

*І.М. МИЦЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, Ю.О. ПЕДЕНКО, канд. техн. наук,  
О.М. РОЄНКО, канд. фіз.-мат. наук*

## **ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗАХИСТУ БПЛА ВІД ПРИДУШЕННЯ СИГНАЛІВ УПРАВЛІННЯ**

### **Вступ**

У теперішній час безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко застосовують у найрізноманітніших секторах як народного господарства, так у військових цілях. У [1] представлено досить вичерпний огляд різних платформ БПЛА відповідно до різних класифікацій, надано опис новітніх технологій, що використовуються в БПЛА. Розвиток БПЛА надав широкий шлях щодо комерціалізації. БПЛА вже використовуються в сільськогосподарській промисловості для моніторингу сільськогосподарських угідь, аналізу зразків ґрунту та навіть для пасіння худоби. У майбутньому він може розширитися ще більше, тоді як попит постійно зростає. БПЛА також використовуються в пошуково-рятувальних роботах, щоб рятувати людей із ситуацій, що загрожують життю, і щоразу ця технологія доводить свою корисність як ніколи. У найближчому майбутньому не дивно, що БПЛА знайдуть своє застосування в роздрібній торгівлі, транспорті, розвагах, охороні житла та навіть у будівництві з використанням 3D-принтерів. Зрозуміло, що майбутні можливості для БПЛА величезні. Крім того, з розвитком технологій стало легше виробляти безпілотники та керувати ними. У сучасну епоху, якщо БПЛА об'єднати з технологією смартфонів, це призведе до створення безпечних, надійних інструментів і функцій [2 – 5]. Також слід нагадати, що БПЛА десятиліттями використовувалися збройними силами різних країн для авіарозвідки, управління вогнем і цілевказівки, нанесення ударів по наземних та інших цілях та інше.

Одночасно зі зростанням можливостей БПЛА, розвивалися методи і засоби, що їм протидіють. У [6] підкреслено, що виявлення, класифікація, ідентифікація, відстеження та подолання низьких, повільних і малих повітряних загроз є серйозною проблемою для існуючих сенсорних систем моніторингу. Системи так званого протидії безпілотним літальним апаратам першого покоління часто покладаються на виявлення каналу передачі даних від оператора до БПЛА, що забезпечує обмежені можливості проти поточних загроз. Однак цей спосіб виявлення БПЛА є проблемою, коли оператори маніпулюють стандартними каналами передачі даних, і він взагалі не працюватиме проти поточних і майбутніх автономних БПЛА. Інші сучасні методи виявлення та нейтралізації БПЛА включають, наприклад, поєднання радара з оптичними датчиками. Ці системи не завжди надійні, можуть генерувати велику кількість хибних тривог і часто вимагають великої кількості обслуговуючого персоналу [7, 8].

Найдоступнішим методом боротьби з БПЛА є придушення радіосигналів, які використовуються для його управління. У результаті БПЛА втрачає зв'язок з оператором і не може продовжити рух у робочому режимі, що часто призводить до його краху. Тому розробка методів і засобів боротьби з придушенням сигналів керування не втрачає своєї актуальності та стає все більш необхідною. У [9] наведено та проаналізовано методи захисту каналу передачі БПЛА, що є першочерговим завданням для забезпечення протидії атакам на БПЛА. При цьому треба враховувати, що навіть використання найбільш захищених від впливу умисних завад видів модуляції з розширенням спектра не гарантує захисту такого каналу. Досліджено структурно-функціональні методи побудови бездротової захищеної системи каналів зв'язку БПЛА. Запропоновано архітектурне рішення із використанням двох каналів у різних діапазонах частот для каналу управління БПЛА. Подано схематичну структуру організації такого каналу зв'язку. Дано вираз запасу міцності каналу зв'язку проти конкретної навмисної завади. Показано, що запропоноване архітектурне рішення матиме аналогічний ефект при впливі на канал зв'язку структурованих завад. У разі впливу імітаційної завади ситуація буде неодно-

значною, тому дуже важливо правильно визначити канал, на який впливає навмисна завада [10 – 12].

Одним із методів боротьби з придушенням радіосигналів, що керують БПЛА, є (у разі виявлення сигналів завад) зміна робочої частоти сигналу керування БПЛА на іншу, що дає змогу БПЛА продовжувати рух і не втрачати працездатність. Цей метод і покладено в основу пропонованого в статті рішення. Метою даної роботи є розробка схеми автономного приймального пристрою (блоку захисту), що підключається до входу приймача БПЛА та здійснює його захист від радіосигналів завад у робочому режимі (рис. 1).



Рис. 1. Підключення блока захисту до приймача-передавача БПЛА

За відсутності сигналів завад на штатній частоті БПЛА  $f_{\text{шт}}$  блок захисту, приймає сигнал керування оператора і передає його на вхід приймача БПЛА, який рухається в робочому режимі і виконує поставлені перед ним завдання.

У разі появи радіосигналів завад на штатній частоті, тобто на частоті  $f_3 = f_{\text{шт}}$  самостійно їх виявляє і за допомогою передавача БПЛА видає команду оператору на зміну робочої частоти  $f_{\text{шт}}$  на додаткову частоту  $f_d$ . При цьому вихідна частота блоку захисту залишається постійною і дорівнює штатній частоті БПЛА  $f_{\text{шт}}$ . Це дає змогу не перебудовувати приймач БПЛА, що істотно спрощує застосування блока захисту. Крім цього, при отриманні інформації про наявність радіосигналів завад блок керування БПЛА також автоматично переходить на додаткову робочу частоту  $f_d$ . БПЛА продовжує рух і виконання поставлених перед ним завдань, але використовує додаткову робочу частоту.

Таким чином, до завдань блоку захисту входить:

- постійний контроль з метою виявлення наявності радіосигналів завад на штатній робочій частоті  $f_{\text{шт}}$ ;
- за відсутності радіосигналів завад приймання радіосигналів керування від оператора на штатній частоті  $f_{\text{шт}}$  та передавання їх на вхід приймача БПЛА;
- у разі виявлення радіосигналів завад на штатній частоті  $f_{\text{шт}}$  передача інформації про їх наявність оператору, що призводить до автоматичної зміни частоти передавача керування на додаткову частоту  $f_d$ ;
- також у разі виявлення радіосигналів завад здійснюється автоматичне перемикання блока захисту на приймання керуючих сигналів на додатковій частоті  $f_d$ . Радіосигнали додаткової частоти у блоці захисту перетворюються таким чином, щоб його вихідний сигнал мав частоту, що дорівнює штатній частоті БПЛА  $f_{\text{шт}}$ . Після перетворення вихідний сигнал блоку захисту подається на вхід приймача БПЛА.

Для можливості керування БПЛА та одночасного виявлення сигналів завад у пропонованому методі використовують два режими роботи, що чергуються (див. рис. 2).

Під час першого режиму  $T_{\text{роб}}$  здійснюється штатне керування БПЛА на робочій частоті  $f_{\text{шт}}$ . Другий режим  $T_{\text{вияв}}$  призначений для знаходження радіосигналу завади на штатній частоті  $f_{\text{шт}}$ . В цьому режимі сигнал керування оператора не випромінюють, а блок захисту

БПЛА контролює наявність радіосигналів на частоті  $f_{\text{Ш}}$ . Виявлення сигналу на частоті  $f_{\text{Ш}}$  в другому режимі свідчить про наявність завади.

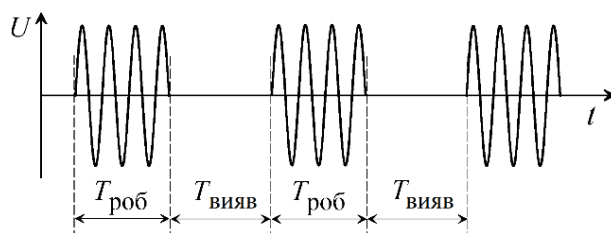


Рис. 2. Керуючий сигнал БПЛА

У період часу  $T_{\text{роб}}$  сигнал управління випромінюється передавачем оператора на основній частоті  $f_{\text{Ш}}$  і управляє БПЛА, який виконує своє завдання, потім у період часу  $T_{\text{вияв}}$  сигнал управління не випромінюється, що дає можливість блоку захисту виявляти сигнали завад на робочій частоті  $f_{\text{Ш}}$ . При цьому, якщо сигнал завади блоком захисту не виявлено, БПЛА продовжуватиме свою роботу на штатній частоті  $f_{\text{Ш}}$ . У разі виявлення завади на частоті  $f_{\text{Ш}}$  блок захисту автоматично змінює робочу частоту на додаткову частоту  $f_{\text{д}}$ , при цьому БПЛА зберігає можливість виконання свого завдання. Тривалість режиму роботи  $T_{\text{роб}}$  і знаходження  $T_{\text{вияв}}$  обирають таким чином, щоб не порушувався робочий режим БПЛА з урахуванням його швидкості польоту, швидкості обробки сигналів та інших можливостей.

Таким чином, блок захисту має являти собою простий і недорогий пристрій, який би виявляв сигнали завади й автоматично перемикав керування БПЛА на додаткову робочу частоту  $f_{\text{д}}$ . При цьому частота вихідного сигналу блок захисту залишається незмінною і дорівнює штатній робочій частоті  $f_{\text{Ш}}$ .

На рис. 3 наведено функціональну схему блока захисту БПЛА.

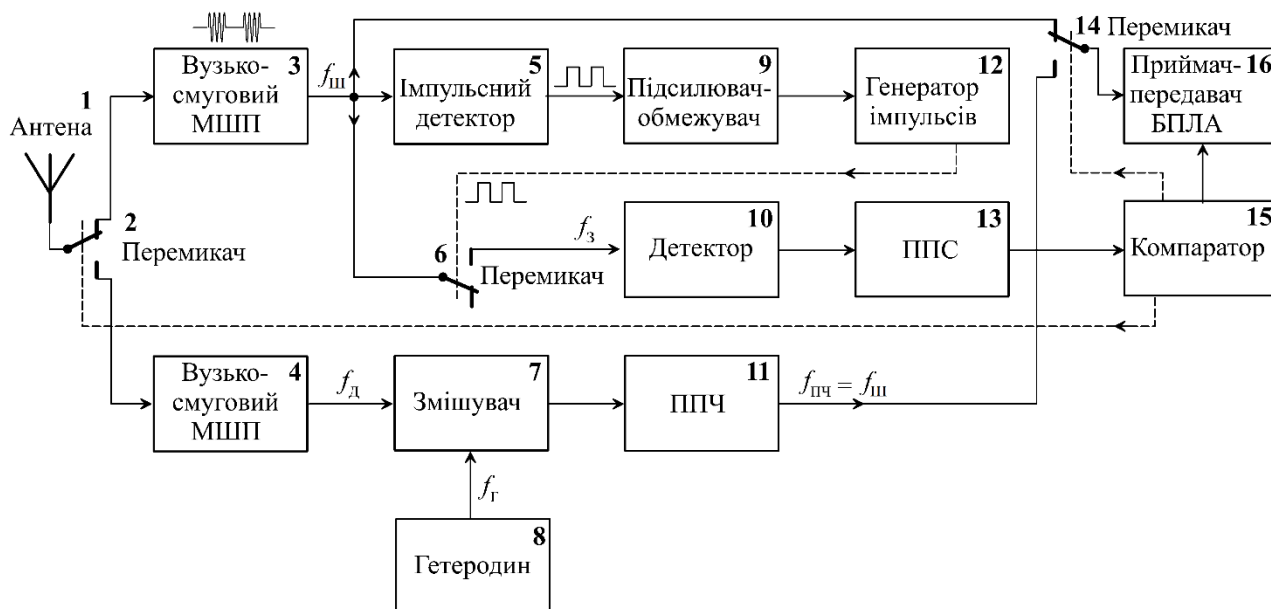


Рис. 3. Функціональна схема блока захисту БПЛА

Працює блок захисту таким чином. У робочому режимі (період часу  $T_{роб}$ ) сигнал управління на частоті  $f_{ш}$  від оператора БПЛА приймається антеною 1, що має робочу смугу частот, достатню для приймання сигналів як на штатній частоті  $f_{ш}$ , так і на додатковій частоті  $f_{д}$ , для цього може бути використана зокрема логоперіодична антена [13]. У разі великого розносу робочих частот  $f_{ш}$  і  $f_{д}$  слід застосовувати дводіапазонну антену, наприклад [14].

Далі прийнятий сигнал за допомогою антенного перемикача 2 надходить на вхід малошумливого підсилювача (МШП) 3. Резонансний малошумливий підсилювач 3 налаштований на основну (штатну) робочу частоту  $f_{ш}$ . Смуга амплітудно-частотної характеристики має бути не вузкою за спектр сигналу керування, що приймається.

Прийнятий сигнал керування посилюється підсилювачем 3 до величини, необхідної для роботи виявника сигналів завад і синхронізації всього блока захисту загалом. Для цього його подають на вхід імпульсного детектора 5, де відбувається виділення його огинаючої, а також на вхід комутатора 6 пристрою виявлення завад.

Крім цього, вихідний сигнал підсилювача 3 за допомогою комутатора 14 подається безпосередньо на вхід приймача БПЛА, який виконує своє завдання і перебуває в робочому режимі.

Керування блоком захисту здійснюється синхронізатором, який складається з імпульсного детектора 5, підсилювача-обмежувача 9 і генератора імпульсів 12. Вихідний сигнал імпульсного детектора 5 підсилюється та обмежується підсилювачем-обмежувачем 9, який обмежує вершини сигналів і прибирає небажані флуктуації амплітуд сигналу керування БПЛА.

Далі вихідний сигнал підсилювача-обмежувача 9 подається на вхід синхронізації генератора імпульсів 12 і синхронізує генерацію його імпульсів з імпульсами  $T_{роб}$  вхідного сигналу оператора. Генератор імпульсів 12 працює в режимі очікування і під час приходу імпульсу запуску з виходу підсилювача-обмежувача 9 генерує імпульс тривалістю  $T_{роб}$  позитивної полярності, що подається на схему виявника сигналів завад, а саме на керуючий вхід комутатора, та тримає його в розімкненому стані. Коли дія цього імпульсу закінчується і настає час знаходження  $T_{вияв}$ , перемикач 6 підключає вхід схеми виявлення до виходу малошумливого підсилювача 3.

Схема виявлення складається з вхідного перемикача 6, детектора сигналу завад 10, підсилювача постійного струму (ППС) 13 і компаратора 15. Він працює таким чином. Під час  $T_{роб}$ , коли випромінюється сигнал керування, схема виявлення відключена від вхідних пристроїв блока захисту і сигнали керування на неї не надходять. Потім, у період виявлення завад  $T_{вияв}$ , коли відсутнє випромінювання сигналів керування, її вхід за допомогою перемикача 6 підключають до вхідних пристроїв блока захисту і вона контролює наявність сигналів завад на штатній робочій частоті  $f_{ш}$ . За відсутності сигналів завад у період  $T_{вияв}$  вихідний сигнал схеми виявлення дорівнює нулю, а компаратор 15 не спрацьовує та залишає антенний перемикач 2, перемикач 14 у початковому положенні. При цьому БПЛА продовжує рух із використанням штатної частоти  $f_{ш}$ .

У разі потрапляння БПЛА в зону дії сигналів завад на частоті  $f_{ш}$  в період  $T_{вияв}$ , коли відсутній сигнал керування від оператора, блок захисту їх виявляє й автоматично перемикає блок захисту на додаткову частоту  $f_{д}$ . Крім цього каналом зв'язку передає інформацію про наявність сигналів завад на передавальній пристрій оператора, який також автоматично перемикається на додаткову частоту  $f_{д}$ . У результаті, за наявності сигналів завад на частоті  $f_{ш}$  схема виявлення і захисту БПЛА працює таким чином. У період виявлення  $T_{вияв}$  сигнал

завади за допомогою комутаторів надходить на вхід детектора 10, де детектується і далі посилюється підсилювачем постійного струму ППС 13.

Вихідний сигнал підсилювача 13 подається на керуючий вхід компаратора 15, який спрацьовує і змінює знак вихідного сигналу на протилежний. Спрацьовування компаратора 15 призводить до спрацьовування антенного перемикача 2, який антену 1 відключає від входу малошумливого підсилювача 3 і підключає її до входу малошумливого підсилювача 4 додаткової частоти  $f_d$ . Крім цього, спрацьовування компаратора 15 призводить до спрацьовування комутатора 14, який відключає від входу БПЛА сигнал керування на робочій частоті  $f_{ш}$  і підключає вхід БПЛА до виходу приймача додаткової частоти  $f_d$ . Приймач додаткової частоти  $f_d$  складається з малошумливого резонансного підсилювача 4, змішувача 7, гетеродина 8 і підсилювача проміжної частоти ППЧ 11 та працює таким чином. Після спрацьовування компаратора 15 антенний перемикач 2 під'єднує антену 1 до входу малошумливого резонансного підсилювача 4 сигналів керування на додатковій робочій частоті  $f_d$ , який їх вибірково підсилює і подає на вхід перетворювача частоти, де вони перетворюються так, щоб вихідна проміжна частота  $f_{пч}$  дорівнювала основній (штатній) робочій частоті БПЛА  $f_{ш}$ :

$$f_{пч} = f_r - f_d = f_{ш}, \text{ якщо } f_r > f_d, \quad (1)$$

$$f_{пч} = f_d - f_r = f_{ш}, \text{ якщо } f_r < f_d, \quad (2)$$

де  $f_r$  – частота гетеродина 8,

Слід мати на увазі, що під час модуляції сигналу керуючого БПЛА, де відіграють роль фазові зсуви, кращим є вибір  $f_r > f_d$  (1), оскільки зберігається знак фазових зсувів. У разі  $f_r < f_d$  (2), знак змінюється на протилежний. Для цього випадку сигнал на виході підсилювача проміжної частоти необхідно забезпечити кут зсуву фаз, що дорівнює  $180^\circ$ . У першому випадку в цьому немає необхідності [15].

Крім цього, вихідний сигнал порогового пристрою 15 у разі виявлення завади і спрацьовування подається на передавач БПЛА, що здійснює зв'язок з оператором, і блок управління оператора автоматично переходить на додаткову частоту  $f_d$ .

## Висновки

Пропонований метод і схема пристрою, що його реалізує (блок захисту), для боротьби з придушенням радіосигналів, що керують БПЛА, дають можливість:

- вести постійний контроль і виявлення радіосигналів завади в разі їх появи;
- за відсутності радіосигналів завад здійснювати приймання радіосигналів керування від оператора на штатній частоті  $f_{ш}$  і передавати їх на вхід приймача БПЛА;
- у разі виявлення радіосигналів завад на основній частоті  $f_{шт}$  штатній частоті  $f_{ш}$  перемикачати приймач блока захисту на додаткову частоту  $f_d$ , водночас частота вихідного сигналу блока захисту після перетворення залишається такою самою, як частота  $f_{ш}$ , що дає змогу зберегти налаштування приймача БПЛА;
- каналом зв'язку з оператором надсилати інформацію про наявність завад і автоматично перемикачати блок керування БПЛА на додаткову робочу частоту.

### Список літератури:

1. Chaurasia R., Mohindru V. Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A Comprehensive Survey. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119769170.ch1>
2. Drones Importance and Usage in Real Estate. <https://www.ifsec.events/india/visit/news-and-updates/drones-importance-and-usage-real-estate>. Accessed 31 March 2021.
3. Cai G., Dias J., Seneviratne L. A Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends. *Unmanned Syst.*, 2, 2, 175–199, 2014.
4. Pham H., Smolka S.A., Stoller S.D., Phan D., Yang J. A survey on unmanned aerial vehicle collision avoidance systems. *CoRR*, abs/1508.07723, 2015.
5. Hackney C. and Alexander C., 2.1.7. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping // *Geomorphological Techniques*. L. Clarke, and J. M. Nield, (Eds.), British Society for Geomorphology, London, GB, 2015.
6. Dominicus J. New Generation of Counter UAS Systems to Defeat of Low Slow and Small (LSS) Air Threats. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1152139.pdf>
7. Willis M., et al. A Comprehensive Approach to Countering Unmanned Aircraft Systems // Joint Air Power Competence Centre, (2021).
8. Holland Michel Arthur. Counter-Drone Systems. 2 nd Edition, Center for the Study of the Drone at Bard College, <https://dronecenter.bard.edu/projects/counter-drone-systems-project/counter-drone-systems-2nd-edition>, (2019).
9. Kaidenko M. M., Kravchuk S. O. Protection against the effect of different classes of attacks on UAV control channels // *Information and telecommunication sciences*. 2022. Vol. 13, №1. P. 35–43.
10. B. Sklar. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Second Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
11. A. Wiesel, J. Goldberg, H. Messer-Yaron. SNR estimation in time-varying fading channels // *IEEE Transactions on Communications*, vol. 54, no. 5, pp. 841-848, May 2006, <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2006.873995>.
12. Z. Sun, X. Gong, F. Lu. A non-data-aided SNR estimator based on maximum likelihood method for communication between orbiters // *JWireless Com Network*, 123 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01730-4>
13. Optimization of a printed log-periodic antenna position on a UAV / Venkata Reddy Kandregula, Pavlos Lazaridis, Zaharias Zaharis, et al. // *TechRxiv*. October 26, 2023. DOI:10.36227/techrxiv.24427117.v1
14. Akhter Z, Bilal R. M., Shamim A. A. Dual mode, Thin and Wideband MIMO Antenna System for Seamless Integration on UAV // *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. 2021. Vol. 2, September. P. 991–1000. DOI: 10.1109/OJAP.2021.3115025
15. Бова М. Т., Гойжевський В. О., Маєвський С. М., Молебний В. В. Вимірювання різниці фаз у радіоелектроніці. Київ : Вища шк., 1972. 232 с.

*Надійшла до редколегії 29.05.2024*

### *Відомості про авторів:*

**Миценко Ігор Михайлович** – д-р фіз.-мат. наук, Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, ст. науковий співробітник; Україна; email: [igor.mytsenko@gmail.com](mailto:igor.mytsenko@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6598-6809>

**Педенко Юрій Олександрович** – канд. техн. наук, Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, ст. науковий співробітник; Україна; email: [yuriy.pedenko@gmail.com](mailto:yuriy.pedenko@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8752-9581>

**Роснко Олександр Миколайович** – канд. фіз.-мат. наук, Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, зав. відділом, Україна; email: [alexnikrnk@gmail.com](mailto:alexnikrnk@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9632-527X>