

Bogumił GAJDZICKI, Krzysztof GNIOTEK
POLITECHNIKA ŁÓDZKA, ŻEROMSKIEGO 116, 90-924 ŁÓDŹ

Pomiar barwy powierzchni płaskich wyrobów włókienniczych

Dr inż. Bogumił GAJDZICKI

Nauczyciel akademicki w Zakładzie Chemicznej Obróbki Wyrobów Włókienniczych Instytutu Architektury Tekstyliów PŁ. Zajmuje się problemami uszlachetniania wyrobów włókienniczych takimi jak bielenie, barwienie, drukowanie i apretura. Prowadzi zajęcia z zakresu pomiaru barwy wyrobów włókienniczych i praktycznego ich wykorzystania w przemyśle. Ekspert ISO/TC 38 Textile w zakresie odporności wybarwień i pomiaru barwy.

e-mail: bogumil.gajdzicki@p.lodz.pl



Prof. dr hab. inż. Krzysztof GNIOTEK

Kierownik Katedry Automatyzacji Procesów Włókienniczych na Wydziale Inżynierii i Marketingu Tekstyliów PŁ. Zajmuje się podstawowymi problemami metrologii, instrumentacją pomiarów i metodyką badań doświadczalnych. Zdefiniował zakres i określił podstawowe zasady nowego obszaru wiedzy łączącego elementy włókiennictwa, elektroniki i informatyki, który wraz z pracownikami nazwał tekstroniką. Profesor tytularny od 2005 roku.

e-mail: krzysztof.gniotek@p.lodz.pl



Streszczenie

W referacie opisano barwę powierzchni jako zjawisko fizyczne i subiektywne wrażenie wzrokowe. Przedstawiono podstawowe założenia obiektywnego jej wyrażania oraz jakościowy model matematyczny obiektu, którym jest barwa powierzchni takich płaskich wyrobów włókienniczych jak tkaniny czy dzianiny. Opisano procedury pomiaru barwy oraz przyrządy pomiarowe. Wskazano niektóre źródła niedokładności takich pomiarów.

Słowa kluczowe: pomiary barwy, płaskie tekstylia, niedokładność

Colour measurements of flat textile surfaces

Abstract

The colour of the surface is described as a physical phenomenon and subjective visual impression. Basic assumptions of objective description of colour have been presented as well as a mathematical model of an object - a colour of flat textile fabrics (such as woven or knitted fabrics). Colour measurement procedures and measuring instruments have been described. Some sources of inaccuracy of such measurements have been indicated.

Key words: colour measurements, flat textiles, inaccuracy

1. Wprowadzenie

Barwa powierzchni, podobnie jak zapach czy chwyt, należy do tych cech wyrobów włókienniczych, które bezpośrednio oddziałują na ludzkie zmysły i przez użytkowników określane są organoleptycznie. Z użytkowego punktu widzenia jest to ocena najważniejsza, decydująca o powodzeniu produktu na rynku. Z punktu widzenia producenta czy dystrybutora ocena taka ma mniejsze znaczenie ze względu na swoją subiektywność. Wynika stąd konieczność używania obiektywnych metod pomiarowych, ograniczających wpływ obserwatora na wynik pomiaru.

Wiadomo [1], że istnieje grupa cech obiektów, których pomiary noszą cechy kreatywności i z różnych względów nie mogą być w pełni traktowane rutynowo. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest brak możliwości trwałego zakończenia identyfikacji modelu matematycznego obiektu m.in. z powodu konieczności uwzględniania indywidualnych cech obserwatora. Pomiary barwy również wykazują taką cechę chociaż w 1931 r. przyjęto przez CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) uśrednione, a następnie w 1964 r. zmodyfikowane i znormalizowane, wyniki eksperymentalnego sposobu zdefiniowania procesu postrzegania barwnych światła przez człowieka; stanowi to do dzisiaj jeden z podstawowych elementów liczbowego wyrażania barwy powierzchni. Wraz z żywiołowym rozwojem nowych technik pomiarowych i informatyki, podejmowane są próby ich zaadoptowania do rozwiązywania problemów pomiaru i liczbowego opisu barwy [2].

2. Barwa powierzchni jako zjawisko fizyczne

Barwa przedmiotu jest wynikiem oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z substancją barwną użytą do jego zabarwienia. Promieniowanie, w najprostszym przypadku, ulega odbiciu od powierzchni nieprzezroczystych lub przechodzi przez przedmioty przezroczyste; jest także przez nie częściowo pochłaniane. Promieniowanie takie, w zakresie tak zwanym widzialnym – VIS, o długości fali światła od 400 nm do 700 nm, odbierane jest przez organ wzroku człowieka i dzięki temu możemy postrzegać barwę otaczających nas przedmiotów. Sposób interpretacji docierających do człowieka bodźców nie jest do końca wyjaśniony [3]; jest indywidualnie interpretowany przez każdego człowieka. Kolor wyrobu stanowi istotną cechę komercyjną produktu [4]. W tym sensie organoleptyczna ocena barwy jest trudna do technologicznego wykorzystania, chociaż człowiek z dużym doświadczeniem w ocenie barwy posiada zdolność rozróżniania nawet do 10000 różnych barw.

Każda substancja barwna posiada zdolność do selektywnego pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego o odpowiedniej długości fali świetlnej. Promieniowanie, które nie zostaje pochłonięte ulega od powierzchni wyrobu włókienniczego odbiciu. Takie zjawisko powoduje zróżnicowanie składu wiązki promieniowania odbitego od powierzchni w stosunku do wiązki promieniowania padającego na tą powierzchnię i wywołuje wrażenie barwy. Udział promieniowania odbitego w stosunku do całkowitej energii promieniowania docierającej do powierzchni w funkcji długości fali światła nazywany jest charakterystyką widmową tej powierzchni. Wyrażona ona może być w postaci zbioru wartości liczbowych określających remisję promieniowania podawanych w %, lub w postaci tak zwanej krzywej widmowej. W przypadku wyrobów włókienniczych charakter krzywej widmowej jest dokładnym odzwierciedleniem charakterystyki widmowej użytego barwnika.

W praktyce krzywą widmową wyznacza się dokonując pomiaru remisji światła od powierzchni wyrobu włókienniczego na spektrofotometrze. Wybarwienia wykonane tym samym barwnikiem użytym w różnej ilości posiadają taki sam charakter krzywych widmowych, są jednak równoległe przesunięte względem siebie. Im więcej barwnika użyto do zabarwienia włókna tym więcej światła jest pochłaniane i krzywa widmowa jest przesunięta do dołu. Krzywa widmowa charakteryzuje się występowaniem pewnego minimum, przy którym następuje maksymalne pochłanianie światła o określonej długości tzw. λ_{max} . Przy pomocy tej wartości, jak również przebiegu krzywej można charakteryzować barwę powierzchni. (Tab.1)

3. Matematyczny model barwy powierzchni

Większość stosowanych obecnie systemów pomiaru barwy sprowadza się do wyznaczenia podstawowych składowych trójchromatycznych barwy X, Y i Z. Wartości te następnie mogą być przeliczane na inne parametry barwy powierzchni, które w znacznie lepszy sposób korelują z wizualnym postrzeganiem barwy powierzchni lub ocenianą różnicą barwy między dwoma barwnymi powierzchniami. Obiektywna charakterystyka barwy powierzchni polega na wyznaczeniu trzech wartości liczbowych odpowiadających takim cechom barwy jak jasność, odcień i nasycenie.

Tab. 1 Barwa powierzchni w funkcji λ_{\max}
Tab. 1 Colour of surface as a function of λ_{\max}

Barwa pochłanianego światła	λ_{\max} , w nm	Barwa powierzchni
Fioletowa	400 - 435	żółtozielona
Fioletowoniebieska	435 - 460	żółta
Niebieska	460 - 480	oranżowa
Zieloniebieska	480 - 495	czerwona
Zielona	510 - 560	purpurowa
Zielonożółta	560 - 575	fioletowa
Żółta	575 - 590	fioletowoniebieska
Oranżowa	590 - 600	niebieska
Czerwona	600 - 700	zieloniebieska

Z tego punktu widzenia barwa jest punktem w przestrzeni trójwymiarowej. Składowe trójchromatyczne obliczane są ze wzorów (1),

$$\begin{aligned} X &= \int_{\lambda} R(\lambda)E(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y &= \int_{\lambda} R(\lambda)E(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z &= \int_{\lambda} R(\lambda)E(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

w których: R – wartość emisji w funkcji długości fali, uzyskana w wyniku pomiaru natężenia promieniowania; E – znormalizowane i zatwierdzone przez CIE charakterystyki widmowe iluminantów (czyli źródeł światła) rzeczywistych jak również nierzeczywistych; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ i $\bar{z}(\lambda)$ – znormalizowane i zatwierdzone przez CIE charakterystyki względnych współrzędnych trójchromatycznych.

Remisja jest ilorazem wartości natężenia promieniowania rozproszonego światła odbitego do natężenia promieniowania wiązki światła padającego. Wielkość E obrazuje znormalizowaną energię iluminantu dla długości λ i wyraża wpływ rodzaju iluminantu na postrzeganą barwę. \bar{X} , \bar{y} i \bar{z} to znormalizowane współrzędne charakteryzujące obserwatora; wyrażają one sposób postrzegania barwnych światła: czerwonego, zielonego i niebieskiego, koniecznych do odwzorowania przez człowieka dowolnej barwy widmowej. Ich zbiór wartości charakteryzuje tzw. obserwatora podstawowego o kącie 2° (1931 r.) lub obserwatora dodatkowego o kącie 10° (1964 r.). W ten sposób model obejmuje zarówno cechy powierzchni badanej, jak i źródła światła oraz obserwatora.

Bardziej praktycznym opisem barwy jest określanie jej odcienia i nasycenia lub ich zmiany. Tego typu zależność można przedstawić na wykresie chromatyczności barwy $x(y)$. Wartości współrzędnych barwy oblicza się ze wzorów (2).

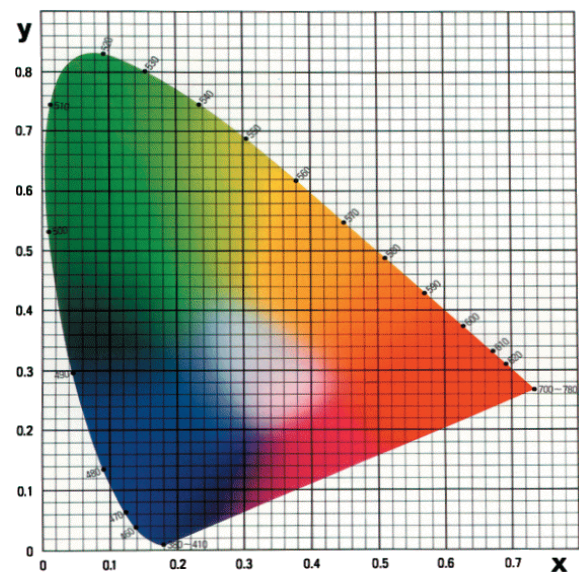
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2)$$

Istnieją także inne, często stosowane sposoby przedstawiania barwy, np. układ CIELAB 1976, w którym definiuje się trzy

wielkości L^* , a^* i b^* [5]. W referacie ten sposób nie będzie omawiany.

Wartość mierzonej emisji światła od powierzchni wyrobu włókienniczego zależy od wielu czynników. Zgodnie z Normą PN EN ISO 105-J01: 2002 idealna próbka powinna być sztywna, gładka, bez tekstury, nieprzezroczysta i o równomiernym zabarwieniu. W przypadku wyrobu włókienniczego próbka o takich cechach nie występuje. Jej powierzchnia nie jest gładka i często wykazuje nierównomierność zabarwienia; nie jest też ciałem sztywnym. Oprócz tego wyroby włókiennicze należą do przeświecających; wymaga to często użycia odpowiednio dużej próbki i wielokrotnego jej złożenia. Na wynik pomiaru wpływa także fotochromizm i termochromizm próbki oraz jej wilgotność, która powoduje zmianę koloru i charakterystyki krzywej widmowej.

W pomiarze barwy występują dwa zagadnienia: ocena absolutnych wartości współrzędnych x i y oraz pomiar różnicy barwy w stosunku do wzorca. Materiał ograniczono do zagadnienia pierwszego.



Rys. 1. Wykres chromatyczności barwy
Fig. 1 Chromaticity diagram

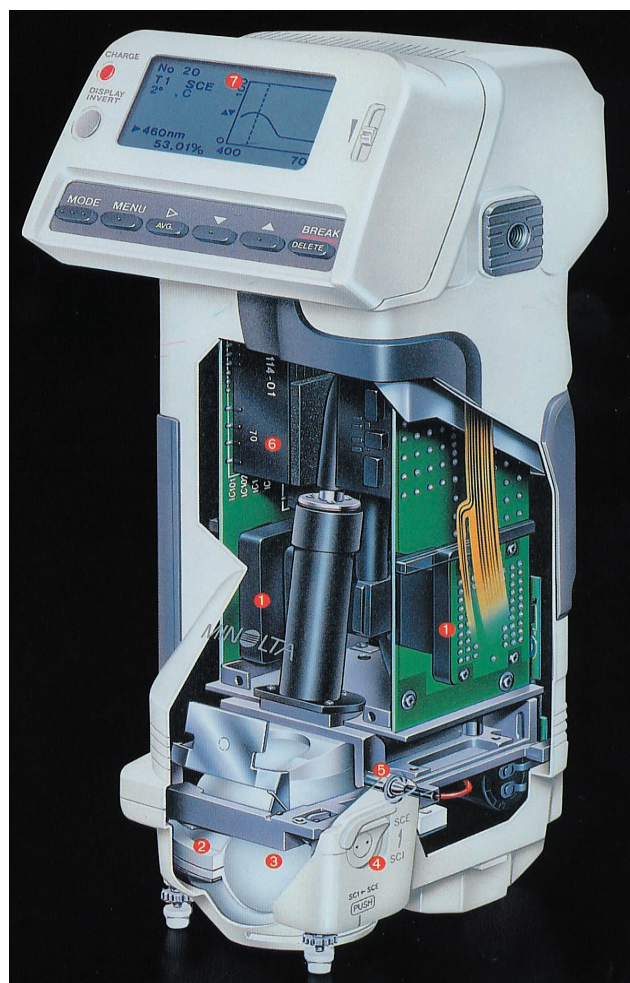
Na podstawie wzorów (1) i (2) oraz przedstawionych uwag można wyobrazić sobie jakościowy model matematyczny barwy powierzchni w postaci tabeli 2. Model dotyczy wyrobu włókienniczego nie zawierającego rozjaśniaczy optycznych i barwników fluorescencyjnych.

Tab. 2 Jakościowy model matematyczny barwy powierzchni tkaniny
Tab. 2 Qualitative mathematical model of colour of flat textile surfaces

Wielkości wejściowe	Wielkości wyjściowe	Wielkości stałe	Wielkości zakłócające
długość fali λ , natężenie promieniowania,	współrzędna x , współrzędna y ,	Charakterystyki $E(\lambda)$, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, geometria pomiarowa, krotność złożenia próbki, powierzchnia otworu pomiarowego	fotochromizm, termochromizm, wilgotność, wykończenie powierzchni, nierównomierność wybarwienia

4. Przyrządy i procedury pomiarowe

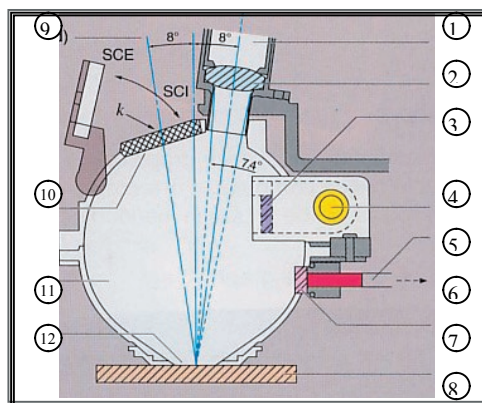
Z powodów podanych w poprzednim rozdziale pomiary barwy powierzchni odbywają się w zamkniętej przestrzeni z wykorzystaniem spektrofotometrów (rys.2).



Rys.2 Spektrofotometr przenośny typu CM-2002/CM-2022 Minolta
Fig.2 Portable spectrophotometer, type CM-2002/CM-2022 Minolta

1 - ultrakompaktowy miernik spektralny promieniowania,
2 - kula całkująca, powleczona wewnątrz siarczanem baru,
3 - geometria pomiarowa d/8, oświetlenie próbki światłem rozproszonym od wnętrza kuli; pomiar pod kątem 8°,
4 - przełącznik pomiaru ze składaną lustrzaną włączoną i wyłączoną,
5 - lampa ksenonowa ze światłem pulsującym,
6 - analogowy układ kontrolny,
7 - monitor LCD

Próbka oświetlana jest zwykle światłem polichromatycznym, a pomiędzy nią i odbiornikiem umieszcza się monochromator umożliwiający pomiar światła z określonym przedziałem długości fali $\Delta\lambda$. Próbki włókiennicze mierzone są zwykle w przedziale od 400 nm do 700 nm. Odbiciowe spektrofotometry stosowane do pomiaru wyrobów włókienniczych wyróżniają się różną geometrią pomiarową określaną symbolami „45/0” lub „0/45”, w których próbka oświetlana jest pod kątem wymienionym jako pierwszy, a pomiar promieniowania odbitego wykonywany jest pod kątem wymienionym jako drugi. Istnieją także urządzenia o geometrii sferycznej (rys. 3), w których próbka jest oświetlana, równomiernie ze wszystkich stron, światłem rozproszonym od wewnętrznej powierzchni kuli. W tych urządzeniach pomiar lub oświetlenie próbki dokonywane jest pod różnym kątem, natomiast jeśli kąt ten mieści się w zakresie od 0 do 10 stopni od prostopadłej do próbki, to geometria taka, zgodnie z przyjętą w normalizacji nomenklaturą, jest określaną jako d/0 lub 0/d.

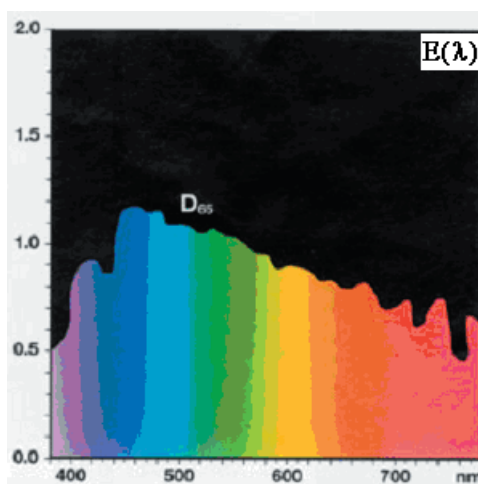


Rys. 3 Schemat kuli całkującej spektrofotometru o geometrii d/8
Fig. 3 Diagram of integrative sphere of geometry d/8 spectrophotometer
1 - światłowod do pomiaru emisji,
2 - soczewka, 3 - filtr UV,
4 - lampa ksenonowa z pulsującym światłem,
5 - światłowod do pomiaru natężenia promieniowania wewnątrz kuli,
6 - miernik natężenia promieniowania oświetlającego wnętrze kuli,
7 - płytka dyfuzyjna, 8 - mierzona próbka,
9 - mechanizm otwarcia/zamknięcia składowej spektralnej,
10 - „pułapka” światła, 11 - wnętrze kuli, 12 - otwór pomiarowy

5. Źródła niedokładności pomiaru

Niedokładność pomiaru barwy wynika z niedokładności pomiaru długości fali świetlnej, natężenia promieniowania padającego, natężenia promieniowania odbitego rozproszonego, rzędnej charakterystyki widmowej E oraz rzędnych wielkości \bar{x} , \bar{y} i \bar{z} .

Wartości charakterystyki widmowej iluminantu E mają charakter stałych fizycznych. Ich określenie zapoczątkowano w latach 30-tych ubiegłego stulecia jako uśrednione natężenie promieniowania pierwotnych źródeł światła. Na przykład iluminant D65 określa światło dzienne o temperaturze barwowej 6500 K (rys. 4). Rzędne charakterystyki podawane są w postaci tabel lub wykresów bez określania niedokładności ich wyznaczenia.



Rys. 4. Charakterystyka widmowa E iluminantu D65
Fig. 4 Spectrum characteristic E of illuminant D65

Podobnie rzecz się ma z charakterystykami względnych współrzędnych trójchromatycznych \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} . Odzworowują one czułość ludzkiego oka na barwę czerwoną, zieloną i niebieską. Zostały określone w badaniach eksperymentalnych i są podawane bez określenia miar niedokładności ich wyznaczenia. Wielkości te mają charakter subiektywny i być może wkrótce zostaną zmienione. Świadczy to o kreatywności pomiaru barwy, której model matematyczny zawiera elementy zależne od cech ludzkiego oka.

Charakterystyka widmowa czy inne cechy źródła światła spektrofotometru nie mają wpływu na niedokładność ponieważ emisja jest wielkością względną. Istotny jest natomiast pomiar natężenia i długości fali.

Normy amerykańskie [6], oparte na systemie CIE, podają, np. dla iluminantu D65, wartości charakterystyki widmowej z dokładnością do 4 cyfr znaczących. Odpowiadające im długości fali podawane są co 10 lub 20 nm. Wartości charakterystyk względnych współrzędnych trójchromatycznych \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} podawane są z dokładnością do 5 cyfr znaczących, dla długości fali określanej co 5 nm.

Instrukcje obsługi spektrofotometrów podają najczęściej niedokładności pomiaru natężenia fali odbitej w postaci błędu przypadkowego i nieskorygowanego błędu systematycznego. Na przykład dla przyrządu SF 300 UV firma Datacolor podaje odpowiednio $\pm 0,10\%$ i $\pm 0,05\%$. Błędy te obliczono porównując wskazania przyrządu z przyrządem wzorcowym DCI SF500 Master Instrument.

Obliczenia wartości z wzorów (1) i (2) prowadzone są drogą sumowania powierzchni prostokątów o podanych długościach i szerokościach odpowiadających interwałom długości fali. Liczba tych prostokątów zależy, rzecz jasna, od przedziału długości fali i szerokości interwałów. Dla uniknięcia niejednoznaczności co do zakresów długości fal i wartości interwałów w normach podaje się obliczone współczynniki wagowe W zawierające iloczyn typu $E(\lambda)x(\lambda)$. Wtedy obliczenie składowych trójchromatycznych prowadzone jest wg wzorów (3)

$$\begin{aligned} X &= \sum_{360}^{780} W_x(\lambda) R(\lambda) \Delta \lambda \\ Y &= \sum_{360}^{780} W_y(\lambda) R(\lambda) \Delta \lambda \\ Z &= \sum_{360}^{780} W_z(\lambda) R(\lambda) \Delta \lambda \end{aligned} \quad (3)$$

Kształt charakterystyki widmowej iluminantu jest na tyle skomplikowany, że dotychczas nie podjęto próby aproksymacji tej funkcji i zastąpienia operacji sumowania całkowaniem.

W celu uzyskania danych do obliczenia niepewności typu A przeprowadzono badania powtarzalności pomiaru. W tym celu przyrządem SF 300 UV, firmy Datacolor, zmierzono barwę powierzchni tkaniny wełnianej o splocie płóciennym zabarwionej na czerwono. Wykonano 4 serie pomiarów, po 10 pomiarów w serii, przy czym do każdej serii próbka była przygotowywana od nowa, tzn. była składana do warstwy poczwórnej. W ramach serii przyrząd mierzył barwę tego samego punktu tkaniny. Dla uwzględnienia struktury powierzchni, która w przypadku tkaniny jest bardzo rozwinięta, po każdym pomiarze próbka była obracana o 90°. Wyniki pokazano w tabeli 3.

Przy założeniu rozkładu normalnego badanej cechy i jednorodności wariancji w poszczególnych seriach można, przy pomocy analizy wariancji, wykazać, że zarówno w przypadku x jak i y zmiana miejsca pomiaru na powierzchni tkaniny wpływa istotnie na jego wynik. Bardzo duża wartość statystyki F ($F_x=2764,8$; $F_y=691,5$) jest spowodowana dobrą powtarzalnością wskazań przyrządu pomiarowego i nierównomiernością wybarwienia tkaniny, co pokazano w tabeli 4.

Wynika stąd, że pomiar barwy powierzchni nie powinien odbywać się w jednym punkcie, a sposób rozmieszczenia punktów pomiarowych na badanej powierzchni winien być znormalizowany. Jest to problem znany i dyskutowany. Pomiar w kilku punktach umożliwia określenie nierównomierności wybarwienia. Jednakże ta cecha barwnej powierzchni nie jest dotychczas zdefiniowana. Wynika to z faktu, że ostatecznym oceniającym jest człowiek: technolog i klient; a człowiek nie jest w stanie wychwycić takiej nierównomierności. Stąd istniejące normy zalecają pomiar w jednym punkcie powierzchni. Zdefiniowana jest natomiast różnica barwy w dwóch punktach. Dotyczy to przypadku porównania barwy powierzchni z jej wzorcem i

oceny zastrzeżeń klienta do zamówionego produktu. Istnieje więc narzędzie oceny nierównomierności; brak jedynie praktycznej potrzeby jego stosowania.

Tab. 3 Wyniki pomiarów współrzędnych barwy powierzchni tkaniny wełnianej
Tab. 3 Measurement results of surface colour coordinates of woollen fabric

Nr	Seria 1		Seria 2		Seria 3		Seria 4	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1	,5193	,2922	,5193	,2922	,5221	,2931	,5178	,2921
2	,5192	,2923	,5194	,2922	,5227	,2933	,5179	,2922
3	,5193	,2922	,5193	,2922	,5224	,2932	,5179	,2921
4	,5193	,2922	,5194	,2921	,5223	,2931	,5179	,2923
5	,5192	,2922	,5194	,2922	,5226	,2933	,5179	,2923
6	,5192	,2922	,5194	,2920	,5227	,2932	,5178	,2922
7	,5191	,2922	,5194	,2922	,5226	,2932	,5178	,2922
8	,5192	,2922	,5194	,2922	,5226	,2932	,5179	,2922
9	,5191	,2922	,5195	,2921	,5227	,2932	,5179	,2922
10	,5190	,2922	,5193	,2921	,5226	,2932	,5178	,2922

Tab. 4 Estymaty współrzędnych i odchylenia standardowe z próby
Tab. 4 Estimate of coordinates and experimental standard deviations

Współrzędna i parametr	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	
x	\bar{x}_{sr}	0,51919	0,51938	0,52253	0,51786
	$10^{-4} s_x$	0,994	0,632	2,003	0,516
y	\bar{y}_{sr}	0,29221	0,29215	0,29320	0,29220
	$10^{-4} s_y$	0,316	0,707	0,667	0,667

Zdaniem autorów wykonanie pomiaru barwy powierzchni w kilku punktach, a następnie uśrednienie wyników, jest zabiegiem logicznym i pożytecznym. Daje on w efekcie zwiększenie obszaru niedokładności dookoła estymaty wartości prawdziwej. Obszar ten jest prostokątem na wykresie chromatyczności barwy. Jego boki to przedziały niedokładności pomiaru współrzędnych x i y . Z tego punktu widzenia pomiar barwy nosi cechy pomiaru w sensie szerszym i ocena jego niedokładności nie może być oparta na prostej analizie niepewności standardowych. Aby móc stosować to narzędzie potrzebny jest zabieg, którego opis wykracza poza ramy tego artykułu.

6. Wnioski

1. Pomiar barwy należy do grupy pomiarów kreatywnych choć stopień jego obiektywizacji jest znaczny w porównaniu do takich cech produktów włókienniczych jak chwyt czy zapach.
2. Wyniki pomiaru barwy w różnych punktach powierzchni tkaniny różnią się istotnie od siebie.

7. Literatura

- [1] Gniotek K.: Creative measurement in view of the scope of metrology. Measurement - Journal of the International Measurement Confederation IMEKO, Vol.20, No.4, Elsevier Science Ltd., 1997, pp.259-266.
- [2] Trussell H. J.: Applications of Digital Signal Processing, Fuzzy Logic and Neural Nets to Computational Color. Textile Chemist and Colorist 30 (1998), 28-32
- [3] Beau Lotto R., Purves D.: Perceiving colour. Rev. Prog. Color. 34 (2004), 12-25.
- [4] Bruce M., Benson L., Oulton D., Hogg M., Wilson J.: Optimising product colour. Rev. Prog. Color. 31 (2001), 29-35.
- [5] Mielicki J.: Zarys wiadomości o barwie. Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki, Łódź, 1997.
- [6] Norma ASTM E 308-95: Standard practise for computing the colors of objects by using the CIE system.

Artykuł recenzowany