

*М. С. НИКОНОВ, С. Ю. ШЕВЧЕНКО*

## МОНІТОРИНГ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В статті окреслено основні існуючі проблеми моніторингу об'єктів електросистеми, адже регулярний огляд приладів та пристроїв електричної енергосистеми дозволяє оцінити їх технічний стан та виявити наявність дефектів та попередити аварійні режими. Проведено аналіз перспективних рішень в процесі інспекції технічного стану об'єктів або аварійних ділянок електричних мереж з використанням безпілотних літальних апаратів. Розглянуто класифікацію, переваги та недоліки безпілотних літальних апаратів, наведено перелік завдань, які вони здатні виконувати враховуючи власну конструкцію, технічні параметри. Окреслено основні частини структурної схеми керування безпілотного літального апарату та можливості розширення, удосконалення та усунення існуючих недоліків. Розглянуто існуючі технології автоматичного керування, виявлення та слідування електричної повітряної лінії та пристроїв безпілотником. Проведено аналіз базового принципу роботи датчиків вимірювання теплового поля та електромагнітного поля, як найбільш перспективних на сьогоднішній день у визначенні порушення правильної роботи пристроїв. По-перше, при несправності, об'єкти здатні випромінювати теплову енергію і часткові розряди, датчик якого здатний вимірювати її на відстані та перетворювати в температуру. По-друге, при тих самих пошкодженнях змінюється електромагнітне поле навколо об'єктів, вимір та аналіз значення цього параметра спеціальним датчиком дозволяє знаходити пошкоджені ділянки. Розглянуті питання забезпечення захисту каналу зв'язку наземної частини з безпілотником від зломисників і інформаційного захисту обміну даних. Розглянуто можливості розвитку існуючих технологій з метою удосконалення процесу моніторингу загального технічного стану електричної мережі, пошуку пошкоджених електричних ділянок та пристроїв, автоматизації процесу керування та зменшення собівартості пристрою.

**Ключові слова:** електрична мережа, моніторинг, БПЛА, типи БПЛА, ручне управління безпілотника, автоматичне управління безпілотника, передача даних, тепловізійний датчик, електромагнітний датчик.

*M. S. NIKONOV, S. YU. SHEVCHENKO*

## MONITORING OF POWER ELECTRICAL NETWORKS USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

In this paper, the main existing problems of monitoring power system objects are outlined, because the regular inspection of electrical power system devices and apparatus allows to evaluate a technical condition, to detect presence of defects and to prevent emergency situations. The paper carries out an analysis of promising solutions in the process of inspecting the technical condition of objects or emergency sections of power grids using drones. The article considers the definition, advantages, and disadvantages of unmanned aerial vehicles, provides a list of tasks that they can perform, considering their own design and technical parameters. The main components of the structural control scheme of an unmanned aerial vehicle and the possibilities of expanding, improving, and eliminating existing shortcomings are described. Existing technologies for automatic control, detection and tracking of electric overhead lines and devices by an unmanned aerial vehicle are described. The basic principle of operation of thermal field and electromagnetic field sensors is analyzed as the most promising to date in determining the malfunction of devices. Firstly, in the case of a fault, objects can produce thermal energy and partial discharges, which the sensor is able to measure at a distance and convert into temperature. Secondly, the electromagnetic field around the objects changes in the event of the same damage, and measuring the value of this parameter with a special sensor allows to detect damage. The issues of ensuring the protection of the communication channel between the ground unit and the drone from intruders and information security of data exchange are also considered. The possibilities of developing existing technologies to improve the process of monitoring the general technical condition of the electrical network, searching for damaged electrical sections and devices, automating the control process, and reducing the cost of the device are analyzed.

**Keywords:** power grid, monitoring, UAV, types of UAVs, manual control of a drone, automatic control of a drone, data transmission, thermal imaging sensor, electromagnetic sensor.

**Вступ.** Технічний стан елементів електричної мережі впливає на надійність та безперебійну роботу енергосистеми. Регулярний огляд електричних об'єктів за допомогою ручного або автоматичного обладнання дозволяє оцінити технічний стан електричних пристроїв, а також виявити наявність дефектів в електричних апаратах. Своєчасна заміна та ремонт пошкоджених ділянок енергосистеми забезпечує ефективну роботу електричних мереж та стабільне електропостачання для виробництва та потреб людей [1].

З подальшим розвитком, розширенням, удосконаленням конфігурації електричних мереж побудови та трансформації електромереж діагностика технічного стану електричних мереж з використанням БПЛА все частіше демонструє велику науково-дослідницьку та прикладну цінність. Технології спостереження з використанням БПЛА набувають

нагальної потреби, з метою розвитку енергосистеми, безперебійного і стабільного забезпечення електропостачання в нинішніх умовах. Безпілотники дозволяють проводити діагностику стану електричних мереж дистанційно та визначати аварійні ділянки або такі, що виробили свій технічний ресурс. Конструкція БПЛА дозволяє переносити додаткове технічне обладнання для проводити повноцінний широкий спектр вимірювань важливих показників, як температуру, електромагнітне поле струмопровідних елементів й ізоляції та інші.

**Мета статті.** Провести аналіз існуючих проблем моніторингу об'єктів електросистеми та розглянути перспективи інспекцій електричних мереж з використанням безпілотних літальних апаратів. Розглянути класифікацію, переваги та недоліки, структурну схему керування БПЛА та улаштування принципу виміру температури навколишніх об'єктів

© М. С. Ніконов, С. Ю. Шевченко, 2023

та електромагнітного поля з використанням безпілотника.

**Огляд літератури.** Існує декілька методів виявлення дефектів, які виникають впродовж експлуатації електричних мереж. Серед них традиційні ручні методи інспекції ліній або сучасні методи моніторингу з повітря.

Ефективність першого методу залежить виключно від досвідченості робочого персоналу. Як правило інспекція проводиться за допомогою польових спостережень та проводяться неозброєним оком або з використанням оптичних приладів, рідше застосовують тепловізори [2]. Даний метод має високу адаптивність, однак ефективність відносно низька, а вимоги до персоналу, який проводить перевірку високі [3].

Інший метод залучає використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). З розвитком такої технології доступна абсолютно нова можливість для діагностики технічного стану електричних мереж [1, 4]. Ці нові пристрої замінюють людей для виконання складних і небезпечних завдань. Вартість процесу інспекції за допомогою БПЛА є відносно низькою, оскільки термін окупності одного комплексу в нашій країні, як показано в дослідженні [5], становить пів року, а використання та застосування є гнучким й адаптивним.

Конструкція БПЛА дозволяє встановлювати необхідне обладнання для проведення точної діагностики та керування польотом дистанційно або автоматично. В роботі [6] поведено глибоке дослідження проблеми навігації БПЛА. На основі технології GPS та в поєднанні з аналізом комп'ютерного зору впроваджено інноваційний підхід до позиціонування та відстеження БПЛА під час діагностики електричних мереж. Дане дослідження допомагає безпілотнику виконувати функції уникнення перешкод і безпечної посадки в автоматичному режимі без участі оператора.

В іншій роботі [7] представлено технологію літального апарату, яка дозволяє автоматично слідувати вздовж повітряної лінії за допомогою оснащений лазерною системою визначення дальності. Така система дозволяє апарату триматися ближче до об'єкту спостереження, уникати перешкоди та виконувати поставлені цілі.

У дослідженні [8] пропонується метод теплового моніторингу за допомогою інфрачервоної камери, встановленої на БПЛА. Такий метод здатний перетворювати виміряну енергію в точну температуру та усувати енергію випромінюваної іншими джерелами тепла. Крім того, реалізовано метод автоматичного відстеження лінії для фокусування на об'єкти дослідження під час моніторингу з метою отримання надійного теплового зображення.

Під час моніторингу виникає нагальна потреба в обробці, передачі даних. В науковому дослідженні [9] розглянуто питання отримання, зберігання, первинна обробка і надійна передача даних, великих обсягів інформації. Наявність стійких каналів зв'язку між

безпілотником та наземною частиною, зменшує ризик стороннього втручання в процес моніторингу та не уможливило втрату вимірних даних.

**Типи БПЛА.** БПЛА – це загальний термін для позначення безпілотних літальних апаратів, які керуються за допомогою бездротових сигналів або за встановленими процедурами. БПЛА широко використовуються у військовій справі, геодезії та картографії, фотографії, моніторингу та інших сферах.

БПЛА за типом конструкції можна розділити на апарати з фіксованим крилом, з роторним крилом, безпілотні вертольоти та апарати з вертикальним злетом і посадкою [1]. Кожна з конструкцій має свої переваги та недоліки, що спонукає дослідників та розробників постійно удосконалювати конструкцію пристрою [10–12]. На рис. 1 зображено зовнішній вигляд кожного типу БПЛА [1].

Безпілотник з нерухомим крилом [13] зображений на рис. 1 а, швидкість його польоту може перевищувати 100 км/год. Завдяки аеродинамічній структурі та зрівноваженого енергоспоживання пристрій здатний долати великі відстані. Недолік даного типу БПЛА у високій швидкості польоту, через що якість та деталізація отриманих даних низька. Таким чином, БПЛА такого типу зазвичай долучають у фіксації загального стану електричних мереж.

На рис. 1 б показано БПЛА з роторним крилом [14], який характеризується простотою конструкції, низькою вартістю і зручністю експлуатації. Цей тип БПЛА літає з низькою швидкістю, а також запас енергії не дозволяє долати великі відстані. Тому, даний тип використовується для огляду окремих деталей електричної мережі.

Інший тип БПЛА – безпілотні вертольоти рис. 1 в [1]. У порівнянні з першим типом, має більші показники маневреності та здатний підійматися і приземлятися на невеликих відстанях. Даний тип здатний зависати в місцях для детального моніторингу стану електричних мереж енергосистеми. Як і в другому типі, запасу енергії не вистачає на тривалий час використання, тому використовуються для інспекції електричних мереж на короткі відстані [10].

Четвертий тип БПЛА з вертикальним злетом і посадкою (рис. 1 д) [15]. Даний тип стає популярним у використанні у проведенні моніторингу технічного стану електричних мереж. Поєднання переваг БПЛА з фіксованим крилом та БПЛА з вертикальним злетом і посадкою гвинтокрила, надає можливість легко злітати і приземлятися та в режимі фіксованого крила проводити інспекцію електричних мереж досить великі відстані [1]. Під дією автоматичної системи управління ці два стани можуть плавно перемикатися [11]. Тому, недолік з деталізацією отриманих даних першого типу нівелюється перемиканням режимами роботи.

**Структурна схема керування.** Схему керування БПЛА можна структурно розділити на систему управління польотом, силову систему, корисне навантаження, систему зв'язку та наземну частину [16, 17].

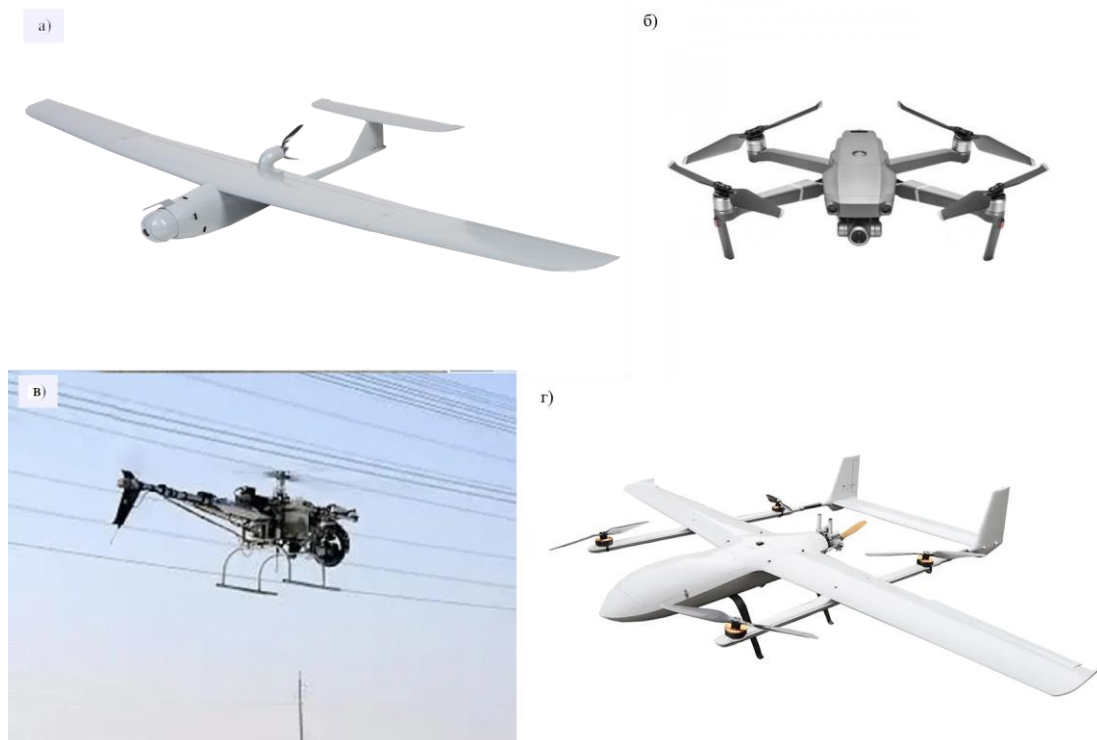


Рисунок 1 – Типи безпілотних літальних апаратів:  
 а) з фіксованим крилом [13], б) з роторним крилом [14],  
 в) безпілотні вертольоти [1], г) з вертикальним злетом і посадкою [15]

Система управління польотом являється основною частиною безпілотника, що контролює процес і режим польоту й виконання різних завдань. Модуль управління польотом можна розділити на ручний та автоматичний режим. Система управління польотом, зазвичай, отримує сигнали управління від модуля зв'язку і регулює стан польоту БПЛА. В автоматичному режимі безпілотник має самостійно визначати й виконувати певний порядок дій, потреба яких виникає під час польоту. У ручному режимі літальний апарат не потребує самостійного керування, якщо він стабільно летить відповідно до сигналу, що надходить з наземної частини [1].

Система живлення може забезпечуватися від електромережі або двигуна внутрішнього згоряння. Двигун внутрішнього згоряння має велику потужність, але шум, як завжди, відносно великий. В той же час, система живлення також складна. Шум електроприводу невеликий, конструкція проста, силова частина легка та пристосована до навколишніх погодних умов [1]. Енергетична система БПЛА забезпечує енергією силову установку й різноманітне бортове обладнання для моніторингу й керування. В БПЛА з електричним приводом основним компонентом енергетичної системи є акумуляторна батарея, яка може бути нікель-метал-гідридною або нікель-хромовою.

Система зв'язку важлива частина БПЛА, як спосіб підтримки зв'язку з наземною станцією і можливості контрольованого управління в режимі реального часу. Вона також слугує каналом передачі всієї необхідної інформації. Захист даних від

втручання зломисників реалізується з використанням додаткового шифрування. Втрати на енергоспоживання при цьому невеликі (від 2 до 19 Вт), а швидкодія при цьому становить від 52 МБ/с до 185 МБ/с [9].

Для зменшення маси безпілотника використовується наземна станція, де знаходиться обладнання обробки й поглибленого вивчення всієї інформації. Сигнал керування польоту БПЛА також надсилається наземною станцією, яка реалізує втручання людини у складних непередбачуваних ситуаціях [1].

Серед обладнання, яке необхідне для виконання завдання моніторингу електричних мереж, можуть бути присутні прилади для зйомки, вимірювання та візуалізації температурного поля, обладнання для обробки інформації.

На сьогоднішній день існують готові варіанти приладів [18], які поєднують у собі одразу декілька функцій такі як, збір інформації про положення технологією GPS, збір інформації про температуру, вимір значення електромагнітного поля й інші функції. Вимірювання теплового поля виконується з використанням інфрачервоної камери. Принцип вимірювання базується на вимірюванні часткових розрядів і теплову енергію, які випромінюють об'єкти при несправності, та перетворення в температуру [8]. Роботу датчика вимірювання електромагнітного поля можна описати наступним принципом: магнітний датчик перетворює сигнал електромагнітного поля області моніторингу або об'єкту в сигнал напруги. Далі, проводиться оцифрування за допомогою

мікросхеми, а потім зберігається в накопичувачах або передається на наземну станцію [1]. Такі готові системи прості в експлуатації, зручні в перенесенні й мають характеристики високої точності вимірювання.

**Висновки.** Аналізуючи викладену вище інформацію, використання БПЛА дозволяє розробити безпечну та швидку технологію моніторингу технічного стану об'єктів електричної мережі. Такі пристрої надають широкий спектр використання різних модулів для визнання багатьох показників одночасно, що в свою чергу спрощує процес вимірювання та аналіз параметрів електричних мереж та дозволяє ефективно виявляти пошкоджені ділянки та уникати помилкового виявлення, яке виникає під час польових інспекцій. У даній роботі розглянуто схему управління БПЛА, яку можна розділити на систему управління польотом, силову та систему живлення, навантаження, яке може переносити безпілотник, систему зв'язку й наземну частину. Розвиток технологій дозволяє використовувати автоматичну систему управління, такі як, автоматичний злет і спуск або повністю автоматизовану систему слідування електричної мережі із залученням оператора у крайніх непередбачуваних ситуаціях. Розглянуто принцип роботи датчиків вимірювання температури та електромагнітного поля. Однак вартість деяких готових варіантів висока і їх використання понесе великі втрати і строк окупності зростає на роки. Тому, подальша розробка та модернізація аналогів таких систем є актуальною задачею.

### Список літератури

- Xu B., Zhao Y., Wang T., Chen Q. Development of power transmission line detection technology based on unmanned aerial vehicle image vision. *SN Applied Sciences*. 2023. Vol. 5, no. 3. 72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05299-7>.
- Тепловізійна діагностика електричних мереж. *Електроенергетика*. URL: <https://forca.com.ua/info/teploviziinii/teploviziina-diagnostika-elektrichnih-merezh.html> (дата звернення: 16.06.2023).
- Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ДНАОП 0.00-1.21-98): Наказ Міністерства праці та соціальної політики України від 09.01.1998 р. № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text> (дата звернення: 15.06.2023).
- Zhou G., Yuan J., Yen I-L., Bastani F. Robust real-time UAV based power line detection and tracking. *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Phoenix, AZ, USA, 25–28 September 2016. P. 744–748. DOI: <https://doi.org/10.1109/icip.2016.7532456>.
- Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Швець С. В., Захаренко Н. С. Підвищення надійності системи електропостачання за рахунок безпілотних літальних апаратів. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2020. № 2. С. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2020-2-11-16>.
- Mejias L., Campoy P., Saripalli S., Sukhatme G. S. A visual servoing approach for tracking features in urban areas using an autonomous helicopter. *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, Orlando, FL, USA, 15–19 May 2006. P. 2503–2508. DOI: <https://doi.org/10.1109/robot.2006.1642078>.
- Montambault S., Beaudry J., Toussaint K., Pouliot N. On the application of VTOL UAVs to the inspection of power utility assets. *2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI 2010)*, Montreal, QC, Canada, 5–7

- October 2010. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/carpi.2010.5624443>.
- Jeong S., Kim M.-G., Kim J.-H., Oh K.-Y. Thermal monitoring of live-line power transmission lines with an infrared camera mounted on an unmanned aerial vehicle. *Structural Health Monitoring*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/14759217231156359>.
- Зуев А. О., Караман Д. Г. Система моніторингу об'єктів електроенергетичної інфраструктури з використанням БПЛА. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2018. Т. 5, № 51. С. 87–91. DOI: <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.5.087>.
- Katrasnik J., Pernus F., Likar B. A survey of mobile robots for distribution power line inspection. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25, no. 1. P. 485–493. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2009.2035427>.
- Nguyen V. N., Jenssen R., Rovero D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: a review of current status and the potential role of deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. Vol. 99. P. 107–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.016>.
- Shuangchun S., Yanlei L., Zhenxiao Y. et al. Review of autonomous inspection technology for power lines using UAVs. *2021 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT)*, Qingdao, China, 2–4 July 2021. P. 481–484. DOI: <https://doi.org/10.1109/iceemt52412.2021.9601446>.
- APC-2. *A.Drones*. URL: <https://drones.com.ua/drones/ars-2/> (дата звернення: 12.06.2023).
- Mavic 2 - DJI. *DJI Official*. URL: <https://www.dji.com/global/mavic-2> (дата звернення: 12.06.2023).
- Fixed-wing VTOL drone is the future. *Fly Dragon Drone Tech*. URL: <http://www.dronefromchina.com/new/Fixed-wing-VTOL-Drone-Is-The-Future.html> (дата звернення: 12.06.2023).
- Bhola R., Krishna N. H., Ramesh K. N., Senthilnath J., Anand G. Detection of the power lines in UAV remote sensed images using spectral-spatial methods. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 206. P. 1233–1242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.036>.
- Chen W., Li Y., Zhao Z. InsulatorGAN: A transmission line insulator detection model using multi-granularity conditional generative adversarial nets for UAV inspection. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 19. 3971. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13193971>.
- Drone magnetometer sensor fluxgate magnetic sensor magnetometer minimum payload 600g UAV navigation geophysical survey. *AliExpress*. URL: [http://www.aliexpress.com/item/1005004571035110.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02&sk=&aff\\_platform=&aff\\_trace\\_key=&af=&cv=&cn=&dp=](http://www.aliexpress.com/item/1005004571035110.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=) (дата звернення: 15.06.2023).

### References

- B. Xu, Y. Zhao, T. Wang, and Q. Chen, "Development of power transmission line detection technology based on unmanned aerial vehicle image vision," *SN Applied Sciences*, vol. 5, no. 3, Feb. 2023, Art. no. 72, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05299-7>.
- "Тепловізійна діагностика електричних мереж. [Thermal imaging diagnostics of electrical networks]" *Електроенергетика [Elektroenergetika]*. <https://forca.com.ua/info/teploviziinii/teploviziina-diagnostika-elektrichnih-merezh.html> (accessed Jun. 16, 2023).
- Ukraine, Ministry of Labor and Social Policy of Ukraine. (1998, Jan. 9). *Order of the Ministry of Labor and Social Policy of Ukraine no. 4, Pro zatverdzhennia Pravyly bezpechnoi ekspluatatsii elektroustanovok spozhyvachiv (DNAOP 0.00-1.21-98) [On Approval of the Rules for the Safe Operation of Consumer Electrical Installations (DNAP 0.00-1.21-98)]*. Accessed: Jun. 15, 2023. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text> (in Ukrainian)
- G. Zhou, J. Yuan, I.-L. Yen, and F. Bastani, "Robust real-time UAV based power line detection and tracking," in *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Phoenix, AZ, USA, Sep. 25–28, 2016. p. 744–748, doi: <https://doi.org/10.1109/icip.2016.7532456>.

5. O. G. Grib, I. T. Karpaliuk, S. V. Shvets, and N. S. Zaharenko, "Improvement of the power supply system reliability by means of unmanned aerial vehicles," *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, no. 2, p. 1–6, 2020, doi: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2020-2-11-16>. (in Ukrainian)
6. L. Mejias, P. Campoy, S. Saripalli, and G. S. Sukhatme, "A visual servoing approach for tracking features in urban areas using an autonomous helicopter," in *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, Orlando, FL, USA, May 15–19, 2006, p. 2503–2508, doi: <https://doi.org/10.1109/robot.2006.1642078>.
7. S. Montambault, J. Beaudry, K. Toussaint, and N. Pouliot, "On the application of VTOL UAVs to the inspection of power utility assets," in *2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI 2010)*, Montreal, QC, Canada, Oct. 5–7, 2010, p. 1–7, doi: <https://doi.org/10.1109/carpi.2010.5624443>.
8. S. Jeong, M.-G. Kim, J.-H. Kim, and K.-Y. Oh, "Thermal monitoring of live-line power transmission lines with an infrared camera mounted on an unmanned aerial vehicle," *Structural Health Monitoring*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/14759217231156359>.
9. A. O. Zuev and D. H. Karaman, "Electric power infrastructure objects monitoring system using UAV," *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, vol. 5, no. 51, p. 87–91, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.5.087>. (in Ukrainian)
10. J. Katrasnik, F. Pernus, and B. Likar, "A survey of mobile robots for distribution power line inspection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, p. 485–493, Jan. 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2009.2035427>.
11. V. N. Nguyen, R. Jenssen, and D. Roverso, "Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, p. 107–120, Jul. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.016>.
12. S. Shuangchun et al., "Review of autonomous inspection technology for power lines using UAVs," in *2021 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT)*, Qingdao, China, Jul. 2–4, 2021, p. 481–484, doi: <https://doi.org/10.1109/iceemt52412.2021.9601446>.
13. "ARS-2." A.Drones. <https://adrones.com.ua/drones/ars-2/> (accessed Jun. 12, 2023).
14. "Mavic 2 - DJI." DJI Official. <https://www.dji.com/global/mavic-2> (accessed Jun. 12, 2023).
15. "Fixed-wing VTOL drone is the future." Fly Dragon Drone Tech. <http://www.dronefromchina.com/new/Fixed-wing-VTOL-Drone-Is-The-Future.html> (accessed Jun. 12, 2023).
16. R. Bhole, N. H. Krishna, K. N. Ramesh, J. Senthilnath, and G. Anand, "Detection of the power lines in UAV remote sensed images using spectral-spatial methods," *Journal of Environmental Management*, vol. 206, p. 1233–1242, Jan. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.036>.
17. W. Chen, Y. Li, and Z. Zhao, "InsulatorGAN: A transmission line insulator detection model using multi-granularity conditional generative adversarial nets for UAV inspection," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 19, Oct. 2021, Art. no. 3971, doi: <https://doi.org/10.3390/rs13193971>.
18. "Drone magnetometer sensor fluxgate magnetic sensor magnetometer minimum payload 600g UAV navigation geophysical survey." AliExpress. [http://www.aliexpress.com/item/1005004571035110.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02&sk=&aff\\_platform=&aff\\_trace\\_key=&af=&cv=&cn=&dp=](http://www.aliexpress.com/item/1005004571035110.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=) (accessed Jun. 15, 2023).

Надійшла (received) 24.06.2023

## Відомості про автора (-іє) / About the Author (-s)

**Ніконов Микола Сергійович (Mykola Nikonov)** – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0542-7594>; e-mail: [mykolanikonov99@gmail.com](mailto:mykolanikonov99@gmail.com).

**Шевченко Сергій Юрійович (Sergii Shevchenko)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: [Sergii.Shevchenko@khp.edu.ua](mailto:Sergii.Shevchenko@khp.edu.ua).