

А.В. Коваль, к.т.н.

О.В. Гордійченко, магістр

Житомирський державний технологічний університет

## Розробка модулю для вимірювання концентрації шкідливих та вибухонебезпечних газів на міні безпілотному літальному апараті

Розробка здійснюється на основі датчика шкідливих та вибухонебезпечних газів. В роботі авторами запропоновано схему яка забезпечує стабільний вихідний сигнал, що містить вимірювальну інформацію про концентрацію газу. Запропонований модуль може бути використаний для пошуку газів є компактним, легким, з можливістю встановлення на будь-який міні безпілотний літальний апарат (БПЛА). В цьому проекті передбачається розробка системи, яка базується на звичайному комерційному міні БПЛА AR.Drone фірми Parrot, з модулем для вимірювання концентрації газу, де керування та обробка отриманих даних здійснюється на базовій станції під контролем Robot Operating System (ROS). Система автоматично збирає дані про забруднення та знаходить осередки витоку газу у потенційно небезпечних місцях. Мобільна система здатна працювати за відсутності сигналу GPS, має можливість швидкого розгортання і може бути керована оператором або працювати в автономному режимі, без загрози його життю. Проведені початкові лабораторні випробування, що підтвердили життєздатність системи.

**Ключові слова:** газ; AR.Drone; ROS; забруднення; пошук; БПЛА.

**Постановка проблеми.** В умовах сьогодення людство намагається зробити своє життя максимально простим і безпечним. Для цього вже було створено і зараз створюється багато різних речей. Наприклад, роботи і безпілотні літальні апарати (БПЛА) були побудовані для співпраці з людьми у різних місіях та завданнях. Крім цього БПЛА використовуються для фото/відео зйомки, доставки їжі та у інших цивільних сценаріях таких, як: картографія, контроль стану ліній електропередач, газу та нафтопроводів, залізничних колій, сільськогосподарського використання, в охоронних системах та для нагляду за особливо небезпечними об'єктами, в пошукових та рятувальних операціях [1, с. 58]. З огляду на багатогранність способів використання і широкий модельний ряд бюджетні БПЛА, що доступні в звичайному магазині, також можуть бути задіяні і для пошуку забруднень на протигагу вартісним спеціалізованим апаратам, що при всіх їх перевагах не є спеціалізованими у пошуку джерел витоків газу.

Типовими завданнями для таких бюджетних систем можуть бути: пошук витоків газу в середині приміщень, пошук забруднень, що виникли в наслідок діяльності певного підприємства, підвищення безпеки обслуговуючого персоналу газових магістралей, пошук витоків газу поблизу газо/нафто розподільчих вузлів, підвищення рівню безпеки пожежників за рахунок взаємодії з ними при гасінні складних пожеж [1, с. 70].

Можна розглянути наступну ситуацію, де одна країна використовує газопровід з великою протяжністю для постачання газу або нафти через незаселений регіон. В умовах сьогодення перевірка стану газопроводу потребує регулярного контролю з боку обслуговуючого персоналу і для знаходження місць витоків використовуються застарілі методи, що ґрунтуються на використанні датчиків тиску або витратомірів. Дані методи є застарілими і не дозволяють знайти проблемну ділянку за короткий час [2, с. 12]. Використання вимірювальної системи на базі БПЛА, яка базується на звичайному дешевому квадрокоптері з датчиком газу або іншому датчику відповідно до особливих потреб може вирішити дану задачу. БПЛА або дрони можуть розташовуватись на фіксованих позиціях уздовж газопроводу і обслуговувати підконтрольну ділянку газопроводу, де дальність залежить від робочого діапазону БПЛА та погодних умов. Така система з розрахованою заздалегідь інтенсивністю польотів здійснює вимірювання газової концентрації вздовж газопроводу та надсилає ці дані до базової станції.

Окрім цього сценарію також можливе використання даної системи для пошуку витоків газу при ліквідації наслідків стихійних лих [2, с. 15]. Наприклад, якщо в результаті землетрусу було пошкоджено будинок з газопроводом, що був проведений до нього, то в першу чергу необхідно переконатися в відсутності загрози життю рятувальників.

Система, що пропонується в цій роботі, спрямована підвищити безпеку людини, оскільки подібні вимірювання не повинні ставити під загрозу життя оператора та цивільних. Для роботи системи у попередньо сформульованих сценаріях вона повинна бути легкою, компактною, мати змогу бути встановленою на будь-який безпілотний літальний апарат, працювати в середовищах, де неможливо використовувати GPS [1]. Крім цього, будуть необхідні інші функції, такі як робота в умовах слабого GPS сигналу, або повної його відсутності (поблизу мостів та будівель), і можливість легкого розгортання

та експлуатації оператором з мінімальним ризиком для його здоров'я чи в автоматичному режимі з віддаленої базової станції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В області вимірювання концентрації газів у повітрі існує декілька дослідницьких де використовуються подібні системи. Але більшість з них пов'язані з контролем якості повітря у приміщенні. Наприклад, Д.Лозано та іншими [3, с. 30] пропонується мережа бездротових датчиків, яка складається з базової станції з підключенням до інтернету та автономних модулів. Кожен модуль обладнаний різними сенсорами для вимірювання температури, вологості, освітленості та якості повітря. Згодом подібні дослідження були зроблені Цанг-Чу Ю та іншими [4, с. 231], Джон Лі та інші.

Вагомий внесок в дослідження локалізації небезпечних газів поблизу відкритих свердловин зробили П.Нейман та інші [5, с. 4]. Ця команда представила систему, побудовану на базі БПЛА, здатну виконувати завдання в різноманітних сценаріях викидів газу. Пізніше вони вдосконалили свою систему з урахуванням непередбачуваного характеру дисперсії газу [6, с. 730, 7, с. 35]. Аналогічні системи були введені М.Россі та іншими [7, с. 1434] і П.Кройз та іншими [8, с. 391] де елемент виявлення газу був встановлений на комерційній БПЛА.

У даному проєкті було запропоновано вимірювальний модуль стійкий до впливу шумів системи живлення міні БПЛА та забезпечуючий стабільність вихідного сигналу; наземну станцію та безпілотну систему, яка працює в умовах відсутності сигналу GPS на відміну від вищезгаданих систем. Для автономного польоту використовується монокулярна система одночасної локалізації та картографування (SLAM) з паралельним відстеженням і відображенням (PTAM), представлене Г.Клейном і Д.Мюрреєм [9, с. 225–234].

**Мета дослідження.** Вирішення важливої проблеми підвищення точності та надійності вимірювань концентрації шкідливих та вибухонебезпечних газів в умовах встановлення вимірювального модуля на міні безпілотний літальний апарат.

**Викладення основного матеріалу.** Оскільки пропонується авторами система є багатокomпонентною, то подальша структура роботи буде складатися з наступних підрозділів: 1) Міні БПЛА; 2) Газовий модуль; 3) Базова станція; 4) Результати досліджень.

#### 1) Міні безпілотний літальний апарат.

В наш час на ринку представлена велика кількість БПЛА. Для нашого проєкту ключовими факторами є: безпека (оператора з урахуванням вибухонебезпечності газів), час польоту (понад 10 хв.), можливість модифікації як програмних засобів так і апаратної складової та повної сумісності з ROS [10, с. 13].

Проведений аналіз доступних міні безпілотних літальних апаратів продемонстрував що AR.Drone від Parrot може бути використаним як рухома платформа для вимірювальної системи. Крім цього він був обраний завдяки наступним особливостям: спеціальний міцний захисний фюзеляж, виконаний з нейлонових та вуглецевих волокон, для безпечного польоту всередині будівель. Основним завданням цього фюзеляжу є захист несучих гвинтів у разі зіткнення з навколишніми об'єктами. Фюзеляж можна замінити на інший, полегшений комплектний, для польотів в умовах відкритого простору, якщо це потрібно дозволяє нести важче бортове обладнання. Більш того, AR.Drone легко модифікувати для розширення його функціональності, наприклад порт USB, який не використовується за замовченням, але може бути задіяний для додавання модулю GPS або інших компонентів.

Крім цього БПЛА має гарне технічне оснащення, порівняно з конкурентами у цьому ціновому діапазоні. Хочеться підкреслити його головну особливість – це повна підтримка ROS, це було важливою складовою для проведення досліджень. Ще однією перевагою є те, що на нього встановлено операційну систему на базі ядра Linux, що суттєво розширює його функціонал. БПЛА має стандартний набір датчиків, а саме 3-х осевий акселерометр та гіроскоп, датчик атмосферного тиску, висотомір та дві камери [10, с. 9].

#### 2) Газовий модуль

##### 2.1. Датчик рівню забрудненості повітря

Очевидно, що використання БПЛА в якості вимірювальної платформи необхідно враховувати його корисну вантажопідйомність. Тому однією з наших цілей було обрати датчик концентрації газу з найкращим співвідношенням маси та вимірювальних характеристик. Аналіз та дослідження ринку [11, с. 21] показали, що каталітичні датчики мають широкий діапазон вимірювання концентрації газів, достатню стабільність, надійність, простоту у використанні, низьку вартість та малу вагу. Відповідно до сформульованих вимог був обраний каталітичний датчик Figaro TGS6812-D00, показаний на рисунку 1, його технічні характеристики представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні характеристики датчику газу Figaro TGS6812-D00

Детектуванні газу	Гідроген, Метан, Бутан, Пропан, Пропан
Тип датчику	Каталітичний
Напруга живлення	Постійна напруга 3 В
Робочі умови	Температура $-10 \sim +70$ °C, відносна вологість $\leq 95$ %

Закінчення таблиці 1

Споживана потужність	525 мВт
Розмір	Діаметр: 12 мм, висота 13 мм
Вага	1,5 г



Рис. 1. Каталітичний сенсор концентрації газу TGS6812-D00

## 2.2. Розробка вимірювального модуля.

Перша версія вимірювального модулю (рис. 2) [12, с. 3] продемонструвала гарні результати у статичних лабораторних умовах, проте була виявлена необхідність її вдосконалення для роботи системи у динамічних режимах, з урахуванням специфіки роботи, а саме:

- зменшення довжини з'єднувальних провідників від вимірювальної плати до датчика газу на квадрокоптері;
- розробка нової вимірювальної плати, в схему якої було додано два підтягуючі резистори між землею і кожним з двох аналогових портів в arduino;
- були підібрані кращі значення резисторів вимірювального моста, який необхідний для правильної роботи датчика газу.
- було використано спеціальні роз'єми, які здатні забезпечувати стабільний контакт під час польоту;
- однією з останніх змін вимірювальної плати було створення контуру, під'єданого до від'ємного потенціалу акумуляторної батареї, що проходив по торцях електричної плати;
- додавання 3.3 В стабілізатору напруги та фільтру живлення;
- після деяких експериментів було вирішено додати операційний підсилювач для збільшення рівня сигналу від датчика газу. Схема зображена на рисунку 3, її фізична реалізація представлена на рисунку 4.

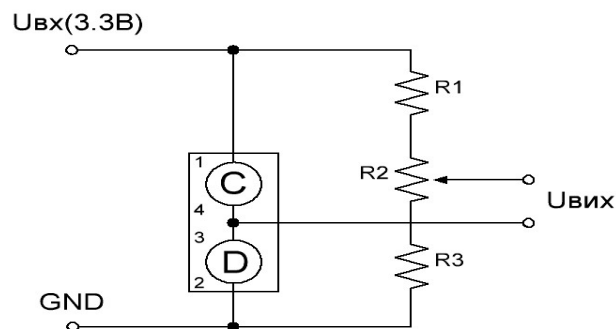


Рис. 2. Електрична принципова схема підключення датчика газу TGS6812

Вдосконалення вимірювальної системи дозволили отримувати стабільний сигнал з датчика і прибрати основні фактори появи завад, що спотворювали дані вимірювань.

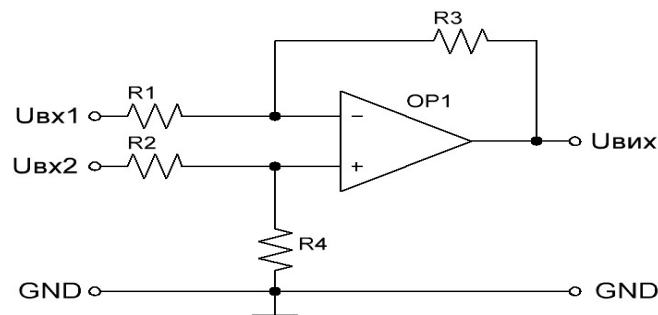


Рис. 3. Електрична принципова схема диференціального підсилювача

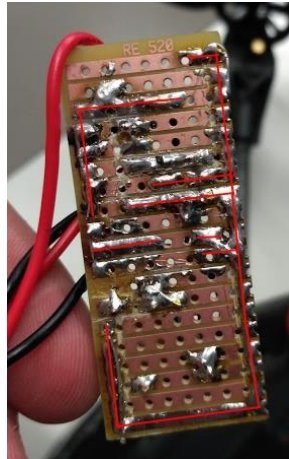


Рис. 4. Плата вимірювального модулю, зворотна сторона

На рисунку 5 зображено газовий модуль вбудований в БПЛА.



Рис. 5. Вимірювальна система встановлена на AR.Drone

### 3) Базова станція.

В якості наземної станції в даному проекті використовується комп'ютер з Ubuntu та операційною системою ROS, що розроблена в Массачусетському технологічному інституті [13]. ROS – це гнучкий програмний комплекс для написання програмного забезпечення, для керування роботами. Вона представляє набір інструментів, бібліотек та додаткових програмних засобів, які мають на меті спростити завдання створення складної та надійної поведінки роботів на різних робототехнічних платформах [14, с. 5].

В нашому проекті робоче середовище ROS складалося з трьох основних модулів, які є самодостатніми для польотів та навігації.

Першим з них є `ardrone_autonomy` – розроблений Мані Монаджем [15] для забезпечення зв'язку між БПЛА та комп'ютером з встановленим ROS. Це дозволяє отримувати дані від датчиків міні БПЛА та здійснювати керування квадрокоптером.

Пакет `tum_ardrone`, що був розроблений в технічному університеті Мюнхена [16], та дає змогу здійснення автономних польотів у попередньо невідомих умовах довкілля та поганого, або відсутнього сигналу GPS, орієнтуючись відповідно до зображення з бортових камер міні БПЛА. Також є можливість ручного керування міні БПЛА.

Власний розроблений ROS модуль, що забезпечує можливість отримання даних з нестандартних (додаткових) датчиків, що встановлені на БПЛА, також надає можливість опрацьовувати отримані дані в ROS, або в інших програмних продуктах.

### 4) Результати досліджень.

Попередні експериментальні дослідження в лабораторних умовах продемонстрували високу стабільність та завадостійкість вихідного сигналу.

Було досліджено стабільність напруги живлення відносно рівню заряду акумуляторної батареї та позиції установки датчика концентрації газу. Для цього було проведено реєстрацію напруги живлення акумуляторної батареї під час польоту без наявності газу (рис. 6).

Відповідно до рисунку 6 рівень живлення акумулятора є стабільним на всьому робочому діапазоні рівню заряду акумулятора від 100 %–0 % ємності та задовольняє вимогам роботи датчика газу і не впливає на покази вимірювальної системи. Графік розряду акумуляторної батареї є нелінійним оскільки досліджувана акумуляторна батарея була не новою, а також це є властивістю даного типу акумуляторів.

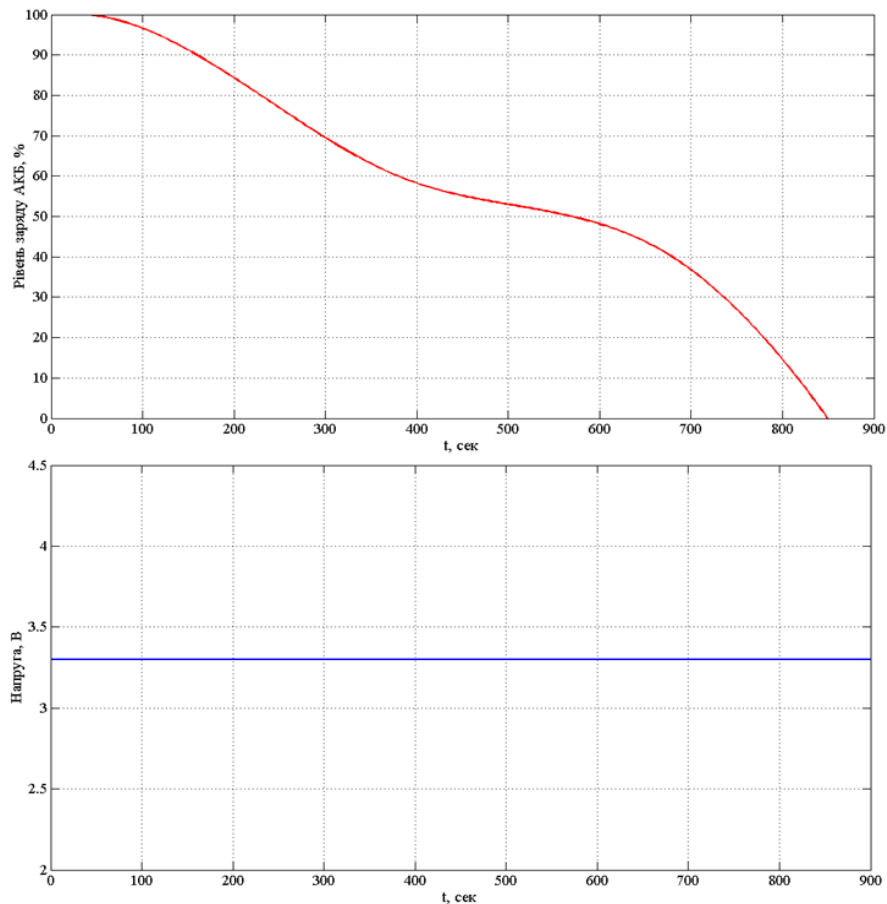


Рис. 6. Стабільність напруги живлення відносно рівню заряду акумуляторної батареї

Наступним етапом було проведення статичного експерименту (рис. 7) на відкритому повітрі, де досліджено залежність вимірюваної концентрації газу від відстані між джерелом газу та вимірювальним модулем. На першій стадії вимірювальний модуль розташовувався на відстані 100 см від джерела газу. Далі починався запис даних про концентрацію газу, після чого відкрився газовий балон, і вмикався вентилятор, що створює напрямлений вітровий потік поблизу джерела газу. Коли вимірюваний рівень газу досягав усталеного значення газовий балон закривався, і протягом деякого часу вимірювання тривало поки рівень газу не досягне нульового рівня (мінімальна вимірювана концентрація для даного типу датчика). Схема проведення експериментів показана на рисунку 7, а результати вимірів на рисунку 8.

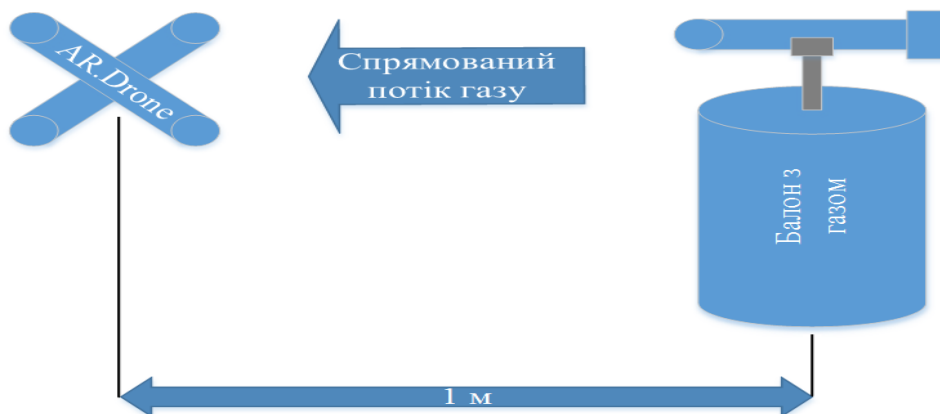


Рис. 7. Методика проведення експерименту

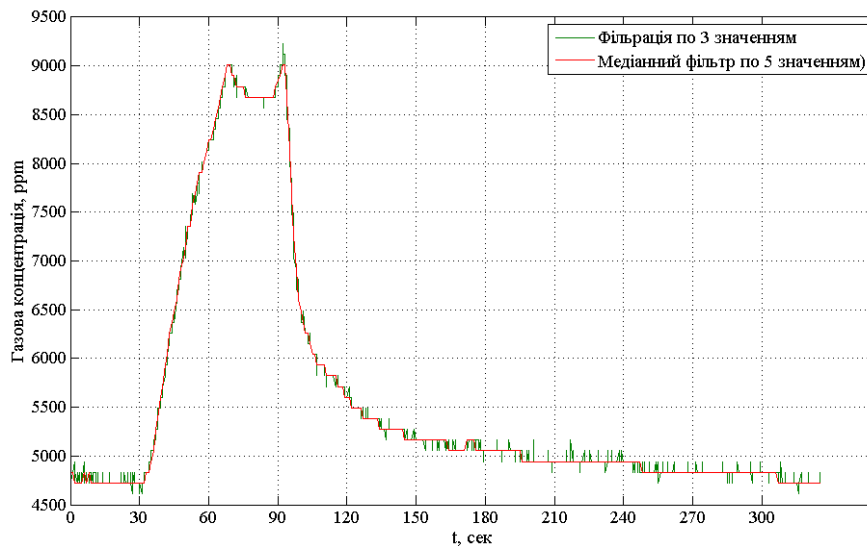


Рис. 8. Вимірювання концентрації газу в лабораторних умовах на відкритому повітрі (відстань від джерела газу 1 м)

**Висновки.** В результаті проведених досліджень була розроблена мобільна вимірювальна система, що складається з AR.Drone, базової станції з ROS та газового модуля. Проведені експериментальні дослідження у лабораторних умовах показали, що система здатна виявляти шкідливі та вибухонебезпечні гази на відкритому повітрі. Крім цього було забезпечено стабільний рівень живлення газового модуля під час польоту БПЛА та вдосконалено вимірювальний модуль та ROS пакет по вимірюванню газової концентрації.

#### Список використаної літератури:

1. Vachtsevanos G.J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles / G.J. Vachtsevanos, K.P. Valavanis. – Springer Publishing Company, 2014. – 58 p.
2. Geiger G. Principles of Leak Detection / G.Geiger. – 1st Edition. – Breda : Krohne Oil & Gas, 2008. – 12 p.
3. Wireless sensor network for indoor air quality monitoring / J.Lozano, JI.Su'arez, P.Arroyo and others. – Chemical Engineering, 2012. – 30 p.
4. Wireless sensor networks for indoor air quality monitoring / T.C. Yu, C.C. Lin, C.C. Chen and others // Medical engineering & physics. – 2013. – Pp. 231–235.
5. Micro-drone for the characterization and self-optimizing search of hazardous gaseous substance sources: A new approach to determine wind speed and direction : IEEE International Workshop on 2010 / P.Neumann, M.Bartholmai, J.H. Schiller and others // Robotic and Sensors Environments (ROSE). – 2010. – Pp. 1–6.
6. Gas source localization with a micro-drone using bio-inspired and particle filter-based algorithms / P.P. Neumann, V.Hernandez Bennetts, A.J. Lilienthal and others // Advanced Robotics. – 2013. – Pp. 725–738.
7. An artificial potential field based sampling strategy for a gas-sensitive micro-drone / P.Neumann, S.Asadi, J.H. Schiller and others // IROS Workshop on Robotics for Environmental Monitoring (WREM). – 2011. – Pp. 34–38.
8. Gas-drone: Portable gas sensing system on uavs for gas leakage localization // M.Rossi, D.Brunelli, A.Adami and others // SENSORS. – 2014. – pp. 1431–1434.
9. Autonomous measurement drone for remote dangerous source location mapping / P.Croiz'e, M.Archez, J.Boisson and others // International Journal of Environmental Science and Development. – 2015. – 391 p.
10. Klein G. Parallel tracking and mapping for small ar workspaces : 6th IEEE and ACM International Symposium on / G.Klein, D.Murray // Mixed and Augmented Reality. – ISMAR, 2007. – Pp. 225–234.
11. AR.Drone Developer Guide. – 2012 Access mode : <https://jpchanson.github.io/ARdrone/ParrotDevGuide.pdf>.
12. Liu X. A survey on gas sensing technology / X.Liu, S.Cheng, H.Liu // Sensors. – 2012. – № 12. – Pp. 9635–9665.
13. TGS6812-D00. – 2014 Access mode : <http://www.figarosensor.com/products/entry/tgs6812.html>.
14. ROS Tutorials. – 2017 Access mode : <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials>.
15. Ros: an open-source robot operating system : ICRA Workshop on Open Source Software / M.Quigley, K.Conley, B.Gerkey, J.Faust, T.Foote, J.Leibs, R.Wheeler, A.Y. Ng. – 2009. – Vol. 3. – P. 5.
16. Mani Monajjemi Ardron autonomy / Mani Monajjemi Access mode : <https://ardrone-autonomy.readthedocs.io/en/latest/installation.html>.
17. Hongrong H. Tum\_simulator / H.Hongrong. – 2014 Access mode : [http://wiki.ros.org/tum\\_simulator](http://wiki.ros.org/tum_simulator).

#### References:

1. Vachtsevanos, G.J. and Valavanis, K.P. (2014), *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer Publishing Company, 58 p.

2. Geiger, G. (2008), *Principles of Leak Detection*, 1<sup>st</sup>, Krohne Oil & Gas, Breda, 12 p.
3. Lozano, J., Su´arez, J.I., Arroyo, P. and others (2012), *Wireless sensor network for indoor air quality monitoring*, Chemical Engineering, 30 p.
4. Yu, T.C., Lin, C.C., Chen, C.C. and others (2013), «Wireless sensor networks for indoor air quality monitoring», *Medical engineering & physics*, pp. 231–235.
5. Neumann, P., Bartholmai, M., Schiller, J.H. and others (2010), «Micro-drone for the characterization and self-optimizing search of hazardous gaseous substance sources: A new approach to determine wind speed and direction», *IEEE International Workshop on, Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, pp. 1–6.
6. Neumann, P.P., Hernandez Bennets, V., Lilienthal, A.J. and others (2013), «Gas source localization with a micro-drone using bio-inspired and particle filter-based algorithms», *Advanced Robotics*, pp. 725–738.
7. Neumann, P., Asadi, S., Schiller, J.H. and others (2011), «An artificial potential field based sampling strategy for a gas-sensitive micro-drone», *IRIS Workshop on Robotics for Environmental Monitoring (WREM)*, pp. 34–38.
8. Rossi, M., Brunelli, D., Adami, A. and others (2014), «Gas-drone: Portable gas sensing system on uavs for gas leakage localization», *SENSORS*, pp. 1431–1434.
9. Croiz´e, P., Archez, M., Boisson, J. and others (2015), «Autonomous measurement drone for remote dangerous source location mapping», *International Journal of Environmental Science and Development*, 391 p.
10. Klein, G. and Murray, D. (2007), «Parallel tracking and mapping for small ar workspaces», *Mixed and Augmented Reality*, ISMAR, 6<sup>th</sup> IEEE and ACM International Symposium on, pp. 225–234.
11. Github.io «AR.Drone Developer Guide» (2012), available at: <https://jpchanson.github.io/ARdrone/ParrotDevGuide.pdf>
12. Liu, X., Cheng, S. and Liu, H. (2012), «A survey on gas sensing technology», *Sensors*, No. 12, pp. 9635–9665.
13. Figarosensor «TGS6812-D00» (2014), available at: <http://www.figarosensor.com/products/entry/tgs6812.html>
14. Wiki.ros «ROS Tutorials» (2017), available at: <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials>
15. Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R. and Ng, A.Y. (2009), «Ros: an open-source robot operating system», *ICRA Workshop on Open Source Software*, Vol. 3, p. 5.
16. Mani, Monajjemi (2015), «Ardrone autonomy», available at: <https://ardrone-autonomy.readthedocs.io/en/latest/installation.html>
17. Hongrong, H. (2014), «Tum\_simulator», available at: [http://wiki.ros.org/tum\\_simulator](http://wiki.ros.org/tum_simulator)

**Коваль** Антон Валерійович – доцент кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокіна Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- міні безпілотні літальні апарати;
  - колективні системи роботів;
  - моніторинг навколишнього середовища.
- E-mail: koval.anton@gmail.com.

**Гордійченко** Олег Володимирович – магістр кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокіна Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- міні безпілотні літальні апарати;
  - моніторинг навколишнього середовища.
- E-mail: oleggordiihenko@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 01.03.2018.