

## Przemysław RYBACZEWSKI, Grzegorz WICZYŃSKI

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ,  
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

# Badanie mętności optycznej śródreżca z wykorzystaniem diod LED z zakresu bliskiej podczerwieni

Mgr inż. Przemysław RYBACZEWSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, gdzie w roku 2010 uzyskał tytuł magistra inżyniera o profilu dyplomowania: Pomiar w Technice i Medycynie. Obecnie jest doktorantem w Zakładzie Metrologii i Optoelektroniki Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej. Zainteresowania naukowe: metrologia ukierunkowana na pomiary biomedyczne, zwłaszcza z zastosowaniem optoelektroniki.



e-mail: przemyslaw.rybaczewski@gmail.com

Dr hab. inż. Grzegorz WICZYŃSKI

Pracownik naukowo-dydaktyczny Zakładu Metrologii i Optoelektroniki Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe: metrologia ukierunkowana na pomiary przemysłowe i biomedyczne, badania w zakresie oceny jakości energii elektrycznej oraz zastosowania systemów sensorycznych w układach sterowania.



e-mail: grzegorz.wiczynski@put.poznan.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań transiluminacyjnych śródreżca z użyciem dwupunktowego źródła promieniowania optycznego. W pierwszej części pracy omówiono specyfikę transiluminacji takich obiektów oraz warunki badań. Następnie zamieszczono uzyskane wyniki transiluminacji dla diod LED o różnych charakterystykach widmowych. Zaobserwowano, że obraz transiluminacyjny w dużym stopniu zależy od wzajemnego położenia diod LED i silnie pochłaniających elementów prześwietlanego obiektu.

**Słowa kluczowe:** transiluminacja, mętność optyczna, podczerwień.

## Study of the optical turbidity of metacarpus with use of near infrared LEDs

### Abstract

The optical turbidity of biological objects related to the scattering and absorption properties of particular tissue elements makes it difficult to transilluminate them with optical radiation. In the paper the results of transillumination studies of the metacarpus are presented. Experimental studies were realized to determine a suitable configuration of the two-point source of optical radiation in order to transilluminate peripheral body parts. The specificity of transillumination of such objects and conditions to study them in the arrangement: LED - the tested object - CMOS camera are described (Fig. 2). The results obtained for LEDs of different spectral characteristics are shown (Figs. 3, 6-8). The results of measurements are given with changes in the pixel intensity as a function of its location in the transillumination image. We made an attempt to interpret the influence of the location of the applied point sources of radiation on the results of transillumination (Fig. 5). It can be supposed that this image depends significantly on the mutual position of LEDs and the strongly absorbing elements of the transilluminated object. This relationship can make location of the particular components of the object very difficult. However, it seems to be probable that taking into account the mutual position of a LED and an object in the analysis of transillumination images will facilitate location of such elements as e.g., blood vessels.

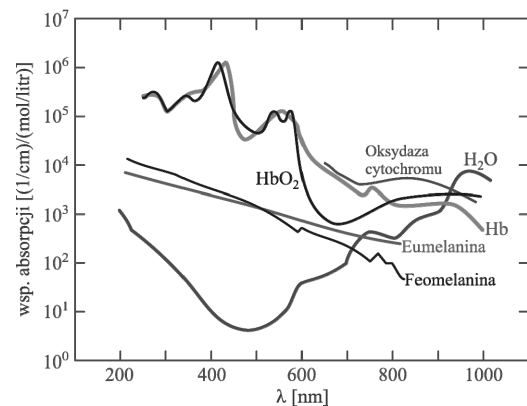
**Keywords:** transillumination, turbid media, peripheral body part, infrared.

## 1. Wstęp

Zjawisko transiluminacji dotyczy transmitowania przez obiekt promieniowania optycznego, które staje się nośnikiem informacji o właściwościach obiektu. W przypadku obiektów biologicznych wykorzystuje się właściwości optyczne badanych tkanek. Obiekt biologiczny podczas transiluminacji jest elementem o określonym wejściu i wyjściu sygnałowym. Wejście jest powierzchnią odbiorczą sygnału emitowanego ze źródła promieniowania optycznego. Natomiast wyjściem jest powierzchnia emitująca promieniowanie przepuszczające [1, 2].

Podstawową trudnością podczas prześwietlania promieniowaniem optycznym obiektów biologicznych jest ich mętność optyczna. Cecha ta wynika ze struktury danego obiektu oraz właściwości

absorbujących i rozpraszających poszczególnych elementów składowych tkanek [3]. W zależności od rodzaju tkanki i jej składu, promieniowanie optyczne o określonej długości fali jest mniej lub bardziej pochłaniane (rys. 1) i rozpraszane.



Rys. 1. Zależność współczynnika absorpcji promieniowania optycznego od długości fali dla różnych składników tkanek [4]

Fig. 1. Changes in optical radiation absorption in various tissue components as a function of the wavelength [4]

Większość tkanek miękkich wykazuje stosunkowo małą absorpcję promieniowania w obszarze widzialnym (barwa czerwona) i bliskiej podczerwieni – zwłaszcza w zakresie okna optycznego od 600 nm do 1300 nm [5, 6]. Poza tym obszarem "okna transiluminacyjnego" promieniowanie optyczne w zakresie widzialnym jest w znacznym stopniu pochłaniane przez pigmenty tkanek, takie jak: hemoglobina i melanina (eumelanina, feomelanina) [7]. Im mniejsza absorpcja, tym bardziej możliwa głębsza penetracja przy mniejszej energii wprowadzanej do transiluminowanego obiektu.

Tkanka miękką w zakresie bliskiej podczerwieni charakteryzuje się mniejszym rozpraszaniem niż w zakresie widzialnym [5], co oznacza, że większa liczba fotonów balistycznych i quasi-balistycznych podlega detekcji na wyjściu. Fotony balistyczne są najbardziej pożądane, ponieważ pozwalają najdokładniej odwzorowywać strukturę wewnętrzną badanego obiektu. Ze względu na silną absorpcję i rozpraszanie oraz ograniczenie energii wysyłanej w kierunku badanego obiektu możliwości transiluminacji grubych warstw tkanek ograniczają się głównie do takich części ciała: ręce, stopy i piersi.

Mętność optyczna transiluminowanych obiektów utrudnia lub wręcz uniemożliwia lokalizację wewnętrznych składników anatomicznych. Poznawanie wpływu mętności na pozyskiwane obrazy transiluminacyjne jest istotnym etapem prac związanych z prześwietlaniem obiektów biologicznych.

W pracy omówiono efekty badań mętności optycznej na przykładzie fragmentu śródreżca. Eksperymentalnie poszukiwano odpowiedniej konfiguracji źródła promieniowania optycznego.

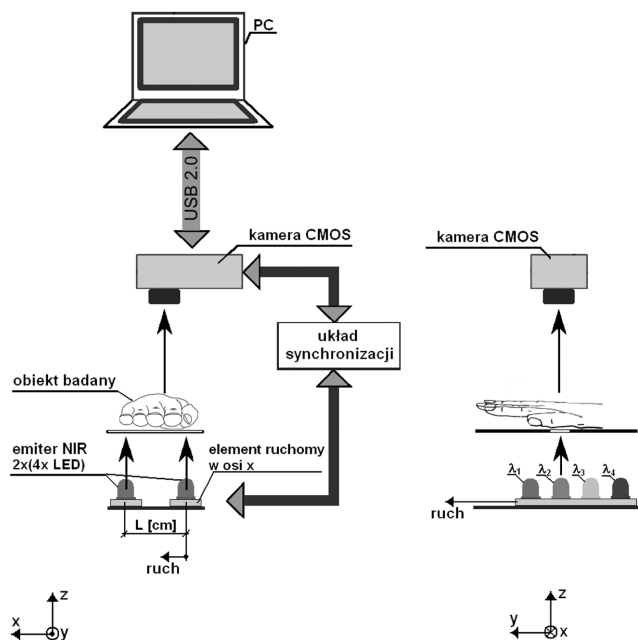
Przedstawiono wpływ odległości pomiędzy dwoma punktowymi źródłami promieniowania optycznego (LED), o różnych charakterystykach widmowych, na zarejestrowany wynik transiluminacji. Prezentację efektów prac eksperymentalnych poprzedzono omówieniem warunków badań.

## 2. Stanowisko badawcze

Stanowisko do badania mętności optycznej fragmentu śródręcza zaprojektowano przy następujących założeniach:

- punktowe źródło promieniowania optycznego w postaci czterech par diod LED (o różnych długościach fali  $\lambda$  z zakresu NIR);
- obiekt badań unieruchomiony względem kamery;
- w każdej ekspozycji prześwietlaniu podlega ten sam fragment śródręcza;
- w czasie ekspozycji załączana jest tylko jedna para LED znajdująca się w danym momencie pod badanym fragmentem śródręcza;
- wyniki badań pozwolą określić zależność wyniku transiluminacji od odległości pomiędzy punktowymi źródłami promieniowania oraz od charakterystyki widmowej wykorzystanych diod LED.

Stanowisko badawcze (rys. 2) składa się z dwupunktowego multichromatycznego emitera promieniowania optycznego, badanego obiektu oraz kamery CMOS.



Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska badawczego – widok z przodu i z boku  
Fig. 2. Block diagram of the measuring setup - front and back view

Emiter promieniowania z zakresu bliskiej podczerwieni to zestaw par diod LED o następujących długościach fali (odpowiednio dla każdej pary): 760, 860, 880 i 940 nm. Diody LED zamontowano na prowadnicach umożliwiających ruch w osi  $OX$  oraz  $OY$ . W osi  $OX$  ruch jednego z elementów odbywa się płynnie, umożliwiając nastawę odległości  $L$  pomiędzy źródłami punktowymi. Natomiast przesuw w osi  $OY$  odbywa się skokowo – jednocześnie dla każdej pary diod LED. Wielkość skoku odpowiada odległości pomiędzy osiami symetrii sąsiadujących diod emitujących promieniowanie o różnych długościach fali. Przesunięcie w osi  $OY$  ma za zadanie umiejscowienie wybranej pary diod LED zawsze pod tym samym punktem śródręcza. Obiekt badany unieruchamia się na nieprzepuszczalnej (dla promieniowania podczerwonego) płycie z otworem wyciętym wzdłuż osi  $OX$ . Odbiornikiem promieniowania jest monochromatyczna kamera CMOS UI-1240ME-NIR o podwyższonej czułości w zakresie bliskiej podczerwieni, wyposażona w obiektyw KMP-IR 8/1,4-M30,5 o charakterystyce

widmowej dostosowanej do użytych w badaniach diod LED. Kamera pracuje w trybie wyzwolenia zewnętrznego. Układ synchronizacji ma za zadanie wyzwolenie kamery oraz załączenie wybranej grupy diod LED na czas trwania ekspozycji. Obiektem badań jest fragment lewego śródręcza ułożony nieruchomo na podstawie ze szczeliną. Kamery oraz źródło promieniowania dołącza się do zewnętrznego komputera z zainstalowanym dedykowanym oprogramowaniem. Aplikacja umożliwia pozyskanie i przetwarzanie danych.

Stanowisko badawcze umożliwia zarejestrowanie wyniku transiluminacji w czasie ekspozycji wybranego fragmentu obiektu na działanie promieniowania optycznego o wybranej charakterystyce widmowej, pochodzącym z pary diod LED o zadawanej odległości pomiędzy nimi. Przy wybranej odległości, prześwietlanie odbywa się w danej chwili tylko dla jednej wybranej pary diod.

Z kamery pozyskuje się dyskretną reprezentację obrazu transiluminacyjnego w postaci maczy o wymiarach:  $M \times N$  (gdzie:  $M = 1280$  pikseli,  $N = 1024$  pikseli). Każdy elementarny składnik obrazu (piksel) może przyjmować tylko jeden spośród ograniczonej liczby stanów bpp (*bits per pixel*) [8]. W badaniach zastosowano monochromatyczną kamerę o formacie 8bpp. Wartość danego piksela  $q$  wyrażona w LSB opisuje jego jasność względną. Za pomocą formatu 8bpp można zakodować 256 stopni szarości. Skrajnymi wartościami formatu są:  $q = 0$  (odpowiadające czerni) i  $q = 255$  (odpowiadające bieli). Ze względu na możliwość przesterowania detektora kamery, należy unikać wartości 255.

Przed przystąpieniem do właściwego prześwietlania obiektu badanego dokonano pozycjonowania emiterów promieniowania optycznego z kamerą i ustalenie lokalizacji osi środkowych diod LED na obrazie. W celu zmniejszenia przesterowania detektora występującego podczas bezpośredniego oświetlenia kamery, emitory promieniowania przysłonięto materiałem optycznie jednorodnym. Dla tak przygotowanego stanowiska ustalono położenia diod (względem osi  $OX$  i  $OY$ ), zmniejszając odstęp pomiędzy diodami LED z krokiem  $\Delta L = 0,5$  cm, począwszy od  $L = 5,5$  cm. Z pozyskanych obrazów utworzono charakterystyki wzorcowe zamieszczone na rys. 3 i 4.

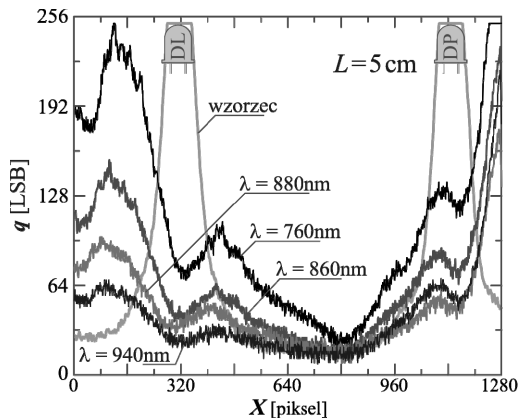
Przetwarzanie danych rozpoczyna się pobraniem wartości pikseli  $q$  zgromadzonych w wybranym wierszu maczy reprezentującej obraz otrzymany z kamery. W ten sposób uzyskano zależność jasności względnej piksela  $q$  od jego położenia  $X$  w wybranym wierszu, gdzie  $X$  zawiera się w przedziale od 0 do 1279 (liczba kolumn maczy wynosi:  $M-1$ ). Otrzymana w ten sposób charakterystyka jest pewnego rodzaju przekrojem poprzecznym optycznych właściwości transiluminowanego obiektu. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów pobranych z tego samego wiersza.

## 3. Wyniki badań i próba ich interpretacji

W trakcie ekspozycji maksymalna wzajemna odległość pary diod LED wynosiła  $L = 5,5$  cm. Eksperymentalnie stwierdzono, że taka odległość zapewnia brak „wyciekania” promieniowania poza obszar obiektu wywołującego przesterowanie detektora kamery. Odstęp pomiędzy diodami LED  $L$  zmieniano (zmniejszano) z krokiem  $\Delta L = 0,5$  cm. Odpowiada to zmianie położenia piksela w wierszu o  $\Delta X = 83$  pikseli. W ten sposób pozyskano charakterystyki  $q = f(X)$  dla dostępnych długości fali  $\lambda$ . W celu określenia wpływu charakterystyk widmowych diod LED na wynik transiluminacji wyznaczono charakterystyki  $q = f(X)$  dla dwóch wybranych odległości  $L$ . Na tych wykresach naniesiono charakterystyki wzorcowe wskazujące położenie diod LED. W trakcie omawianych badań położenie emitera oznaczonego DP nie ulegało zmianie. Dlatego prawa część wzorcowych charakterystyk ma taki sam kształt.

Na rys. 3 zestawiono charakterystyki  $q = f(X)$  dla różnych długości fali  $\lambda$  diod LED przy zachowaniu stałej odległości  $L = 5$  cm. Różnice pomiędzy charakterystykami dla różnych  $\lambda$  wynikają z właściwości optycznych transiluminowanego obiektu. Poza tym, w dużym stopniu spowodowane są zróżnicowaniem mocy optycz-

nej zastosowanych źródeł promieniowania oraz tłumienia toru optycznego obiektyw - detektor kamery (wzrastającego ze zbliżaniem długości fali  $\lambda$  do wartości 1000 nm).



Rys. 3. Zależności  $q = f(X, L = 5 \text{ cm})$  dla wybranych długości fali  $\lambda$  diod LED

Fig. 3. Changes in  $q = f(X)$  as a function of the wavelength for the distance  $L = 5 \text{ cm}$

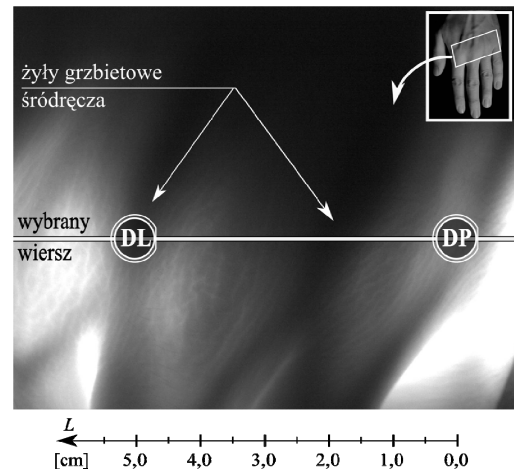
Cechą wspólną przebiegów jest powtarzalność występowania lokalnych ekstremów – zarówno maksimów jak i minimów. Ekstrema te niezależnie od długości fali  $\lambda$  diody LED pokrywają się dla określonego położenia piksela  $X$  na obrazie. Podobne zestawienie wyników pomiarów wykonano również dla innych odległości  $L$  pomiędzy diodami LED. Badania wykazały, że niezależnie od odległości między diodami, ekstrema lokalne krzywych (otrzymanych dla różnych wartości długości fali) pokrywają się.

Na rysunku 3 wierzchołki wzorca przedstawiające położenie emiterów po stronie wejściowej, nie pokrywają się z krzywymi transiluminacyjnymi obiektu. Oznacza to, że na obrazie prześwietlonego śródreżca fotony balistyczne stanowiły znikomą część w porównaniu z fotonami rozproszonymi. Można domniemywać, że na drodze propagacji promieniowania znajdował się obszar silnego rozpraszania z elementami silnie pochłaniającymi. Z analizy struktury anatomicznej ręki [9, 10] wynika, że elementami silnie pochłaniającymi prawdopodobnie były powierzchnio-wo położone żyły grzbietowe śródreżca (rys. 4) oraz głębiej zlokalizowane struktury takie jak: więzadła poprzeczne, mięśnie glistowate, mięśnie międzykostne wypełniające przestrzeń międzystawowe oraz tętnice dłoniowe wspólne palców. Ekstrema globalne (maksima) przesunięte względem diody LED pokrywają się z położeniem stawów. Stawy śródreżczno-paliczkowe, podobnie jak inne stawy, są połączeniami maziowymi, w których można wyróżnić następujące składniki główne:

- wolne, pokryte chrząstką powierzchnie stawowe kości łączących się w stawie;
- torebkę stawową, która otacza cały staw;
- jamę stawową.

Zewnętrznie staw pokrywają niezbyt grube warstwy mięśni oraz skóra. W skład skóry wchodzi m. in. eumelanina i feomelanina będące formami melaniny – odpowiednio ciemnym i jasnym barwnikiem. Ich wzajemny stosunek decyduje o naturalnym zabarwieniu skóry. Natomiast jama stawowa zawiera maź stawową składającą się w 95% (do 97%) z wody [9]. Dla wody wartość współczynnika absorpcji (rys. 1) wzrasta w przedziale zastosowanych długości fali od 760 nm do 940 nm, jednakże ma on wartość wciąż mniejszą niż utlenowana hemoglobina  $\text{HbO}_2$  (we krwi tętniczej). Natomiast wartość współczynnika absorpcji melaniny zmniejsza się wraz ze wzrostem długości fali. Wydaje się zatem uzasadnione, że w zakresie zastosowanego promieniowania optycznego obszary stawów charakteryzują się mniejszą absorpcją niż przestrzenie z nimi sąsiadujące.

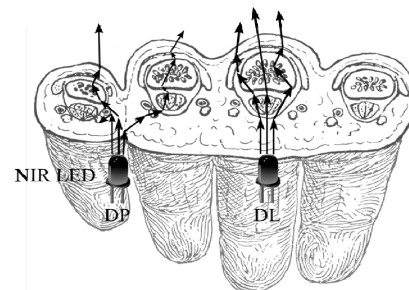
Na zdjęciu z rys. 4 zaznaczono lokalizację wiersza, dla którego wyznaczono zależność  $q = f(X, L = 5 \text{ cm})$ . Zdjęcie to obrazuje wynik transiluminacji, w której wykorzystano diody LED o  $\lambda = 760 \text{ nm}$ . Dla ułatwienia interpretacji obrazu naniesiono lokalizację emiterów promieniowania (znajdujących po drugiej stronie ręki) oraz umieszczono podziałkę pozwalającą określić położenie emiterów w podczas ekspozycji dla innych wartości  $L$ .



Rys. 4. Obraz transiluminacyjny dla  $\lambda = 760 \text{ nm}$  i  $L = 5 \text{ cm}$

Fig. 4. The transillumination image obtained for  $\lambda = 760 \text{ nm}$  and  $L = 5 \text{ cm}$

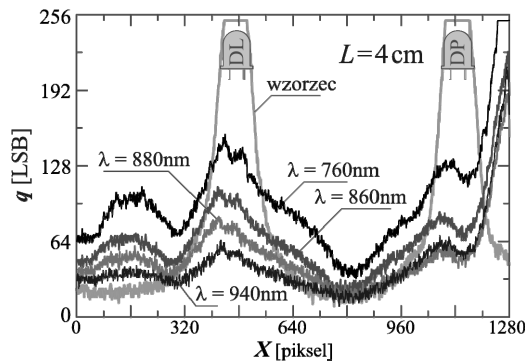
Opis propagacji fotonów w jednorodnym ośrodku mętnym optycznie jest zadaniem bardzo złożonym. Zadanie się jeszcze bardziej komplikuje w przypadku transiluminacji obiektu niejednorodnego. Na rys. 5 pokazano przykładowe propagacje fotonów w trakcie transiluminacji śródreżca.



Rys. 5. Przykładowe trajektorie propagacji fotonów (struktura anatomiczna [10])

Fig. 5. Examples of the propagation trajectories of photons (anatomical layout [10])

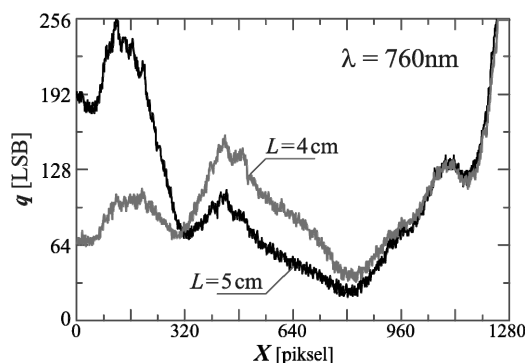
Przed diodą LED (oznaczoną DP) umiejscowioną po lewej stronie rys. 5 znajdują się naczynia krwionośne (tętnice dłoniowe wspólne palców) oraz mięśnie międzykostne i glistowate. Są to elementy silnie tłumiące promieniowanie optyczne. Skutkuje to tym, że prawdopodobieństwo propagacji fotonu balistycznego jest znikome i na drugą stronę obiektu docierają tylko silnie rozproszone fotony. Przejawia się to niezgodnością położenia ekstremów, tak jak na rys. 3. Natomiast dioda LED (oznaczona DL) z prawej strony rys. 5 nie jest przesłonięta blisko położonymi naczyniami krwionośnymi. Dzięki temu po drugiej stronie obiektu występują fotony zarówno słabo, jak i silnie rozproszone. Wyniki transiluminacji dla takiego położenia diody LED przedstawia zestaw charakterystyk  $q = f(X)$  na rys. 6. Dla odległości  $L = 4 \text{ cm}$  maksimum krzywej wzorcowej pokrywa się z ekstremami (maksimami) charakterystyk  $q = f(X)$ . Z analizy zdjęcia z rys. 4 wynika, że dla  $L = 4 \text{ cm}$  dioda LED znajduje się pod stawem śródreżczno-paliczkowym palca środkowego.



Rys. 6. Zależność  $q = f(X, L = 4 \text{ cm})$  dla wybranych długości fali  $\lambda$  diod LED

Fig. 6. Changes in  $q = f(X)$  as a function of the wavelength for the distance  $L = 4 \text{ cm}$

Z porównania charakterystyk otrzymanych dla  $L = 5 \text{ cm}$  i  $L = 4 \text{ cm}$  wynika, że zmiana lokalizacji diody LED powoduje uwydatnienie ekstremów lokalnych znajdujących się w sąsiedztwie źródła optycznego oraz zmniejszenie ekstremów zlokalizowanych dalej od źródła. Obserwacja krzywych na rys. 7 pozwala na stwierdzenie, że w wyniku zmiany odległości  $L$  (czyli położenia diody LED względem struktury badanego obiektu) ekstrema charakterystyki  $q = f(X)$  zmieniają swoją wartość (w osi  $q$ ), ale ich położenie na osi  $X$  pozostaje stałe.

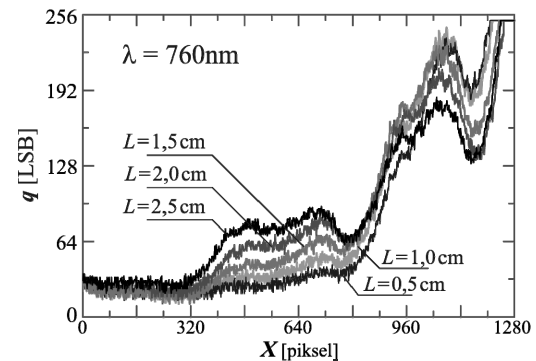


Rys. 7. Zależności  $q = f(X, \lambda = 760 \text{ nm})$  dla odległości  $L$  wynoszących 4 i 5 cm

Fig. 7. Changes in  $q = f(X)$  as a function of the distance  $L = 4$  or 5 cm for the wavelength 760 nm

Potwierdzeniem wpływu położenia diod LED względem struktury badanego obiektu na kształt charakterystyki  $q = f(X)$  jest zestaw zależności przedstawionych na rys. 8. Został on przygotowany dla odległości  $L$  w przedziale od 0,5 cm do 2,5 cm. Zmiana odległości  $L$  nie wpływa na położenie ekstremów na osi  $X$ .

Opisane wyniki doświadczeń pozwalają na określenie wpływu odległości pomiędzy punktowymi źródłami promieniowania optycznego na jakość odwzorowania wybranej peryferyjnej części ciała. Położenie ekstremów charakterystyki  $q = f(X)$  zależy od budowy anatomicznej transiluminowanego obiektu. Jednak w miarę zbliżania diody LED do ekstremum kształt krzywej  $q = f(X)$  podlega widocznej modyfikacji. Przejawia się to uwypukleniem ekstremum a pole powierzchni pod krzywą rośnie. Ponieważ charakterystyki  $q = f(X)$  wyznaczono przy stałej mocy optycznej emitera, pole powierzchni można traktować jako wskaźnik jakości konfiguracji emitera promieniowania. Największą wartość pola przyjmuje krzywa uzyskana dla  $L = 2,5 \text{ cm}$ . Na obecnym etapie badań wydaje się, że odstęp między punktowymi źródłami promieniowania nie jest krytycznym warunkiem otrzymania prawidłowej ekspozycji mętno optycznie obiektu.



Rys. 8. Zależności  $q = f(X, \lambda = 760 \text{ nm})$  dla odległości  $L$  wynoszących 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 i 2,5 cm

Fig. 8. Changes in  $q = f(X)$  as a function of the distance  $L$  for the wavelength 760 nm

## 4. Podsumowanie

W pracy opisano warunki i wyniki badań mętności optycznej przykładowej peryferyjnej części ciała. Prace eksperymentalne miały na celu poszukiwanie takiej konfiguracji dwupunktowego źródła promieniowania optycznego, która zapewniałaby najlepsze odwzorowanie transiluminowanego obiektu. Analiza uzyskanych wyników badań prowadzi do stwierdzenia, że obraz transiluminacyjny w dużym stopniu zależy od wzajemnego położenia diod LED i silnie pochłaniających elementów prześwietlanego obiektu. O ile położenie ekstremów charakterystyki  $q = f(X)$  zależy głównie od struktury anatomicznej obiektu, to wartości ekstremalne w dużym stopniu zależą także od położenia punktowych źródeł promieniowania względem obiektu. Jest to poważne utrudnienie w praktycznym wykorzystaniu transiluminacji optycznej w badaniach biomedycznych prowadzące do znaczącego wzrostu skomplikowania algorytmów identyfikujących strukturę badanego obiektu.

## 5. Literatura

- [1] Cheong W.F., Prah S.A., Welch A.J.: A review of the optical properties of biological tissues. IEEE J. Q. Electron. vol. 26, pp. 2166-2185, 1990.
- [2] Wiczyński G.: Transillumination of peripheral parts of the body with the use of optical radiation, Proc. of SPIE, vol. 6348, pp. 63480K, 2006.
- [3] Szczepanowski R., Mroczka J.: Model dyfuzji fotonów w diagnostyce krwi, Metrologia w procesie poznania. Kongres Metrologii. KM. Materiały kongresowe, Wrocław, 6-9.09.2004. T. 2, s. 543-546, 2004.
- [4] Xu R.: Biomedical Imaging by Near Infrared Light, <http://medimage.bmi.ohio-state.edu> (ostatni dostęp: 28.01.2013).
- [5] Anderson R. R., Parrish J. A.: The optics of human skin, J. Invest. Dermatol, 77: 13-19, 1981.
- [6] Cysewska-Sobusiak A.: Problemy metrologiczne identyfikacji cech obiektu żywego poddanego nieinwazyjnej transiluminacji, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1995.
- [7] Van Assendelft O. W.: Spectrophotometry of hemoglobin derivatives, Royal Vangorcum Ltd., Assen, The Netherlands, 1970.
- [8] Tadeusiewicz R., Korohoda P.: Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów, Wyd. Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków, 1997.
- [9] Bochenek A., Reicher M., Bilikiewicz T., Hiller S., Stołyhwo E.: Anatomia człowieka, Tom I, Anatomia ogólna, kości, stawy i więzadła, mięśnie, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 1965.
- [10] The Division of General Surgery, Manual of Surgical Anatomy, Washington, DC: Medical Departments U.S. Army and Navy, 1918. Pobrano z: [http://etc.usf.edu/clipart/52800/52852/52852\\_fingers.htm](http://etc.usf.edu/clipart/52800/52852/52852_fingers.htm) (ostatni dostęp: 28.01.2013).