

наслідок, гарантувати належне оброблення неприйнятних емерджентних ризиків.

1. International Organization for Standardization. Integrated management systems. A practical guide. 2026 URL: [https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100435\\_preview.pdf](https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100435_preview.pdf) (accessed on: 26.04.2026).
2. Мохор В. В., Цуркан В. В. Інтегрована система управління інформаційною безпекою об'єктів критичної інфраструктури сфери енергетики. *Кібербезпека енергетики* : матеріали науково-практичної конференції (Київ, 27 травня 2022 р.). Київ : ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2022. С. 123–125.
3. ISO/IEC 42001:2023. Information technology. Artificial intelligence. Management system. [From 2023-12-18]. URL: <https://www.iso.org/standard/42001> (accessed on: 26.04.2026).

### **Синтез сигналів управління складної форми для захищеного каналу зв'язку БПЛА**

УДК 004.056: 621.39

Назарій Когут<sup>1</sup>, Орест Синявський<sup>2</sup>

*Національний університет "Львівська політехніка",  
<sup>1</sup>nazarii.m.kohut@lpnu.ua, <sup>2</sup>orest.y.syniavskiy@lpnu.ua*

Вступ. Сучасний етап розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) характеризується їх масовим застосуванням у військових та цивільних сферах. Головною умовою успішного виконання місій БПЛА є надійне та безперервне функціонування каналів управління та телеметрії. Проте радіоканали БПЛА є вразливими до навмисних завад (РЕБ), перехоплення даних та підміни сигналів управління (GPS/сигнального спуфінгу). Традиційні методи захисту, такі як криптографічне шифрування, не захищають фізичний рівень зв'язку від придушення шумовими або прицільними завадами. Тому розробка методів синтезу сигналів управління складної форми, які мають високу прихованість та завадозахищеність, є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням побудови завадостійких систем зв'язку присвячено роботи багатьох вітчизняних та закордонних вчених. Найчастіше для захисту каналів БПЛА використовують технології розширення спектра: псевдовипадкове переналаштування робочої частоти (ППРЧ) та прямого розширення спектра послідовністю (ПРСП) [1–3].

Проте за умов застосування інтелектуального радіоелектронного придушення (Smart Jamming), традиційні закони формування сигналів стають прогнозованими для заводових систем противника. Потребують вдосконалення математичні моделі синтезу сигналів, які б адаптивно змінювали свою структуру у реальному часі.

Мета роботи. Підвищення завадозахищеності та імітостійкості каналу зв'язку БПЛА шляхом синтезу фазоманіпульованих та частотно-маніпульованих сигналів складної форми на основі нелінійних динамічних систем.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети у дослідженні запропоновано комплексний підхід до синтезу сигналів управління, який базується на використанні хаотичних динамічних систем (зокрема, системи Лоренца, Росслера або дискретних відображень Чебишева).

Процес синтезу сигналів складної форми складається з таких етапів:

Генерація псевдовипадкових послідовностей (ПВП): замість класичних кодів Голда чи М-послідовностей застосовуються траєкторії нелінійних хаотичних відображень. Це забезпечує експоненційну чутливість до початкових умов (ключів) та збільшує ансамбль доступних сигналів.

Формування складної структури сигналу: синтез сигналів із багатопозиційною фазовою (MSK, QPSK) або частотною маніпуляцією, де параметри сигналу (фаза, частота, тривалість чипу) змінюються за нелінійним законом.

Адаптація до завадової обстановки: розроблено алгоритм динамічної зміни форми сигналу залежно від спектрального аналізу завад, що фіксуються приймачем БПЛА.

Математична модель синтезованого сигналу  $s(t)$  у загальному вигляді описується виразом:

$$s(t) = A(t) \cos \cos (2\pi f_0 t + \phi(t, \vec{x}) + \theta_m(t))$$

де  $A(t)$  – закон амплітудної модуляції,  $f_0$  – несуча частота,  $\theta_m(t)$  – інформаційна фазова маніпуляція команд управління, а  $\phi(t, \vec{x})$  – додатковий складний фазовий зсув, що визначається вектором станів  $\vec{x}$  хаотичної системи.

Перевагою використання таких сигналів є їхній спектр, який за своїми характеристиками наближається до білого шуму. Це забезпечує високий рівень енергетичної та структурної прихованості (LPI/LPD – Low Probability of Intercept / Low Probability of Detection). Завадові станції супротивника не можуть синхронізуватися з таким сигналом, що нівелює ефективність прицільних та імітаційних завад.

Результати моделювання. Для оцінки ефективності розроблених методів було проведено комп'ютерне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Моделювався канал зв'язку БПЛА в умовах впливу флукуаційного шуму та навмисних прицільних завад за частотою.

Результати показали, що використання синтезованих хаотичних сигналів складної форми дозволяє:

- Знизити ймовірність бітової помилки (BER) на 2.5 – 3.0 дБ при однаковому відношенні сигнал/завада порівняно з класичними системами ППРЧ.
- Збільшити структурну скритність сигналу, оскільки функція взаємної кореляції між перехопленим сигналом та копією завади не має чітко виражених піків.
- Забезпечити швидке відновлення синхронізації приймача на борту БПЛА після короткочасного повного блокування каналу зв'язку.

Висновки. У роботі запропоновано та обґрунтовано синтез сигналів управління складної форми для безпілотних літальних апаратів. Використання хаотичних динамічних систем для формування структури сигналів дозволяє

значно підвищити захищеність ліній зв'язку від засобів радіоелектронної боротьби. Складна форма сигналів унеможливує їх прогнозування та регенерацію заводовими комплексами ворога. Запропоновані рішення можуть бути впроваджені при модернізації чинних радіоліній керування тактичних БПЛА та розробці перспективних заводо захищених систем зв'язку.

1. Кутень Р.Б., Синявський О.Ю.. Методи і засоби забезпечення стабільності та захисту радіозв'язку в умовах складної електромагнітної обстановки. *Комп'ютерні системи та мережі*. – 2024. – №1(6). – С. 99-107.
2. Костяк М.Ю., Синявський О.Ю. Синтез сигналу управління каналу зв'язку БПЛА методом динамічного програмування. *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2026, Том 1, № 83, – С.198-201.
3. Синявський О.Ю. Метод розрахунку чутливості каналу зв'язку БПЛА як критерію синтезу сигналів управління. *Сучасний захист інформації*. Київ. – 2026. – № 1. – С.163-168.