподібне перемикання частоти та генерації сигналу, гарантують, що ЕМЗ залишаються ефективними, навіть якщо ціль використовує контрзаходи, як-от зміна частоти.

Ефективність електромагнітних перешкод часто виходить за межі прямого порушення сигналу. Гармонічні та субгармонічні перешкоди використовують нелінійну поведінку електронних схем, створюючи внутрішній шум або дестабілізуючи систему. Наприклад, радіолокаційні системи можуть бути обдуреними гармоніками їхніх робочих частот, що призведе до прорахунків або повного збою. Дослідження, виконані Орасуг та Реєм, демонструють, як такі матеріали, як графен, інтегровані в системи перешкод, можуть посилити ці руйнівні ефекти шляхом посилення гармонічних сигналів [4].

Отже, аналіз фізичних механізмів взаємодії ЕМЗ з бортовими системами БпЛА засвідчує вразливість їхніх важливих підсистем – навігації (GPS), каналів зв'язку, радарних приймачів і ланцюгів живлення. Розуміння цих вразливостей дає змогу сформулювати конкретні вимоги до матеріалів, конструкцій антен і схем випромінювання, що розглянемо в наступному розділі.

3. ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЕМЗ

Взаємодія матеріалів відіграє ще одну важливу роль в ЕМЗ. Коли електромагнітні хвилі стикаються з матеріалами, вони можуть відбиватися або поглинатися. Відбиті хвилі можуть перешкоджати сигналам цільової системи, створюючи спотворення, тоді як поглинені хвилі можуть генерувати тепло, потенційно пошкоджуючи апаратне забезпечення цілі. Ця динамічна взаємодія між відображенням і поглинанням є не лише природним явищем, а й розробленою особливістю передових систем ЕМЗ. Наприклад, матеріали на основі графену використовують для захисту дружніх систем від перешкод і для фокусування випромінюваних електромагнітних перешкод для максимального негативного впливу на систему. Ефективність екранування (SE) визначається як [4]

$$SE_{\text{total}} = SE_R + SE_A + SE_M \text{ (дБ)},$$

де $SE_R = 20 \log_{10} \left(\frac{|\eta_0 + \eta_s|^2}{4 \operatorname{Re}(\eta_0) \operatorname{Re}(\eta_s)} \right)$ – втрати на відбиття, $SE_A = 20 \log_{10}(e^{t/\delta})$ – втрати на поглинання (t – товщина матеріалу, $\delta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)}$ – глибина скін-шару), SE_M – поправка на багаторазові перевідбиття, η_0 та η_s – хвильові імпеданси вільного простору та матеріалу, відповідно (у загальному випадку комплексні). Наприклад, для графен-полімерного композита з електричною провідністю $\sigma \approx 10^4$ С/м та товщиною $t = 2$ мм на частоті 2,4 ГГц глибина скін-шару становить $\delta \approx 0,1$ мм, що забезпечує значне поглинання ($t/\delta \approx 20$). За таких параметрів SE_{total} перевищує 40 дБ, що є достатнім для надійного екранування типових ліній зв'язку та навігаційних каналів БпЛА у діапазоні 1–3 ГГц. Зі збільшенням товщини або провідності матеріалу ефективність екранування зростає ще відчутніше.

Обрані матеріали також відіграють важливу роль у розвитку систем ЕМЗ, зосереджуючись на розробці високоефективного екрануючого покриття й застосування адаптивних компонентів, які підвищують ефективність системи. Такі матеріали, як графен-полімерні композити, зробили революцію в технологіях екра-

нування електромагнітних перешкод. Вони поєднують легкі властивості з винятковою провідністю та електромагнітним поглинанням, що робить їх ідеальними для мобільних систем ЕМЗ. Моделювання методом скінченних елементів дає змогу відтворити взаємодію цих матеріалів з електромагнітними хвилями на різних частотах, забезпечуючи точну оптимізацію для активних і для захисних застосувань. Недавні висновки Орасуг і Рея в їхньому огляді матеріалів, що екранують електромагнітні перешкоди, підтверджують трансформаційний потенціал таких композитів у різних сценаріях [4]. Комплексний огляд [10] систематизує сучасні композитні матеріали для електромагнітного екранування, враховуючи наповнювачі на основі вуглецю, металів та їхні гібридні поєднання. Такі матеріали, що здатні змінювати свої електромагнітні властивості у відповідь на зовнішні подразники, є амбітним рубежем у розробці систем ЕМЗ. Наприклад, феромагнітні матеріали, інтегровані з наноструктурованими полімерами, можуть динамічно змінювати свою проникність і діелектричну проникність, допомагаючи в режимі реального часу налаштовувати ефективність екранування, що може поліпшити адаптивність обладнання. Ці матеріали особливо корисні в густонаселених електромагнітних середовищах, де гнучкість спектра критично важлива [4].

Завдяки впливу електромагнітних випромінювань на системи можна досягнути вагомих збоїв навігації. Це один з найсерйозніших наслідків, особливо для систем, які залежать від GPS. Перешкоди на частотах GPS можуть призвести до помилок позиціонування, коли цільовий пристрій обчислює неправильні місцезнаходження, що призводить до відхилення від свого шляху. У серйозніших випадках сигнали GPS можуть бути повністю заблоковані, змушуючи систему покладатися на інерційну систему наведення та навігацію, яка набагато менш точна та схильна до помилок з часом. Дослідження Міддлтона щодо введення імпульсного шуму стало основоположним у демонстрації того, як ефективно налаштовані перешкоди можуть використовувати ці вразливості [2]. Методи спрямованих ЕМЗ для вибіркового придушення сигналів GPS та GLONASS детально розглянули автори в [13].

Системи зв'язку особливо вразливі до ЕМЗ, оскільки вони утворюють основу командно-контрольних операцій. Порушення роботи цих систем може спонукати до розриву критично важливих командних зв'язків, що спонукатиме до дестабілізації роботи і зробить неефективними цілі групи БпЛА. Заповнюючи середовище сигналу ретельно підібраним шумом, ЕМЗ може перевищити співвідношення сигнал/шум (SNR), фактично унеможлививши надійну передачу даних. Ефективність завади визначається відношенням потужності завади до потужності корисного сигналу (JSR – Jamming-to-Signal Ratio)

$$JSR = \frac{P_j \cdot G_j}{P_s \cdot G_s} \cdot \frac{R_t^2}{R_j^2} \cdot \frac{B_s}{B_j},$$

де P_j , G_j – потужність та коефіцієнт підсилення антени джерела завади; P_s , G_s – потужність і коефіцієнт підсилення антени передавача корисного сигналу; R_t – відстань від передавача сигналу до приймача; R_j – відстань від джерела завади до приймача; B_s та B_j – ширини смуг корисного сигналу та завади, відповідно. Коефіцієнт підсилення приймача G_r скорочується, оскільки він однаково впливає на обидва сигнали. Коли $JSR \gg 1$, канал зв'язку стає непрацездатним. Для ілюстрації розглянемо сценарій, коли джерело завади з потужністю 10 Вт і спрямованою антеною ($G_j = 20$ дБі) розташоване на відстані $R_j = 500$ м від приймача БпЛА, тоді як командний передавач ($P_s = 1$ Вт, $G_s = 5$ дБі) перебуває на відстані

$R_t = 5$ км; при порівнянних смугах сигналу та завади відношення JSR сягає значень порядку 10^2 – 10^3 , що практично гарантує втрату працездатності каналу зв'язку. Крім звичайного насичення шумом, передові методи, такі як підробка сигналу, імітують законні комунікації, обманюючи цільову систему, щоб вона інтерпретувала помилкові команди чи дані. Нещодавні експериментальні дослідження [9] підтвердили ефективність поєднання методів глушіння та підробки сигналів із використанням програмно-визначеного радіо (SDR) для нейтралізації комерційних БПЛА. Алгоритми динамічної адаптації спектра демонструють вищий рівень складності, оскільки вони аналізують зашифрований зв'язок і коригують шаблони перешкод у реальному часі. Ця адаптивність гарантує, що ЕМЗ зберігає свій руйнівний потенціал навіть проти просунутих систем, що використовують шифрування, гнучкість частоти або інші контрзаходи [3].

Радарні системи, які часто вважають очима багатьох літальних об'єктів, дуже чутливі до електромагнітних перешкод. Помилкове відлуння, створене відбитими перешкодами, може заплутати системи стеження, тоді як безперервні імпульси високої потужності можуть заглушити радіолокаційні приймачі, ефективно засліплюючи їх. Поєднання радіолокаційної перешкоди з перешкодами GPS, як досліджено Wang та ін., демонструє комплексний підхід до нейтралізації навігації та ситуаційної обізнаності у ворожих системах [3].

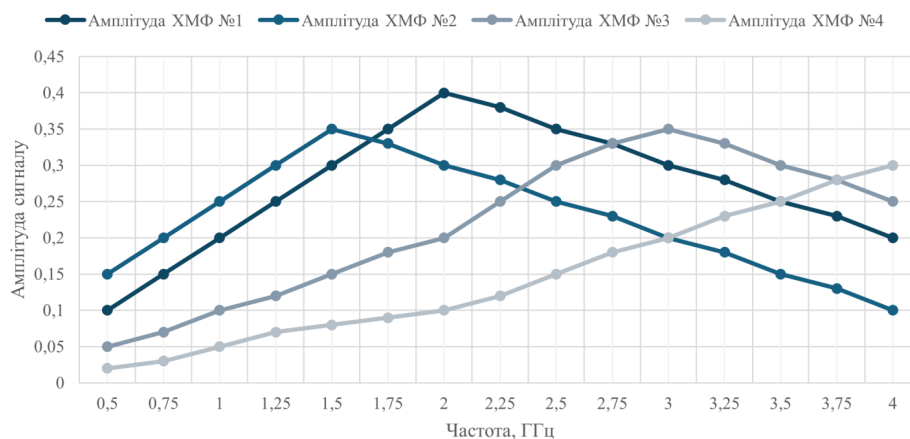


Рис. 1. Спектральний розподіл ЕМЗ на основі характеристикних модових функцій (побудовано за даними [1, 3])

На графіку (рис. 1) зображено спектральний розподіл електромагнітних завад у складних середовищах на основі характеристикних модових функцій (ХМФ), побудований на підставі статистично-фізичної моделі Міддлтона [1] та результатів спектрального аналізу перешкод [3]. Графік ілюструє, як різні модові компоненти сигналу змінюються залежно від частоти. Видно, що кожна модова функція має свій характерний максимум у певному частотному діапазоні, що підтверджує складність розподілу завад і необхідність їх точного аналізу. Ці дані свідчать про ефективність алгоритмів адаптації для ідентифікації та нейтралізації таких завад у реальному часі.

Крім того, ЕМЗ високої інтенсивності можуть навіть спричинити фізичне пошкодження електронних систем. Коли електромагнітна енергія поглинається в надлиш-

ку, вона може генерувати тепло, яке перевищує те, на яке система розрахована. Цей термічний стрес може призвести до розплавлення компонентів або зумовити стрибки напруги, які дестабілізують пристрій. Дослідження Орасуг і Рея композитів на основі вуглецю демонструє їхню подвійну роль у захисті від зовнішнього втручання, водночас уможливаючи цілеспрямовані електромагнітні атаки, здатні спричинити подібні апаратні збої [4].

Однак використання ЕМЗ як контрзаходу не позбавлене проблем. Побічні наслідки, такі як збої в роботі цивільних комунікаційних мереж або ненавмисне втручання в роботу суміжних систем, потрібно ретельно контролювати. Алгоритмізація процесу повинна охоплювати точне націлювання, досягнуте за допомогою спрямованих антен і адаптивних петель зворотного зв'язку, щоб мінімізувати ці ефекти. На графіку зображено, як кут спрямованості антени впливає на ефективність нейтралізації цільових систем і зростання побічних ефектів. Графік побудовано на підставі узагальнення даних, наведених у дослідженнях [5, 7], щодо характеристик спрямованих антенних систем та їхнього впливу на концентрацію електромагнітної енергії. Графік має схематичний характер і відображає якісні тенденції на основі узагальнення експериментальних і розрахункових даних із зазначених джерел.

З графіка (рис. 2) видно, що при вузькому куті (0–15 градусів) максимізується вплив на цільову систему, а побічні ефекти залишаються мінімальними. Зі збільшенням кута спрямованості (до 90 градусів) ефективність знижується, а побічні ефекти зростають, що підтверджує необхідність точного налаштування спрямованих антен. Використання адаптивних алгоритмів дає змогу досягти балансу між ефективністю та зниженням ризиків.

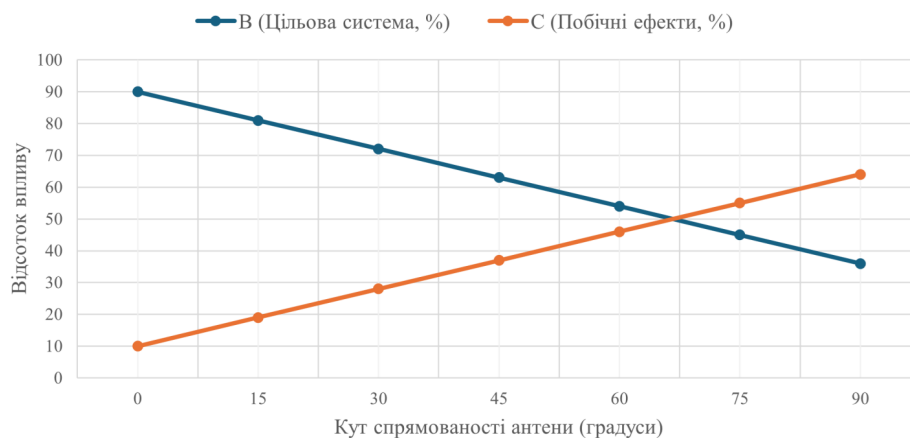


Рис. 2. Вплив кута спрямованості антени на ефективність нейтралізації цільової системи та рівень побічних ефектів

Отже, поєднання сучасних екрануючих матеріалів на основі графен-полімерних композитів і спрямованих антенних систем формує апаратну основу для створення ЕМЗ з контрольованими характеристиками. Подальше підвищення ефективності таких систем пов'язане з алгоритмічними методами адаптації параметрів завади та чисельного моделювання електромагнітних взаємодій, що розглянемо в наступному розділі.

4. АДАПТИВНІ АЛГОРИТМИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЇХНЬОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

ЕМЗ працює як стратегічний і багатогранний інструмент нейтралізації літальних об'єктів. Дедалі більша залежність БпЛА від електромагнітних сигналів для навігації, зв'язку та ситуаційної обізнаності створює можливості для цілеспрямованого руйнування, що потребує передових алгоритмічних структур. Розширення методів і засобів електронного захисту можливе завдяки розумінню та використанню таких механізмів як введення шуму, цілеспрямованого порушення частоти, гармонічних перешкод і взаємодії матеріалів. Розробка та розгортання систем створення ЕМЗ потребує надійної алгоритмічної основи, здатної адаптуватися в режимі реального часу до динамічних операційних середовищ. Процес розробки охоплює теоретичне моделювання, експериментальну перевірку та обчислювальну оптимізацію для точного та надійного створення перешкод системам БпЛА.

Зважаючи на це, критичним аспектом проєктування системи ЕМЗ є точне моделювання електромагнітних взаємодій у цільовому середовищі. Скінченно-різницева моделювання у часовій області (FDTD) та метод скінченних елементів (FEM) забезпечують високу точність і деталізацію під час аналізу поширення та взаємодії електромагнітних хвиль зі складними середовищами. Метод FDTD базується на дискретизації рівнянь Максвелла

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} (\nabla \times \mathbf{H} - \sigma \mathbf{E}), \quad \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E}),$$

де $\mathbf{E}$ та $\mathbf{H}$ – вектори електричного та магнітного полів; ε – діелектрична проникність; μ – магнітна проникність; σ – електрична провідність середовища. Ці моделі охоплюють такі важливі чинники: відбиття сигналу, заломлення, поглинання та ефекти багатопроменевого поширення. Наприклад, дослідження, проведені з використанням ревербераційних камер, як описано в “Фокусування потужних електромагнітних хвиль за допомогою реверсу часу” (фр. “Focalisation d’une onde de forte puissance par retournement temporel”), підтверджують важливість моделювання точного розподілу сигналу для оптимізації стратегій електромагнітних перешкод [5]. Методи реверсування часу виникли як трансформаційний підхід у розробці системи ЕМЗ. Ці методи використовують симетрію поширення хвилі для досягнення високоточного націлювання на перешкоди. Записуючи поширення тестових сигналів і змінюючи їхній часовий профіль, системи електромагнітних перешкод можуть фокусувати енергію безпосередньо на БпЛА, порушуючи критичні підсистеми, не впливаючи на сусідні системи. Експериментальні результати в камерах з режимним перемішуванням демонструють надійність і ефективність цього підходу в практичних сценаріях [5].

Щоб забезпечити ефективність у середовищах, що швидко змінюються, системи ЕМЗ повинні адаптуватися у реальному часі, щоб бути здатними реагувати на зміни в поведінці БпЛА або умов навколишнього середовища. Методи байєсівської оптимізації та алгоритми градієнтного спуску широко використовуються для динамічного уточнення сигналів перешкод. Ці алгоритми регулюють такі параметри: частота, амплітуда та модуляція форми хвилі на основі зворотного зв'язку в реальному часі, забезпечуючи максимальні перешкоди з мінімальними витратами електроенергії. Оптимізація параметрів вектора завади $\theta = (f, A, \varphi)$ відбувається за

правилом градієнтного спуску

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \alpha_k \nabla_{\theta} J(\theta_k),$$

де $J(\theta)$ – цільова функція ефективності завади, $\alpha_k > 0$ – крок навчання на k -й ітерації, а $\nabla_{\theta} J$ – градієнт цільової функції за параметрами частоти f , амплітуди A та фази φ сигналу завади. На практиці крок навчання α_k обирають достатньо малим для забезпечення стійкості збіжності, але водночас достатнім для відстеження динаміки цілі: параметри (f, A, φ) мають адаптуватися з частотою, порівнянною з періодом маневрів БпЛА (порядку десятків мілісекунд), що висуває жорсткі вимоги до обчислювальної швидкодії системи. Інтеграція моделей машинного навчання ще більше може розширити ці можливості. Зокрема, нещодавнє дослідження [12] демонструє використання генеративного штучного інтелекту для створення адаптивних стратегій глушіння та підробки сигналів, які значно перевищують ефективність традиційних методів. Контрольовані алгоритми навчання, засновані на об'ємних наборах даних протоколів зв'язку БпЛА та характеристик сигналу, дають змогу системам ЕМЗ передбачати і ефективно протидіяти маневрам БпЛА. Наприклад, підходи до навчання з підкріпленням, як описано в “Оцінці методів нейтралізації дронів з використанням методів радіоперешкод і підробки” (англ. “Evaluation of Drone Neutralization Methods Using Radio Jamming And Spoofing Techniques”), допомагають системам ЕМЗ ітеративно вдосконалювати свої стратегії за допомогою моделювання та відпрацюванні випробувань у реальному світі [6]. Удосконалені методи виділення ознак, зокрема вейвлет-перетворення, значно поліпшують здатність системи виявляти навіть незначні варіації у відгуках БпЛА, що суттєво підвищує загальну точність її роботи.

Ефективні системи ЕМЗ зазвичай застосовують мультимодальний підхід, поєднуючи глушіння, підробку сигналів і гібридні стратегії для досягнення максимального впливу. Теоретико-графові моделі забезпечують ефективну координацію цих модальностей, сприяючи безперебійній роботі системи та запобігаючи виникненню контрпродуктивних взаємодій. Дослідження підтвердили високу ефективність такого поєднання, особливо проти БпЛА, оснащених передовими засобами протидії, враховуючи стрибкоподібну зміну частоти чи шифрування сигналів [6].

Універсальність систем ЕМЗ дає змогу їх розгортати в різних сферах застосування, зокрема захисту цивільної інфраструктури, але кожна з яких потребує індивідуальних рішень. Як захисний механізм, ЕМЗ слугують нелетальними точними інструментами для протиповітряної оборони. Ці системи можуть виводити з ладу розвідувальні або небезпечні безпілотні літальні апарати в конфліктному середовищі, не завдаючи побічної шкоди. Мультимодальні стратегії перешкод, перевірені в експериментальних дослідженнях, забезпечують стійкість до адаптивних технологій БПЛА. Ця здатність особливо важлива в сценаріях, де мінімізація фізичного знищення є стратегічним пріоритетом [6]. Точно націлені перешкоди запобігають несанкціонованому вторгненню літальних об'єктів, одночасно забезпечуючи мінімальні порушення роботи навколишніх систем. Відповідність нормативним вимогам, зокрема щодо використання електромагнітного спектра, потребує інтеграції алгоритмічної прозорості та можливостей адаптивного націлювання для унеможливлення пошкодження цивільної інфраструктури [4, 5].

Узгоджене застосування чисельного моделювання (FDTD, FEM) та адаптивних алгоритмів (градієнтний спуск, байєсівська оптимізація, навчання з підкріпленням) забезпечує можливість цілеспрямованого керування параметрами ЕМЗ у реальному

часі. Це створює передумови для практичного розгортання таких систем у реальних операційних сценаріях, які розглянемо в наступному розділі.

5. ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Будь-яка технологія потребує практичної реалізації, що становить складну взаємодію передових матеріалів, алгоритмічних інновацій і дизайну систем. Опираючись на основоположні ідеї та технологічні досягнення, викладені вище, наступним логічним кроком є вирішення нюансів та аспектів практичного розгортання та оптимізації для реальних завдань. Хоча теоретичні рамки й експериментальна перевірка виявили надійні принципи, перетворення їх у масштабовані та контекстно-залежні програми потребує детального вивчення їхньої інтеграції в існуючі та нові системи.

Одним із важливих шляхів для просування практичної реалізації є вдосконалення взаємодії між інноваційними матеріалами та проектуванням системи. Використання композитів на основі графену, хоча й є перспективним для захисту від електромагнітних перешкод, але потребує сумісності з різними робочими середовищами. Крім провідності та механічної міцності, ці матеріали мають бути розроблені для довговічності в екстремальних умовах, таких як висока вологість, температурні коливання, тривалий вплив електромагнітних полів. Цей крок потребує ітераційного підходу до проектування, коли лабораторні прототипи піддаються стрес-тестам у реальному світі, щоб забезпечити сталість продуктивності протягом життєвого циклу пристроїв [4].

Паралельно з удосконаленням матеріалів важливо масштабувати алгоритмічні розробки в адаптивних антенних системах, щоб задовольняти вимоги до все більш цільних і динамічних середовищ передачі сигналів. Сучасні градієнтні алгоритми вже продемонстрували високу ефективність у сценаріях з обмеженими обчислювальними ресурсами, проте їх масштабування для комунікаційних мереж нового покоління, таких як 5G і майбутні стандарти, потребує інтеграції штучного інтелекту та машинного навчання. Ці технології дають змогу виконувати прогнозоване налаштування, що забезпечить системам можливість адаптуватися до моделей перешкод ще до їхньої появи, а не реагувати постфактум [7].

Технології боротьби з безпілотниками, хоча й ефективні в експериментальних установках, створюють унікальні виклики в сценаріях багатьох загроз. Взаємодія між методами глушіння та спуфінгу, особливо в середовищах із частковою діяльністю дронів, потребує передових механізмів координації. Майбутні системи можуть мати перевагу від включення децентралізованих, автономних агентів, здатних динамічно керувати частотою та ситуаційною обізнаністю. Такий підхід не тільки підвищить точність, а й мінімізує ненавмисні збої в роботі сусідніх систем зв'язку. Крім того, існує нагальна потреба в розробці масштабованих методів нейтралізації великих роїв безпілотників, де традиційні заходи протидії один на один можуть бути неефективними [6].

Для електромагнітних систем високої потужності, досліджених за допомогою методів реверсування часу, актуальним завданням є перехід до компактних і енергоефективних реалізацій. Хоча праця Валлона виокремлює переваги використання ревербераційних камер для ефективного фокусування енергії, подальше розширення застосувань цих технологій потребуватиме розробки портативних рішень, які можна

інтегрувати в польові системи. Дослідження альтернативних середовищ розповсюдження та їхнього впливу на ефективність реверсування часу відкриває перспективи для практичного використання за межами контрольованих лабораторних умов. Це охоплює мобільне тестування електромагнітної сумісності, а також розробку адаптивних систем живлення для промислової автоматизації та інших сфер [5].

Ба більше, інтеграція цих передових технологій у існуючі структури зумовлює питання сумісності та відповідності нормативним вимогам. Наприклад, рішення для захисту від електромагнітних перешкод повинні відповідати світовим стандартам електромагнітної сумісності, зберігаючи економічну ефективність для широкого впровадження. Подібно системи електромагнітної боротьби та системи реверсу часу повинні керуватися нормативними умовами, що регулюють радіочастоти та випромінювання високої потужності, особливо в регіонах із суворими експлуатаційними обмеженнями. У перспективі поєднання цих технологічних досягнень формує міцну основу для інновацій у міждисциплінарних галузях. Спільна робота матеріалознавців, інженерів-електриків і системних проєктувальників має вирішальне значення для розширення меж можливого та досягнення нових висот у розвитку технологій. Кінцева мета полягає не лише у вирішенні безпосередніх технічних проблем, а й у передбаченні майбутніх потреб, гарантуючи, що ці технології залишатимуться адаптованими до мінливих вимог зв'язку, безпеки та стійкості інфраструктури. Подолавши розрив між теорією та застосуванням, цей наступний етап дослідження обіцяє зміцнити роль передових технологій електромагнітних перешкод як критично важливих чинників сучасної інфраструктури. Шлях від концепції до кінцевої розробки потребує ретельного планування, тестування та чіткого бачення інтеграції, що прокладає шлях до надійних, масштабованих і трансформаційних рішень.

5.1. ОБМЕЖЕННЯ ОГЛЯДУ

Цей огляд свідомо зосереджений на електромагнітних завадах як засобі протиповітряного захисту, що дає змогу забезпечити необхідну глибину аналізу фізичних принципів, матеріалів та алгоритмів у межах єдиної роботи. Поза детальним фокусом цієї статті залишилися лазерні та кінетичні засоби протидії БпЛА, кібернетичні й суто програмні методи нейтралізації, а також вузькоспеціалізовані рішення у сфері радіотехнічної розвідки (SIGINT/ESM), кожне з яких потребує окремого систематичного огляду. Такі обмеження цілеспрямовані й націлені на збереження цілісності та послідовності викладеного матеріалу. Водночас міждисциплінарна інтеграція засобів ЕМЗ з іншими технологіями протидії – лазерними, кінетичними й кібернетичними – є перспективним напрямом подальших досліджень, що може суттєво розширити можливості комплексних систем протиповітряного захисту.

6. ВИСНОВОК

Проведено огляд сучасного стану досліджень у галузі електромагнітних завад як засобу протидії високотехнологічним літальним об'єктам. На підставі аналізу розглянутих джерел можна сформулювати такі головні висновки.

1. Статистично-фізичні моделі Міддлтона [1, 2] забезпечують теоретичну основу для опису ймовірнісних характеристик ЕМЗ та їхнього впливу на електронні системи, зокрема через введення імпульсного шуму в канали зв'язку та навігації БпЛА.
2. Адаптивні алгоритми динамічного аналізу спектра, описані у [3], демонст-

рують здатність систем ЕМЗ коригувати параметри перешкод у реальному часі, що є критичним для протидії системам зі стрибкоподібною зміною частоти.

3. Матеріали на основі графен-полімерних композитів, досліджені в [4], поєднують функції електромагнітного екранування та посилення гармонійних перешкод, що підтверджує їхню перспективність для інтеграції в мобільні системи ЕМЗ.

4. Методи реверсування часу [5] забезпечують високоточне фокусування електромагнітної енергії на цільових об'єктах, що експериментально підтверджено в умовах ревербераційних камер.

5. Мультимодальні стратегії, що поєднують глушіння та підробку сигналів [6, 9], продемонстрували ефективність проти БпЛА з передовими засобами протидії, враховуючи шифрування та частотну гнучкість.

6. Комплексний аналіз вразливостей ключових підсистем БпЛА (система передачі даних, система управління польотом, система живлення) [8] та систематизація сучасних протидронових систем [11] підтверджують стратегічну значущість ЕМЗ як нелетального засобу протидії.

7. Застосування генеративного штучного інтелекту для створення адаптивних стратегій глушіння [12] відкриває нові можливості для автоматизації електронної боротьби.

Водночас огляд виявив низку невирішених проблем: масштабування алгоритмів для протидії великим роям БпЛА, забезпечення довговічності матеріалів в екстремальних умовах експлуатації [10] та відповідність нормативним вимогам щодо використання електромагнітного спектра. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розширення експериментальної бази, зокрема через польові випробування портативних систем ЕМЗ та інтеграцію методів машинного навчання для прогнозованого налаштування параметрів перешкод [7, 12].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Middleton D. Statistical-Physical Models of Electromagnetic Interference / D. Middleton // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – Aug. 1977. – Vol. EMC-19, № 3. – P. 106–127. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TEM.1977.303527>.
2. Selim B. A Deep Learning Approach for the Estimation of Middleton Class-A Impulsive Noise Parameters / B. Selim, M. S. Alam, G. Kaddoum, M. T. AlKhodary, B. L. Agba // ICC 2020 – 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland. – 2020. – P. 1–6. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149097>.
3. Zhang P. Application of IMMF-IHHT Algorithm to Suppressing Random Interference of Geomagnetic Sensors / P. Zhang, Gao M., W. Wang, et al. // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2023. – Vol. 23 (2023). – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13634-023-00985-5>.
4. Orasugh J. T. Functional and Structural Facts of Effective Electromagnetic Interference Shielding Materials: A Review / J. T. Orasugh, S. S. Ray // ACS Omega. – 2023. – Vol. 8 (9). – P. 8134–8158. – DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05815>.
5. Vallon H. Focalisation d'une onde de forte puissance par retournement temporel / Vallon H. // Other. Université Paris Saclay (COMUE). – 2016. – English. – NNT: 2016SACL006. – tel-01346929.
6. Rozenbeek D. J. Evaluation of Drone Neutralization Methods Using Radio Jamming and Spoofing Techniques / D. J. Rozenbeek // Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering and Computer Science. – 2020. – 84 с. – (Second Cycle, 30 Credits).
7. Плющ О. Г. Алгоритм налаштування адаптивної антенної решітки, який не потребує присутності опорного сигналу / О. Г. Плющ, А. А. Рибидайло // Збірник наукових праць

- Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняховського. – February 14, 2020. – №. 2-66. – P. 108–114. – DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-2-66/108-114>.
8. Zhang Z. Strong Electromagnetic Interference and Protection in UAVs / Zhang Z., Y. Zhou, Y. Zhang, B. Qian // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13, № 2. – P. 393. – DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>.
 9. Zidane Y. Jamming and Spoofing Techniques for Drone Neutralization: An Experimental Study / Y. Zidane, J.S. Silva, G. Tavares // *Drones*. – 2024. – Vol. 8, №. 12. – P. 743. – DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8120743>.
 10. Zecchi S. A Comprehensive Review of Electromagnetic Interference Shielding Composite Materials / S. Zecchi, G. Cristoforo, M. Bartoli, A. Tagliaferro, D. Torsello, C. Rosso, M. Boccaccio, F. Acerra // *Micromachines*. – 2024. – Vol. 15, №. 2. – P. 187. – DOI: <https://doi.org/10.3390/mi15020187>.
 11. Chauhan D. Nation's Defense: A Comprehensive Review of Anti-Drone Systems and Strategies / D. Chauhan, H. Kagathara, H. Mewada, S. Patel, S. Kavaia, G. Barb. // *IEEE Access*. – 2025. – Vol. 13. – P. 53476–53505. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3550338>.
 12. Sarikaya B.S. GenAI-Based Jamming and Spoofing Attacks on UAVs / B. Sonmez Sarikaya, S. Bahtiyar. // *IEEE Access*. – 2025. – Vol. 13. – P. 107596–107620. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3574284>.
 13. Новіцький П.С. Методи створення спрямованих електромагнітних завад для вибіркового впливу на GPS/GLONASS / П.С. Новіцький, М.В. Степаняк // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2025. – Т. 86, № 2ю – С. 105–112. – DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2025.02.105>.
 14. Новіцький П.С. Новітні технології зі створення електромагнітних завад для протидії літальним об'єктам / П.С. Новіцький, М.В. Степаняк // *Комп'ютерні технології друкарства*. – 2024. – № 1 (51). – С. 121–133. – DOI: <https://doi.org/10.32403/2411-9210-2024-1-51-121-133>.

Стаття: надійшла до редколегії 20.01.2026

доопрацьована 11.02.2026

прийнята до друку 04.03.2026

ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN AIR DEFENSE SYSTEMS: A REVIEW OF PRINCIPLES, TECHNOLOGIES AND ALGORITHMS

P. Novitskyi, M. Stepanyak

*Lviv Polytechnic National University,
12, Stepan Bandera str., 79013, Lviv, Ukraine,
e-mail: pavlo.s.novitskyi@lpnu.ua*

The leap in the development of unmanned aerial vehicles (UAVs) and aerial systems has become the driving force behind large-scale transformations in various fields, from logistics and communications to environmental research and the transformation of industry approaches. These technologies rely on precise and complex electromagnetic signals for communication and navigation. However, this dependence also makes them vulnerable to electromagnetic interference (EMI) failures. By exploiting this vulnerability, defense systems can neutralize entire systems without resorting to physical destruction, reducing collateral damage and minimizing the risk to human lives. EMI, as a form of electronic protection, represents a highly effective and scalable solution to this problem. This interference complicates the ability of UAVs to receive and transmit signals, orient themselves

in space, or perform specified operations, thus providing reliable electronic protection. The paper systematizes the physical principles of EMI impact on key UAV subsystems – GPS/GLONASS navigation receivers, command-and-control communication channels, and radar systems – employing Middleton's statistical-physical model to describe the probabilistic characteristics of interference. Technological solutions for EMI generation are analyzed, including the use of graphene-polymer composites as shielding materials that provide shielding effectiveness exceeding 40 dB in the 1–3 GHz range, as well as directional antenna systems for minimizing collateral impact on civilian infrastructure. Adaptive algorithms for optimizing interference parameters are examined, including gradient descent methods, Bayesian optimization, and reinforcement learning approaches that enable dynamic real-time adjustment of the jamming signal's frequency, amplitude, and phase. Numerical methods for modeling electromagnetic interactions – finite-difference time-domain (FDTD) and finite element method (FEM) – are discussed, along with the time-reversal technique for high-precision focusing of electromagnetic energy on target objects. Promising directions for further research are identified, including the scaling of systems for countering large UAV swarms, integration of generative artificial intelligence into electronic warfare systems, and the development of portable energy-efficient solutions for field deployment.

Key words: unmanned aerial vehicles (UAVs), electromagnetic interference (EMI), electronic warfare, cyber-physical systems, adaptive algorithms, signal processing, numerical modeling.