

## DODATEK B

### Wprowadzenie do termowizji i termografii\*

Ogólnie *termografię* definiuje się jako proces obrazowania w paśmie średniej podczerwieni<sup>1</sup>. Realizuje się go poprzez rejestrację promieniowania cieplnego, emitowanego przez obserwowane ciała fizyczne<sup>2</sup>, bez konieczności oświetlania ich zewnętrznym źródłem światła. W ten sposób można również dokonywać dokładnych pomiarów temperatury [6].

Kompletny proces zawiera *detekcję* i *rejestrację* emitowanego promieniowania podczerwonego, oraz *przekształcania* go w obraz widzialny [15], tj. (kolorowy) obraz termalny, będący odwzorowaniem temperaturowego pola związanego z badaną powierzchnią. Stąd też wywodzi się inna, potocznie używana nazwa termografii – *termowizja*<sup>3</sup>.

Zjawisko promieniowania ciał, zauważone już w XIX wieku, pozwala nam (poprzez zastosowanie odpowiednich czujników) dostrzec to, co jest niewidoczne dla oka. Podczerwień jest pasmem, w którym znajdują się fale elektromagnetyczne dłuższe niż widzialne<sup>4</sup>. Promieniowanie to wykrywamy i obrazujemy za pomocą *skanerów* i *kamer termowizyjnych*, które to właśnie służą do bezkontaktowego<sup>5</sup> zobrazowania rozkładu temperatury na podstawie pomiaru mocy promieniowania podczerwonego emitowanego przez poszczególne elementy obserwowanej powierzchni [13, 15].

Na Zachodzie techniki termograficzne są powszechnie uznawane. Wykorzystują je na przykład zakłady ubezpieczeniowe w celu obniżenia poziomu ryzyka związanego z awarią lub przestojem ubezpieczanych instalacji [5]. W Polsce firmy ubezpieczeniowe nie zainteresowały się jeszcze tym sposobem obniżenia składek. Prawdopodobnie zmieni się to, kiedy przepisy związane z certyfikacją zaczną obowiązywać w całej Europie. Ogólnie termografia bywa również stosowana przy ocenie energetycznej budynków, ale zwykle prowadzi jedynie do wniosków jakościowych odnośnie izolacyjności ich przegród zewnętrznych.

#### B.1. Historia

Początki termografii datuje się na rok 1800, kiedy to Sir Frederick William Herschel, jako pierwszy, dzięki zjawisku rozszczepienia światła, wykonał doświadczenie pomiaru temperatury każdego koloru. Okazało się, że termometr leżący w 'cieniu', tuż obok czerwonego koloru światła widzialnego, wykazał wzrost temperatury, co świadczyło o tym, że istnieje dodatkowy czynnik – promieniowanie niewidzialne nazwane „podczerwienią”.

Według historycznego szkicu [5]: *W latach 50–70 XX w. kamery termalne budowano głównie na bazie kriogenicznie chłodzonych, pojedynczych detektorów fotonowych promieniowania podczerwonego. Techniki pomiarów i wizualizacji w podczerwieni od początku*

\* Materiał przygotowany przez: Z. Kowalczuka, L. Chojnickiego, M. Krzaczkę.

<sup>1</sup> Z długością fal od ok. 0,9 do 14  $\mu\text{m}$ .

<sup>2</sup> W przedziale temperatur spotykanych w warunkach codziennych.

<sup>3</sup> Wywodzić ją również można od nazwy handlowej pierwszych kamer firmy AGA–Thermovision.

<sup>4</sup> O długości fal w szerokim zakresie 0,75  $\mu\text{m}$  – 1mm.

<sup>5</sup> Za pomocą m.in. detektora promieniowania i układu optycznego.

miały ogromny potencjał, jednak ich światowy rozwój był ograniczany wysokim kosztem aparatury. Było to szczególnie odczuwalne w Polsce. Pierwotnie domeną zobrażeń termalnych były zastosowania wojskowe, dopiero pod koniec lat 60 ubiegłego wieku technika ta zaczęła być stosowana w obszarze cywilnym – zwłaszcza w zastosowaniach medycznych. Początkowo, tj. w latach 70 na rynek krajowy dostarczane były głównie kamery ze Szwecji, które sprzedawała firma AGA, a następnie powstała z niej Agema. Niestety, ich cena była wtedy zbyt wysoka dla większości potencjalnych użytkowników, gdyż koszt podstawowego systemu rozpoczynał się od ok. 50 tys. dolarów. Z tych powodów posiadaczami kamer stawały się głównie instytuty naukowo-badawcze. Na początku lat 90 większość urzędzeń było w posiadaniu tych placówek i często były one modernizowane, zazwyczaj poprzez rozbudowę o układy interfejsów cyfrowych. W tych latach zaczął się również szybki rozwój urzędzeń termografii i termowizji, kiedy to zaczęły dominować detektory wieloelementowe – linijki oraz matryce detektorów. W drugiej połowie lat 90 XX w. nastąpił przełom technologiczny polegający na skonstruowaniu względnie tanich matryc nie chłodzonych detektorów termicznych, dzięki czemu radykalnie spadły ceny, przy jednoczesnym wzroście walorów użytkowych tych kamer.

## B.2. Teoretyczne podstawy termowizji i termografii

Widmo elektromagnetyczne dzieli się na szereg obszarów długości fal, nazywanych zakresami. Metody wykorzystywane do detekcji promieniowania odnoszą się do tych zakresów.

Nie ma zasadniczej różnicy pomiędzy promieniowaniem w różnych pasmach widma elektromagnetycznego. Wszystkie one podlegają tym samym prawom, a jedyna różnica polega na *długości* (albo – ekwiwalentnie – *częstotliwości*) *fali*.

Zgodnie z prawem Prevau, każdy przedmiot mający temperaturę wyższą od zera bezwzględnego (0 K) emituje promieniowanie elektromagnetyczne, tym większe, im wyższa jest temperatura tego ciała. Zjawisko to pozwala na pomiar (rozróżnienie) temperatury.

Według współcześnie powszechnie dostępnych źródeł (np. [6]) wymienić można następujące rodzaje występującego promieniowania:

**promieniowanie fal elektromagnetycznych** (według rosnącej energii):

- [promieniowanie radiowe](#)
- promieniowanie mikrofalowe – [mikrofale](#)
- [promieniowanie tła](#) (promieniowanie reliktove)
- [promieniowanie cieplne](#) (termiczne) – promieniowanie elektromagnetyczne wysyłane przez każde ciało o temperaturze większej od zera bezwzględnego
- promieniowanie podczerwone [podczerwień](#)
- promieniowanie świetlne – [światło](#)
- [promieniowanie słoneczne](#)
- [promieniowanie laserowe](#)
- promieniowanie ultrafioletowe (nadfioletowe, nadfiolet) [ultrafiolet](#)
- [promieniowanie rentgenowskie](#) (promienie Roentgena, promienie X)
- [promieniowanie synchrotronowe](#) – wytwarzane przez naładowane cząstki poruszające się po okręgach w [polu magnetycznym](#) w [synchrotronach](#) lub w polu [gwiazd neutronowych](#)
- [promieniowanie gamma](#) – promieniowanie elektromagnetyczne wysyłane np. przez jądra atomów

**promieniowanie korpuskularne** (strumień cząstek):

- [promieniowanie beta](#) – strumień elektronów lub pozytonów powstających z [rozpadów beta](#)
- [promieniowanie alfa](#) – strumień jąder atomów [helu](#)

**mieszane** (definicja nie ogranicza się tylko jednego falowego czy korpuskularnego typu):

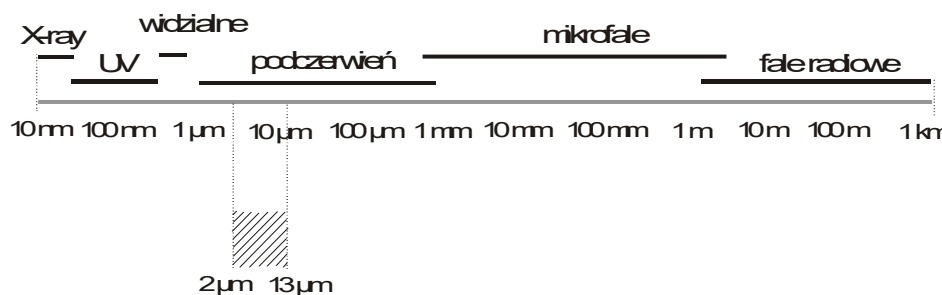
- [promieniowanie naturalne](#) – promieniowanie radionuklidów istniejących w środowisku naturalnym
- [promieniowanie kosmiczne](#)
- [promieniowanie jonizujące](#)
- [promieniowanie niejonizujące](#)
- promieniowanie jąder – promieniowanie wysyłane przez wzbudzone jądra atomowe
- promieniowanie jądrowe – strumień cząstek lub promieniowanie elektromagnetyczne wytwarzane podczas przemian jąder atomowych
- promieniowanie plazmy – promieniowanie wytwarzane przez [plazmę](#)
- [promieniowanie hamowania](#) – promieniowanie elektromagnetyczne powstające podczas hamowania cząstki obdarzonej [ładunkiem elektrycznym](#).

Przybliżony podział ważniejszych rodzajów promieniowania, z uwzględnieniem długości fali, przedstawiono w tab. B.1.

Tab. B.1. Podział promieniowania w zależności od długości fali.

Rodzaje promieniowania	Długość fali
Kosmiczne oraz promieniowanie gamma	$(10^{-11} \div 10^{-14})$ m
Fale rentgenowskie	$(10^{-9} \div 10^{-11})$ m
Ultrafioletowe	$(10^{-7} \div 10^{-9})$ m
Promieniowanie widzialne	$(4 \div 7) \cdot 10^{-7}$ m
Podczerwone:	
– bliska podczerwień	0,75 $\mu$ m
– średnia podczerwień	3 $\div$ 6 $\mu$ m
– daleka podczerwień	6 $\div$ 15 $\mu$ m
– ekstremalna podczerwień	15 $\div$ 1000 $\mu$ m
Mikrofale	1 $\div$ 1000 mm
Fale radiowe	$(10^5 \div 10^3)$ m

Podział ten, wyrażony na wspólnej osi (długości fali), zilustrowano również na rys. B1.



Oś x – długość fali [m]

Rys. B.1. Długość fal promieniowania podczerwonego widocznego za pomocą kamer termowizyjnych (jak można zauważyć, jest to tylko część podczerwieni) [9].

Aby dokładnie zrozumieć zasady termografii, należy poznać główne prawa fizyczne dotyczące emisji energii z ciał.

### B.2.1. Główne prawa fizyczne

Prawa fizyki dobrze są opisane w podręcznikach z wymiany ciepła. Tu prezentujemy jedynie wybrane fragmenty z obszaru teorii promieniowania.

#### *Prawo Stefana-Boltzmannna*

$$W(T) = \sigma T^4 \quad (\text{B.1})$$

$\sigma$  – stała Stefana-Boltzmannna promieniowania ciała doskonale czarnego,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$

$W$  – energia promieniowania (zdolność emisyjna)

$T$  – temperatura ciała [K].

Jak widać ze wzoru (B.1), całkowita zdolność emisyjna ciała (energia promieniowania ciała doskonale czarnego) jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury [1, 3].

Mierząc promieniowanie podczerwone wysyłane przez dane ciało, mierzymy zatem (pośrednio) także jego temperaturę.

Dla ciała doskonale czarnego, na podstawie wzoru (B.1), powiązanie temperatury z natężeniem promieniowania podczerwonego wyraża następujący związek:

$$T = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{E_o}{C_o}} \quad (\text{B.2})$$

$E_o$  – strumień promieniowania cieplnego [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$C_o$  – stała promieniowania ciała doskonale czarnego,  $C_o = 5,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$

$T$  – temperatura bezwzględna [K] powierzchni.

#### *Prawo Kirchhoffa*

Stosunek spektralnej zdolności emisyjnej do zdolności absorpcyjnej nie zależy od natury ciała i jest dla wszystkich ciał jednakową funkcją temperatury.

Dla ciał szarych wzór Stefana-Boltzmannna wymaga przekształcenia. Należy wyskalować ów wzór przez współczynnik  $e$  – spektralnej zdolności emisyjnej danego ciała (z przedziału 0÷1):

$$W = e \sigma T^4 \quad (\text{B.3})$$

Prawo Kirchhoffa jest rozwinięciem prawa Stefana-Boltzmannna (dot. ciała doskonale czarnego), gdyż pozwala na określenie zdolności emisyjnej ciała szarego (rzeczywistego).

#### *Prawo przesunięć Wiena*

Ze wzrostem temperatury optyczne<sup>6</sup> widmo promieniowania ciała (doskonale czarnego) przesuwa się w stronę fal krótszych

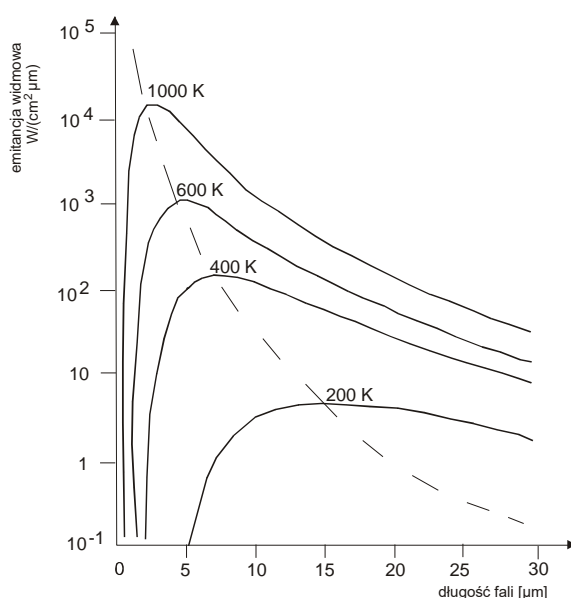
$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (\text{B.4})$$

$b$  – stała Wiena,  $b = 2,8977685 \times 10^{-3} \text{ m K}$ .

<sup>6</sup> Tj. obraz uzyskany przez rozłożenie światła niemonochromatycznego na składowe o różnych barwach ( $\lambda$ ).

Wzór Wiena wyraża znane zjawisko zmiany kolorów promieniowania: od czerwonego przez pomarańczowy, do żółtego, w miarę wzrostu temperatury. Prawo to pozwala określić długość fali, przy której występuje maksimum energii promieniowania dla danej temperatury.

Długość fali danego koloru utożsamia się z  $\lambda_{\max}$  [8]: *Dobre przybliżenie wartości  $\lambda_{\max}$  dla danej temperatury ciała czarnego można otrzymać dzięki nabytemu doświadczeniu (300 K). Dla bardzo gorących gwiazd, takich jak Syriusz (11 000 K), emitujących niebieskawo-białe światło, szczyt emitancji widmowej przypada na niewidoczną część widma, w ultrafiolecie – przy długości 0,27  $\mu\text{m}$ . Słońce (około 6 000 K) emituje światło żółte, a jego maksimum przypada na środek widma widzialnego. W temperaturze pokojowej (300 K) maksimum emitancji wynosi około 9,7  $\mu\text{m}$  i znajduje się w dalekiej podczerwieni, a w temperaturze ciekłego azotu (77 K) maksimum emitowanej niewielkiej ilości energii przypada na 38  $\mu\text{m}$ , w zakresie bardzo dalekiej podczerwieni.*



Rys. B.2. Prawo przesunięć Wiena: przykład widmowego rozkładu energii promieniowania [1].

### B.2.2. Podstawowe problemy działania kamer

Aby zrozumieć zasadę działania kamer podczerwieni należy wzorami fizycznymi opisać strumień promieniowania cieplnego dochodzący do detektora, w którego skład wchodzi:

- strumień emitowany przez badany obiekt (ob)

$$\text{ob} \rightarrow \text{ob} \quad (B.5)$$

- strumień emitowany przez otoczenie (o) i odbity (odb) od badanego obiektu

$$\text{ob} \leftarrow \text{ob} \quad (B.6)$$

- strumień emitowany przez atmosferę (atm)

$$\text{ob} \leftarrow \text{atm} \quad (B.7)$$

Ostatnim elementem składowym strumienia dochodzącego do detektora jest strumień emitowany przez elementy optyczne i filtry kamery. W najnowszych typach kamer jego wartość można pominąć, gdyż jest dużo mniejsza od wymienionych wyżej.

Wynikowy (wyjściowy) sygnał z detektora promieniowania opisuje przybliżony wzór:

$$I_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \phi \tau_{\lambda} C R_{\lambda} T^4 \quad (\text{B.8})$$

- $\epsilon_{\lambda}$  – monochromatyczny współczynnik emisyjności
- $\phi$  – gęstość strumienia [ $\text{W/m}^2$ ] promieniowania cieplnego
- $\tau_{\lambda}$  – monochromatyczny współczynnik przenoszenia (transmisji)
- $C$  – zmienny parametr zależny od stopnia tłumienia atmosfery, absorpcji elementów optycznych i filtrów kamery, właściwości detektora
- $R_{\lambda}$  – monochromatyczne natężenie promieniowania [ $\text{W/m}^2$ ]
- $T$  – temperatura bezwzględna [K]
- $\lambda$  – długość fali promieniowania.

Uproszczenie wzoru (B.8) polega głównie na nieuwzględnieniu wpływu transmisji oraz promieniowania własnego atmosfery i optyki kamery [11].

W omawianym zagadnieniu, termografii bardzo ważnym pojęciem jest *emisyjność*<sup>7</sup> ( $\epsilon$ ) ciała, która wyraża zdolność danego obiektu do wydzielania energii promienistej. Duża wartość  $\epsilon$  obiektu świadczy o tym, że jest on dobrze ‘widziany’ przez kamerę (znikoma zaś wartość – odwrotnie). Wskaźnik ten ujmuje bowiem wpływ promieniowania odbitego od obiektu [7].

Współczynnik emisyjności  $\epsilon$  wyrażać można na przykład jako stosunek natężenia promieniowania pochłanianego przez powierzchnię ciała (szarego) do natężenia promieniowania padającego na to ciało, albo też [15] jako stosunek ilości energii emitowanej do energii, która powinna być emitowana. Emisyjność ciała doskonale czarnego równa jest jedności. Większość materiałów/powierzchni [4] to ciała szare o współczynniku emisyjności<sup>8</sup>  $\epsilon$  mniejszym niż 1,0. Jego wartość zależy od składu chemicznego oraz geometrii i sposobu wykończenia powierzchni, również czasu i kąta obserwacji oraz długości fali i temperatury [4, 13, 15].

Współczynnik emisyjności można wyznaczyć według stosownych tabel (patrz literatura, np. [4]; przykład w tab. B.2) lub też względnie łatwo cenić/skorygować poprzez dostosowanie wskazań kamery do wskazań termometru kontaktowego mierzącego ten sam punkt [15].

Tab. B.2. Przykładowe przybliżone wartości współczynnika emisyjności ( $\epsilon$ ) materiałów.

blacha stalowa ocynkowana	0,23	beton	0,62
drewno świerkowe	0,77	cegła	0,75÷0,93
drewno dębowe	0,895	guma	0,86÷0,96
tynk wapienny	0,91	szkło	0,937

Znajomość współczynnika emisyjności jest zatem niezbędna dla właściwej oceny temperatury obserwowanego obiektu [15]. Przykładowo zastosowanie emisyjności tynku wapiennego dla stali ocynkowanej, prowadzi do zawyżenia wartości temperatury tego ostatniego o 41,4 %. Oznacza to, że łatwo można (względnie) porównywać wartości temperatury na termogramie, ale tylko w obrębie jednego materiału.

<sup>7</sup> Mówimy tu o wskaźniku bezwzględnym, w odróżnieniu od np. wzoru Plancka dla zdolności emisyjnej.

<sup>8</sup> Lub absorpcji – gdyż w praktyce można przyjąć, że niskowydajny emiter zwykle jest słabym absorberem. Np., wypolerowane aluminium ma  $\epsilon = 0,04$ , tzn. jest bardzo nisko wydajnym emitorem, bardzo dobrze odbija promienie i trudno jest go ogrzać promieniowaniem podczerwonym; po pokryciu emalią  $\epsilon = 0,85-0,91$  [11].

Ważnym elementem jest również wiedza na temat przepuszczalności promieniowania podczerwonego przez atmosferę ziemską, która zależy (nie monotonicznie) od długości fali. W związku z tym, należy uwzględnić odległość od przedmiotu. Im jest ona mniejsza, tym badanie będzie dokładniejsze, gdyż straty wywołane przejściem przez atmosferę będą mniejsze.

Z uwagi na specyfikę tłumienia, wytworzył się naturalny podział systemów termowizyjnych na *krótkofalowe* ( $3\div 5\ \mu\text{m}$ ) i *długofalowe* ( $8\div 14\ \mu\text{m}$ ). Podobnemu podziałowi podlegają również detektory: **swb** (ang. *short wave band*) o zakresie  $3\div 5\ \mu\text{m}$  oraz **lwb** (ang. *long wave band*) w zakresie  $8\div 14\ \mu\text{m}$  [11, 12]. W obu współczynnik transmisji przyjmuje wartość optymalną.

### B.3. Kamery termowizyjne

Branża kamer rozwija się prężnie zarówno pod względem technologicznym, jak i możliwości zastosowania. Z roku na rok powstają coraz to większe matryce, usuwa się i koryguje kolejne niedoskonałości, kamery stają się coraz mniejsze. W obecnej chwili dostępnych jest bardzo wiele kamer dedykowanych do różnego typu prac w budownictwie, przemyśle, czy medycynie. Każdy typ kamery ma swoją specyfikę i parametry, które można znaleźć w literaturze specjalistycznej [15, 16] oraz internecie [3, 7, 10].

Warto również wspomnieć o roli oprogramowania dołączanego do każdej z kamer, które bardzo ułatwia ich obsługę. Współcześnie prezentuje ono zaawansowane aplikacje przetwarzania obrazu, pozwala wyznaczać histogramy, oraz pokazywać miejsca krytyczne w izolacji budynku.

#### B.3.1. Producenci

Największymi producentami w branży są firmy: Flir, Fluke, InfraTec, Land, Cedis. Pojawiają się też u nas produkty firm chińskich. Ostatnio na ten rynek wchodzi również polskie firmy.

Vigo System [10, 14] to popularny polski producent w branży. Jest to firma, która działa głównie w zakresie produkcji detektorów podczerwieni; w obszar termowizji weszła ona na rynek kilka lat temu, proponując urządzenie działające na pojedynczym detektorze.

Drugim polskim producentem jest firma Czaki Thermo-Product [2], która oferuje produkty przewidziane m.in. do pracy przemysłowej *on-line* w systemie 24 h, w tym serię kamer (z pełnym, zaawansowanym oprogramowaniem), które pozwalają na monitoring procesów przy zachowaniu wymagań związanych ze stabilnością i ciągłością pracy [5].

#### B.3.2. Budowa współczesnych kamer

Sprzęt termowizyjny to głównie kamery termowizyjne. Równocześnie szerokie zastosowanie znajdują pakiety komputerowe do graficznej wizualizacji wyników oraz przetwarzania obrazów (w celu wykrywania charakterystycznych miejsc).

Jak każdy przyrząd wizyjny, kamera termowizyjna składa się z detektora (matrycy detektorów) oraz obiektywu, czyli konstelacji soczewek.

Do budowy obiektywu służą specjalne materiały, takie jak german, krzem, czy specjalne szkła. Obniżyć cenę urządzenia można wykorzystując obiektywy firmy Umicore<sup>9</sup>, wytwarzane poprzez odlanie ze specjalnego szkła powierzchni asferycznych [5].

Wśród detektorów – czułych na promieniowanie podczerwone – wyróżniamy:

- **detektory pirometryczne** – pod wpływem fal dokonuje się zmiana wewnętrznej polaryzacji elektrycznej (bardzo czułe detektory)
- **detektory bolometryczne** – fale wywołują zmianę rezystancji elementu
- **detektory fotonowe** – na skutek oddziaływań fotonów i elektronów następuje absorpcja fali/energii i generacja nośników prądu, co powoduje pojawienie się prądu.

<sup>9</sup> Kosztujące kilkaset euro (obiektywy do kamer na podczerwień są bowiem ogólnie bardzo drogie).

Od 1993 roku stosowane są kamery wyposażone w matryce detektorów typu FPA (ang. *Focal Plane Array*). W typowej matrycy 320 x 240 jest 76 800 pojedynczych detektorów (pikseli). Każdy piksel jest odczytywany 25, 50 (sygnał PAL; Europa) lub 30, 60 (sygnał NTSC; USA) razy na sekundę przez układ odczytowy ROIC (ang. *readout integrated circuit*), co oznacza, że odczyt informacji odbywa się poprzez multipleksowanie<sup>10</sup> każdego piksela [7].

Kolejny krok w rozwoju kamer termowizyjnych stanowiło wprowadzenie w 1997 r. na rynek pierwszej kamery mikrobolometrycznej – z matrycami termicznych detektorów niechłodzonych. Nieco później wprowadzono niechłodzone matryce zbudowane z detektorów piroelektrycznych. Możliwość pozbycia się konieczności skanowania i chłodzenia istotnie poprawiła parametry eksploatacyjne kamery, która po radykalnym uproszczeniu części mechanicznej stała się lekka, bardziej niezawodna oraz szybciej gotowa do pracy. Podczas gdy czas schładzania detektora do temperatury kriogenicznej trwał nawet do 10 minut, czas potrzebny na stabilizację temperatury jego pracy w kamerach bez chłodziarek nie przekracza 1 minuty [7].

Niechłodzone detektory matrycowe charakteryzują następujące parametry [11]:

- wymiar matrycy, obecny standard dla matryc niechłodzonych to: 320 x 240 i większe z podziałką 50  $\mu\text{m}$
- zdolność rozdzielcza mierzonej temperatury: 0,02÷0,2 K
- częstotliwość pracy, tj. odczytu informacji z poszczególnych pikseli matrycy, zawiera się w granicach: 25÷50 Hz (dla sygnału PAL) oraz 30÷60 Hz (dla NTSC)
- temperatura pracy detektora: 30 °C (stabilizator grzejno-chłodzący, działający na zasadzie termoelektrycznej)
- minimalne natężenie padającego strumienia promieniowania,  $D = 10^7 \div 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ .

Każda z firm produkująca detektory posiada własną technologię (różne materiały półprzewodnikowe, inny sposób działania), zatem każdy z detektorów ma pewne wady i zalety, które warto poznać (można znaleźć je w specyfikacji technicznej danej kamery, np. [11, 16]).

### B.3.3. Kalibracja i błędy

Postawienie poprawnej diagnozy wymaga stosownej wiedzy o charakterystyce konstrukcyjno-funkcjonalnej badanego obiektu – albo o cechach potencjalnej anomalii, która może w nim wystąpić. W praktyce termografii przemysłowej trudno jest o tzw. wzorcowe termogramy, czy też sztywne kryteria kwalifikacji. W przypadku badania transformatorów [7], których temperatura podczas pracy może wynosić kilkadziesiąt stopni Celsjusza, może zajść potrzeba obserwacji różnic temperatury na złączach na poziomie nawet 0,5 K.

Kalibracja kamery odbywa się za pomocą ciała doskonale czarnego. Każda kamera powinna być co najmniej raz w roku kalibrowana w oparciu o taki wzorzec.

Bardzo ważna jest też znajomość ciał, których temperaturę badamy, gdyż nawet małe zmiany spektralnego współczynnika zdolności emisyjnej ciała powodują zakłamania w odczycie temperatury, nawet na poziomie 20 K (przy wysokich temperaturach). Należy również zwrócić uwagę na odbicia<sup>11</sup>, które powodują rejestrację temperatury wyższej niż w rzeczywistości. Transmisja i interferencja również wywołują problemy, które napotyka operator kamery. Transmisyjność w powietrzu dla różnych długości fal promieniowania podczerwonego jest różna. Wilgotność powietrza także stanowi parametr, który trzeba uwzględnić. Interferencja może nastąpić w wypadku występowania zanieczyszczeń i pyłów w środowisku, co również utrudnia właściwy pomiar.

Ważnym parametrem, który musi ustawić operator jest też odległość od badanego elementu. Związane jest to z tłumieniem fal w atmosferze (im większa odległość tym niższa temperatura).

<sup>10</sup> Katalogach kamer opisywane jest to w języku angielskim jako technika *image frequency*.

<sup>11</sup> Np. od ścian pieca hutniczego, przy badaniu temperatury w nim.



Istotnym elementem, który należy wprowadzić, aby pomiar był właściwy, jest temperatura otoczenia. Dobrze ten problem prezentuje przykład [12], w którym pokazano, jaką temperaturę przypisuje kamera powierzchni ściany w przypadku arbitralnej oceny temperatura otoczenia. Występująca w takich przypadkach odchyłka temperaturowa wynika z faktu, że kamera termowizyjna mierzy całkowite natężenie promieniowania docierające do detektora. Zatem temperatura otoczenia i atmosfery ma duży wpływ na strumień docierający do detektora (może podnieść lub obniżyć wartość ocenianej temperatury).

Należy pamiętać, że temperatura wskazana przez kamerę zależy również od detektora, jaki zostanie zastosowany. W przypadku detektora **sw** ( $3,6\div 5\ \mu\text{m}$ ) oraz **lw** ( $8\div 12\ \mu\text{m}$ ) mogą wystąpić różnice emisyjności w zależności od typu detektora [12].

Innym problemem, który może wystąpić, jest zbyt krótki czas uśredniania (szybko realizowane pomiary), którego celem jest redukcja wpływu szumu detektora. Oczywiście, oprócz tego podobne błędy mogą wynikać z wahań w wartości wzmocnienia przedwzmacniacza lub innych układów elektronicznych, oraz z niestabilności układów chłodzenia.

Bardzo ważnym warunkiem jest, aby badania odbywały się w środowisku, w którym kamera została skalibrowana, gdyż każda zmiana wywołuje błędy odczytu.

Można podać wiele analogicznych sytuacji, w których konieczna jest odpowiednia wiedza, aby właściwie dobrać aparaturę, procedurę pomiarową, współczynniki korekcji, czy skalę temperaturową. Dlatego fizyk, mechanik czy inżynier, pomimo posiadania nawet najlepszych urządzeń, może mieć podstawowe trudności ze skutecznym zbadaniem przemysłowej instalacji elektrycznej, a doświadczony elektryk i operator kamery – z efektywną diagnozą obiektu budowlanego. Aby uzyskać certyfikat w zakresie danego typu instalacji, zwykle konieczne jest uczestnictwo w kursie trwającym około 30 godzin oraz wiele miesięcy praktyki przemysłowej. W świecie tego typu szkolenia i certyfikacja odbywają się na trzech poziomach doskonałości [5].

#### B.3.4. Przykład kamery wizyjnej



Rys. B.3. Kamera termowizyjna *THERM v50* polskiej firmy Vigo System S.A [10, 14].

Dane kamery<sup>12</sup>:

- rozdzielczość obrazu - 384 x 288 pikseli (PAL, 50 Hz) lub 320 x 240 pikseli (NTSC, 60 Hz)
- rozdzielczość termiczna NETD - 0,065 °C dla 30 °C
- rozdzielczość przestrzenna - 1 mrad
- rozmiar piksela (detektora) - 25 μm
- zakres spektralny - 8÷14 μm
- zakres temperaturowy - -20÷120 °C lub 0÷400 °C
- dokładność pomiaru - ±2 °C, ±2% zakresu.

<sup>12</sup> Aktualna cena – to ok. 60.000 PLN, całkowita masa 1,5 kg.

Po przesłaniu danych pomiarowych do komputera ich analizy dokonuje się za pomocą oprogramowania THERM v50. Oprogramowanie to daje możliwość różnego rodzaju analizy rozkładu temperatur, definiowania regionów, wykresów, histogramów. Wyniki pracy można szybko zaprezentować i wydrukować za pomocą załączonego generatora raportów [10].

W opracowaniu [16] zebrano i przedstawiono zbiór trzydziestu kamer termowizyjnych, wraz z ich podstawowymi parametrami, wyprodukowanymi przez firmy: Fluke, SDS Infrared, Gude Infrared, Flir System, Jenoptic, Sonel, NEC, oraz Testo.

## Bibliografia

- [1] Gałkowska A., Kolincio A., Kozłowski K.: *Fizyka w Tablicach dla Kandydatów na Studia i Studentów*. Podkowa 2002.
- [2] [http: Czaki Thermo-Product. http://www.czaki.pl/](http://www.czaki.pl/) (2009)
- [3] [http: Flir system. http://www.flir.com.pl/termografia.php](http://www.flir.com.pl/termografia.php), (2008).
- [4] [http: Ogrzewnictwo. http://www.ogrzewnictwo.pl/](http://www.ogrzewnictwo.pl/) (2010).
- [5] [http: Rozmowa z dr inż. Piotrem Pręgowskim, właścicielem firmy PIRS, 7 sierpień, \(strona\) 2007. http://www.AutomatykaB2B.pl](http://www.AutomatykaB2B.pl), (2008).
- [6] [http: Termografia, \(hasło\). http://www.wikipedia.pl](http://www.wikipedia.pl), (2007).
- [7] [http: Termowizja.biz. http://www.termowizja.biz/viewpage.php?page\\_id=50](http://www.termowizja.biz/viewpage.php?page_id=50), (2009).
- [8] [http: Termowizja.net. http://www.termowizja.net/](http://www.termowizja.net/), (2009).
- [9] [http: Termowizyjna metoda diagnostyki technicznej w BOT Elektrowni Bełchatów, 31 lipiec 2007. http://www.AutomatykaB2B.pl](http://www.AutomatykaB2B.pl), (2008).
- [10] [http: Vigo system. http://vigo.com.pl](http://vigo.com.pl), (2008).
- [11] Minkina W.A.: *Technika pomiarów w podczerwieni w procesach technologicznych*, (plik). Politechnika Częstochowska. Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania. <http://www.el.pcz.czyst.pl/~za/stud/term/refer.pdf>, (2008).
- [12] Minkina W.A.: *Pomiary Termowizyjne – Przyrządy i Metody*, ss. 1-243. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej [ISBN 83-7193-237-5], Częstochowa 2004.
- [13] Krzaczek M.: *Ocena stanu ochrony cieplnej budynku*. – Kowalczyk Z.: *Charakterystyka Energetyczna Budynku*, rozdz. 2. PWNT, Gdańsk 2010.
- [14] Kuczyński K.: Polskie detektory podczerwieni na światowych rynkach. *Elektro.info*, no. 4, ss. 16-17, 2008. <http://www.elektro.info.pl>, (2010)
- [15] Kuczyński K.: Bezkontaktowa diagnostyka urządzeń. *Elektro.info*, no. 11, ss. 46-48, 2010. <http://www.elektro.info.pl>, (2010).
- [16] Kuczyński K.: Zestawienie kamer termowizyjnych – Podstawowe parametry. *Elektro.info*, no. 11, ss. 50-57, 2010. <http://www.elektro.info.pl>, (2010).