

**Krzysztof OKARMA**

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE,  
ul. 26. Kwietnia 10, 71-126 Szczecin

## Analiza wpływu dwuwymiarowych funkcji okien na liniową korelację nowoczesnych miar jakości obrazu z oceną subiektywną

Dr inż. Krzysztof OKARMA

Adiunkt w Katedrze Przetwarzania Sygnałów i Inżynierii Multimedialnej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Absolwent Wydziału Elektrycznego (1999) i Informatyki (2001) Politechniki Szczecińskiej, stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziale Elektrycznym (2003), gdzie pełni funkcję prodziekana ds. studenckich. Autor ponad 90 publikacji z zakresu przetwarzania i analizy obrazów oraz sygnałów.



e-mail: okarma@zut.edu.pl

### Streszczenie

W artykule zamieszczono analizę wpływu funkcji przesuwne okna 2-D użytego przy wyznaczaniu wartości dwóch nowoczesnych miar jakości obrazu (Multi-Scale SSIM oraz VIF) na ich korelację z oceną subiektywną. Użyte obrazy testowe są dostępne wraz z subiektywnymi ocenami DMOS jako tzw. baza LIVE zawierająca 982 obrazy poddane pięciu typom zniekształceń. Uzyskane wyniki przeanalizowano pod kątem korelacji liniowej dla dwuwymiarowych wersji kilku typowych okien znanych z widmowej analizy sygnałów.

**Słowa kluczowe:** ocena jakości obrazów cyfrowych, okna czasowe 2-D, podobieństwo strukturalne.

### Analysis of influence of two-dimensional windowing functions on linear correlation of modern image quality metrics with subjective evaluation

#### Abstract

In this paper there is presented the analysis of influence of a two-dimensional sliding window on the correlation of two modern image quality metrics (MS-SSIM and VIF) with subjective evaluation. The experiments have been performed using a dataset of images with some typical contaminations. These images can be found, together with subjective DMOS scores, as LIVE Image Quality Assessment Database containing 982 images with five common types of distortions. The quality assessment results obtained for these images have been analysed in the aspect of the linear correlation with subjective evaluation using various types of windowing functions. In order to examine the impact of the windowing function on the correlation, some well known window functions typically used in many signal processing applications have been applied in two-dimensional versions as the sliding windows within the quality assessment procedure. The obtained results presented in this paper, together with some previously published ones related to the relationship between the optimal window size for the Structural Similarity metric and the image resolution, can lead to the development of further modifications of the existing image quality assessment methods. The direction of further research should be aimed at even better fitting of objective metrics to human perception of digital images.

**Keywords:** digital image quality assessment, two-dimensional windows, structural similarity.

## 1. Wprowadzenie

Użyteczność metod obiektywnej oceny jakości obrazów cyfrowych, w szczególności należących do grupy metod skalarnych, jest bardzo duża. Komputerowa analiza obrazu prowadząca do wyrażenia jego jakości za pomocą pojedynczej wartości liczbowej jest atrakcyjna, szczególnie z punktu widzenia różnorodnych metod optymalizacji algorytmów przetwarzania obrazów, a także ich stratnej kompresji. Obiektywne metody oceny jakości obrazów

stanowią także podstawę do bardziej rozbudowanych technik oceny jakości sygnałów wideo.

## 2. Nowoczesne miary jakości obrazów oparte na podobieństwie strukturalnym

Przez dziesiątki lat porównawcza ocena jakości obrazów oparta była na błędzie średniokwadratowym oraz podobnych do niego wskaźnikach [1], których korelacja z wrazeniami subiektywnymi była dyskusyjna. Biorąc to pod uwagę, zaproponowanie w 2002 roku [2] techniki oceny jakości opartej na iloczynie trzech czynników, znacznie lepiej odpowiadających sposobowi postrzegania typowych zniekształceń obrazu przez oko ludzkie, można uznać za swoistą rewolucję w dziedzinie przetwarzania i analizy obrazów. Twórcy tej miary, nazwanej uniwersalnym wskaźnikiem jakości obrazu (*Universal Image Quality Index*), zwrócili jednak uwagę na jej niestabilność dla ciemnych i płaskich fragmentów obrazu, co zaowocowało zdefiniowaniem tzw. podobieństwa strukturalnego (*Structural SIMilarity - SSIM*) wyrażonego w zwartej formie jako [3]:

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)} \cdot \frac{(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (1)$$

gdzie średnie wartości jasności fragmentów obrazu oryginalnego i ocenianego, wariancje oraz kowariancja obliczane są jako:

$$\mu_x = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij}, \quad \mu_y = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{ij}, \quad (2)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N^2 - 1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \mu_x)^2, \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{N^2 - 1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \mu_y)^2, \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N^2 - 1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \mu_x)(y_{ij} - \mu_y). \quad (4)$$

Rolę zabezpieczającą przed dzieleniem przez zero pełnią współczynniki oznaczone jako  $C_1$  oraz  $C_2$ , które powinny być na tyle małymi liczbami, aby nie wprowadzać istotnego błędu jeśli wartości mianowników nie są bliskie zero. Proponowane przez twórców wskaźnika SSIM wartości wynoszą  $C_1 = 0.01 \times L$  oraz  $C_2 = 0.03 \times L$ , gdzie  $L$  oznacza wartość maksymalnej jasności pikseli (typowo  $L = 255$  dla obrazów 8-bitowych).

Zakładając zerowe wartości tych współczynników, uzyskujemy definicję uniwersalnego wskaźnika jakości obrazu, z tą dodatkową różnicą, iż obie miary wykorzystują różne funkcje wagowe wewnątrz przesuwne okna do obliczania lokalnego wskaźnika jakości dla fragmentów obrazu zgodnie z zależnością (1).

Stosując okno przesuwne o rozmiarze  $N \times N$  pikseli, dla którejkolwiek z obu miar, uzyskać można tzw. mapę jakości obrazu o rozdzielczości mniejszej od rozdzielczości ocenianego obrazu o  $N-1$  wierszy i  $N-1$  kolumn. Jako skalarny wskaźnik jakości dla całego obrazu przyjmuje się wartość uśrednioną z całej mapy jakości.

W przypadku definicji uniwersalnego wskaźnika jakości obrazu używano okna o rozmiarze  $8 \times 8$  pikseli bez żadnej funkcji wagowej, co w teorii sygnałów odpowiada dwuwymiarowemu oknu prostokątnemu. Z kolei definicja podobieństwa strukturalnego określa okno przesuwne o rozmiarze  $11 \times 11$  pikseli jako spróbkowaną dwuwymiarową funkcję Gaussa. Prosty eksperyment z wykorzystaniem obrazu bez ciemnych plam oraz bez obszarów

o stałej intensywności w obrębie całego okna pozwala stwierdzić zauważalne różnice w wartościach uzyskiwanych dla obu miar spowodowane wyłącznie wpływem użytej funkcji okna. W wypadku wskaźnika podobieństwa strukturalnego (SSIM) wpływ zarówno kształtu, jak również wielkości funkcji okna został określony, co zostało przedstawione w poprzednich publikacjach [4-6].

Rozwinięcie wskaźnika SSIM, określane jako Multi-Scale SSIM, oparte jest na idei analizy obrazu w różnej skali na zasadzie piramidy dwójkowej. Trzy elementy występujące w iloczynie we wskaźniku SSIM (zniekształcenie luminancji –  $l$ , utrata kontrastu –  $c$  oraz zaburzenie struktury –  $s$ ) są ważone przy użyciu wykładników określonych osobno dla każdej skali. Definicja tego wskaźnika może być wyrażona jako:

$$MS - SSIM = (I_M)^{\alpha_M} \cdot \prod_{j=1}^M [(c_j)^{\beta_j} \cdot (s_j)^{\gamma_j}] \quad (5)$$

gdzie  $M$  oznacza najwyższy współczynnik skali uzyskany po  $M-1$  iteracji składających się z operacji filtracji dolnoprzepustowej oraz dwukrotnego zmniejszenia rozdzielczości obrazu [7].

Kolejnym interesującym pomysłem opartym na podobnych założeniach jest wykorzystanie wskaźnika wierności informacji wizualnej (*Visual Information Fidelity* - VIF) opartego na dekompozycji falkowej lub obliczanego w dziedzinie płaszczyzny obrazu dla pikseli znajdujących się wewnątrz okna. Warto zauważyć, że wersja działająca w dziedzinie pikseli (VIFp) jest szybsza, a zamiast podpasm dekompozycji falkowej są używane współczynniki skali obrazu. Ogólną definicję wskaźnika VIF można przedstawić jako [8, 9]:

$$VIF = \frac{\sum_{j=0}^S \sum_{i=0}^{M_j} I(c_{i,j}; f_{i,j})}{\sum_{j=0}^S \sum_{i=0}^{M_j} I(c_{i,j}; e_{i,j})} \quad (6)$$

gdzie  $S$  oznacza liczbę podpasm,  $M_j$  oznacza liczbę bloków dla  $j$ -tego podpasma, natomiast  $I(a;b)$  oznacza współczynnik wzajemnej wymiany informacji (*mutual information*) pomiędzy  $a$  oraz  $b$ . Mianownik oraz licznik wyrażenia (6) reprezentują odpowiednio informację uzyskaną z obrazu odniesienia i ocenianego. Współczynnik wzajemnej wymiany informacji obliczany jest na podstawie percepcji ( $e$ ) dwóch odpowiadających sobie bloków obrazu referencyjnego ( $c$ ) z szumem addytywnym  $n$  oraz percepcji ( $f$ ) bloku obrazu zniekształconego.

W obu przedstawionych metodach domyślną funkcją okna wykorzystywaną w obliczeniach jest dwuwymiarowe okno Gaussa o rozmiarze  $11 \times 11$  pikseli, podobnie jak ma to miejsce dla wskaźnika SSIM. Celowe jest zatem zbadanie wpływu kształtu funkcji okna na uzyskiwane wyniki, w szczególności na ich korelację z subiektywnymi ocenami jakości obrazów, także dla miar jakości stanowiących rozwinięcie idei podobieństwa strukturalnego.

### 3. Dwuwymiarowe funkcje okien

Zasadniczym celem stosowania okien czasowych w widmowej analizie sygnałów jednowymiarowych jest redukcja niekorzystnego efektu rozmycia widmowej gęstości mocy. Efekt ten jest spowodowany skończonym czasem obserwacji dyskretnego ciągu próbek sygnału, co powoduje jego gwałtowne obcięcie równoznaczne ze stosowaniem okna prostokątnego. Do celów analizy widmowej sygnałów, a także projektowania filtrów cyfrowych o skończonej odpowiedzi impulsowej, zaproponowano szereg okien czasowych o kształtach powodujących łagodniejsze "obcinanie" ciągu obserwowanych próbek.

Za najprostsze okno, wyłączając prostokątne, uznać można okno Bartletta, mające kształt symetrycznego trójkąta. Zakładając, iż wszystkie okna dane są w postaci znormalizowanej tzn. mają wartość równą 1 na środku przedziału obserwacji, dla nieparzystej ilości próbek będzie się ono charakteryzowało wartościami równymi 0 dla próbek skrajnych oraz 1 dla próbki środkowej.

Do najpopularniejszych okien czasowych, powszechnie stosowanych w przetwarzaniu sygnałów jednowymiarowych, zaliczyć można okna z rodziny kosinusoidalnych: Hamminga, Hanną oraz Blackmana [10] określone odpowiednio (w postaci ciągłej zakładając przedział obserwacji, w którym zdefiniowana jest funkcja okna jako  $\langle -T; T \rangle$ ) następującymi wzorami:

$$w_{Hm}(t) = 0.54 + 0.46 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right) \quad (7)$$

$$w_{Hn}(t) = 0.5 + 0.5 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right) \quad (8)$$

$$w_{Bl}(t) = 0.42 + 0.5 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right) + 0.08 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right) \quad (9)$$

Ponadto, dla celów porównawczych, w niniejszej pracy użyto okien Parzena (rzadziej określane jako okno de la Valle-Poussina [10]) oraz Nuttalla [11], również zaliczanego do grupy okien kosinusoidalnych, zdefiniowanych odpowiednio jako:

$$w_p(t) = \begin{cases} 1 - 6 \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{|t|}{T}\right) & \text{dla } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 2 \cdot \left(1 - \frac{|t|}{T}\right)^3 & \text{dla } \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (10)$$

$$w_{Nut}(t) = 0.3635819 + 0.4891775 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right) + 0.1365995 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right) + 0.0106411 \cdot \cos\left(\frac{3\pi \cdot t}{T}\right) \quad (11)$$

Przekształcenie postaci okien jednowymiarowych do postaci dwuwymiarowej zostało zrealizowane w postaci iloczynu wartości funkcji okna w kierunku poziomym i pionowym. W celu analizy wpływu wyłącznie kształtu okna na uzyskiwane wyniki przyjęto stały rozmiar okna przesuwonego równy  $11 \times 11$  pikseli zgodnie z zaleceniami twórców wskaźnika SSIM.

### 4. Zastosowanie funkcji okien do obliczenia wartości wskaźników jakości obrazu

W celu zbadania wpływu zastosowanej funkcji okna na zgodność wskaźników Multi-Scale SSIM oraz VIF z oceną subiektywną przeprowadzono obliczenia obu wartości z wykorzystaniem ośmiu różnych funkcji okien o rozmiarze  $11 \times 11$  pikseli dla 982 obrazów stanowiących tzw. bazę LIVE [12]. Jest to powszechnie stosowana baza 29 obrazów poddanych pięciu rodzajom zniekształceń o różnych intensywnościach wraz z uśrednionymi ocenami subiektywnymi w postaci wartości DMOS (Differential Mean Opinion Scores) przeskalowanych do zakresu  $\langle 0; 100 \rangle$ . Ze względu na fakt, iż 203 spośród ocen dotyczą obrazów oryginalnych, dla których wartości obu rozważanych miar jakości są z założenia równe 1, zostały one wyłączone z analizy, aby nie powodowały zawyżenia współczynników korelacji, pomimo iż w wielu publikacjach prezentowane są wyniki analiz dla całej bazy. Po obliczeniu wartości wskaźników jakości z użyciem różnych funkcji okien dla poszczególnych rodzajów zniekształceń, jak również dla wszystkich zniekształconych obrazów dostępnych w bazie LIVE, wyznaczono współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy wartościami wskaźników MS-SSIM oraz DMOS zebrane w tabeli 1, a także analogiczne współczynniki korelacji pomiędzy wartościami VIF oraz DMOS (tabela 2). W obu tabelach pogrubieniem czcionki zaznaczono wskaźniki korelacji wyższe aniżeli uzyskane dla standardowego okna Gaussa, przy czym wyniki najlepsze zaznaczono dodatkowo pochylem. Obliczenia

wykonano dla składowej luminancyjnej występującej w "telewizyjnych" modelach barw YUV/YIQ.

Analizując uzyskane wyniki można zauważyć, iż istnieje zależność pomiędzy kształtem funkcji okna a korelacją uzyskiwanych wyników z subiektywnymi ocenami jakości zniekształconych obrazów.

W wypadku obu rozpatrywanych miar jakości można zauważyć, iż współczynnik korelacji dla całej bazy jest znacznie niższy aniżeli dla każdego z pięciu rodzajów zniekształceń osobno, co jest naturalne ze względu na różnorodność typów zniekształceń obrazu (zaszumienie, kompresja, rozmycie, błędy bitowe).

Dla wskaźnika Multi-Scale SSIM w zdecydowanie największej liczbie przypadków najefektywniejsze okazało się okno prostokątne, co ma tę zaletę, iż umożliwia dodatkowe zmniejszenie złożoności obliczeniowej procedury oceny jakości. W wypadku miary VIF uzyskano wyższe wskaźniki korelacji, jednak pomimo najlepszych ogólnych wyników uzyskanych dla okna prostokątnego, dla poszczególnych rodzajów zniekształceń nieco lepsze okazywały się inne rodzaje okien (np. okno Nuttalla w wypadku kompresji).

Tab. 1. Współczynniki korelacji liniowej wartości wskaźnika MS-SSIM uzyskane dla różnych funkcji okien z oceną subiektywną (wartościami DMOS)

Tab. 1. Linear correlation coefficients of the MS-SSIM index with subjective evaluation (DMOS values) obtained for various windowing functions

Zniekształcenie / Funkcja Okna	JPEG	JPEG 2000	Szum biały	Rozmycie Gaussa	Symulowany kanał z zanikami Rayleigha	Wszystkie
Gausa	0,6995	0,8155	0,7489	0,7023	0,7046	0,4762
prostokątna	0,6976	<b>0,8230</b>	<b>0,7534</b>	<b>0,7032</b>	0,6961	<b>0,4942</b>
Bartletta	0,6990	<b>0,8178</b>	<b>0,7505</b>	0,6987	0,7004	<b>0,4841</b>
Hamminga	<b>0,6995</b>	<b>0,8181</b>	<b>0,7508</b>	0,6997	0,7001	<b>0,4842</b>
Hanna	0,6992	<b>0,8168</b>	<b>0,7500</b>	0,6997	0,7017	<b>0,4818</b>
Blackmana	0,6994	<b>0,8158</b>	<b>0,7493</b>	0,7013	0,7036	<b>0,4784</b>
Nuttalla	0,6991	<b>0,8157</b>	<b>0,7510</b>	0,7018	0,7038	<b>0,4791</b>
Parzena	0,6994	<b>0,8158</b>	<b>0,7493</b>	0,7014	0,7037	<b>0,4781</b>

Tab. 2. Współczynniki korelacji liniowej wartości wskaźnika VIFp uzyskane dla różnych funkcji okien z oceną subiektywną (wartościami DMOS)

Tab. 2. Linear correlation coefficients of the VIFp index with subjective evaluation (DMOS values) obtained for various windowing functions

Zniekształcenie / Funkcja okna	JPEG	JPEG 2000	Szum biały	Rozmycie Gaussa	Symulowany kanał z zanikami Rayleigha	Wszystkie
Gausa	0,9232	0,9285	0,8708	0,9484	0,9578	0,7528
prostokątna	0,9098	0,9142	<b>0,8721</b>	0,9391	0,9492	<b>0,7614</b>
Bartletta	<b>0,9236</b>	<b>0,9291</b>	0,8706	<b>0,9494</b>	<b>0,9579</b>	0,7515
Hamminga	<b>0,9232</b>	<b>0,9286</b>	<b>0,8709</b>	<b>0,9488</b>	<b>0,9578</b>	<b>0,7529</b>
Hanna	<b>0,9265</b>	<b>0,9319</b>	0,8696	<b>0,9488</b>	<b>0,9588</b>	0,7464
Blackmana	<b>0,9299</b>	<b>0,9354</b>	0,8676	0,9466	<b>0,9592</b>	0,7391
Nuttalla	<b>0,9312</b>	<b>0,9364</b>	0,8661	0,9451	<b>0,9594</b>	0,7355
Parzena	<b>0,9305</b>	<b>0,9358</b>	0,8668	0,9459	<b>0,9594</b>	0,7373

## 5. Podsumowanie i wnioski

Metody oceny jakości rozważane w niniejszym artykule należą do grupy metod obiektywnych wymagających pełnej znajomości obrazu oryginalnego (porównawczych, czyli tzw. *full-reference*). Nie należy jednak traktować tego jako znaczącej wady ze względu na dużą uniwersalność takiego podejścia. Aktualnie znane są

również metody tzw. "ślepej" (*no-reference*) oceny jakości obrazów [13], nie wykorzystujące w ogóle informacji o obrazach oryginalnych, w przeciwieństwie do niektórych typu *reduced-reference* (wymagających częściowej informacji o oryginale) [14]. Są one zwykle specjalizowane, pozwalając estymować wielkość zniekształceń obecnych w obrazie tylko dla określonego ich typu, najczęściej rozmycia lub artefaktów blokowych charakterystycznych dla kompresji JPEG.

Przedstawione wyniki badania korelacji liniowej nowoczesnych porównawczych miar jakości obrazów z ocenami subiektywnymi w zestawieniu z uzyskanymi uprzednio wynikami [5] dotyczącymi zależności pomiędzy optymalną wielkością okna dla wskaźnika SSIM a rozdzielczością ocenianego obrazu pozwolą mogąc na opracowanie kolejnych modyfikacji znanych wskaźników jakości obrazów charakteryzujących się jeszcze lepszym dopasowaniem do ludzkiej percepcji obrazów cyfrowych.

## 6. Literatura

- [1] Eskicioglu A.: Quality Measurement for Monochrome Compressed Images in the Past 25 Years. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, Istanbul, Turkey, pp. 1907 – 1910, 2000
- [2] Wang Z., Bovik A.: A Universal Image Quality Index. IEEE Signal Processing Letters, vol. 9, no. 3, pp. 81–84, 2002.
- [3] Wang Z., Bovik A., Sheikh H., Simoncelli E.: Image Quality Assessment: From Error Measurement to Structural Similarity. IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600–612, 2004.
- [4] Okarma K.: Colour Image Quality Assessment using Structural Similarity Index and Singular Value Decomposition. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5337, pp. 55 – 65, 2009.
- [5] Okarma K.: Two-Dimensional Windowing in the Structural Similarity Index for the Colour Image Quality Assessment. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5702, pp. 501 – 508, 2009.
- [6] Okarma K.: Optymalizacja korelacji szybkiej metody estymacji jakości obrazów opartej na podobieństwie strukturalnym z oceną subiektywną, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 55, nr 7/2009, pp. 444 – 446.
- [7] Wang Z., Simoncelli E., Bovik A.: Multi-Scale Structural Similarity for Image Quality Assessment. Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, California, USA, 2003.
- [8] Sheikh H.R., Bovik A.C., de Veciana G.: An Information Fidelity Criterion for Image Quality Assessment Using Natural Scene Statistics. IEEE Transactions on Image Processing, vol. 14, no. 12, pp. 2117 – 2128, 2005.
- [9] Sheikh H.R., Bovik A.C.: Image Information and Visual Quality. IEEE Transactions on Image Processing, vol. 15, no. 2, pp. 430 – 444, 2006.
- [10] Harris F.J.: On the Use of Windows for Harmonic Analysis with Discrete Fourier Transform. Proceedings of the IEEE, vol. 66, no. 1, pp. 51–83, 1978.
- [11] Nuttall A.H.: Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 29, no. 1, pp. 84–91, 1981.
- [12] Sheikh H.R., Wang Z., Cormack L., Bovik A.C.: LIVE Image Quality Assessment Database Release 2. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>
- [13] Li X.: Blind Image Quality Assessment. Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Rochester, USA, pp. 449 – 452, 2002.
- [14] Okarma K., Lech P.: A Statistical Reduced-Reference Approach to Digital Image Quality Assessment. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5337, pp. 43 – 54, 2009.

otrzymano / received: 13.05.2010

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2010

artykuł recenzowany