

**Jan M. KRAWCZYK**

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

**Anna M. MAZUR**

Centrum Technologii Kosmicznych, Instytut Lotnictwa, Warszawa

## **WPROWADZENIE DO WYKORZYSTANIA TECHNOLOGII LOTNICZYCH W BADANIACH TERMOWIZYJNYCH BUDYNKÓW**

Artykuł omawia tematykę efektywności energetycznej w budownictwie oraz wykorzystanie bezzałogowych systemów latających do badania energochłonności budynków. Przedstawiono pojęcie efektywności energetycznej w budynkach, jej znaczenie oraz wpływ na środowisko. Przybliżono zagadnienia wpływu budynków na środowisko w szczególności poprzez straty ciepła. Omówiono również sposoby oraz znaczenie badań termowizyjnych. Zaprezentowano klasyfikację samolotów bezzałogowych przystosowanych do wykorzystania w badaniach termowizyjnych. Temat został omówiony zarówno pod kątem charakterystyki energetycznej, konstrukcji, jak i wad oraz zalet stosowania takich rozwiązań. Dokonano również analizy obecnych ścieżek rozwoju w tej dziedzinie, wskazano także pewne problemy i wątpliwości.

**Słowa kluczowe:** efektywność energetyczna, bezzałogowe systemy latające (BSL), modelowanie w energetyce, straty ciepła, badania termowizyjne

### **1. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA**

#### **1.1. Znaczenie zmniejszenia zużycia energii**

Eksperti zwracają uwagę na rosnące znaczenie zmniejszenia zużycia energii w systemach energetycznych. Obecnie największe zużycie energii można zaobserwować w budownictwie, transporcie i przemyśle. Największy potencjał redukcji zużycia energii jest właśnie w tych sektorach. W okresie od 1990 do 2008 roku całkowity produkt krajowy brutto w UE-27 wzrósł średnio o 2,1% rocznie, ale końcowe zużycie energii tylko 0,5%. W ciągu ostatnich 20 lat efektywność energetyczna w UE-27 wzrosła o 19% przy średniej rocznej wartości 1,1%. Zużycie energii w budownictwie wzrosło o około 13% przy średniej rocznej 0,7%. W sektorze przemysłowym zużycie energii w UE-27 zmniejszyło się o 30% w ciągu ostatnich dwóch dekad ze średnią roczną na poziomie 1,9%. Sektor transportu poprawił efektywność energetyczną o 15% w ciągu ostatnich 20 lat, średnio 0,9% rocznie [1].

Cena dwutlenku węgla wzrosła od początku roku 2013 o 40% do około 6,9 euro za tonę, a od kwietnia 2012 roku koszt jego zakupu wzrósł aż o 140%. Warto zwrócić też uwagę na rosnący problem zmniejszenia bezpłatnej emisji, który w ciągu kilku lat zmusi producentów energii do drastycznego podniesienia cen. Z ciągłym wzrostem cen emisji w ciągu kilku lat ceny energii mogą wynosić do 50% więcej niż obecnie. Opcji redukcji jest mało. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii i efektywność energetyczna są uważane za podstawę dla zrównoważonego rozwoju energetycznego, ale ostatnio coraz częściej eksperci zwracają uwagę na rosnące znaczenie zmniejszenia zużycia energii w systemach energetycznych. Podczas gdy odnawialne źródła energii, takie jak biomasa, wiatr lub elektrownie wodne, zaczynają budzić coraz więcej kontrowersji i wątpliwości o absolutnie pozytywny wpływ na środowisko, oszczędność energii jest najczystszy sposobem redukcji emisji gazów. Jej potencjał jest ogromny i znacznie większy niż możliwości alternatywnych źródeł energii, w tym odnawialnych źródeł energii i technologii istniejących elektrowni jądrowych [2].

Inwestycje w efektywność energetyczną poprawiają wizerunek kraju i powodują wzrost konkurencyjności gospodarki w świecie. Jednocześnie, tego typu inicjatywy stymulują rozwój wewnętrzny i promują rozwój technologiczny, zapewniając nowe miejsca pracy, i zwiększają wartości sektora. Bardzo ważny, jeśli nie najważniejszy dla krajów na etapie doganiania najbardziej rozwiniętych gospodarek, jest fakt, że poprawa efektywności energetycznej jest najtańszym i najbardziej opłacalnym sposobem osiągnięcia zrównoważonego rozwoju energetycznego [3].

## **1.2. Obecna sytuacja i potencjał redukcji w sektorze budowlanym i budynków**

W ciągu ostatnich dwóch dekad zużycie energii w UE spadło o około 1,6%. Poziomy są bardzo różne w poszczególnych krajach. W Estonii zużycie energii spadło o 8%, na Słowacji i na Litwie o 5%, podczas gdy w Portugalii i Hiszpanii konsumpcja w ciągu ostatnich 20 lat wzrosła [4]. Wpływają na to zarówno zmiany w strukturze gospodarki, takie jak rozwój sektora usług w odniesieniu do przemysłu, a także działania na rzecz poprawy efektywności energetycznej. Warto wspomnieć w tym miejscu, że rozwój technologiczny danego kraju jest skorelowany z rozwojem infrastruktury bardzo energochłonnej, takiej jak drogi, sieci itp. Zużycie energii w sektorze budowlanym uwzględnia wiele czynników przeciwnych. Z jednej strony poprawia się jakość użytych materiałów, oszczędność energii i wydajność energetyczna urządzeń gospodarstwa domowego oraz oświetlenia, z drugiej strony zwiększa się powierzchnia i liczba jednostek budowanych, a także ilość wykorzystywanych w nich sprzętów. W ciągu ostatnich 20 lat efektywność energetyczna w UE-27 wzrosła o 19% przy średniej rocznej wartości 1,1%. W tym samym okresie zużycie energii w budownictwie wzrosło o około 13% przy średniej rocznej 0,7% (ok. 0,4% na osobę). W 2006 roku emisje sektora mieszkaniowego stanowiły 10% całkowitej emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej [5].

W sektorze przemysłowym w ciągu ostatnich dwóch dekad zużycie energii zostało zmniejszone o 30% przy średniej rocznej 1,9%. Zróżnicowanie między krajami jest dość duże. Zaobserwowano zmniejszenie zużycia prawie we wszystkich gałęziach przemysłu. Trzy z najbardziej energochłonnych gałęzi przemysłu, odpowiedzialne za 50% całkowitego zużycia, to przemysł stalowy, papierniczy i chemiczny.

Przez lata w branży budowlanej można było zaobserwować znaczną poprawę w zakresie zużycia energii. Wynika to zarówno z rozwoju technologii budowlanych, jak i podniesienia standardów ogrzewania. Obserwując te dane, można oszacować potencjał poprawy efektywności energetycznej związany z modernizacją budynku z danego okresu budowy.

## 2. TECHNOLOGIE TERMOWIZYJNE

### 2.1. Kamery termowizyjne

Istnieje wiele technik do badania sprawności energetycznej budynku, które nie ingerują w jej strukturę. Są to proste techniki, takie jak np. urządzenia pomiarowe do badania wilgoci. Jednak, występują również bardziej skomplikowane i kosztowne, na przykład termografia. W każdym przypadku ważne jest, aby wybrać odpowiednie metody pomiaru i interpretacji wyników.

Światło podczerwone jest emitowane przez każdy obiekt o temperaturze powyżej zera bezwzględnego. Wykonywanie pomiarów w podczerwieni może być wykorzystywane w różnych sytuacjach, a mianowicie do: oceny strat ciepła w systemach izolowanych, obserwacji zmian przepływów w rurociągach lub wykrywania przegrzewania urządzeń elektrycznych. Termowizja może być z powodzeniem wykorzystana w sektorze budowlanym, głównie do wykrywania wad warstw izolacji, mostków termicznych i wad sieci ciepłowniczej.

Termografia lub fotografia termiczna to fotografia przy użyciu aparatu, który przechwytuje widmo podczerwieni. Promieniowanie podczerwone znajduje się poza zakresem widma widzialnego i jest niewidoczne gołym okiem. Wszystkie obiekty, które są cieplejsze od zera bezwzględnego ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), emitują światło podczerwone. Im cieplejszy obiekt, tym więcej promieniowania podczerwonego emituje. Kamery rejestrują ilość światła podczerwonego i przekładają to na temperaturę.

Ponieważ budynki to zazwyczaj duże konstrukcje, wygodnie jest przeprowadzić inspekcje termowizyjne z zachowaniem odpowiedniej odległości od obiektu. Doskonałym rozwiązaniem jest wykorzystanie zdalnie sterowanych bezzałogowych statków powietrznych (UAV), wyposażonych w kamery na podczerwień. Zaletą tego rozwiązania jest również możliwość inspekcji dachu lub innych wysokich konstrukcji, których nie można łatwo objąć z ziemi.

Kamery termowizyjne są w stanie uchwycić nawet bardzo małe różnice temperatury na poziomie  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Obraz przedstawiony za pomocą kamery termowizyjnej

jest wielokolorowy, gdzie każdy kolor przedstawia inną temperaturę. Skale temperaturowe mogą być stosowane w zależności od przedstawionych przedmiotów. Badania termowizyjne znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach, a tym samym mogą być użytecznym narzędziem diagnostycznym w analizie stanu budynku. Szczególnie kwestia nieinwazyjności badań jest bardzo ważna, np. w zabytkowych budynkach.

Obecne rozwiązania obejmują połączenie różnego rodzaju systemów i sprzętu (aparatury, obiektów, czujników itp.) oraz oprogramowania. Za pomocą zaawansowanego oprogramowania można uzyskać informacje o ilości strat energii, ryzyku pojawienia się punktu rosy i innych cennych danych.

Badania termowizyjne mogą zidentyfikować problemy struktury budynku. Obrazowanie termiczne może być wykorzystywane do identyfikacji i lokalizacji obszarów wilgoci, cieńszych elementów ściennych, pęknięć i zagłębień. Wymagana jest jednak specjalizacja nie tylko w podejmowaniu decyzji o tym, jak robić zdjęcia, ale także ważna jest przy tym umiejętność ich interpretacji. Niestety, przedmioty, które mają wysoką lub niską emisyjność, takie jak na przykład metal, nie zapewniają dokładnych pomiarów temperatury. Ponadto, elementy, takie jak warunki pogodowe, orientacja i pory dnia, wpływają na wyniki. Informacje zebrane z obrazów termicznych mogą być właściwie ocenione tylko w połączeniu z danymi zebranymi w ramach kompleksowego badania stanu.

## 2.2. Klasyfikacja bezzałogowych statków powietrznych

Bezzałogowe statki powietrzne (ang. Unmanned Aerial Vehicle - UAV) lub drony to takie samoloty, które mogą latać bez ludzkiego operatora na pokładzie [6]. Na bezzałogowy system latający (BSL) składają się takie elementy, jak: bezzałogowy statek powietrzny (UAV), łącząca transmisja danych, stacja kontroli naziemnej (GCS) i operator. UAV może być zdalnie sterowany, częściowo lub w pełni autonomicznie [4].

Szeroka gama UAV może być klasyfikowana zgodnie z ich operacyjnym zasięgiem, wagą, rodzajem misji, wydajnością, konfiguracją, złożonością lub wysokością lotów. Niestety, obecnie nie ma powszechnie stosowanych uniwersalnych i powszechnych klasyfikacji UAV. Klasyfikacji UAV można dokonać, uwzględniając takie kryteria, jak: zasięg - długi, krótki i bliski; wysokość - wysoka, średnia, niska i bardzo niska, a pod kątem misji - rozpoznawanie, walka, badania i rozwój, cywilne oraz handlowe [7-9].

Według [9], UAV można sklasyfikować również w zależności od zastosowania. Główne zastosowanie cywilne to: badanie bezpieczeństwa granic, monitoring środowiska i rolnictwa, teledetekcja, mapowanie terenu i meteorologia.

Wiele prac badawczych z dziedziny technologii UAV zostało przeprowadzonych w celu zwiększenia długości lotu i możliwości zwiększenia ładunku. Według [7], UAV o różnych konfiguracjach i rozmiarach, z różnymi możliwościami oraz poziomem i długością lotu powinny być klasyfikowane w następujący sposób:

- Fixed-wing UAV - samoloty wymagające klasycznej drogi startowej lub systemu wystrzeliwania za pomocą katapulty. Zamontowane na stałe skrzydła UAV mogą zapewnić długi lot i wysoką prędkość przelotową.
- Rotary-wing UAV (wiroplaty, pionowego startu i lądowania VTOL) - występują w różnych konfiguracjach, np.: helikoptery, koncentryczne, tandem i multiwirnikowce. Ich główne zalety to wysoka zwrotność i zdolność unoszenia, umożliwiające pracę w zamkniętych pomieszczeniach [10].
- Sterowce - zwykle balony i sterowce. Są lżejsze od powietrza, ale jednocześnie mają duże rozmiary. Zapewniają długie loty, ale przy niskich prędkościach [7].
- Flapping Wings UAV - mają elastyczne małe skrzydła, inspirowane budową ptaków i owadów latających [7].
- Istnieją również inne konfiguracje hybrydowe lub odkryte [7], takie jak: cabrio rotor, tilt-wing, samolot odrzutowy itp. [11].

### 2.3. Zalety bezzałogowych statków powietrznych dla pomiarów termowizyjnych

Bezzałogowe statki powietrzne wyposażone w urządzenia termowizyjne mogą być wykorzystane w wielu dziedzinach, jak np. diagnostyka budynków, kontrola obiektów przemysłowych, takich jak kominy, wieże chłodnicze, wieże wodne, zbiorniki i rurociągi, wykrywanie deficytu wody w rolnictwie, pomiary temperatury dla linii produkcyjnych, monitoring obiektów przemysłowych, lokalizacja osób w czasie misji poszukiwawczo-ratowniczych, monitorowanie obszarów po pożarach lub innych katastrofach naturalnych bądź przemysłowych i wielu innych.

W zależności od parametrów danego UAV można go używać do wykonywania różnego rodzaju zadań, które wymagają specjalnych czujników. Dobrze zaprojektowane i wyposażone UAV mogą być stosowane do inspekcji termicznych wewnątrz budynków.

Bezzałogowe systemy latające mogą być bardzo korzystne z kilku względów technicznych i ekonomicznych. Najważniejsze z nich to: zdolność do wykonywania zdjęć dla małych, trudnych obszarów, stosunkowo mało ograniczeń czasowych i lokalizacyjnych, niskie koszty operacyjne wynikające z możliwości obserwacji dużego obszaru, minimalizując potrzebny do tego czas i koszty, zdolność do obsługi cyfrowego przetwarzania zdjęć lotniczych i satelitarnych, przyjazna dla środowiska charakterystyka lotów, względna niezależność od warunków atmosferycznych. Z drugiej strony istnieją znaczne problemy związane z rozwojem UAV, zarówno techniczne, jak i regulacyjne.

Największy potencjał do zastosowania w technologiach termowizyjnych mają wielowirnikowce (multiwirniki) oraz konstrukcje jednoskrzydłowe, które mogą być przypisane do grupy Mini UAV. Wynika to ze stosunkowo niskich kosztów produkcji, inwestycji i eksploatacji platformy UAV i urządzeń pokładowych, które składają się z układu sterowania, nawigacji i rejestracji danych. Oprócz kosztów

ważnymi czynnikami są: krytyczne parametry techniczne UAV, takie jak: wysokość, zakres, czas lotu, ładunek, masa startowa i wymiary zewnętrzne. UAV umożliwiają szybkie, stosunkowo tanie pozyskanie danych wysokiej rozdzielczości oraz obrazów w dowolnej orientacji [9].

Cenną zaletą UAV pionowego startu jest możliwość dokładnej analizy wszystkich elementów budynków, takich jak pionowe ściany budynków oraz zdolność do dokładnego zdiagnozowania dachów i elewacji budynków, bez potrzeby narażania ludzi do pracy na wysokościach. Metoda ta pozwala na szybkie i dokładne kontrolowanie całej powierzchni dachu i powierzchni bocznej; jest ona nie tylko bardzo precyzyjna, ale także bardzo ekonomiczna. Jest to niezwykle istotne, ponieważ większość strat ciepła z budynku wynika ze strat z powierzchni dachu, ścian i okien. Dzięki temu uzyskujemy szczegółowe dane techniczne charakterystyki energetycznej niezbędne do modernizacji technicznej i ekonomicznej budynku. Regularne monitorowanie może prowadzić do znacznych oszczędności i usunięcia wad na wczesnym etapie. W przypadku niektórych budynków, oprócz indywidualnej oceny ich efektywności energetycznej i kontroli dachu, dostępność informacji termowizyjnej pozwala uzyskać przestrzenne dane lokalizacji budynku niezbędne do całkowitego pomiaru wydajności [12].

Prawidłowo zastosowane kamery termowizyjne mogą umożliwić szybką i niezawodną kontrolę ilości strat ciepła w budynku w wyniku wycieków i uszkodzeń. Zastosowanie odpowiednich czujników i systemów komputerowych zapewnia automatyczną i precyzyjną lokalizację ewentualnych usterek, uzyskanie precyzyjnych danych, wysoką dokładność pozycjonowania i zdolność do wykonywania wielu powtarzalnych pomiarów.

## WNIOSKI

Rosnące koszty zakupu uprawnień do emisji i ograniczenie dostępu do bezpłatnych uprawnień spowoduje wzrost cen energii. Będzie to miało wpływ zarówno na krajowych producentów, którzy muszą ponosić dodatkowe koszty dystrybucji, jak i prawdopodobny wzrost importu energii z krajów sąsiednich. Poprawa efektywności energetycznej jest najtańszym i najbardziej opłacalnym sposobem na obniżenie kosztów.

Termowizja może być z powodzeniem używana w sektorze budowlanym w celu określenia strat ciepłych i mostków ciepłych, wykrywania wad, braku izolacji lub szczelności i kontroli strat energii.

Regularne monitorowanie za pomocą technik obrazowania termicznego może prowadzić do znacznych oszczędności i usunięcia wad na wczesnym etapie. Termiczne wyniki obrazowania są niezbędne do przeprowadzenia modernizacji technicznej i poprawy ekonomicznej efektywności energetycznej budynków.

Wykorzystanie UAV umożliwia w krótkim czasie kontrolę elementów budynku, które mogą być trudno dostępne dla człowieka. Wykorzystanie UAV w termowizji

może być kamieniem milowym w obszarze badań i rozwoju energii. Największy potencjał do stosowania termowizji mają multiwirlnikowce oraz konstrukcje stałoskrzydłowe.

Aktualne problemy badawcze związane z rozwojem UAV do obrazowania termicznego wynikają głównie z: ograniczeń prawnych i przepisów normalizacyjnych, bezpieczeństwa, akceptacji politycznej i społecznej, nowych systemów UAV, certyfikacji i integracji, miniaturyzacji czujników, projektowania i wdrażania autonomicznych technik lotu, komunikacji w czasie rzeczywistym, integracji wielu czujników na platformie UAV, automatyzacji pozyskiwania i przetwarzania danych, zdolności UAV do pracy w różnych warunkach pogodowych i dużej turbulencji. Rozwiązanie powyższych zagadnień umożliwi prawie całkowitą automatyzację badań termowizyjnych.

## LITERATURA

- [1] International Energy Agency, Energy Policies of IEA Countries, Francja, 2013.
- [2] Dessus B., Atlas des énergies pour un monde vivable, Ed. Syros, Paryż 1994.
- [3] Figórski A., Krawczyk J.M., Wajss P., Efektywność energetyczna - możliwości dla Polski, Czysta Energia 2011.
- [4] Eurostat, Energy Production and Imports, Luxembourg 2013.
- [5] Guła A., Krawczyk J.M., Efficient Use of Energy, Monografia AGH, Kraków 2012.
- [6] Thompson II, R.M., Drones in Domestic Surveillance Operations: Fourth Amendment Implications and Legislative Responses, Congressional Research Service 2013.
- [7] Gupta S.G., Ghonge M.M., Jawandhiya P.M., Review of Unmanned Aircraft System (UAS), International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) 2013.
- [8] Manoj Thapa, Ram Chandra Shrestha, Autonomous UAV: General and Case Study of Reaper MQ-9, Tribhuvan University, Institute of Engineering, Central Campus Pulchowk Department of Mechanical Engineering 2014.
- [9] Sawicki P., Unmanned Aerial Vehicles in Photogrammetry and Remote Sensing - State of the Art and Trends, Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 2012, s. 365-376.
- [10] Vikram Hrishikeshavan, Experimental Investigation of a Shrouded Rotor Micro Air Vehicle in Hover and in Edge-wise Gusts, 2011.
- [11] Reg Austin, Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment, John Wiley & Sons, 2010.
- [12] Lagüela S., Díaz-Vilariño L., Roca D., Lorenzo H., Aerial thermography from low-cost UAV for the generation of thermographic digital terrain models, Applied Geotechnologies Research Group, University of Vigo, Lab 22, ETSE Minas, Campus Universitario Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo, Hiszpania, 2015.

## INTRODUCTION TO THE USE OF AERIAL TECHNOLOGY IN THE THERMAL IMAGING OF BUILDINGS

**Article discusses the subject of energy efficiency in the construction and building sector and the use of unmanned aerial vehicles in order to study energy consumption**

in buildings. At the beginning, the concept of energy efficiency in buildings is presented, its importance and impact on the environment. The next section explores the effects of buildings on the environment, in particular, through heat loss. The article also outlines the importance of research methods and thermal imaging. Specifically developed unmanned aircraft classification is adapted for the use in thermal studies. The topic is discussed in terms of both the characteristics and structure, as well as the advantages and disadvantages of the use of such solutions

**Keywords:** energy efficiency, unmanned aerial vehicles, energy modeling, heat losses, thermal imaging