Єна Максим Вікторович, аспірант

Харківський аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковскього, Харківський авіаційний інститут, м. Харків

<https://orcid.org/0009-0006-0664-3244>

**ІНТЕГРАЦІЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ДАНИХ В УПРАВЛІННІ ТРАФІКОМ БПЛА**

**Вступ**

Безпека даних є однією з ключових вимог у сучасних системах управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Швидке зростання кількості дронів, а також розвиток застосування безпілотних систем для військових, комерційних і приватних завдань ставить нові виклики перед інженерами, розробниками та операторами. В умовах, коли потрібні надійні способи передачі інформації про польотні плани, ідентифікацію апаратів, аналіз маршрутів і управління повітряним простором, блокчейн-технології здатні забезпечити високу ступінь захисту та інтеграції даних.

Метою цієї роботи є розгляд основних переваг упровадження блокчейну в системи управління трафіком БПЛА (UAV Traffic Management, або UTM), а також аналіз потенційних викликів, з якими можуть зіткнутися розробники і регуляторні органи при впровадженні таких рішень.

**1. Актуальність та передумови використання блокчейну в управлінні БПЛА**

Безпілотні літальні апарати активно використовуються для моніторингу інфраструктури, сільського господарства, пошуково-рятувальних операцій, доставки товарів та інших комерційних сфер. Разом із їх поширенням виникає потреба в ефективному управлінні повітряним простором, щоб уникнути зіткнень, запобігти несанкціонованим польотам та забезпечити захист конфіденційних даних.

Традиційно обмін даними про польоти (наприклад, диспетчерські системи, схеми поділу повітряного простору) базується на централізованих платформах. Це означає, що один чи декілька центральних серверів керують процесами автентифікації, відстеження і координації. Така модель уразлива до кібератак, може мати низьку ефективність у пікових навантаженнях, а також створює єдину точку відмови.

Блокчейн-технологія забезпечує розподілене зберігання даних у вигляді ланцюга блоків, які пов’язані та захищені криптографічними методами. Основні переваги:

1. **Децентралізація**: немає потреби у центральному посереднику чи сервері, що знижує ризик відмови системи.
2. **Прозорість та незмінність**: усі зміни фіксуються у ланцюгу блоків, записати «заднім числом» або видалити інформацію фактично неможливо.
3. **Високий рівень безпеки**: криптографічні механізми гарантують надійну верифікацію транзакцій та убезпечують від несанкціонованого внесення змін.

**2. Механізми інтеграції блокчейну в системи управління трафіком БПЛА**

Одним із ключових аспектів UTM є можливість швидко й однозначно ідентифікувати кожен дрон, який перебуває в повітряному просторі. За допомогою блокчейну можна зберігати унікальні ідентифікатори БПЛА, що дозволяє миттєво перевірити власника апарата, його технічні характеристики та історію польотів. Децентралізована мережа, де кожен учасник зберігає копію реєстру, перешкоджає спробам підробити дані про власність чи стан дрона.

Щоб уникнути зіткнень і конфліктів у повітряному просторі, оператори БПЛА повинні спільно використовувати польотні плани і дані про час та маршрут польоту. У традиційній централізованій системі зміни у базі даних планів польоту можуть стати вразливими для атак чи помилок. У блокчейні ж кожен новий запис (транзакція) проходить процедуру узгодження (консенсусу) між усіма учасниками мережі. Це гарантує, що запис про польотний план дійсно надійшов від уповноваженого оператора та не був змінений.

Завдяки блокчейну легко сформувати детальну історію польотів дрона. Кожний блок міститиме інформацію про дату, час, маршрут та інші параметри. У разі виникнення інцидентів (зіткнення, несанкціонований політ тощо) розслідування буде спрощене: вся інформація перевіряється за заздалегідь підтвердженими блоками, що унеможливлює її підробку.

Смарт контракти можуть автоматизувати правила взаємодії між учасниками повітряного руху. Наприклад, можна встановити умову про те, що дрон не зможе отримати дозвіл на зліт, доки не буде виконано певні вимоги з безпеки (оновлення ПЗ, перевірка справності сенсорів, сплата зборів тощо). Усе це реалізується програмним способом у мережі блокчейну, що робить виконання цих умов обов’язковим та некоректованим ззовні.

**3. Переваги та виклики впровадження блокчейну в UTM**

3.1. **Переваги**

1. **Покращена безпека й надійність**: зменшується ризик кібератак, бо для атаки потрібно буде скомпрометувати більшість вузлів мережі одночасно.
2. **Підвищена прозорість**: усі учасники можуть відстежувати зміни в реальному часі, що спрощує аудит і контроль.
3. **Усунення посередників**: відпадає потреба у довірі до центральних органів — достовірність даних гарантується самою блокчейн-архітектурою.
4. **Відкритість для інновацій**: можливість розробляти нові сервіси на основі смартконтрактів, які взаємодіють зі сторонніми платформами (логістика, страхові компанії, митниця тощо).

3.2. **Виклики та обмеження**

1. **Масштабованість**: блокчейн-мережі зазвичай повільніші, ніж централізовані бази даних, особливо якщо йдеться про велику кількість транзакцій у реальному часі.
2. **Регуляторні аспекти**: законодавство багатьох країн ще не пристосоване до децентралізованих рішень. Потрібне оновлення правових норм і стандартів, щоб ефективно інтегрувати блокчейн у сферу управління повітряним рухом.
3. **Витрати та впровадження**: інтеграція блокчейну в наявні системи вимагає значних інвестицій. Крім того, навчання персоналу щодо роботи з блокчейном потребує ресурсів і часу.
4. **Консенсусні алгоритми та енергоспоживання**: класичні протоколи (наприклад Proof-of-Work) споживають багато ресурсів. Потрібно добирати більш енергоефективні алгоритми (Proof-of-Stake, Proof-of-Authority та ін.), адаптовані для задач UTM.

**4. Перспективи та можливі напрями розвитку**

4.1. **Інтеграція штучного інтелекту**
Поєднання штучного інтелекту (ШІ) та блокчейну може підвищити ефективність управління дронами, дозволяючи в реальному часі прогнозувати завантаженість повітряного простору, визначати оптимальні маршрути та реагувати на непередбачувані ситуації. Блокчейн у цьому випадку забезпечує легітимність і зберігання навчальних даних, що особливо важливо для моделей машинного навчання.

4.2. **Стандартизація та міжнародне співробітництво**
Для того, щоб блокчейн-рішення були дієвими на глобальному рівні, потрібно створити універсальні стандарти та протоколи обміну даними між різними країнами та авіаційними агенціями. Міжнародні організації, такі як Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO), можуть зіграти ключову роль у виробленні таких стандартів.

4.3. **Нові моделі бізнесу**
Завдяки можливості формування системі «дрон-як-послуга» (DaaS) на базі смартконтрактів, оператори й клієнти матимуть прозорий алгоритм взаємодії. Наприклад, плата за використання дрона може відбуватися автоматично після підтвердження завершення маршруту.

4.4. **Розвиток IoT-інфраструктури**
БПЛА часто розглядають як мобільні вузли Інтернету речей (IoT). Інтеграція блокчейну в цю екосистему дозволить безпечно передавати величезні масиви даних, отриманих із сенсорів і камер на бортах дронів. Це може бути затребувано в логістиці, агросекторі, моніторингу довкілля тощо, де необхідна висока безпека і достовірність інформації.

**Висновки**

Інтеграція блокчейн-технологій у системи управління трафіком безпілотних літальних апаратів має значний потенціал для підвищення рівня безпеки, прозорості та надійності обміну даними. Децентралізація та криптографічна захищеність блокчейну допомагають усунути вразливі місця централізованих рішень, забезпечують чітку історію польотів та розвивають нові сервіси, зокрема на базі смартконтрактів.

Водночас перед розробниками та авіаційними регуляторами стоїть низка викликів: потрібно вдосконалити технічні алгоритми (особливо в частині масштабування), адаптувати законодавчі норми та стандарти під децентралізовані рішення, а також вирішити питання енергетичних і фінансових витрат на впровадження. Та все ж, враховуючи стрімкий розвиток технологій, є підстави очікувати, що у найближчому майбутньому блокчейн стане одним з ключових інструментів побудови безпечної та ефективної системи управління дронами, інтегрованої з широким спектром інших цифрових сервісів.

**Література**

1. Keith, A., Sangarapillai, T., Almehmadi, A., & El-Khatib, K. (2023). A Blockchain-Powered Traffic Management System for Unmanned Aerial Vehicles. Applied Sciences, 13(19), 10950. <https://doi.org/10.3390/app131910950>

2. Aliyu, A. A., & Liu, J. (2023). Blockchain-Based Smart Farm Security Framework for the Internet of Things. Sensors, 23(18), 7992. <https://doi.org/10.3390/s23187992>

3. Li, Z., Chen, Q., Li, J., Huang, J., Mo, W., Wong, D. S., & Jiang, H. (n.d.). A secure and efficient UAV network defense strategy: Convergence of blockchain and deep learning. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2024.103844>