

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-43>

УДК 62.23

Зайцев Олександр Вікторович, д.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2475-3800>

Борисов Олег Володимирович, к.т.н.

<https://orcid.org/0000-0002-9460-2605>

Борисов Ігор Володимирович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2276-9913>

Воєнна академія імені Євгенія Березняка, м. Київ, Україна

СИСТЕМА ЗНИЩЕННЯ FPV-ДРОНІВ З КЕРУВАННЯМ ПО ВОЛОКОННО – ОПТИЧНИМ ЛІНІЯМ ЗВ'ЯЗКУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАГОРОДЖЕНЬ З ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ РОЗРЯДОМ

Зайцев О.В., Борисов О.В., Борисов І.В. Система знищення fpv-дронів з керуванням по волоконно – оптичним лініям зв'язку за допомогою загороджень з імпульсним електричним розрядом. У статті описано інноваційний підхід до протидії FPV-дронам з оптоволоконною системою передачі управління через створення високотемпературних електротермічних бар'єрів. Методи руйнування оптоволоконного кабелю базуються на нагріванні або імпульсному розряді, що спричиняє пропалювання волокна при контакті з провідником. Порівнюються дві технології: постійний нагрів ніхромової струни та імпульсний розряд сталевого дроту. Надано технічне обґрунтування системи, з описом енергозбереження, високовольтного ключа та контролера, що дозволяє створити модульну мережу захисту для тилових об'єктів. Аналіз показує переваги імпульсної системи, зокрема її маскуваність, ефективність та можливість довгих секцій. Обґрунтовано вибір матеріалів та схеми реалізації для створення локальних зон високотемпературного руйнування оптоволоконної мережі. Запропонована технологія є перспективною для створення пасивних, безпечних та масштабованих засобів захисту об'єктів від безпілотних систем нового покоління, що використовують оптоволоконний канал управління.

Ключові слова: FPV-дрони, імпульсний розряд, протидроновий захист, ніхромовий струн, пропалювання, електричний бар'єр, пасивна оборона, енергоімпульсна система, руйнування керування.

Zaitsev O., Borisov O., Borisov I. A system for destroying FPV drones controlled via fiber optic communication lines using barriers with pulsed electric discharge. This article describes an innovative approach to countering FPV drones equipped with fiber-optic communication systems by creating high-temperature electro-thermal barriers. The methods for destroying the fiber-optic cable are based on heating or pulsed discharges, which cause the fiber to burn upon contact with a conductive wire. Two technologies are compared: constant heating of a nichrome wire and pulsed high-current discharges of steel wire. The technical implementation of the system is provided, including energy storage, high-voltage switches, and controllers, enabling the creation of modular protection networks for rear facilities. An analysis demonstrates the advantages of pulsed systems, particularly their masking, efficiency, and the potential for long sections. The choice of materials and circuit design for creating localized high-temperature destruction zones of optical fibers is justified. The proposed technology offers promising prospects for developing passive, safe, and scalable means of protecting objects from next-generation unmanned systems that utilize fiber-optic control channels.

Keywords: FPV drones, pulsed discharge, anti-drone protection, nichrome string, burning, electric barrier, passive defense, energy pulse system, control destruction.

Постановка проблеми. Сучасні БпЛА з ВОЛЗ становлять серйозну загрозу як для передових, так і для тилових позицій. Вони практично невразливі до засобів радіоелектронної боротьби, оскільки не випромінюють радіосигналів і не залежать від GPS-навігації. Традиційні методи виявлення й нейтралізації виявляються малоефективними або взагалі непридатними проти таких дронів. Тому актуальним стає створення простих, надійних і масштабованих засобів фізичного ураження дронів з оптоволоконною системою передачі, які не потребують складної інфраструктури чи високоточних систем наведення. Одним із перспективних рішень є побудова електротермічних бар'єрів, здатних руйнувати прив'язь дронів у момент її проходження через контрольовану ділянку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій На тлі масового застосування БпЛА у сучасних конфліктах значна увага приділяється засобам протидії безпілотним системам. Більшість наукових і прикладних робіт зосереджені на засобах радіоелектронної боротьби, подавленні каналів зв'язку, GPS-спуфінгу, створенні перешкод у діапазонах керування та передачі відео (наприклад, [1–3]). Однак у разі використання дронів з оптоволоконним керуванням ці методи втрачають ефективність, що відзначають низка сучасних дослідників та військових аналітиків [4, 5]. Окремі спроби створення фізичних бар'єрів проти БпЛА відомі в контексті сіткових загороджень, засобів кінетичного ураження або мікрохвильового випромінювання, проте вони переважно громіздкі, обмежені в зоні дії або потребують складної логістики. У відкритому доступі відсутні публікації, присвячені локальному пошкодженню оптоволоконної мережі за допомогою електротермічних рішень. Таким

чином, запропонований підхід – побудова натягнутих нагрівальних або імпульсних електричних бар'єрів – є новим і потребує окремого технічного обґрунтування та експериментального підтвердження.

Мета дослідження Метою даного дослідження є розробка та обґрунтування ефективного способу фізичної нейтралізації БпЛА з ВОЛЗ створення високотемпературного бар'єру на основі нагрівальної або імпульсної струни. Дослідження спрямоване на оцінку доцільності використання імпульсного електричного розряду як методу локального пошкодження оптоволокна, аналіз його технічних параметрів, енергоспоживання, безпеки та можливостей масштабування. Особлива увага приділяється побудові прототипу, здатного працювати в умовах обмеженого живлення, з мінімальним втручанням оператора. У дослідженні також розглянуто потенціал інтеграції системи в ширші комплекси захисту тилових і стаціонарних об'єктів.

Виклад основного матеріалу дослідження На сьогодні найбільш поширеним типом безпілотних систем ближнього радіусу дії є FPV-дрони, що застосовуються для точкового ураження цілей, розвідки, коригування вогню, прориву оборони та психологічного тиску. Стандартна архітектура таких дронів включає радіоканал керування (2.4 ГГц або 868 МГц), або інші кастомні частоти для обходу РЕБ, відеолінк (5.8 ГГц) і GPS-модуль для навігації [4, 5]. Для боротьби з такими апаратами ефективно застосовуються засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ), що здатні подавляти або спуфити ці канали, викликаючи втрату керування та падіння дрону. Однак у відповідь на зростаючу ефективність засобів РЕБ з'явилась нова категорія FPV-дронів з ВОЛЗ (Рис.1), де керування та відеопотік даних передаються по тонкій, малопомітній волоконно-оптичній лінії, що фізично з'єднує FPV-дрон з оператором.



Рис.1 – FPV-дрон з оптоволоконною системою передачі

Враховуючи масоване застосування противником ударних БпЛА типу FPV, тому числі з керуванням по волоконно-оптичним лініям зв'язку протягом 2024 та початку 2025 років постало питання систематизації досвіду протидії цій загрозі та виробленню дієвих способів протидії. На теперішній час на тактичному рівні боротьба з ударними БпЛА противника здійснюється особовим складом підрозділів, а кожен з способів не забезпечує високу ефективність захисту та залежить від умов та навченості військовослужбовців. Так як дрони не мають радіовипромінювання, і не залежать від GPS і не реагують на радіоперешкоди. У польових умовах вони здатні з високою точністю досягати цілей, не залишаючи шансів для перехоплення або виявлення засобами РЕБ. Це створює серйозну проблему як для передової, так і для захисту стратегічної інфраструктури в тилу.

До способів застосування противником БпЛА з ВОЛЗ можна віднести:

ураження засобів РЕБ та створення умов для масованого застосування ударних БпЛА з керуванням по радіоканалам;

застосування із засідки (режиму очікування) вздовж імовірного маршруту пересування техніки;

застосування в умовах щільної протидії засобів РЕБ для ураження ОВТ та особового складу, як в захищених фортифікаційних спорудах (районах очікування), так під час ведення бойових дій.

У зв'язку з цим виникає потреба у методах нейтралізації таких дронів, які б дозволяли зруйнувати оптоволоконний кабель ще до досягнення дроном цілі. Саме на розробку такої технології за допомогою електротермічного загородження – спрямоване дане дослідження.

Розглянемо методи нейтралізації БпЛА з ВОЛЗ, починаючи з найпростішого вогнепальної зброї і до більш складних або спеціалізованих рішень.

Фізичні методи нейтралізації БпЛА з ВОЛЗ

1. *Вогнепальна зброя (ручна або автоматична).* Переваги: доступність, простота, автономність. Недоліки: дуже обмежена ефективність; важко вразити маленьку швидку ціль, особливо в русі; низька ймовірність пошкодження оптоволоконна; високі вимоги до навичок стрільця. Застосування як останній рубіж оборони або в умовах міського бою.

2. *Кінетичні засоби ближнього бою (сітки, дроти, коптери-перехоплювачі)* Переваги: можливість захоплення або заплутування дрону, мінімальна шкода інфраструктурі. Недоліки: складність реалізації проти швидкісних БпЛА з ВОЛЗ; майже не впливають на дріт. Застосування охорона важливих об'єктів, але не масштабні системи.

3. *Бойові лазери Тризуб (Рис.2)*



Рис.2 – Український бойовий лазер "Тризуб".

Переваги: безшумність, точковий вплив, відсутність боєприпасів. Недоліки: надзвичайно висока вартість, чутливість до погодних умов, потрібен час на наведення та фокусування; лазери неефективні для враження тонкої оптоволоконної прив'язі, якщо вона натягнута на великій висоті. Застосування експериментальні ППО, охорона стратегічних об'єктів.

4. *Пропалювання оптоволоконна: нагрівальні або імпульсні струни.* Переваги: цілеспрямоване фізичне ураження; складно обійти; не потребує радіовипромінювання чи наведення; добре масштабується. Недоліки: потребує фізичної установки струни на маршруті; виключно стаціонарне застосування. Застосування створення зон перехоплення в тилу, навколо штабів, логістичних вузлів, укриті, польових позицій.

Серед фізичних методів найбільш перспективним для стаціонарного перехоплення БпЛА з ВОЛЗ є саме створення зон високотемпературного ураження. Інші методи або неефективні проти оптоволоконна, або занадто складні, дорогі чи малодоступні в умовах бойових дій.

Принцип дії системи, яке розкриває, якими методами можна створити зону високотемпературного ураження та забезпечити її ефективність. Для створення зон високотемпературного ураження можуть використовуватись такі методи:

Резистивний нагрів струни – використання сплавів з високим питомим опором (ніхром, фехраль), які при пропусканні струму нагріваються до температур понад 1000 °С. Цей метод простий у реалізації, але вимагає стабільного джерела енергії та якісної термоізоляції навколишніх конструкцій;

Імпульсний розряд високої енергії – розряд великої потужності через тонку струну (або сітку) за дуже короткий час (10–50 мс). Піковий струм миттєво викликає локальне плавлення або іскровий пробій у момент перетину оптоволоконном, що дозволяє економити енергію та зменшити теплові втрати;

Комбінований режим – фонове підігрівання струни до 200–300 °С з подальшим імпульсним підривом при виявленні об'єкта. Це підвищує ймовірність успішного ураження та зменшує час реакції.

Для вибору методу високотемпературного ураження розглянемо температурні показники при яких оптоволоконно буде уражене, та температурні умови оптоволоконна необхідні для ураження за яких оптоволоконно втрачає механічну цілісність та працездатність.

Оптоволоконні кабелі, що використовуються у БПЛА з ВОЛЗ, зазвичай виготовляються з кварцового скла (SiO_2) діаметром 125–250 мкм, часто без зовнішньої оболонки. Температурні характеристики:

Температура розм'якшення кварцу: ≈ 1100 °С;

Температура плавлення кварцу: ≈ 1650 °С;

Моментальна втрата оптичних властивостей: > 900 °С;

Механічне руйнування тонкої неброньованої нитки: можливо вже при локальному нагріві понад 600 °С при швидкому нагріванні.

Таким чином, ефективне ураження можливо при досягненні температури контактного середовища понад 900–1000 °С, що дозволяє або пропалювання, або миттєве викривлення та розрив волокна.

На основі цього аналізу доцільно використовувати нагрівальні елементи, здатні стабільно або імпульсно досягати вказаного діапазону температур. Для досягнення температури понад 900–1100 °С з метою ураження оптоволоконна необхідно використовувати провідники з високим питомим опором, стабільними термічними характеристиками, механічною міцністю та корозійною стійкістю. Нижче (Рис 3) наведено порівняння основних кандидатів.

Матеріал	Температура нагріву (макс)	Питомий опір (Ом·мм ² /м)	Переваги	Недоліки
Ніхром (NiCr)	до 1200–1300 °С	$\sim 1,1$	Дешевий, стабільний, доступний	Легко окислюється, обмежена довжина
Фехраль (FeCrAl)	до 1400–1500 °С	$\sim 1,4$	Вища t , краще тримає форму	Крихкий, важче паяти
Вольфрам (W)	до 3000 °С (у вакуумі)	$\sim 0,05$	Висока t , міцний	Дуже крихкий, дорогий, важко обробляється
Карбонове волокно	до 1800 °С	$\sim 1,0$	Легке, гнучке, добре гріється	Неоднорідне, зношується з часом

Рис 3 – Порівняння провідників

Для постійного нагріву найкращим вибором є ніхром або фехраль, які легко натягуються, працюють у повітрі, витримують багато циклів. Для імпульсного прожогу можливо застосування тонкої ніхромової або фехралевої струни, через яку пропускається розряд великої потужності. Також перспективним є карбонове волокно, яке швидко нагрівається, проте вимагає герметизації. Вольфрам застосовується рідше через крихкість та складність монтажу, але може використовуватись у спеціальних умовах.

Розглянемо стратегію постійного нагріву ніхромової струни. Ніхром (сплав нікелю та хрому) є одним із найбільш поширених матеріалів для створення нагрівальних елементів завдяки своїй стабільній роботі при високих температурах. Для цілей ураження оптоволоконна необхідно забезпечити нагрів струни до температури не менше 1000 °С, бажано в межах 1100–1200 °С, що забезпечує впевнене оплавлення кварцового волокна при короткому контакті.

Найбільш ефективною є ніхромовою струна діаметром 0,3–0,5 мм, що дозволяє досягати робочої температури у діапазоні 1100–1200 °С при струмі 3–5 А, підтримувати стабільний тепловий бар'єр по всій довжині секції, витримувати багаторазові цикли нагріву та охолодження.

Оптимальна довжина секції при живленні від 220 В змінного струму або інвертора 10–20 метрів, з натягуванням між опорами або електроопорами. Важливо дотримуватись належного натягу для уникнення провисання та зменшення ризику випадкового дотику з землею або рослинністю. Основні обмеження це високе середнє енергоспоживання – до 300–500 Вт на кожні 10 метрів. Постійне інфрачервоне випромінювання робить систему потенційно вразливою для виявлення

тепловізійними засобами. Потребує термічного захисту навколишніх елементів, особливо у суху пору року або при встановленні біля легкозаймистих конструкцій. Альтернативна стратегія це швидкий імпульсний розряд. З урахуванням вище зазначених обмежень, особливо на довжину секцій та енерговитрати, перспективною є альтернативна стратегія – короткочасний імпульсний розряд високої енергії. Такий підхід дозволяє використовувати довші секції до 100 м, працювати у пасивному режимі до моменту активації, не випромінюючи теплового фону, значно зменшити загальне енергоспоживання, адже енергія накопичується та вивільняється лише у момент перетину оптоволоконном захисної струни.

Імпульсний метод пропалювання з використанням сталевго дроту. Імпульсний метод ураження оптоволоконна базується на вивільненні великої кількості енергії за короткий час (10–50 мс) через тонкий металевий провідник. У момент проходження потужного імпульсу дріт нагрівається до температури понад 1000 °С, чого достатньо для моментального оплавлення або викривлення оптоволоконної нитки, яка перетинає зону дії.

Використання сталевго дроту має нижчий питомий опір (~0,15 Ом·мм²/м) порівняно з ніхромом, вона дешевша у 5–10 разів; міцніша механічно; стійка до натягування на великі відстані (до 100 м); легко доступна у вигляді звичайного будівельного дроту (0,2–0,4 мм).

У імпульсному режимі високий питомий опір не є критичним, оскільки джерелом тепла стає не тільки опір, а й струмовий розряд з високою щільністю енергії, яка фокусовано вивільняється у дріті. Основні параметри імпульсу для секції 100 метрів з тонким сталевим дротом (~0,3 мм) ефективний імпульс має характеристики: Енергія імпульсу: 600–900 Дж; Напруга накопичення: 400–600 В; Ємність конденсатора: 2200–5000 мкФ; Час імпульсу: 10–20 мс; Піковий струм: 300–500 А.

Для генерації імпульсу використовується блок накопичення енергії (конденсатори), силовий ключ (IGBT або тиристор) і блок керування (мікроконтролер або тригер по датчику руху). Після активації енергія імпульсу проходить через дріт, створюючи локальну зону миттєвого перегріву.

Переваги імпульсного методу зі сталевим дротом:

Мінімальна вартість розгортання – звичайний сталевий дріт легко доступний;

Можливість використання довгих секцій (до 100–150 м);

Високий рівень маскування – система в пасивному режимі невидима для тепловізорів і РЕБ;

Безпечність у неактивному стані – дріт холодний, не становить ризику займання;

Енергетична ефективність – низьке середнє споживання.

Енергетичний блок накопичення імпульсу є ключовим елементом імпульсної системи ураження. Його завдання – накопичити достатню кількість енергії та швидко передати її на розрядний дріт для створення миттєвого високотемпературного імпульсу. Основу блоку становить батарея високовольтих імпульсних конденсаторів, які здатні швидко заряджатись і розряджатись, забезпечуючи значну потужність у короткий проміжок часу. Типова конфігурація включає 2 – 4 конденсатори ємністю від 1000 до 2200 мкФ з робочою напругою 450 – 600 В. Залежно від необхідної енергії (наприклад, 600–900 Дж на імпульс), можна використовувати електролітичні або плівкові конденсатори з низьким внутрішнім опором (Low ESR), що забезпечує ефективний розряд без перегріву або втрат. З'єднання конденсаторів здійснюється паралельно для збільшення загальної ємності та збереження напруги. Живлення для зарядки конденсаторного блоку може надходити від стандартної побутової мережі 220 В, від генератора або від інвертора постійного струму 24 – 48 В. У польових умовах ефективним є використання сонячної панелі з контролером заряду або переносної акумуляторної станції з виходом 220 В. Для контролю зарядки та захисту компонентів застосовується керований зарядний модуль на базі DC-DC підвищувального перетворювача з керуванням через мікроконтролер. Контролер (наприклад, ESP32, STM32 або Arduino) відстежує напругу на банку конденсаторів і визначає момент готовності до розряду. Він також ініціює розряд через силовий ключ після отримання сигналу від сенсорної системи або оператора. Важливо передбачити систему захисту від перезарядки, короткого замикання та неконтрольованого розряду для забезпечення безпечної експлуатації.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У статті розглянуто принцип дії та технічну концепцію створення імпульсної системи високотемпературного ураження БпЛА з ВОЛЗ. Запропоновано дві ефективні реалізації – з постійним нагрівом та з імпульсним розрядом, з перевагою останнього завдяки економічності,

непомітності та можливості роботи на значних дистанціях. Особливу увагу приділено застосуванню сталевго дроту як дешевого і механічно міцного провідника для створення захисних перешкод.

У процесі дослідження були проведені експериментальні тести та розрахунки параметрів нагріву дроту, підбору ємності накопичення, вибору силових ключів та типів сенсорів. Проте, свідомо не наведено конкретних схем, розрахунків і технічних креслень з міркувань безпеки щоб дана технологія була застосована проти нас. Надмірна деталізація може бути використана противником для розробки аналогічних або обхідних систем.

У подальших дослідженнях передбачається вдосконалення конструкції з урахуванням мобільності, енергетичної автономності, стійкості до атмосферних умов і можливості мережевого об'єднання захисних секцій. Також перспективним є впровадження автоматизованих систем виявлення дронів з використанням машинного зору, акустичного аналізу та багатосенсорного синтезу даних. Це дозволить створити масштабовану, розумну інфраструктуру захисту тилових об'єктів та позицій.

Список бібліографічного опису

1. Mohammed, B. A., Zhuk, O., Vozniak, R., Borysov, I., Petrozhalko, V., Davydov, I., Borysov, O., Yefymenko, O., Protas, N., & Kashkevich, S. (2023). Improvement of the solution search method based on the cuckoo algorithm . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(4 (122), 23–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277608>.
2. Borisov , O. (2023). The role of neural networks in military intelligence and combat operations. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (50), 136-141. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-21>
3. Borisov O., & Borisov , I. (2023). The use of drones to improve the efficiency of communication in combat conditions. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (50), 131-135. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-20>.
4. Borysov , O., Artabaiev , Y., & Surma, A. (2024). Cybersecurity of unmanned military aerial vehicles: methods of protection against signal interception and remote control. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (56), 117-125. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-14>
5. Zaitsev O., Borysov O.(2024). The Role and Prospects of Using Robotic Complexes in Modern Combat Operations. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (57), 174-183. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-21>

References

- 1 Mohammed, B. A., Zhuk, O., Vozniak, R., Borysov, I., Petrozhalko, V., Davydov, I., Borysov, O., Yefymenko, O., Protas, N., & Kashkevich, S. (2023). Improvement of the solution search method based on the cuckoo algorithm . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(4 (122), 23–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277608>.
- 2 Borisov , O. (2023). The role of neural networks in military intelligence and combat operations. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (50), 136-141. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-21>
- 3 Borisov O., & Borisov , I. (2023). The use of drones to improve the efficiency of communication in combat conditions. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (50), 131-135. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-20>.
4. Borysov , O., Artabaiev , Y., & Surma, A. (2024). Cybersecurity of unmanned military aerial vehicles: methods of protection against signal interception and remote control. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (56), 117-125. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-14>
5. Zaitsev O., Borysov O.(2024). The Role and Prospects of Using Robotic Complexes in Modern Combat Operations. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (57), 174-183. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-21>