

mgr inż. Andrzej Szczepańczyk<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0003-4195-0152

dr Grzegorz Śmigielski<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-3781-0894

dr inż. Joanna Nowak<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-8912-1508

Mikołaj Dalecki<sup>1)</sup>

# Preliminary results of laboratory tests of an innovative system for measuring light pollution

## *Wstępne wyniki badań laboratoryjnych innowacyjnego systemu do pomiaru zanieczyszczenia światłem*

DOI: 10.15199/33.2026.05.03

**Abstract.** The subject of this article is to evaluate the repeatability and usability of a proprietary light pollution measurement system that enables both stationary measurements and those using unmanned aerial vehicles (UAVs). Results from the preliminary laboratory tests demonstrated correlation with reference measurements obtained from a certified commercial device. Additionally, dedicated software enables real-time analysis of results and the entire system is intuitive to use, even by unskilled users.

**Keywords:** drones; lighting infrastructure; light intensity measurement; light pollution.

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano ocenę powtarzalności i użyteczności autorskiego systemu do pomiaru zanieczyszczenia światłem, który umożliwia zarówno prowadzenie pomiarów stacjonarnych, jak również z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Wstępne wyniki badań laboratoryjnych wykazały korelację z referencyjnymi pomiarami, uzyskanymi z certyfikowanego miernika komercyjnego. Dodatkowo oprogramowanie umożliwia analizę wyników w czasie rzeczywistym, a cały układ jest intuicyjny do obsługi nawet przez niewykwalifikowanego użytkownika.

**Słowa kluczowe:** drony; infrastruktura oświetleniowa; pomiar natężenia oświetlenia; smog świetlny.

Contemporary development of construction and urban infrastructure brings significant environmental challenges, among which light pollution is becoming increasingly important. Rapid urbanization, the expansion of outdoor lighting, and the adoption of new lighting technologies affect not only residents' comfort but also ecosystems and the quality of the nighttime environment. Traditional measurement methods relying on ground-based stations and satellite observations have proven insufficient for accurately determining the spatial distribution of light pollution. Recent studies confirm that light pollution is a significant environmental and technological problem, as it affects both human health and the functioning of ecosystems, as well as the energy economy of cities. The literature contains findings from research on this phenomenon using unmanned aerial vehicles (UAVs). The approach to measurements using UAVs was presented in [1], and a description of the results of night sky photometry, using measurement devices mounted on UAVs, is presented in [2] and [3]. In both cases, the consistency of drone measurements with the results recorded by a ground-based SQM (*Sky Quality Meter*) was examined. In the first study, the analysis revealed significant temporal and spatial variability in urban light levels during the night; for example, sports fields lost over 97% of their brightness, while

Współczesny rozwój budownictwa i infrastruktury miejskiej niesie ze sobą istotne wyzwania środowiskowe, wśród których coraz większe znaczenie ma smog świetlny. Intensywna urbanizacja, rozbudowa oświetlenia zewnętrznego oraz stosowanie nowych technologii oświetlenia wpływają nie tylko na komfort mieszkańców, ale także na ekosystemy oraz jakość środowiska nocnego. Tradycyjne metody pomiarowe bazujące na stacjach naziemnych i obserwacjach satelitarnych okazują się niewystarczające do dokładnego określania przestrzennego rozkładu zanieczyszczenia światłem. Badania z ostatnich lat potwierdzają, że zanieczyszczenie światłem stanowi istotny problem środowiskowy i technologiczny, ponieważ wpływa zarówno na zdrowie człowieka i funkcjonowanie ekosystemów, jak i gospodarkę energetyczną miast. W literaturze można znaleźć wnioski z badań nad tym zjawiskiem z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Podejście do pomiarów z wykorzystaniem BSP zostało zaprezentowane w [1], a opis rezultatów fotometrii nocnego nieba, z zamontowanymi na BSP urządzeniami pomiarowymi, przedstawiono w [2] oraz [3]. W obu przypadkach badano zgodność pomiarów z drona z wynikami rejestrowanymi przez miernik naziemny SQM (*Sky Quality Meter*). W pierwszej z prac analiza wykazała dużą zmienność czasową i przestrzenną światła w mieście w ciągu nocy, np. boiska sportowe traciły ponad 97% jasności, a budynki administracyjne tylko 5% [2]. Autorzy wyka-

<sup>1)</sup> Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Wydział Mechatroniki

<sup>\*</sup>) Correspondence address: szczepanczyk.a@gmail.com

administrative buildings lost only 5% [2]. The authors demonstrated that UAVs can serve as an effective tool for studying the rhythm of nighttime activity in various areas.

Masetti et al. [3] present a study of the relationship between brightness indices calculated from nighttime RGB images and nighttime ground brightness (NGB). The results indicate correlations between SQM results and drone measurements. The authors demonstrated that combining these two methods can help identify light pollution “hotspots” in the city. A similar approach was used in the work by Bobkowska et al. [4]. The publication describes the design of the entire measurement platform (a drone equipped with a RAW camera and a light probe). The results show that with proper calibration of the measurement system, it is possible to create high-resolution maps of surface light intensity. The need to develop algorithms for autonomous measurement systems is discussed by Goodell et al. [5], who present findings from mapping sky brightness and light sources by integrating UAVs with cameras and photometric sensors. In turn, the work by Li et al. [6] discusses the problem of the influence of the recording camera’s tilt angle on light intensity estimation. An integrated approach to light pollution research using UAVs, algorithms, and satellite measurement data to create models of the spatial distribution of light emissions in urban areas was presented by Zhang et al. [7] and Gao et al. [8]. The analyses conducted revealed a strong correlation between UAV measurements and satellite observations. Furthermore, Gao et al. [8] demonstrate that the creation of three-dimensional models and the analysis of light emission anisotropy enable an understanding of the impact of building geometry on light propagation, thereby contributing to the optimization of urban lighting planning.

New techniques for analyzing measurements using algorithms that allow simple SQM instruments to be used as sky cloudiness detectors and indicators of particulate matter concentration—thereby extending their application to automated monitoring networks—have been developed by Cavazzani [9], as well as by Czyżewski [10] and Sun et al. [11]. The findings from the research presented in the works of Karpińska and Kunz [12, 13] and in the patent application [14] also represent a significant contribution to the development of system monitoring. The authors describe a successful transition from prototype measurement networks to integrated and fully functional light monitoring systems, based on real-time measurement and transmission of sensor data. A comprehensive study of the measurement method was conducted by Mander et al. [15] and Barentine [16]. Both papers provide a comprehensive overview of methods for assessing light pollution in terms of accuracy, spatial scale, and the purpose of the study (ecology, energy, or impact on human health). The authors point out that the standardization of measurement procedures and the calibration of sensors (especially widely available, inexpensive sensors) is a key prerequisite for obtaining comparable results. In light of this research, future work should focus on the development of integrated observation platforms (UAV–satellite–ground-based sensors), the automation of data analysis, and the modeling of

zali, że BSP mogą stanowić skuteczne narzędzie do badania rytmu aktywności nocnej w różnych obszarach.

Masetti i in. [3] przedstawia badania zależności między wskaźnikami jasności obliczonymi na podstawie nocnych zdjęć RGB a jasnością gruntu w nocy (*NGB-Night Ground Brightness*). Uzyskane rezultaty wskazują na korelacje pomiędzy wynikami z SQM a pomiarami z drona. Autorzy wykazali, że połączenie tych dwóch metod może pomóc w identyfikacji „hotspotów” zanieczyszczenia światłem w mieście. Podobne podejście zostało wykorzystane w pracy Bobkowska i in. [4]. Publikacja zawiera opis konstrukcji całej platformy pomiarowej (dron z zamontowaną kamerą RAW oraz sondą światła). Wyniki pokazują, że przy odpowiedniej kalibracji systemu pomiarowego możliwe jest stworzenie map natężenia światła powierzchniowego o dużej rozdzielczości. Konieczność opracowania algorytmów w przypadku autonomicznych systemów pomiarowych poruszają Goodell i in. [5], którzy przedstawiają wnioski z mapowania jasności nieba i źródeł światła, przez zintegrowanie BSP z kamerami i czujnikami fotometrycznymi. Z kolei w pracy Li i in. [6] omówiony został problem wpływu kąta nachylenia kamery rejestrującej na oszacowanie natężenia światła. Zintegrowane podejście do badań zanieczyszczenia światłem z wykorzystaniem BSP, algorytmów i danych z pomiarów satelitarnych do tworzenia modeli przestrzennego rozkładu emisji światła w obszarach miejskich przedstawili Zhang i in. [7] oraz Gao i in. [8]. Przeprowadzone analizy wykazały silną korelację pomiędzy pomiarami z BSP a obserwacjami z urządzeń satelitarnych. Ponadto Gao i in. [8] dowodzą, że tworzenie modeli trójwymiarowych oraz analiza anizotropii emisji światła umożliwia zrozumienie wpływu geometrii zabudowy na propagację światła, a tym samym wpływa na optymalizację planowania miejskiego oświetlenia.

Nowe techniki analizy pomiarów z wykorzystaniem algorytmów pozwalających na użycie prostych mierników SQM, jako detektorów zachmurzenia nieba i wskaźników koncentracji pyłów zawieszonych, rozszerzając ich zastosowanie do automatycznych sieci pomiarowych, opracował Cavazzani [9], a także Czyżewski [10] i Sun i in. [11]. Dużym wkładem w opracowanie monitoringu systemowego są również wnioski z badań zawarte w pracach Karpińskiej i Kunza [12, 13] oraz w zgłoszeniu patentowym [14]. Autorzy prezentują skuteczne przejście od prototypowych sieci pomiarowych do zintegrowanych i w pełni funkcjonalnych systemów monitoringu światła, na podstawie pomiaru i transmisji danych z czujników w czasie rzeczywistym. Pełnym opracowaniem metody pomiarowej zajęli się Mander i in. [15] oraz Barentine [16]. W obu pracach przedstawiono kompleksowy przegląd metod oceny zanieczyszczenia światłem pod kątem dokładności, skali przestrzennej i celu badania (ekologia, energetyka czy wpływ na zdrowie człowieka). Autorzy wskazują, że standaryzacja procedur pomiarowych i kalibracja sensorów (szczególnie ogólnodostępnych, niedrogich czujników) stanowi kluczowy warunek uzyskania porównywalnych wyników. W świetle tych badań dalsze prace powinny obejmować rozwój zintegrowanych platform obserwacyjnych (UAV – satelita – naziemne czujniki), automatyzację analizy danych oraz modelowanie wpływu światła na ekosystemy i zdrowie człowieka. Zastosowanie takich

light's impact on ecosystems and human health. The implementation of such solutions will improve the effectiveness of existing measurement strategies, leading to a better understanding of light pollution and its effective reduction in cities and protected areas. In response to this problem, a **mobile measurement system utilizing** an unmanned aerial vehicle (UAV) was developed to identify light pollution. This system integrates optical sensors, data processing and transmission modules, and features configurable software. This approach enables measurements and research to be conducted under various urban conditions and opens new perspectives for urban lighting planning, dark sky protection, and monitoring the impact of construction on the nocturnal environment. The incorporation of a mobile measurement system into engineering practice could become an important element of sustainable development in urbanized areas. This article presents the results of laboratory tests of the proposed measurement system.

### Design of a measurement system

The measurement system presented here is a proprietary solution, both in terms of hardware and software. Initial tests of the system were conducted under laboratory conditions, using a single active sensor. Ultimately, light pollution measurements will be taken at night, when light intensity should not exceed 100 lx. Since there are rest areas (MOPs) along highways and greenhouses that emit large amounts of light into the atmosphere, the measurement range was set at 2.5 klx. Offset coefficients were selected for this value and implemented into the firmware based on a curve (Figure 1) obtained from comparative measurements with a reference sensor. The procedure for determining the offset value was as follows: the measurement system (sensors) was placed in alignment with the reference sensor, and an adjustable light source was positioned 1 m away from them. For each of the eight different illuminance values, 10 measurements were taken. The average illuminance values and the differences between them were calculated.

The table of difference values was used to derive a function for calculating the correction factor of the measurement system. A second-degree polynomial was fitted (offset curve – Figure 1):  $y = E_p - E_x = 1,18 \cdot 10^{-4} \cdot E_p^2 + 0,061512 \cdot E_p + 1,383462$ , where  $E_p$  is the illuminance measured by the measurement system, and  $E_x$  is the illuminance measured by the reference sensor.

The modular design of the measurement system allows for great flexibility in adapting it to current measurement needs by adding or replacing selected measurement modules. Modules such as **PWR** (power supply module), **CPU** (processor),

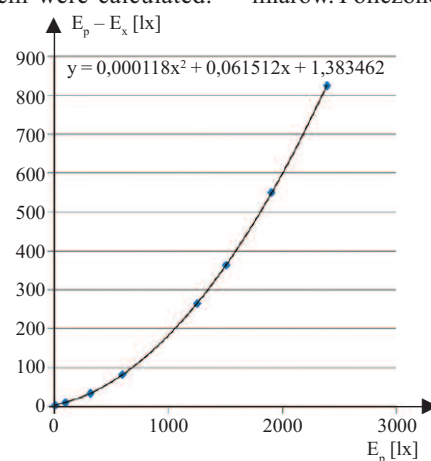
rozwiązań wpłynie na poprawę efektywności dotychczas opracowanych strategii pomiarowych, co pozwoli na lepsze zrozumienie zjawiska zanieczyszczenia światłem i skuteczne jego ograniczanie w miastach oraz na obszarach chronionych. W odpowiedzi na opisany problem **opracowano mobilny system pomiarowy** z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego, umożliwiający identyfikowanie smogu świetlnego. System ten integruje czujniki optyczne, moduły przetwarzania i transmisji danych, a także ma konfigurowalne oprogramowanie. Takie podejście umożliwia prowadzenie pomiarów i badań w różnych warunkach urbanistycznych i otwiera nowe perspektywy planowania oświetlenia miejskiego, ochrony ciemnego nieba oraz monitorowania wpływu budownictwa na środowisko nocne. Włączenie mobilnego systemu pomiarowego do praktyki inżynierskiej może stać się ważnym elementem zrównoważonego rozwoju przestrzeni zurbanizowanych. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych proponowanego systemu pomiarowego.

### Budowa systemu pomiarowego

Prezentowany system pomiarowy jest autorskim rozwiązaniem, zarówno od strony sprzętowej, jak i programowej. Pierwsze testy systemu zostały przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, z aktywnym pojedynczym sensorem. Do celowo pomiary smogu świetlnego wykonywane będą w nocy, gdy natężenie światła nie powinno przekraczać 100 lx. W związku z tym, że są miejsca typu MOP (Miejsca Obsługi Podróżnych) przy autostradach, czy szklarnie, które emitują dużą ilość światła do atmosfery, zakres pomiarowy został ustalony na 2,5 klx. Do takiej wartości dobrano współczynniki offsetu, zaimplementowane do firmware'u na podstawie krzywej (rysunek 1), uzyskanej w pomiarach porównawczych z czujnikiem referencyjnym. Procedura wyznaczenia wartości offsetu była następująca: system pomiarowy (czujniki) umieszczono w jednej osi z czujnikiem referencyjnym, a w odległości 1 m od nich ustawiono regulowane źródło światła. W przypadku ośmiu różnych wartości natężenia oświetlenia wykonano po 10 pomiarów. Policzone zostały wartości średnie natężenia oraz róż-

nice między nimi. Tabela wartości różnic posłużyła do znalezienia funkcji obliczającej współczynnik korekcyjny systemu pomiarowego. Dopasowany został wielomian drugiego stopnia (krzywa offsetu – rysunek 1):  $y = E_p - E_x = 1,18 \cdot 10^{-4} \cdot E_p^2 + 0,061512 \cdot E_p + 1,383462$ , gdzie  $E_p$  jest natężeniem oświetlenia zmierzonego przez system pomiarowy, a  $E_x$  natężeniem oświetlenia zmierzonego przez czujnik referencyjny.

Modułowa konstrukcja systemu pomiarowego pozwala na dużą elastyczność jego dostosowania do aktualnych potrzeb pomiarowych, przez dołożenie lub wyłączenie wybranych modułów pomiarowych. Moduły, takie jak **PWR** (moduł zasilający), **CPU** (procesor), **Light\_sens**



**Fig. 1. Offset curve taken into account during light intensity measurements**

Rys. 1. Krzywa offsetu uwzględniana przy pomiarach natężenia światła

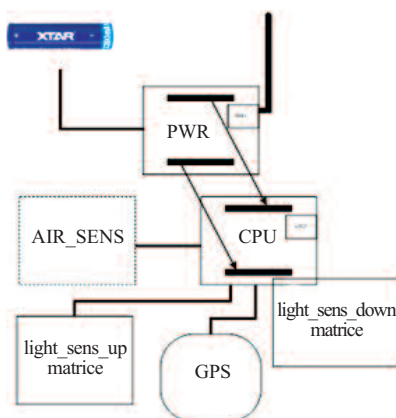
**Light\_sens** (light pollution measurement module), and **Gas\_sensor** (chimney exhaust pollution measurement module) form the basis of the system. The use of a ZIF ribbon connector enables the connection of extensions in the form of other PCBs, such as modules for gas measurement or extended light spectrum measurement. Figure 2 shows a block diagram of the measurement system.

The power supply module (**PWR**), shown in Photo 1, is an essential component of the measurement system architecture. Its function is to provide a stable and reliable multi-voltage power supply to all electronic subsystems on board the device – the processor, sensors, and other modules such as Wi-Fi, the  $\mu$ SD module, or GPS. It is completely separate from the unmanned aerial vehicle's (UAV) power supply and equipped with pin-type connectors, allowing it to be connected to the second CPU board – in a so-called “sandwich” configuration – without unnecessary cabling. The entire system is designed for two operating modes: **mobile** (powered by a single 18650 Li-Ion cell) and **stationary** (powered by a mains power supply). The power input is automatically detected and protected against reverse polarity.

Photo 2 shows the CPU module, which serves as the foundation for the measurement and data processing system in the designed measurement system. This module is built around a 32-bit microcontroller from the STM32 family, offering high performance with low power consumption – a critical factor in mobile applications such as measurements using UAV. It works in conjunction with a Wi-Fi transmitter (embedded on the PWR board), enabling real-time data transmission to a ground station, including to an application that monitors or records data in the field. The board features an integrated  $\mu$ SD card slot with an SPI interface, enabling local storage of measurement data in the form of structured files. Logging occurs synchronously with wireless transmission, which ensures the integrity of the data sequence – a critical factor in the context of mobile measurement missions.

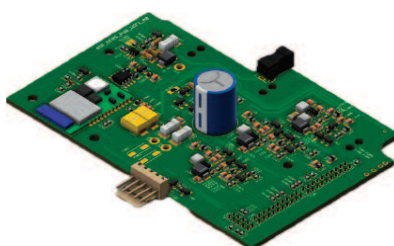
The processor is responsible for handling many system functions, including:

- data acquisition from sensors (optical, gas, and others);
- real-time data processing (e.g., filtering, aggregation, unit standardization),
- management of wireless data transmission,
- logging data to a local storage medium,

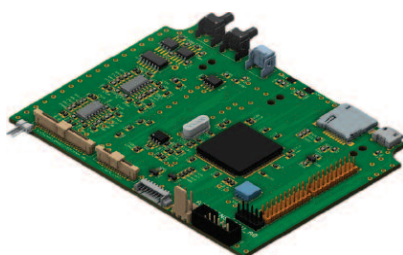


**Fig. 2. Block diagram of the measurement system – discription in the article**

*Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego – opis w artykule*



**Photo 1. PWR module**  
*Fot. 1. Modul PWR*



**Photo 2. CPU module**  
*Fot. 2. Modul CPU*

(moduł do pomiaru smogu świetlnego), czy **Gas\_sensor** (moduł pomiaru zanieczyszczeń spalin z kominów) stanowią bazę układu. Zastosowanie złącza taśmowego typu ZIF umożliwia podłączenie rozszerzeń w postaci innych płytek PCB, takich jak moduły do pomiaru gazów lub rozszerzonego spektrum świetlnego. Na rysunku 2 pokazano schemat blokowy systemu pomiarowego.

Moduł zasilania (**PWR**), przedstawiony na fotografii 1, stanowi niezbędny komponent architektury systemu pomiarowego. Jego zadaniem jest stabilne i niezawodne dostarczanie wielonapięciowego zasilania do wszystkich podsystemów elektronicznych, umieszczonych na pokładzie urządzenia, a więc procesora, sensorów oraz pozostałych modułów, jak Wi-Fi, moduł  $\mu$ SD lub GPS. Moduł PWR jest całkowicie odseparowany od zasilania bezzałogowca (**BSP**) i wyposażony w złącza typu szpilkowego, co pozwala bez zbędnego okablowania połączyć go z drugą płytką CPU na tzw. kanapkę. Całość zaprojektowano z myślą o dwóch trybach pracy: **mobilnym** (zasilanie z pojedynczego ogniwa Li-Ion 18650) oraz **stacjonarnym** (zasilanie z zasilacza sieciowego). Wejście zasilające podlega automatycznej detekcji i ochronie przed odwrotną polaryzacją.

Fotografia 2 przedstawia moduł CPU, stanowiący bazę systemu pomiarowego i przetwarzania danych w zaprojektowanym systemie pomiarowym. W konstrukcji tego modułu wykorzystano 32-bitowy mikrokontroler z rodziny STM32, zapewniający dużą wydajność przy małym zużyciu energii, co jest kluczowe w zastosowaniu mobilnym, takim jak pomiary z wykorzystaniem BSP. Współpracuje on z nadajnikiem Wi-Fi (osadzonym na płytce PWR), umożliwiając przesyłanie danych w czasie rzeczywistym do stacji naziemnej, w tym do aplikacji monitorującej lub rejestrującej dane w terenie. Na płytce zintegrowano slot kart  $\mu$ SD z interfejsem SPI, umożliwiającą lokalne przechowywanie danych pomiarowych w postaci plików strukturalnych. Logowanie odbywa się synchronicznie z transmisją bezprzewodową, co pozwala na zachowanie porządku zapisu – istotnego w kontekście mobilnych misji pomiarowych.

Procesor odpowiada za obsługę wielu funkcji systemowych, w tym:

- akwizycję danych z czujników (optycznych, gazowych i innych);
- przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym (np. filtracja, agregacja, standaryzacja jednostek);
- zarządzanie transmisją bezprzewodową danych;
- logowanie danych na nośniku lokalnym;

- control of peripheral devices (e.g., buttons, LED indicators, power supply system).

The *Light\_sens* tiles shown in the Photo 3 are two independent yet fully complementary optical modules designed to measure light intensity in different spatial directions. The first module is designed to measure artificial light emitted by urban infrastructure (street lighting, building facade lighting, advertisements, etc.), as well as natural light reflected from the ground (local light sources). The second board is a so-called expansion module, designed to measure the brightness of the night sky and light reflected from clouds (typically for measurements using UAVs). It enables the recording of light pollution levels resulting from the scattering of artificial light in the air, which serves as a direct measure of the degree of atmospheric light pollution.

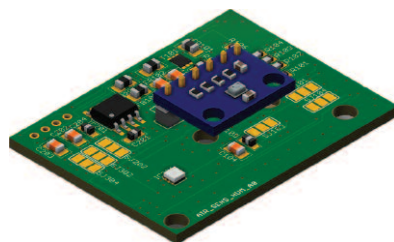
All PCBs are mounted on a frame that was 3D-printed and optimized for this project (Photo 4). In unmanned aerial vehicle applications, the weight of the system being carried is extremely important (the heavier it is, the shorter the flight time). 3D printing allows for optimization in terms of component layout – by reducing unnecessary mounting elements – and lowers the weight of the entire system to approximately 680 g. The ground station (operational application) is equipped with dedicated software featuring a user-friendly graphical interface that allows for the immediate visualization of incoming data in the form of time series graphs, elevation profiles, and the display of measurement locations on a map. The user can dynamically select, filter, and display only those parameters that are relevant at a given moment. In the current version of the system, the mobile unit communicates with the ground station via a Wi-Fi module. This type of communication is sufficient for laboratory testing. Under field operating conditions, a directional or sector antenna can be used to extend the range beyond one kilometer. The complete measurement system is shown in Figure 5.

The modular design of the measurement system allows its functionality to be expanded using optional PCB boards. The version shown here includes one such expansion – the *Gas\_sensor* – a module designed to measure anthropogenic gas and particulate pollutants (PM1, PM2.5, PM10), particularly emissions from chimneys and combustion sources.

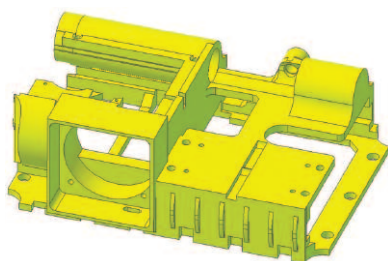
- sterowanie urządzeniami peryferyjnymi (np. przyciskami, wskaźnikami LED, układem zasilania).

Przedstawione na fotografii 3 płytki *Light\_sens*, to dwa niezależne, lecz w pełni komplementarne moduły optyczne, zaprojektowane do rejestracji natężenia światła w różnych kierunkach przestrzennych. Zadaniem pierwszej z nich jest rejestracja sztucznego światła emitowanego przez infrastrukturę miejską (oświetlenie uliczne, elewacyjne, reklamy itp.), a także światła naturalnego, odbitego od powierzchni ziemi (lokalne źródła emisji światła). Druga z płytek stanowi tzw. moduł rozszerzający, przeznaczony do pomiaru jasności nocnego nieba i światła odbitego od chmur (typowo do pomiarów z wykorzystaniem BSP). Umożliwia on rejestrację poziomu smogu świetlnego, pochodzącego z rozpraszania światła sztucznego w powietrzu, co stanowi bezpośrednią miarę stopnia zanieczyszczenia świetlnego atmosfery. Oba moduły *Light\_sens* komunikują się z procesorem STM32 na płycie CPU, który cyklicznie odczytuje dane z czujników, dokonuje ich wstępnego przetworzenia i loguje wyniki na karcie  $\mu$ SD w postaci uporządkowanych plików z metadanymi (czas, wysokość, ID czujnika). Dane z obu modułów są także transmitowane w czasie rzeczywistym do stacji naziemnej przez interfejs Wi-Fi.

Wszystkie płytki PCB zamontowane są na ramie przygotowanej jako wydruk 3D i zoptymalizowanej pod ten projekt (fotografia 4). Przy zastosowaniu do bezałogowych statków powietrznych niezwykle istotna jest masa transportowanego systemu (im większa, tym krótszy czas lotu). Druk 3D pozwala na optymalizację pod względem rozmieszczenia komponentów i redukując zbędne elementy montażowe, zmniejsza masę całego systemu do ok. 680 g. Stacja naziemna (aplikacja robocza) wyposażona jest w dedykowane oprogramowanie z intuicyjnym dla użytkownika interfejsem graficznym, umożliwiającym natychmiastową wizualizację napływających danych w postaci wykresów czasowych, profili wysokościowych oraz wizualizacji lokalizacji pomiaru na mapie. Użytkownik może dynamicznie wybierać, filtrować i prezentować tylko te parametry, które są istotne w danym momencie. W obecnej wersji systemu część mobilna komunikuje się ze stacją naziemną za pomocą modułu Wi-Fi. Do badań laboratoryjnych ten rodzaj komunikacji jest wystarczający. W warunkach operacyjnych w terenie można użyć anteny kierunkowej lub sektorowej, która pozwoli zwiększyć zasięg powyżej kilometra. Kompletny system pomiarowy przedstawiono na fotografii 5. Modułowość systemu pomiarowego umożliwia rozszerzenie jego funkcjonalności za pomocą opcjonalnych płytek PCB. Prezentowana wersja ma jedno z takich rozszerzeń – *Gas\_sensor* – moduł dedykowany do pomiaru zanieczyszczeń gazowych i pyłowych (PM1, PM2.5, PM10) pochodzenia antropogenicznego, przede wszystkim emisji z kominów i źródeł spalania.



**Photo 3. Light\_sens plate**  
*Fot. 3. Płytki Light\_sens*



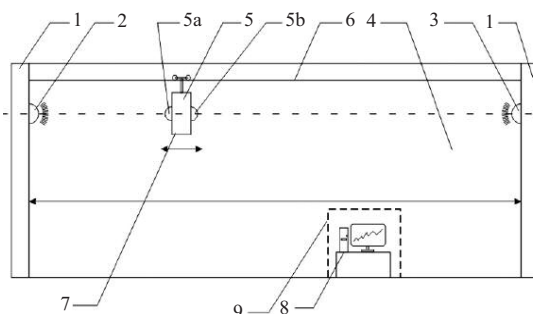
**Photo 4. Electronics mounting frame**  
*Fot. 4. Rama do montażu elektroniki*



**Photo 5. Complete measurement system**  
*Fot. 5. Kompletny system pomiarowy*

### Measurement methodology

A special laboratory was set up for the tests (Figure 3) – completely darkened, windowless, and free of any light sources other than the ones under test (4). Two light sources (2) and (3) were prepared for the test. These were 100 W, 9600 lm COB LEDs mounted on aluminum heat sinks attached to the walls (1) 10 m apart. A guide rail (6) was also placed between these walls, along which the measurement system (5) moved, equipped with sensors (5a) and (5b) that measured light from both sides. The first light source simulated light coming “from the ground,” and the second simulated light coming “from the sky”. The room also contained a ground station (8), located behind a shield (9) to avoid interfering with the system’s measurements. The measurement system and the ground station can operate on any (but the same) Wi-Fi network. Due to its innovative nature, the system in this form was granted a patent (PL444553A1).



**Fig. 3. Schematic representation of the arrangement of individual elements used in the study**

*Rys. 3. Schemat rozmieszczenia poszczególnych elementów użytych w badaniu*

### Metoda pomiarowa

Do testów przygotowano specjalne laboratorium (rysunek 3), całkowicie zaciemnione, pozbawione okien, z którego usunięto wszelkie źródła światła innego niż badane (4). Do badania przygotowano dwa źródła światła (2) i (3). Były to diody COB 100 W, 9600 lm, umieszczone na aluminiowych radiatorach przymocowanych do ścian (1) w odległości 10 m od siebie. Pomiedzy tymi ścianami umieszczona została także prowadnica (6), po której poruszał się system pomiarowy (5) z sensorami (5a) oraz (5b), mierzącymi światło zarówno z jednej, jak i z drugiej strony. Pierwsze źródło światła symulowało światło pochodzące „od ziemi”, a drugie symulowało światło pochodzące „od nieba”. W pomieszczeniu znajdowała się także stacja naziemna (8), usytuowana za osłoną (9), aby nie zakłócać pomiarów systemu. System pomiarowy oraz stacja naziemna mogą pracować w dowolnej (ale tej samej) sieci Wi-Fi. System w takiej postaci, ze względu na innowacyjność, objęto ochroną patentową (PL444553A1).

### Measurement results

Measurements were conducted for various light source supply voltages ranging from 25 to 31 V, for so-called “cold” sources. Due to the fact that only slight differences in illuminance (lx) were observed at the lowest voltage values, the results obtained for three selected voltage values – 28, 30, and 31 V – are analyzed below. At this stage, we also opted not to record data simultaneously from both sensors installed in the proprietary measurement system (hereinafter referred to as LIMS – *Light Intensity Measurement System*).

The primary objective of the study was to verify the functionality of the measurement system; therefore, a certified meter (EXTECH EA30) was also used in the measurements as a reference point for assessing the reliability of the results recorded by a single active sensor in the proprietary measurement system. The measurement range of the EXTECH EA30 meter is 400 klx. The absolute error in the meter’s documentation is specified as:

$$\pm (3\% \text{ RDG} + 0,5\% \text{ FS}) \quad (1)$$

where:

RDG – measured value;

FS – range value.

The measurement range for the LIMS system is 200 klx, while the relative error resulting from the calibration described in section 1 is 5%.

Figure 4 shows the relationship between changes in light intensity (lx) and changes in the distance from the light source (m) of the measuring device, for 28, 30, and 31 V, respectively. In each case, at distances greater than 8 m, an increase in intensity was observed resulting from the superposition of light beams with the opposite light source (during the measurement,

### Wyniki pomiarów

Pomiary przeprowadzono w przypadku różnych wartości zasilania źródła światła w zakresie 25 – 31 V, i tzw. źródeł zimnych. Ze względu na fakt, iż przy najmniejszych wartościach napięcia obserwowano niewielkie różnice wartości natężenia oświetlenia (lx), analizie poddano wyniki uzyskane w przypadku trzech wybranych wartości napięcia: 28; 30 i 31 V. Na tym etapie zrezygnowano również z równoległego zapisu danych z obu czujników, zamontowanych w autorskim systemie pomiarowym (zwanym dalej LIMS – *Light Intensity Measurement System*).

Nadrzędnym celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie funkcjonalności systemu pomiarowego, dlatego też w pomiarach wykorzystany został również certyfikowany miernik (EXTECH EA30), jako punkt odniesienia do oceny wiarygodności wyników odnotowywanych z pojedynczego czujnika aktywnego w autorskim systemie pomiarowym. Zakres pomiarowy miernika EXTECH EA30 to 400 klx. Błąd bezwzględny w dokumentacji miernika został określony jako:

$$\pm (3\% \text{ RDG} + 0,5\% \text{ FS}) \quad (1)$$

gdzie:

RDG – wartość odczytana;

FS – wartość zakresu.

Zakres pomiarowy systemu LIMS to 200 klx, natomiast błąd względny wynikający z kalibracji wynosi 5%.

Na rysunku 4 przedstawiono zależność zmiany natężenia światła (lx) od zmiany odległości od źródła światła (m) urządzenia pomiarowego, kolejno w przypadku 28, 30 i 31 V. W każdym z przypadków powyżej 8 m odległości zaobserwowano zwiększenie natężenia wynikające z nałożenia wiązek z naprzeciwległym źródłem światła (podczas pomiaru druga dioda była uruchomiona i zasilana tym samym napięciem, ale

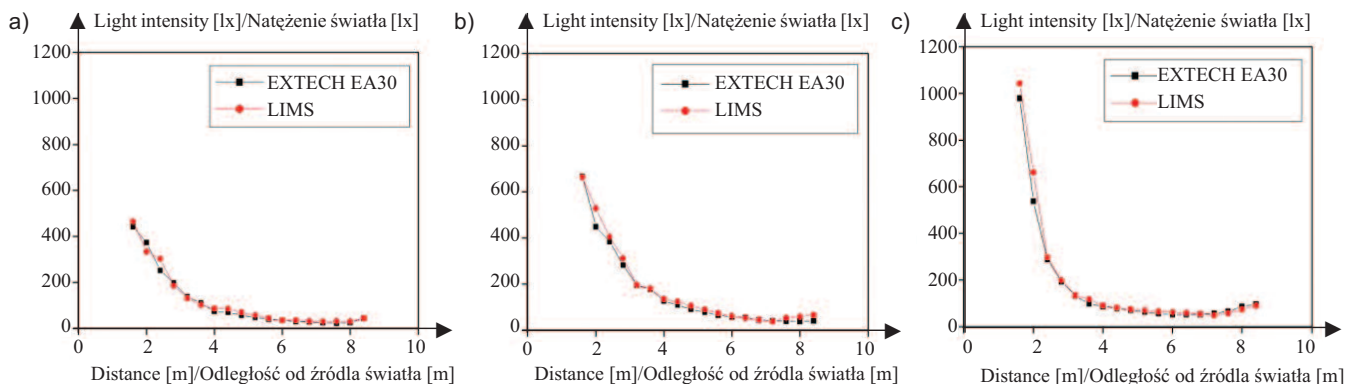


Fig. 4. Light intensity in the sky-earth diagram: a) 28 V; b) 30 V; c) 31 V  
 Rys. 4. Natężenie światła w schemacie „niebo-ziemia”: a) 28 V; b) 30 V; c) 31 V

the second LED was activated and powered by the same voltage, but no measurements were taken with the meters in this case. In Figure 4, the first point is marked at a distance of 1.6 m from the light source. This is because the closer the meter was to the light source, the greater the fluctuations in the measured intensity were observed. Due to the large discrepancies in readings in this range, the graphs show the results of measurements taken with the LIMS and the commercial meter over the 1.6 – 8.4 m section between the two light sources. The black squares in Figure 4 represent measurements taken with a commercial meter, while the red circles represent LIMS measurements.

**Results obtained during measurements on the section between diodes 3 and 2 (“sky”).** In each case, the curves obtained from measurements with both meters were found to be consistent. The maximum illuminance values in lx at a distance of 1.6 m from the source increase as the supply voltage increases. The exact values for both meters are shown in Table 1. In the case of 28 and 31 V, the values read from the LIMS are higher than those measured with a commercial meter; in contrast, at 30 V, the value read from the LIMS was not significantly lower (663 lx, and 667 lx from the EXTECH meter). In each case, a sharp drop in illuminance was observed in the immediate vicinity of the light source, followed by a gradual decrease in illuminance as the distance between the sensor and the source increased. A rapid decrease in the maximum value to approx. 100 lx occurs at a distance 3 – 4 m from the LED. Both devices exhibit a similar cross-curve, which in the 2 – 7 m range can be represented by the inverse square law of the distance from the light source [1, 10]:

$$E(r) \approx \frac{1}{r^2} \quad (2)$$

In point 2 of Figure 5, the curves of each of the following meters are compared: a commercial meter (EXTECH) and a proprietary measurement system (LIMS) for three voltage values.

In each series of measurements taken with both meters, a similar curve pattern is observed – the intensity decreases with distance from the source according to a law approximating  $1/r^2$  (a steep decline is observed up to about 3 – 4 m, followed by

nie przeprowadzono w jej przypadku pomiarów miernikami). Na rysunku 4 pierwszy punkt zaznaczono w odległości 1,6 m od źródła światła. Wynika to z faktu, że im bliżej źródła światła znajdował się miernik, tym większe obserwowano wahania wartości odczytywanego natężenia. Ze względu na duże rozbieżności odczytów w tym zakresie, zachowano wyniki pomiarów LIMS oraz miernikiem komercyjnym, na odcinku 1,6 – 8,4 m, pomiędzy obydwoma źródłami światła. Czarne kwadraty na rysunku 4 oznaczają pomiar miernikiem komercyjnym, a czerwone kółka – LIMS.

**Wyniki otrzymane podczas pomiarów na odcinku pomiędzy diodami 3-2 („niebo”).** Każdorazowo zaobserwowano zgodność krzywych z pomiarów obydwoma miernikami. Maksymalne wartości natężenia w lx w odległości 1,6 m od źródła zwiększają się wraz ze wzrostem wartości napięcia zasilania. Dokładne wartości w przypadku obu mierników przedstawiono w tabeli 1. W przypadku 28 i 31 V wartości natężenia odczytane z LIMS są większe od zmierzonych miernikiem komercyjnym, natomiast przy 30 V odnotowano wartość odczytaną z LIMS nieznacznie mniejszą (663 lx, a z miernika EXTECH 667). W każdym przypadku zaobserwowano stromy charakter krzywej w bliskiej odległości od źródła światła, a następnie stopniowe jej wypłaszczenie w miarę oddalania miernika od źródła. Szybkie zmniejszenie od wartości maksymalnej do ok. 100 lx następuje w odległości 3 – 4 m od diody LED. Oba urządzenia odwzorowują podobny przebieg krzywych, który na odcinku 2 – 7 m można zilustrować prawem odwrotności kwadratu odległości od źródła [1, 10]:

$$E(r) \approx \frac{1}{r^2} \quad (2)$$

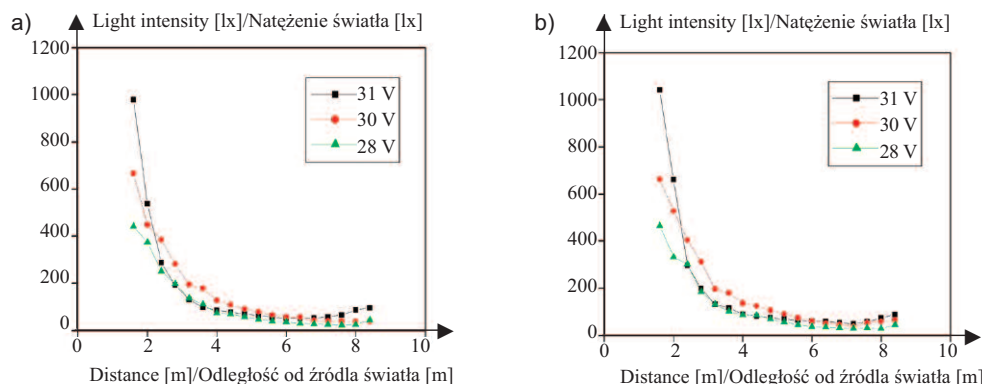
W punkcie nr 2 na rysunku 5 porównano krzywe każdego z mierników: komercyjnego (EXTECH) i autorskiego systemu pomiarowego (LIMS) w przypadku trzech wartości napięcia.

W każdej z serii pomiarowych wykonanych za pomocą obu mierników obserwowany jest podobny przebieg krzywych – natężenie maleje wraz z odległością od źródła zgodnie z prawem zbliżonym do  $1/r^2$  (do ok. 3 – 4 m obserwowany jest stromy spadek, a następnie stopniowe wypłaszczenie

Table 1. Maximum illuminance values for both devices

Tabela 1. Maksymalne wartości natężenia oświetlenia w przypadku obu mierników

Meter/Miernik	28 V	30 V	31 V
EXTECH (lx)	442	667	980
LIMS (lx)	465	663	1042



**Fig. 5. Comparison of curves from both devices: a) commercial meter; b) proprietary measurement system**  
*Rys. 5. Porównanie krzywych w przypadku obu mierników: a) komercyjnego; b) autorskiego systemu pomiarowego*

a gradual flattening of the curve). Discrepancies in readings between the meters range from 2 – 10% in the middle range (3 – 6 m), and above 7 – 8 m, a slight rise in the curves is noticeable. This is due to the reflection and scattering of light from the second LED as the distance decreases. The graphs show at what distance, depending on the supply voltage, the required illuminance level of 500 lx for computer workstations is achieved, in accordance with the PN-EN 12464-1 standard. This value is achieved for both meters at distances of 1.2 m at 28 V, 1.6 m at 30 V, and 2 m at 31 V, respectively.

Using a commercial meter as a reference, the error for the LIMS measurement system was estimated. Standard formulas for absolute and relative error were used in the calculations:

**a) absolute error**

$$\Delta E = |E_{\text{EXTECH}} - E_{\text{LIMS}}| \quad (3)$$

**b) relative error**

$$\delta = \frac{\Delta E}{E_{\text{EXTECH}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

The points selected for the calculations are the maximum values recorded at a distance of 1.6 m from the light source (Table 1) and two additional points from the area where the curve was observed to stabilize in each case: 3.2 m and 6.8 m. The results are presented for each of the three values of the supply voltage (Tables 2, 3, 4).

**Conclusions**

Calculations of the relative error, assuming that the readings from the commercial meter would be used as a reference, showed that for each of the three voltage levels, the error was at most 13.8%. The calibration was performed under

krzywej). Rozbieżności w odczytach pomiędzy miernikami, wynoszą 2 – 10% w środkowym zakresie (3 – 6 m), a powyżej 7 – 8 m zauważalne jest lekkie podniesienie krzywych. Wynika to z odbicia i rozpraszania światła pochodzącego od drugiej diody, wskutek zmniejszania dystansu. Z wykresów można odczytać, w przypadku jakiej odległości, w zależności od napięcia zasilania, osiągany jest wymagany poziom oświetlenia 500 lx dotyczący stanowisk komputerowych zgodnie z normą PN-EN 12464-1. Wartość ta osiągana jest w przypadku obu mierników w odległości odpowiednio: 1,2 m przy 28 V, 1,6 m przy 30 V oraz 2 m przy 31 V.

Traktując miernik komercyjny jako referencyjny, oszacowano błąd systemu pomiarowego LIMS. Do obliczeń przyjęto standardowe wzory na błąd bezwzględny i względny:

**a) błąd bezwzględny**

$$\Delta E = |E_{\text{EXTECH}} - E_{\text{LIMS}}| \quad (3)$$

**b) błąd względny**

$$\delta = \frac{\Delta E}{E_{\text{EXTECH}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Punkty wybrane do obliczeń to wartości maksymalne odczytane w odległości 1,6 m od źródła światła (tabela 1) oraz dwa dodatkowe punkty z obszaru, gdzie w każdym przypadku obserwowane było stabilizowanie się krzywej: 3,2 m oraz 6,8 m. Wyniki przedstawiono w przypadku każdej z trzech wartości napięcia zasilania (tabela 2, 3, 4).

**Wnioski**

Obliczenia błędu względnego, przy założeniu, że wskazania miernika komercyjnego będą traktowane jako referencyjne, wykazały, że przy każdym z trzech poziomów napięcia błąd wynosił maksymalnie 13,8%. Kalibracja została przeprowadzo-

**Table 2. Calculations for 28 V**  
*Tabela 2. Obliczenia w przypadku 28 V*

28 V	LIMS	EXTECH	ΔE	δ [%]
1,6 m	465	442	23	5,2
3,2 m	132	137	5	3,6
6,8 m	33	29	4	13,8

**Table 3. Calculations for 30 V**  
*Tabela 3. Obliczenia w przypadku 30 V*

30 V	LIMS	EXTECH	ΔE	δ [%]
1,6 m	663	667	4	0,6
3,2 m	197	195	2	1,0
6,8 m	46	45	1	2,2

**Table 4. Calculations for 31 V**  
*Tabela 4. Obliczenia w przypadku 31 V*

31 V	LIMS	EXTECH	ΔE	δ [%]
1,6 m	1042	980	62	6,3
3,2 m	133	133	0	0,0
6,8 m	55	54	1	1,9

fixed geometry conditions, whereas during the measurements the angle was not strictly controlled, which introduced an additional error. In the 1.6–3.2 m range, the discrepancies were less than 5%. This indicates that **the proprietary measurement system (LIMS) was well calibrated and allows for the recording of reliable results**. The qualitative agreement between the readings of both meters is high. Quantitatively, these differences will be greater at some points, which may be due to changes in angle. All recorded curves show a trend consistent with the rule: light intensity is inversely proportional to the square of the distance from the source (the farther from the source, the lower the intensity). There is also a clear dependence on voltage – the higher the voltage, the higher the light intensity value expressed in lux.

Knowing that the LIMS is calibrated to a commercial meter, one can consider the practical application of the measured data. By knowing the illuminance values in lux for a given distance, one can determine whether a given room is illuminated in accordance with applicable standards. Furthermore, knowing the illuminance value and the distance from the light source, it is possible to determine a practical indicator known as “luminance”. This value should remain approximately constant for a given voltage and be independent of distance and the meter used. This serves as confirmation of the effectiveness of the proposed measuring device. For both meters, calculations were performed for 500 lx, the illuminance required for computer workstations (Table 5). The obtained constant allows for the so-called standardization of the measurement setup, according to the formula:

$$I[\text{lm}] = E[\text{lx}] \cdot r^2[\text{m}^2] \quad (5)$$

where:

I – the desired illuminance level to be achieved in a given room

For example, in living spaces such as living rooms or kitchens, 300 lx must be provided in accordance with the ISO standard. Using Equation (5), the distance can therefore be determined for selected supply voltage values (Table 6).

The designed measurement system, particularly when combined with an unmanned aerial vehicle (UAV), enables the documentation of excessive nighttime lighting in residential areas, which serves as the basis for optimizing lighting infrastructure solutions. In light pollution measurements, diffuse light dominates, so a wide-angle sensor naturally averages the signal from multiple directions, which limits the impact of minor UAV vibrations on the result. Nevertheless, platform vibrations can introduce additional noise and slight fluctuations in intensity by changing the sensor’s orientation relative to the non-uniform light field. The proposed solution can also be used to analyze the impact of newly constructed

na w przypadku ustalonej geometrii, natomiast podczas pomiarów kąt nie był ściśle kontrolowany, co wprowadziło dodatkowy błąd. W obszarze 1,6 – 3,2 m rozbieżności były mniejsze niż 5%. Oznacza to, iż **autorski system pomiarowy (LIMS) został dobrze skalibrowany i pozwala na rejestrowanie rzetelnych wyników**. Jakościowa zgodność pomiędzy wskazaniami obu mierników jest duża. Pod względem ilościowym różnice te w niektórych punktach będą większe, co może być spowodowane zmianą kąta. Wszystkie zarejestrowane krzywe wykazują tendencję zgodną z regułą: natężenie światła odpowiada odwrotnej proporcjonalności do kwadratu odległości od źródła (im dalej od źródła, tym mniejsze natężenie). Wyrażona jest także zależność od wartości napięcia – im wyższe, tym większa wartość natężenia światła wyrażona w luksach.

Wiedząc, że LIMS wykazuje zgodność z miernikiem komercyjnym, można zastanowić się nad praktycznym zastosowaniem odczytanych danych pomiarowych. Znając wartości natężenia w luksach przy danej odległości, można stwierdzić, czy dane pomieszczenie zostało oświetlone zgodnie z obowiązującymi normami. Ponadto, znając wartość natężenia światła oraz odległość od źródła, możliwe jest wyznaczenie praktycznego wskaźnika tzw. światłości. Wielkość ta powinna być w przybliżeniu stała przy danej wartości napięcia i niezależna od odległości oraz użytego miernika. Dzięki temu może stanowić potwierdzenie skuteczności proponowanego urządzenia pomiarowego. W przypadku obu mierników obliczenia wykonano przy 500 lx, wymaganych do oświetlenia stanowisk komputerowych (tabela 5). Uzyskana stała pozwala na tzw. standaryzację stanowiska pomiarowego, zgodnie z wzorem:

$$I[\text{lm}] = E[\text{lx}] \cdot r^2[\text{m}^2] \quad (5)$$

gdzie:

I – żądana wartość natężenia oświetlenia do uzyskania w danym pomieszczeniu.

W przypadku np. pomieszczeń mieszkalnych typu salon lub kuchnia, zgodnie z normą ISO należy zapewnić 300 lx. Zgodnie z wzorem (5) można zatem wyznaczyć odległość w przypadku wybranych wartości napięcia zasilania (tabela 6).

Zaprojektowany system pomiarowy, szczególnie w połączeniu z bezałogowym statkiem powietrznym (BSP), umożliwi dokumentowanie zjawiska nadmiernego oświetlenia nocą na osiedlach mieszkaniowych, co stanowi podstawę do optymalizacji rozwiązań infrastruktury oświetleniowej. W pomiarach smogu świetlnego dominujące jest światło rozproszone, a więc szerokokątny czujnik w naturalny sposób uśrednia sygnał z wielu kierunków, co ogranicza wpływ drobnych wibracji BSP na wynik. Mimo to drgania platformy mogą wprowadzać dodatkowy szum i niewielkie fluktuacje natężenia, przez zmianę orientacji sensora względem niejednorodnego pola światła. Proponowane

**Table 5. The value of “luminous intensity” I [lm], allowing for the validation of the LIMS measurement system**

Tabela 5. Wartość „światłości” I [lm], pozwalającej na validację systemu pomiarowego LIMS

Value I [lm] for the supply voltage/Wartość I [lm] w przypadku napięcia zasilania		
28 V	30 V	31 V
0,72	1,3	2

**Table 6. Values of optimal distances r [m]**

Tabela 6. Wartości optymalnych odległości r [m]

The value of r [m] for the supply voltage/ Wartość r [m] w przypadku napięcia zasilania		
28 V	30 V	31 V
1,5	2,1	2,6

buildings and architectural elements on the amount of daylight reaching existing structures, thereby supporting the design process, including the selection of light-reflecting or light-transmitting materials. The conducted research confirmed the high effectiveness and reliability of the proprietary light measurement system.

The results obtained represent an important step toward developing methods for diagnosing and mitigating the negative impact of artificial lighting on the natural environment. The research team is currently conducting further development work, preparing expanded analyses and new experimental materials that will serve as the basis for developing LIMS, expanding the scope of measurement methodology, and producing further scientific publications on this topic.

*Received: 20.01.2026  
Revised: 02.03.2026  
Published: 21.05.2026*

rozwiązanie może również zostać wykorzystane do analizy wpływu nowo powstających budynków oraz elementów architektury na ilość światła dziennego docierającego do istniejących obiektów, wspomagając tym samym proces projektowania, w tym dobór materiałów odbijających lub przepuszczających światło. Przeprowadzone badania potwierdziły dużą skuteczność i niezawodność autorskiego systemu pomiarowego światła.

Uzyskane wyniki stanowią ważny krok w kierunku opracowania metod diagnostyki i ograniczania negatywnego wpływu sztucznego oświetlenia na środowisko naturalne. Zespół badawczy prowadzi obecnie dalsze prace rozwojowe, przygotowując rozszerzone analizy oraz nowe materiały eksperymentalne, które posłużą jako podstawa do rozwijania LIMS, zakresu metodologii pomiarowej oraz kolejnych publikacji naukowych w tej tematyce.

*Artykuł wpłynął do redakcji: 20.01.2026 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.03.2026 r.  
Opublikowano: 21.05.2026 r.*

## Literature

- [1] Pietroń K, Kacprzak Ł. Inwentaryzacja hałd materiałów sypkich metodą UAV oraz naziemnego skaningu laserowego. *Materiały Budowlane*. 2021; 4 (584): 82 ÷ 83.
- [2] Li D, Wu J, Zhou L, Zhang D, Jiang T, Zong C. Assessing Nighttime Artificial Light Pollution from the Perspective of an Unmanned Aerial Vehicle Tilt. *Geocarto International*. 2025; <https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2453631>.
- [3] Massetti L, Paterni M, Merlino S. Monitoring Light Pollution with an Unmanned Aerial Vehicle: A Case Study Comparing RGB Images and Night Ground Brightness. *Remote Sensing*. 2025; <https://doi.org/10.3390/rs14092052>.
- [4] Bobkowska K, Burdziakowski P, Tysiac P, Pulas M. (–). An Innovative New Approach to Light Pollution Measurement by Drone. *Drones*. 2024, 8 (9), 504.
- [5] Goodell MN, Truong TE, Marston SR, Smiley BJ, Befus ER, Bingham A, Allen K, Bourne JR, Wei Y, Magargal KE, Ganesan V, Mendoza DL, Seth AC, Harwood SA, Bodson M, Hermans T, Leang KK. Autonomous Light Assessment Drone for Dark Skies Studies. 2020.
- [6] Li X, Zhang Q, Zhou Y. Monitoring hourly night-time light by an unmanned aerial vehicle and its implications to satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 2020; 247, 111931.
- [7] Zhang B, Liu M, Li R, Liu J, Feng, L, Zhang H, Jiao W, Lang L. Evaluation of Urban Microscopic Nighttime Light Environment Based on the Coupling Observation of Remote Sensing and UAV Observation. *Remote Sensing*. 2024; <https://doi.org/10.3390/rs16173288>.
- [8] Gao X, Wang Y, Yang F, Cui X, Zhao X, Chao M, Wei X, Liu J, Shi G, Yao H. Virtual 3D Multi-Angle Modeling and Analysis of Nighttime Lighting in Complex Urban Scenes. *Remote Sensing*. 2025; <https://doi.org/10.3390/rs17061088>.
- [9] Cavazzani S. Novel algorithm for using the Sky Quality Meter as a night cloud detector and aerosol concentration meter. *Atmospheric Pollution Research*. 2025; 16.
- [10] Czyżewski D, Fryc I. The influence of luminaire photometric intensity curve measurements quality on road lighting design parameters. *Energies*. 2020; <https://doi.org/10.3390/en13133301>.
- [11] Sun C.-C., et al. Illuminance and Starting Distance of the Far Field of LED-Array Luminaire Operated at Short Working Distance. *Crystals*. 2020; <https://doi.org/10.3390/cryst10050360>.
- [12] Karpińska D, Kunz M. Measuring Light Pollution in the Night Sky – From Technology Demonstrator to Monitoring System. 2023.
- [13] Karpińska D, Kunz M. Device for automatic measurement of light pollution of the night sky. *Scientific Reports* 12 (1): 16486. 2022.
- [14] Karpińska D, Kunz M, Paprocki, M, Erwiński K, Czoków JM. Urządzenie do pomiaru smogu świetlnego (Patent polski Pat. 246288). *Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej*. 2023.
- [15] Mander S., et al. How to measure light pollution – A systematic review of methods and applications. *Sustainable Cities and Society*. 2023; 92, 104466.
- [16] Barentine J. C. (–). Methods for Assessment and Monitoring of Light Pollution around Ecologically Sensitive Sites. *J. Imaging*. 2019; 5 (5), 54.