

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-70>

УДК 629.7.01

ВИШНЕВСЬКИЙ СВЯТОСЛАВ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2159-603X>e-mail: vyshnevskiy.s.y@vntu.edu.ua**ЛАЗАРЕНКО СЕМЕН**

Національний університет «Запорізька політехніка»

e-mail: semen.lazarenko@gmail.com**ЯНІЦЬКИЙ АНАТОЛІЙ**

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

<https://orcid.org/0000-0001-5318-1915>e-mail: bsn1987@i.ua**ХЕБДА АЛЬОНА**

Фаховий коледж інженерії, управління та землевпорядкування

Державного некомерційного підприємства

«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

e-mail: alenahebda@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Стаття присвячена питанням вдосконалення процесу моніторингу стану високовольтних ліній електропередач із застосуванням безпілотних літальних апаратів. У статті визначено основні принципи, щодо діагностики систем електропостачання промислових підприємств та інших об'єктів енергетичної мережі з використанням безпілотних літальних апаратів та телекомунікаційних технологій. Запропоновано враховувати діагностування під час моніторингу з допомогою безпілотних літальних апаратів для визначення стану функціонування високовольтних ліній електропередач з урахуванням особливостей періодичного контролю стану з довільною дискретністю. Таким чином, у роботі розглянуто концептуальну можливість використання сучасних телекомунікаційних засобів телекомунікації у контексті застосування безпілотних літальних апаратів для діагностики електротехнічних систем, що знаходяться у важкодоступних а також небезпечних ділянках. Особлива увага приділяється комплексам високовольтних ліній електропередач, що в умовах військових дій вбачається критичним для забезпечення надання послуг з електропостачання. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, розглядаються як інноваційні рішення для моніторингу стану високовольтних ліній електропередач, як частини критичної інфраструктури для забезпечення безперебійної подачі електроенергії. Особливо у випадках, коли традиційні методи, такі як ручні огляди чи використання пілотованих літальних апаратів, є трудомісткими, дорогими та небезпечними. Розглянуто застосування сучасних телекомунікаційних засобів для отримання відео високої роздільної здатності та зображення під час візуального огляду, тепловізійні зображення для виявлення перегрівання та інших електричних несправностей, дані LiDAR для 3D-картографування, а також показників датчиків, таких як температура, вологість та інші екологічні та експлуатаційні умови при використанні цих систем у моніторингу.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, моніторинг, телекомунікаційні технології, високовольтні лінії електропередач, діагностика.

VYSHNEVS'KYY SVIATOSLAV

Vinnytsia National Technical University

LAZARENKO SEMEN

National University "Zaporizhzhya Polytechnic"

YANITSKYI ANATOLIY

Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs

KHEBDA ALIONA

Professional College of Engineering,

Management and Land Management of the State Non-Profit Enterprise "State University "Kyiv Aviation Institute"

USE OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES WHEN USING UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR MONITORING THE CONDITION OF HIGH-VOLTAGE POWER LINES

The article is devoted to the improvement of monitoring processes for high-voltage power transmission lines through the application of unmanned aerial vehicles (UAVs). The study defines the fundamental principles for diagnosing power supply systems of industrial enterprises and other energy network facilities using UAVs and modern telecommunication technologies. It is proposed to integrate diagnostic procedures into UAV-based monitoring for assessing the operational condition of high-voltage transmission lines, taking into account the specific features of periodic condition control with arbitrary discreteness.

Thus, the paper considers the conceptual feasibility of employing advanced telecommunication tools in combination with UAVs for diagnosing electrical systems located in hard-to-reach or hazardous areas. Particular attention is given to high-voltage power line complexes, which under wartime conditions are considered critical for ensuring the continuity of electricity supply services.

Unmanned aerial vehicles (UAVs), or drones, are regarded as innovative solutions for monitoring the condition of high-voltage power lines as elements of critical infrastructure that ensure the uninterrupted delivery of electrical energy. This is especially relevant in

cases where traditional inspection methods—such as manual surveys or piloted aircraft—are labor-intensive, costly, and potentially dangerous.

The study discusses the use of modern telecommunication means to obtain high-resolution video and imaging during visual inspections, thermal imaging for detecting overheating and other electrical faults, LiDAR data for 3D mapping, and sensor readings such as temperature, humidity, and other environmental and operational parameters. These data are utilized to enhance the reliability and efficiency of high-voltage line condition monitoring systems.

Keywords: unmanned aerial vehicles, monitoring, telecommunication technologies, high-voltage power transmission lines, diagnostics.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми

Сьогоднішні реалії сьогодення диктують нові підходи до вирішення завдань, які були незмінні десятиліттями та тими що виникають наново. Не виключенням є і енергетична галузь. Контроль стану функціонування електротехнічного обладнання це, як відомо, запорука надійного та ефективного його функціонування. Між тим, слід звернути увагу на системи електропостачання, а саме лінії електропередач (ЛЕП). Саме контроль стану ЛЕП має деяку специфіку виконання моніторингу функціонування [1].

Звичайно, завдання щодо моніторингу стану ЛЕП не нові та виконуються на сьогоднішній день, але з урахуванням сучасних засобів та приладів є необхідність переглянути можливість збільшення ефективності та безпеки проведення даного виду робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день, активно впроваджуються у різні галузі економіки безпілотні літальні апарати, котрі виконують різний спектр складних та небезпечних завдань. Впровадження телекомунікаційних технологій також має своє розповсюдження у різних галузях економіки.

Безумовно, такий підхід має враховувати позитивні та негативні аспекти впровадження вказаних пристроїв, та специфіку їх функціонування при експлуатації поблизу високовольтних ЛЕП.

Однак, слід зазначити, що ряд авторів вже розглянули можливі варіанти застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу різних об'єктів, але питання впровадження безпілотних літальних апаратів залишається поки що відкритим та актуальним для науково-практичних досліджень [1-8].

Метою статті є аналіз можливості та ефективності використання телекомунікаційних технологій при застосуванні безпілотних літальних апаратів для моніторингу стану високовольтних ліній електропередач.

Виклад основного матеріалу

Використання телекомунікаційних технологій у моніторингу стану високовольтних ліній електропередач (ЛЕП) за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є важливим напрямком сучасної енергетики. БПЛА дозволяють ефективно, безпечно та економічно проводити огляд і діагностику ЛЕП, а телекомунікаційні технології забезпечують передачу даних, управління дронами та обробку інформації в реальному часі.

Дослідження свідчить, що телекомунікаційні технології є важливими для використання БПЛА у моніторингу високовольтних ліній, забезпечуючи передачу даних у реальному часі.

Здається ймовірним, що основними технологіями є бездротове зв'язок (2,4 ГГц ISM-діапазон), протокол Mavlink, відео транслявання, супутниковий зв'язок, 5G, LTE та мережі типу "сітка".

Є певна невизначеність щодо точних технологій у різних регіонах, але докази схиляються до їхньої ефективності для безпеки та ефективності.

Безпілотні літальні апарати стали популярним інструментом для моніторингу високовольтних ліній електропередач завдяки своїй здатності швидко та безпечно збирати дані. Телекомунікаційні технології відіграють ключову роль, дозволяючи БПЛА передавати інформацію, таку як відео, зображення та дані сенсорів, на наземну станцію для аналізу. Це забезпечує оперативне виявлення проблем, таких як пошкодження ліній чи перегрівання, зменшуючи ризик аварій.

Основні телекомунікаційні технології включають котрі можуть використовуватися при моніторингу ЛЕП [2]:

- бездротовий зв'язок (2,4 ГГц ISM-діапазон) для керування БПЛА та передачі телеметрії;
- протокол Mavlink для передачі даних між БПЛА та наземною станцією;
- відео транслявання в режимі реального часу, що вимагає високошвидкісних каналів для живих потоків;
- супутниковий зв'язок для роботи у віддалених районах;
- 5G та LTE для швидкої передачі даних з низькою затримкою;
- мережі типу "сітка" для розширення зони покриття.

Ці технології забезпечують ефективність та безпеку, але можуть стикатися з викликами, такими як перешкоди сигналу чи регуляторні обмеження.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, стали інноваційним рішенням для моніторингу стану високовольтних ліній електропередач, що є критичною частиною інфраструктури для

забезпечення безперебійної подачі електроенергії. Традиційні методи, такі як ручні огляди чи використання пілотованих літальних паратів, є трудомісткими, дорогими та небезпечними, особливо у віддалених або важкодоступних регіонах. БПЛА, оснащені сучасними телекомунікаційними технологіями, пропонують ефективну та безпечну альтернативу, дозволяючи швидко охоплювати великі території та передавати дані у реальному часі для аналізу стану ЛЕП.

Тож, телекомунікаційні технології є невід'ємною частиною роботи БПЛА при моніторингу високовольтних ліній. Вони забезпечують зв'язок між БПЛА та наземною станцією, дозволяючи передавати критичну інформацію, таку як [3]:

- відео високої роздільної здатності та зображення під час візуального огляду;
- тепловізійні зображення для виявлення перегрівання та інших електричних несправностей;
- дані LiDAR для 3D-картографування;
- показники датчиків, такі як температура, вологість та інші екологічні та експлуатаційні умови.

Таким чином отримана з допомогою БПЛА інформація використовується для виявлення проблем, таких як фізичні пошкодження ліній чи опор, корозія, заростання рослинністю або явні дефекти, що свідчать про потенційну загрозу збоїв. Завдяки додатковому застосуванню засобів телекомунікації оператори можуть оперативно реагувати на виявлені проблеми, підвищуючи надійність та безпеку функціонування енергетичної інфраструктури.

Застосування БПЛА разом із телекомунікаційними технологіями для моніторингу високовольтних ліній має ряд переваг таких, як [4]:

- ефективність проведення моніторингу та діагностики стану ЛЕП, оскільки БПЛА можуть швидко охоплювати великі території, скорочуючи час на інспекцію;
- безпека проведення моніторингу ЛЕП, оскільки зменшується потреба у роботі людей на висоті чи в небезпечних умовах, що знижує ризик травмування;
- економічність, котра характерна завдяки зниженню затрат на операційні витрати порівняно з традиційними методами, такими як використання пілотованих гелікоптерів;
- дані в реальному часі, котрі дають можливість оперативно аналізувати та реагувати на виявлені проблеми, що підвищує надійність енергетичної системи;
- доступність, котра характерна завдяки тому, що БПЛА можуть працювати у віддалених або важкодоступних районах, де традиційні методи недоступні.

Попри численні переваги застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу стану ЛЕП, існують і певні труднощі, а саме [5]:

- перешкоди сигналу причиною чого може бути рельєф, будівлі або електромагнітні поля від високовольтних ліній можуть порушувати зв'язок, як зазначено у дослідженні про вплив електромагнітного випромінювання на безпеку польотів БПЛА ;
- безпека отриманих даних, котрим необхідно забезпечити захист інформації від несанкціонованого доступу, особливо при передачі чутливих даних;
- регуляторні вимоги в аспекті дотримання правих норм застосування авіації та телекомунікацій, включаючи ліцензування та підготовку персоналу;
- обмежений час польоту, пов'язаний із обмеженістю об'ємів палива чи ємності акумуляторних батарей, що обмежує тривалість місій, та може вимагати додаткових технологій, таких як бездротова зарядка, для подовження операцій;
- погодні умови такі як дощ чи сильний вітер, можуть впливати на якість роботи БПЛА та зв'язку, чи взагалі можливості застосування розглянутих засобів та технологій.

Таблиця 1

Основні телекомунікаційні технології та їхнє використання

Технологія	Опис	Приклад використання
Бездротове зв'язок (2,4 ГГц)	Керування БПЛА, передача телеметрії та відео.	Зв'язок між GCS та БПЛА для моніторингу ЛЕП
Протокол Mavlink	Передача телеметричних даних між БПЛА та наземною станцією.	Телеметрія для аналізу стану БПЛА.
Відео трансляція	Живі HD-потoki для реального часу моніторингу.	Передача відео з камер для виявлення дефектів ЛЕП.
Супутниковий зв'язок	Зв'язок у віддалених районах, BVLOS операції.	Інспекція ЛЕП у важкодоступних регіонах.
5G та LTE	Висока швидкість та низька затримка для даних.	Швидка передача великих обсягів даних у зонах покриття.
Мережі типу "сітка"	Розширення зони покриття у складних місцевостях.	Підтримка зв'язку у гірських або урбанізованих районах.
LiDAR дані	Передача даних для 3D-картографування.	Аналіз конструкцій ЛЕП.

Таблиця 2

Порівняння телекомунікаційних технологій для БПЛА

Технологія	Переваги	Недоліки	Приклади використання
4G/5G	Висока швидкість, низька затримка	Обмежене покриття в віддалених районах	Потокове відео, реальний час аналізу
Радіочастотний зв'язок	Стабільність у локальних умовах	Обмежена дальність	Локальне управління дронами
Супутниковий зв'язок	Покриття у віддалених районах	Вища вартість, нижча швидкість	Інспекції в горах чи пустелях
Волоконно-оптичні мережі	Висока пропускна здатність, надійність	Не завжди доступні в полі	Демонстраційні проекти, стаціонарні точки
Квантовий зв'язок	Висока безпека, захист від хакерських атак	Наразі в розробці, висока вартість	Майбутнє впровадження для кібербезпеки

Таким чином, телекомунікаційні технології є невід'ємною частиною ефективного використання БПЛА для моніторингу стану функціонування високовольтних ліній електропередач та забезпечують швидку та надійну передачу даних, що підвищує ефективність, безпеку та якість процесу моніторингу. Зокрема, розглянуті технології, відіграють ключову роль у забезпеченні безперебійної роботи систем моніторингу. Хоча існують певні виклики, такі як перешкоди сигналу чи регуляторні обмеження, подальший розвиток технологій БПЛА та телекомунікацій, зокрема з появою 5G, обіцяє ще більше вдосконалити їхнє застосування у цій важливій сфері станом на сьогоднішній день.

Висновки

1. У роботі розглянуто концептуальну можливість використання сучасних телекомунікаційних засобів телекомунікації у контексті застосування безпілотних літальних апаратів для діагностики важкодоступних та небезпечних ділянок електротехнічних систем та комплексів високовольтних ліній електропередач.

2. Розглянуто застосування сучасних телекомунікаційних засобів при використанні цих систем у моніторингу.

3. Телекомунікаційні технології значно розширюють можливості БПЛА для моніторингу високовольтних ЛЕП, забезпечуючи швидке, безпечне та точне виявлення проблем. Поєднання 5G, супутникового зв'язку, штучний інтелект та сенсорних технологій відкриває нові перспективи для автоматизації та оптимізації енергетичної інфраструктури.

Література

1. Григоров О.М. Міжнародно-правові засади регулювання відносин у сфері цивільної авіації: становлення та розвиток: Монографія. Одеса: Фенікс. 2020. С.280–281.
2. T. Shmelova, S. Boiko, O. Kotov, O. Burlaka, M. Nozhnova, Yu. Bershadskaya, L. Chyzhova, D. Hinosian, V. Zhurid, V. Yemets, Yu. Oliynyk, B. Moskaluk Modern aspects of application and development of Unmanned Aerial Vehicles. Warsaw: iScience Sp. z o.o. – 2021. – 139 p.
3. Lee, H., Kim, H., & Choi, S. Driving skill modeling using neural networks for performance-based haptic assistance. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 51(3), 198-210 (2021). <https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3061409>
4. Zhao, Peng, Chun Deng, and Yichao Yuan. "Patrol of transmission line with helicopter." North China Electric Power 27.10 (2002): 1-3.
5. Jones, D. I., and G. K. Earp. "Camera sightline pointing requirements for aerial inspection of overhead power lines." Electric Power Systems Research 57.2 (2001): 73-82.
6. Williams, M., D. I. Jones, and G. K. Earp. "Obstacle avoidance during aerial inspection of power lines." Aircraft Engineering and Aerospace Technology 73.5 (2001): 472-479.
7. Shuangchun S, Yanlei L, Zhenxiao Y, Kai W, Ping Y, Kun Z, Tao Y (2021) Review of autonomous inspection technology for power lines using UAVs. In: 2021 IEEE international conference on electrical engineering and mechatronics technology (ICEEMT 2021). <https://doi.org/10.1109/ICEEMT52412.2021.9601446>.
8. Robert Dianovský, Pavol Pecho, Patrik Veľký, Michal Hruz, Electromagnetic Radiation from High-Voltage Transmission Lines: Impact on UAV Flight Safety and Performance, Transportation Research Procedia, Volume 75, 2023, Pages 209-218

References

1. Hryhorov O.M. Mizhnarodno-pravovi zasady rehulivuvannia vidno-syn u sferi tsyvilnoi aviatsii: stanovlennia ta rozvytok: Monohrafiia. Odessa: Feniks. 2020. S.280–281.

2. T. Shmelova, S. Boiko, O. Kotov, O. Burlaka, M. Nozhnova, Yu. Bershadska, L. Chyzhova, D. Hinosian, V. Zhurid, V. Yemets, Yu. Oliinyk, B. Moskaluk Modern aspects of application and development of Unmanned Aerial Vehicles. Warsaw: iScience Sp. z.o.o. – 2021. – 139 p.
3. Lee, H., Kim, H., & Choi, S. Driving skill modeling using neural networks for performance-based haptic assistance. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 51(3), 198-210 (2021). <https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3061409>
4. Zhao, Peng, Chun Deng, and Yichao Yuan. "Patrol of transmission line with helicopter." North China Electric Power 27.10 (2002): 1-3.
5. Jones, D. I., and G. K. Earp. "Camera sightline pointing requirements for aerial inspection of overhead power lines." Electric Power Systems Research 57.2 (2001): 73-82.
6. Williams, M., D. I. Jones, and G. K. Earp. "Obstacle avoidance during aerial inspection of power lines." Aircraft Engineering and Aerospace Technology 73.5 (2001): 472-479.
7. Shuangchun S, Yanlei L, Zhenxiao Y, Kai W, Ping Y, Kun Z, Tao Y (2021) Review of autonomous inspection technology for power lines using UAVs. In: 2021 IEEE international conference on electrical engineering and mechatronics technology (ICEEMT 2021). <https://doi.org/10.1109/ICEEMT52412.2021.9601446>.
8. Robert Dianovský, Pavol Pecho, Patrik Veľký, Michal Hruz, Electromagnetic Radiation from High-Voltage Transmission Lines: Impact on UAV Flight Safety and Performance, Transportation Research Procedia, Volume 75, 2023, Pages 209-218,