

Promocja testów czułości kontrastowej

Mgr Małgorzata Patrzykont^{1,2}, Dr hab. Jacek Pniewski¹

¹ Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

² Klinika Chirurgii Okulistycznej „OPTEGRA,” Warszawa

Wprowadzenie

W praktyce optometrycznej przy ocenie jakości widzenia i doborze korekcji optycznej bazujemy zazwyczaj na pomiarze ostrości wzroku z użyciem różnego rodzaju tablic optotypów. W starszej wersji – papierowych, a w nowszej – wyświetlanych z użyciem projektora lub monitora (np. ekranu LCD). Standardowe tablice są konstruowane tak aby uzyskać możliwie najwyższy kontrast przedstawianych optotypów, jednak poza gabinetem optometrycznym świat nie jest czarno-biały, zatem warto sprawdzić jak pacjenci czują się w świecie o niższym kontraście. Ogólnie, czy warto badać funkcjonowanie wzroku w warunkach zmniejszonego kontrastu? Czy takie badanie – wykonywane z reguły dość rzadko w codziennej praktyce, a dostępne niemal każdemu optometryście – ma jakiś sens? Na czym polega? Jakich informacji diagnostycznych dostarcza? Celem niniejszego artykułu jest przypomnienie najważniejszych informacji na temat kontrastu i czułości kontrastowej (wrażliwości, czułości na kontrast), przybliżenie czytelnikom różnych sposobów pomiaru i ich zalet, a co za tym idzie zachęcenie do korzystania z nich we własnych praktykach.

Podstawowe pojęcia

Zdolność rozdzielcza. Określa zdolność do rozróżniania obiektów. W przypadku wzroku przyjmuje się jako normę zdolność rozróżnienia dwóch punktowych źródeł światła widocznych pod kątem 1' (minuty kątowej). Dla wzoru paskowego (prążkowego) lub sinusoidalnego są to 2', zaś w przypadku liter lub innych symboli – 5'.

Częstość przestrzenna. Określa liczbę cykli jakiegoś zjawiska okresowego na jednostkę długości bądź jednostkę kątową, czyli np. we wzorze sinusoidalnym liczbę jasnych i ciemnych prążków przypadających na każdy metr albo stopień. W omawianych dalej testach najczęściej używa się stopnia jako jednostki miary kąta pod jakim widać omawiany wzór lub symbol, zatem częstość przestrzenna podawana jest jako liczba cykli na stopień. W literaturze fachowej możemy spotkać się ze skrótem cpd (ang. *cycles per degree*). Przykładowo, jeśli zanalizujemy sinusoidalny wzór paskowy, w którym białe paski powtarzają się co 2' to otrzymamy częstość przestrzenną 30 cpd.

Kontrast. Istnieje wiele sposobów oceny kontrastu obserwowanego obrazu, zależnych od jego typu, np. kontrast Webera, Michelsona, czy błąd średniokwadratowy (RMSE, ang. *root mean square error*). Dwa pierwsze stosuje się w przypadku, gdy analizujemy obraz zawierający powtarzalne elementy, dla których łatwo wyznaczyć maksymalne I_{max} i minimalne I_{min} natężenie światła (bądź wartości pikseli w wersji cyfrowej), na przykład wzór sinusoidalny. Wtedy kontrast Webera jest równy $V_w = (I_{max} - I_{min})/I_{min}$, zaś kontrast Michelsona $V_w = (I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$. W przypadku, gdy obraz (cyfrowy) jest bardziej skomplikowany, oblicza się także RMSE, który należy interpretować jako „średnią różnicę natężenia w każdym punkcie obrazu (pikselu) w stosunku do wartości średniej z całego obrazu”. Definicja RMSE (lub w wersji MSE, czyli bez pierwiastka) jest bardziej skomplikowana niż poprzednie

i liczy się ją komputerowo, bo trzeba zanalizować wszystkie punkty obrazu (piksele):

$$RMSE = \left[\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \bar{x} \text{ jest wartością średnią z całego obrazu. Ważne są zakresy warto-}$$

ści, jakie mogą przyjmować poszczególne miary kontrastu: kontrast Webera od 0 do ∞ (tylko teoretycznie), kontrast Michelsona od 0 do 1, zaś RMSE nie może przekroczyć dostępnej dynamiki skali szarości. Łatwo zauważyć, że wszystkie te miary są sobie równe w przypadku gdy obraz jest jednolitą szarą powierzchnią (o stałym natężeniu) i wynoszą 0.

Standardowy pomiar ostrości wzroku oparty na optotypach to właśnie badanie zdolności rozdzielczej przy wysokich częstościach przestrzennych, w warunkach maksymalnego kontrastu. Im mniejsze optotypy, tym wyższa częstość przestrzenna. Warto podkreślić, że jest to badanie podmiotowe, które zależy nie tylko od stanu układu optycznego oka, ale od całości układu wzrokowego i wynik badania jest uzyskiwany na bazie interpretacji odpowiedzi udzielanych przez pacjentów. Obniżona ostrość wzroku mierzona za pomocą standardowych optotypów dostarcza nam natychmiast wielu informacji np. o potrzebie zmiany korekcji, konieczności rozpoczęcia terapii widzenia, czy skierowania pacjenta do innego specjalisty w celu dalszej diagnostyki.

Czułość kontrastowa. To pojęcie pojawia się często przy pomiarach wzroku i jest zdefiniowane najczęściej jako odwrotność najmniejszego kontrastu Michelsona, przy którym pacjent jest w stanie dostrzec wzór paskowy. Przykładowo, jeśli kontrast Michelsona sinusoidalnej siatki o zadanej częstości przestrzennej wynosi 0,01 i jest to „najgęstsza” siatka, jaką przy tym kontraście widzi pacjent, to jego czułość kontrastowa dla tej częstości przestrzennej wynosi 100, przy czym najczęściej wynik przedstawia się w skali logarytmicznej. Dla oka miarowego zdefiniowano normy czułości kontrastowej dla danych częstości przestrzennych, najczęściej dla 3, 6, 12, i 18 cpd.

Testy czułości kontrastowej

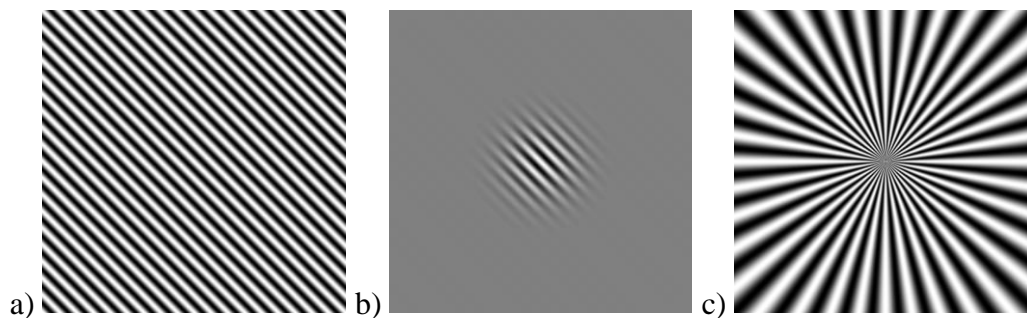
Istnieje wiele różnych sposobów pomiaru czułości kontrastowej układu wzrokowego. Można je podzielić przede wszystkim ze względu na rodzaj bodźca testowego i sposób udzielania odpowiedzi przez osobę badaną [1,2].

Jednym z bardziej popularnych bodźców jest sinusoidalna siatka linii (prążków), widoczna na [rycynie 1a](#). W zależności od formy testu prezentowana jest w jednym, trzech lub sześciu kierunkach (pion; pion, +/-15 stopni; pion, poziomy, +/-15 stopni). Warto zwrócić uwagę na sposób prezentacji bodźca na ekranie. Często wzór nie ma ostrych brzegów odcinających go od tła, tak aby uniknąć wpływu dodatkowo wprowadzonych częstości przestrzennych na wynik badania bądź powidoków. Bodziec jest modyfikowany w taki sposób, że jego kontrast maleje od centrum do peryferii w wyniku wyrafinowanej operacji matematycznej: splotu funkcji sinusoidalnej i funkcji Gaussa. Tak skonstruowane bodźce są nazywane „plamkami Gabora” (ang. *Gabor patch*) ([rycyna 1b](#)) [3], od nazwiska słynnego fizyka Dennisa Gabora, laureata nagrody Nobla w 1971 roku za wynalezienie holografii.

Siatki sinusoidalne są używane powszechnie, bowiem stanowią swoisty podstawowy obraz, który nie posiada treści poza samymi paskami, a jest zróżnicowany. Więcej, każdy obraz monochromatyczny (w przypadku obrazu barwnego trzeba osobno analizować każdy kanał barwy podstawowej) może być przedstawiony jako złożenie wielu odpowiednich fal (składowych) sinusoidalnych, podobnie jak każdy dźwięk składa się z dźwięków podstawowych o różnych częstościach i amplitudach. Za pomocą analizy Fouriera możemy określić jakie fale sinusoidalne składają się na dany obraz, to jest jakie częstości przestrzenne i w jakim „natężeniu”

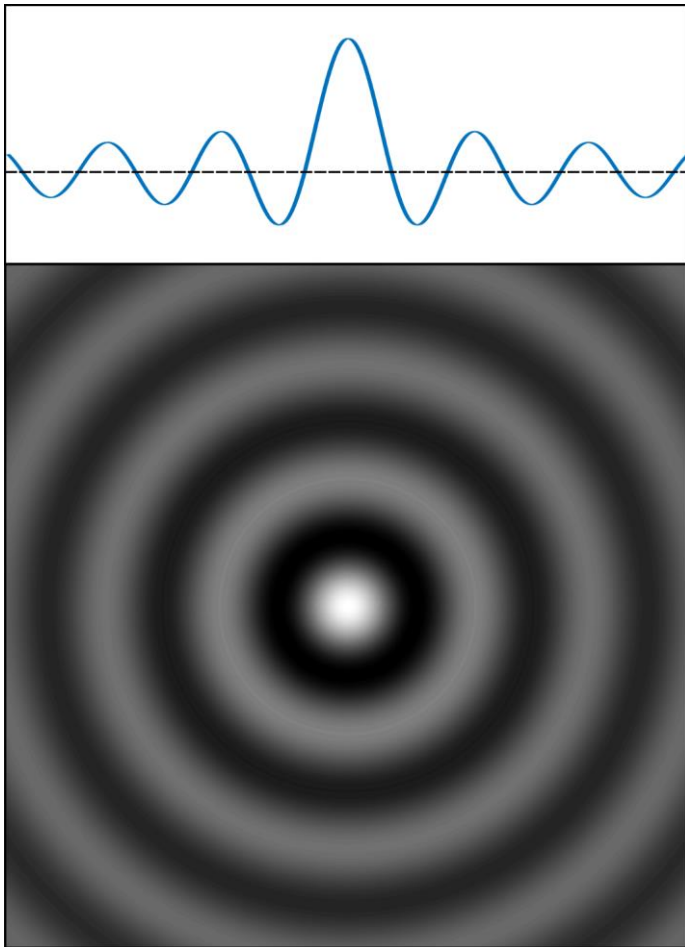
istnieją w obrazie. To fourierowskie podejście do przetwarzania obrazów jest słuszne także w analizie działania układu wzrokowego, bowiem wykazano że układ wzrokowy działa jak wielokanałowy analizator fourierowski [4]. Przekazywanie informacji o obrazie nie odbywa się za pomocą jednego kanału, który zawiera dane o całym zakresie częstości przestrzennych. Układ wzrokowy dekonstruuje obraz siatkówkowy na składowe częstości przestrzenne, które przekazywane są za pomocą wielu oddzielnych kanałów odpowiedzialnych za wąskie przedziały częstości. Warto wiedzieć, że wzory pasków o tylko dwóch poziomach szarości (binarne, nie sinusoidalne) zawierają wiele składowych częstości, które mogą wywierać wpływ na wyniki pomiarów.

W przedstawionych wyżej testach występuje problem związany z brakiem symetrii obrotowej siatek (w szczególności, gdy prezentowany jest jeden kierunek). W przypadku osób z astygmatyzmem (resztkowym i nieskorygowanym), czy innymi aberracjami (np. u osób po zabiegach chirurgii refrakcyjnej, bądź w stożku rogówki) takie testy będą mniej wiarygodne, ze względu na rozogniskowanie obrazu w jednym konkretnym kierunku [5]. Jeśli pokryje się ono z kierunkiem testu może znacznie zawyżyć jego wyniki, lub odwrotnie – fałszywie zaniżyć. W związku z tym badanie nie przedstawi nam realnej informacji o stanie układu wzrokowego pacjenta. W celu zniwelowania tego efektu twórcy testów stosują siatki prezentowane w większej liczbie kierunków, jak na przykład gwiazda Siemens [6], widoczna na [rycynie 1c](#). Im większa liczba kierunków do wyboru, tym pomiar jest bardziej wiarygodny, ale również czas wykonywania badania jest dłuższy, co może znużyć pacjenta i optometrystę. Nowoczesne algorytmy dopasowywania parametrów badania mają na celu uniknięcie również tego problemu.



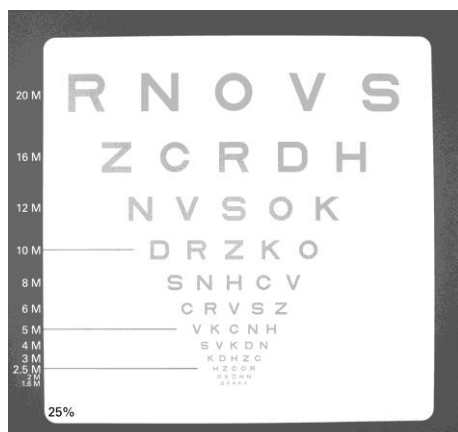
Ryc. 1. Przykłady bodźców do badania kontrastu: a) sinusoidalna siatka, b) bodziec (wzór Gabora), c) gwiazda Siemens

Coraz większą popularność zyskują testy korzystające ze wzorów w kształcie koncentrycznych okręgów, w których radialny profil natężenia jest modyfikowany za pomocą funkcji Bessela. Na [rycynie 2](#) pokazano przykładowy bodziec. Widać, że kolejne, położone coraz dalej od środka minima i maksima rozkładu zbiegają do pewnej średniej jasności (w nieskończoności).



Ryc. 2. Przykład bodźca, opartego na funkcji Bessela pierwszego rodzaju, zerowego rzędu. U góry widoczny profil radialny, odpowiadający dolnemu rozkładowi jasności bodźca

W większości testów czułości kontrastowej parametry bodźców dobierane są w taki sposób żeby przez całe badanie, niezależnie od prezentowanych w danym momencie częstości przestrzennej i kontrastu, średnia luminancja obiektu testowego była taka sama. Wyjątkiem jest tu zapewne znany czytelnikom test ze standardowymi optotypami o malejącym kontraście, widoczny na [rycinie 3](#). W tym teście jednak mierzymy w rzeczywistości nie próg detekcji, jak w przypadku testów opartych na sinusoidalnych siatkach, lecz próg rozpoznania, w którym można dokładnie zidentyfikować dane obiekty. W praktyce używa się testów zawierających optotypy SLOAN, Snellen, czy w przypadku badania dzieci – LEA. Prezentacja może odbywać się przy stałej wielkości optotypów, gdzie każdy następny ma niższy kontrast, lub ze zmienną wielkością optotypów przy stałym kontraście.



Rycina 3. Przykład testu z optotypami o stałym kontraście i malejącej wielkości

W podmiotowym badaniu czułości kontrastowej ważny jest sposób uzyskiwania odpowiedzi od pacjenta. Istnieją trzy najczęściej wykorzystywane sposoby. Dwa z nich bazują na zasadzie wymuszonego wyboru. W zależności od sposobu zaprojektowania testu, prezentowane są siatki o wybranych częstościach przestrzennych z zakresu od 0,5 do 30 cpd, o zmiennym kontraście. Zazwyczaj wybieranych jest 4 lub 6 częstości, by test nie trwał zbyt długo.

Testem, z którym większość optometrystów i optyków miała zapewne okazję spotkać się jest **test wyboru kierunku prezentowanych prążków**. Pacjent wskazuje kierunek linii które widzi na ekranie lub planszy. W niektórych testach, zwłaszcza starszego typu, prezentuje się pacjentowi z góry określoną liczbę plansz, niezależnie od uzyskiwanych odpowiedzi. Przy zmniejszającym się kontraście i stałej częstości siatki ostatnią prawidłową odpowiedź uznaje się za próg czułości kontrastowej. W nowocześniejszych wersjach testów kolejne pokazywane pacjentowi obrazy zależą od jego wcześniejszych odpowiedzi. W tym wypadku często stosowana jest metoda schodkowego dopasowania, to znaczy np. po trzech prawidłowych odpowiedziach dla stałych parametrów bodźca kontrast jest obniżany o z góry założoną wartość, z kolei po jednej złej odpowiedzi kontrast wzrasta o tę samą wartość i uzyskany w ten sposób kontrast uznawany jest za wartość progową. Po kilku cyklach obliczana jest średnia dla zmierzonych wartości progowych i tę wartość podaje się jako próg czułości kontrastowej dla danej częstości przestrzennej.

Powyższa metoda w opisanej formie może być wykorzystywana tylko dla testów z kierunkową siatką sinusoidalną. Pozostałe dwie grupy metod mogą być stosowane również przy testach kołowo symetrycznych.

Metoda dopasowania kontrastu, a właściwie zbiór metod, polega na zmianie kontrastu testu do granicy jego detekcji przez pacjenta. Istnieją metody w których pacjent sam steruje kontrastem obserwowanego bodźca, zwiększając go lub zmniejszając o określoną wartość do momentu, aż uzna, że kolejne zmniejszenie kontrastu uniemożliwi rozpoznanie obiektu. W kolejnej metodzie bodziec prezentowany jest przy kontraście pozwalającym na wykrycie go przez osobę badaną, następnie jest zmniejszany, aż pacjent zasygnalizuje, że nie rozpoznaje już obserwowanego wzoru. Obie te metody obarczone są jednak wpływem powidoków na udzielane odpowiedzi, więc ich wyniki mogą być zafałszowane. Sposobem uniknięcia tego problemu w teście z automatyczną zmianą kontrastu jest niewielka modyfikacja, polegająca na tym, że badanie rozpoczynamy od stanu w którym kontrast jest poniżej progu detekcji i jest on sukcesywnie zwiększany do momentu w którym pacjent poinformuje badających, że zobaczył obiekt testowy. Dla konkretnej częstości przestrzennej test powtarzany jest kilkakrotnie i z uzyskanej średniej z odpowiedzi obliczany jest właściwy próg czułości. W celu skrócenia czasu badania

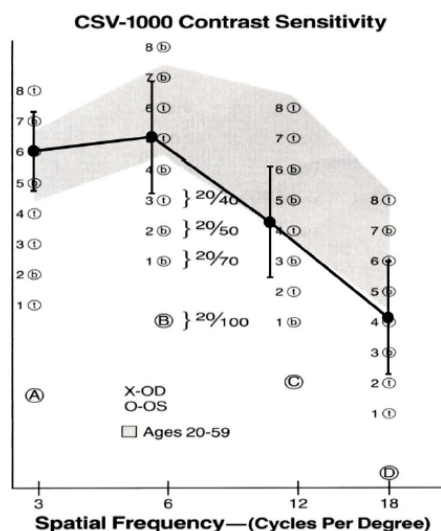
często stosuje się przed właściwą sesją pomiarową krótszy test przesiewowy, tak aby dopasować startowy poziom kontrastu nieznacznie poniżej przewidywanego progu czułości danego pacjenta. W wielu testach przed rozpoczęciem badania pokazywany jest również pacjentowi wzór testu z wysokim kontrastem, aby było on świadomy, co powinien zobaczyć na ekranie.

Kolejną podobną metodą jest **procedura von Békésyego**, wprowadzona wcześniej w badaniach słuchu, polegająca na tym, że osoba badana określa zarówno moment w którym zobaczyła obraz testowy jak i moment w którym według niej obraz zniknął. Badanie to jest oczywiście dłuższe od poprzedniej procedury, a wyniki nie są znacząco różne od uzyskiwanych krótszymi algorytmami.

Ostatnim zbiorem sposobów prezentacji testów są badania polegające na **wymuszonym wyborze pomiędzy dwoma (co najmniej) prezentowanymi bodźcami** [7,8]. Przykładowo, przedstawiamy pacjentowi dwie plansze, a jego zadaniem jest rozstrzygnąć na której z nich występuje wzór testowy (na drugiej znajduje się obraz bez wzoru o jednolitej luminancji równej średniej luminancji we wzorze testowym). Bodźce mogą być prezentowane jako dwie plansze wyświetlane jednocześnie na jednej tablicy, jednak ta metoda obarczona jest ryzykiem wpływu powidoków na udzielane odpowiedzi. Drugim sposobem mającym za zadanie uniknięcie tego efektu jest prezentacja testów rozdzielonych czasowo. Oznacza to, że pary bodźców wyświetlane są w losowej kolejności przez określony czas, zaś pomiędzy nimi następuje przerwa, podczas której powinny zniknąć powidoki. Zadaniem pacjenta jest wybór czy wzór testowy pokazywany był jako pierwszy czy drugi. Kontrast kolejnych bodźców dobierany jest automatycznie metodą schodkową. Osobom starszym i dzieciom metoda ta może nastręczać trudności, ze względu na długi czas upływający między obserwacją testu, a momentem odpowiedzi, dlatego niezwykle ważna jest w tym przypadku właściwa komunikacja z pacjentem.

Jak czytać wyniki badania czułości kontrastowej i jakich informacji dostarczają?

Wynik pomiaru czułości kontrastowej przedstawiany jest zazwyczaj w formie dwuwymiarowego wykresu, którego przykład dla testu CSV-1000 widać na [rycinie 4](#). Zmierzona czułość kontrastowa jest przedstawiona jako funkcja częstości przestrzennych. Im wyższa wartość czułości, tym niższy kontrast był dla danej osoby rozpoznawalny. Wykresy czułości zazwyczaj mają charakter dyskretny ze względu na sposób prezentowania testu (z góry określona liczba badanych częstości i skokowe zmiany kontrastu). Dla każdej częstości przestrzennej określone są normy w zakresie których powinien mieścić się wynik zdrowej, prawidłowo skorygowanej osoby. Liczne badania wskazują na to, że czułość kontrastowa zależna jest od wieku. W grupie osób powyżej 60 roku życia jest ona obniżona w zakresie wszystkich częstości przestrzennych, szczególnie jednak w średnich i wysokich. Dla grup wiekowych z zakresu 20–59 lat różnice w poczuciu kontrastu nie są znaczące [3,9]. Należy o tym pamiętać, ponieważ producenci testów często przedstawiają nam do interpretacji wyników jedną normę niezależnie od wieku pacjentów.



Ryc. 4. Przykładowy wykres, prezentujący krzywą czułości kontrastowej. Szary obszar oznacza zakres, w którym powinna się zmieścić krzywa czułości kontrastowej dla osoby normalnowzrocznej w zadanym przedziale wieku

Obniżony kontrast utrudnia funkcjonowanie i może być przyczyną znacznego dyskomfortu [10]. Pacjenci osiągający prawidłową, normatywną ostrość wzroku, ale mający problemy z poczuciem kontrastu mogą mieć problemy z rozpoznawaniem twarzy, znaków drogowych, poruszaniem się po zmierzchu, we mgle, w deszczu oraz z wieloma innymi czynnościami w codziennym życiu. Prawidłowa interpretacja wykresu czułości kontrastowej pacjenta może dostarczyć nam jednak o wiele więcej informacji niż tylko o jakości widzenia pacjenta. Ubytki czułości kontrastowej w danych przedziałach częstości przestrzennych mogą wskazywać na określone patologie układu wzrokowego. Zmiany czułości kontrastowej są widoczne we wczesnych etapach niektórych chorób, zanim jeszcze wpłyną na ostrość wzroku w wysokim kontraście. Obniżenie czułości kontrastowej w wysokich częstościach przestrzennych może wskazywać na AMD lub początkową zaćmę [11]. W miarę powiększającego się zmętnienia soczewki, obniżeniu ulega czułość kontrastowa we wszystkich częstościach. Obniżenie czułości dla średnich częstości może wskazywać na jaskrę, zaś zmiany w zakresie średnich i niskich częstości mogą oznaczać neuropatię lub zapalenie nerwu wzrokowego, bądź retinopatię cukrzycową. Niepokojące jest również gdy, wyniki są znacząco różne dla obu oczu. Taka sytuacja może wystąpić między innymi w przypadku jaskry lub retinopatii cukrzycowej [12]. U osób ze stożkiem rogówki za pomocą pomiaru czułości kontrastowej możemy ocenić postęp choroby i efekty leczenia [13].

Co nieoczywiste, zawsze warto wykonać badanie czułości kontrastowej podczas doboru soczewek kontaktowych. Pozwoli to ocenić dopasowanie i jakość widzenia w szczególności przy soczewkach torycznych. Wykonując badanie w dniu doboru, a następnie podczas wizyty kontrolnej pod koniec okresu użyteczności soczewek możemy ocenić wpływ osadów białkowych zbierających się na soczewce na jakość widzenia [14].

Czułość kontrastową warto też monitorować podczas rekonwalescencji po zabiegach chirurgicznych, jak np. laserowej korekcji wzroku, bowiem w tym okresie możemy obserwować obniżoną czułość. Pooperacyjna czułość może nieznacznie różnić się w zależności od rodzaju wykonanego zabiegu. Zazwyczaj około roku po zabiegu pomiary czułości kontrastowej wracają do normy zgodnie z wiekiem, chociaż mogą być obniżone w stosunku do czułości przed operacją w pełnej korekcji [15,16].

Dostępne testy

Dostępnych jest wiele rodzajów przyrządów i urządzeń umożliwiających badanie czułości kontrastowej. Najprostsze (choć nie zawsze najtańsze) są papierowe tablice z wydrukowanymi wzorami. Opatentowane przez Grinsburga [17] tablice zawierają wzory z pięcioma częstościami przestrzennymi w dziewięciu rzędach z malejącym kontrastem, przy czym wzory są okrągłe, a prążki sinusoidalne pionowe. Taki test, jednak z czterema częstościami przestrzennymi wykorzystywany jest w urządzeniu do badania kontrastu i oślnienia CSV-1000 [14], którego wynik pokazany był na rycinie 4. Modyfikacją podstawowego testu Grinsberga są tablice Vistech [1], w których prążki są przedstawiane w trzech kierunkach. Kolejną, obecnie najbardziej popularną wersją tego testu jest FACT (*The Functional Acuity Contrast Test*) [18], w którym zmniejszono różnicę w kontraście pomiędzy kolejnymi wzorami, co przekłada się na wyższą czułość badania. Ten test jest wykorzystywany w urządzeniach specjalnie przygotowanych do badania czułości na kontrast jak np. Functional Vision Analyzer [19]. W 2008 roku Holladay opatentował podobne tablice testowe, które wyróżniają się tym, że prezentowane są prążki w sześciu kierunkach. Ten sam patent zawiera specjalną wersję optotypu E i wzór z koncentrycznych kręgów, oba sinusoidalnie zmodyfikowane. Te okrągłe wzory użyte zostały w urządzeniu firmy M&S Technologies „Holladay Automated Contrast Sensitivity System” [8], w ofercie tej firmy znajdują się też inne testy badania kontrastu np. z użyciem sinusoidalnych prążków modyfikowanych funkcją Gabora. Opisane testy są dostępne na ekranach tabletek czy komputerów – przy korzystaniu z takiej wersji należy pamiętać o zachowaniu odpowiedniej odległości badania [20] oraz o tym, że bez kalibracji ekranu wynik badania może być obciążony błędem.

Popularne wyświetlacze optotypów w gabinetach optometrycznych zazwyczaj posiadają możliwość zmiany kontrastu prezentowanych optotypów. Większość z nich ma dostępne testy czułości kontrastowej z sinusoidalnymi prążkami w trzech lub sześciu kierunkach.

Podsumowanie

Testy czułości kontrastowej stanowią uzupełnienie tradycyjnego badania ostrości wzroku, a w pewnych warunkach je zastępują. Dostarczają dodatkowych informacji o stanie narządu wzroku, który – mimo prawidłowej ostrości wzroku – może być poddany procesom fizjologicznym lub patologicznym. Są często wykorzystywane w badaniach przesiewowych, jako czuły wskaźnik niedokorygowania lub choroby oczu. Warto z nich korzystać.

Nie sposób poruszyć wszystkich aspektów czułości kontrastowej w krótkim artykule, w szczególności pominęliśmy szeroki temat badań obowiązkowych kierowców zawodowych, gdzie bada się zmierzchową czułość kontrastową. Czytelników zainteresowanych tematem, zachęcamy do kontaktu.

Piśmiennictwo

- [1] S. Tweteen, M. Wall, B.D. Schwartz, „A comparison of three clinical methods of spatial contrast-sensitivity testing in normal subjects,” *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* **228**(1), 24–7 (1990)
- [2] A. P. Ginsburg, M. W. Connon, „Comparison of Three Methods for Rapid Determination of Threshold Contrast Sensitivity,” *Investigative Ophthalmology & Visual Science* **24**(6), 798–802 (1983)

- [3] J. E. Santillan, L. A. Issolio, E. M. Colombo, „A statistical criterion to establish normal ranges for age in a contrast sensitivity function test,” *Optica Applicata* **44(2)**, 213–225 (2014)
- [4] C. Blakemore, F. W. Campbell, „On the existence of neurones in the human visual system,” *The Journal of Physiology* **203(1)**, 237–260 (1969)
- [5] J. T. Holladay, „Astigmatic axis independent spatial frequency and contrast sensitivity target and method,” United States Patent, US 7,926,948 B2 (2011)
- [6] H. J. Grein, H. Jungnickel, K. Strohm, M. Gebhard, „Measuring contrast sensitivity of human eye with modified siemens stars,” *Optometry and Vision Science* **87(7)**, 501–512 (2010)
- [7] M. L. Simas, N. A. Santos, „Contrast sensitivity to radial frequencies modulated by J_n and j_n Bessels profiles,” *Brazilian Journal Of Medical And Biological Research* **35(11)**, 1357–1367 (2002)
- [8] J. T. Holladay, „Holladay Automated Contrast Sensitivity Testing System,” http://www.mstech-eyes.com/catalog/pdf/general/HACSS_manual.pdf (2013)
- [9] T. L. Costa, R. M. Nougiera, A. G. Pereira, N. A. Santos, „Differential effects of aging on spatial contrast sensitivity to linear and polar sine-wave gratings,” *Brazilian Journal Of Medical And Biological Research* **46(10)**, 855–860 (2013)
- [10] C. Owsley, M. E. Sloane, „Contrast sensitivity, acuity, and the perception of 'real-world' targets,” *British Journal Of Ophthalmology* **71(10)**, 791–796 (1987)
- [11] D. B. Elliott, P. Situ, „Visual acuity versus letter contrast sensitivity in early cataract,” *Vision Research* **38(13)**, 2047–2052 (1998)
- [12] D. Regan, D. Neima, „Low-contrast letter charts in early diabetic retinopathy, ocular hypertension, glaucoma, and Parkinson's disease,” *British Journal Of Ophthalmology* **68(12)**, 885–889 (1984)
- [13] K. Zadnik, M. J. Mannis, C. A. Johnson, D. Rich, „Rapid contrast sensitivity assessment in keratoconus,” *American Journal of Optometry and Physiological Optics* **64(9)**, 693–697 (1987)
- [14] strona www „<http://www.vectorvision.com/clinical-use-contact-lenses>”
- [15] D. Townley, C. Kirwan, M. O'Keefe, „One year follow-up of contrast sensitivity following conventional laser in situ keratomileusis and laser epithelial keratomileusis,” *Acta Ophthalmologica* **90**, 81–85 (2012)
- [16] W. Sekundo, J. Gertner, T. Bertelmann, I. Solomatin, „One-year refractive results, contrast sensitivity, high-order aberrations and complications after myopic small-incision lenticule extraction (ReLEx SMILE),” *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* **252**, 837–843 (2014)
- [17] A. P. Ginsburg, „Spatial frequency and contrast sensitivity test chart and protocol,” United States Patent, US 5,500,699 (1996)
- [18] B. Haughom, T. E. Strand, „Sine wave mesopic contrast sensitivity – defining the normal range in a young population,” *Acta Ophthalmologica* **91(2)**, 176–82 (2013)
- [19] <https://www.stereoptical.com/products/vision-screeners-2/functional-vision-analyzer/>
- [20] Displays: M Rodríguez-Vallejo, C. Llorens-Quintana, W. D. Furlan, J. A. Monsoriu, „Visual acuity and contrast sensitivity screening with a new iPad application,” *Displays* **44**, 15–20 (2016)