

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

6(211)

1982

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 22

WARSZAWA 1982

NR 6/211/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - prof. mgr inż. Lesław Kędziński
Z-ca Redaktora Naczelnego - doc. dr inż. Krystyn Plewko

Redaktorzy działów:

doc. mgr inż. Władysław Center, doc. mgr inż. Adam Moniuszko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa - Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr K. Juskiewicz

Montaż tekstu: B. Skwara

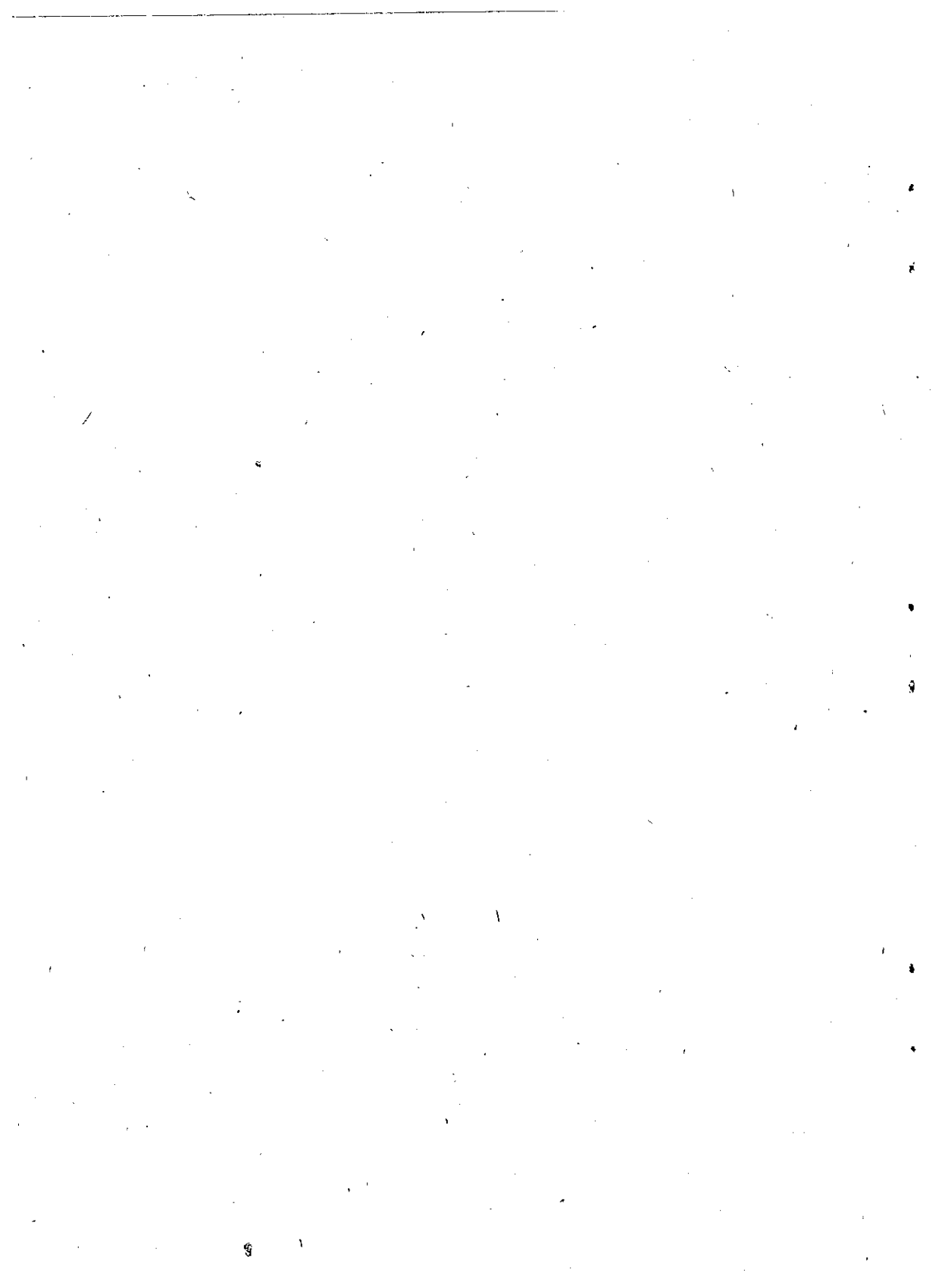
Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 570. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 11.XI. 1982 r.
Druk ukończono w styczniu 1983 r.

Lesław Kędzierski

PODSTAWY KOLORYMETRYCZNE SYSTEMÓW
TELEWIZJI KOLOROWEJ

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	1
2. Odbieranie wrażeń kolorowych przez zmysł wzroku	2
3. Cechy koloru i dopasowanie kolorymetryczne	5
4. Podstawowe prawa kolorymetrii	9
5. Przestrzeń kolorów i jej graficzne przedstawienie	11
6. Międzynarodowy układ współrzędnych kolorymetrycznych - XYZ	21
7. Położenie kolorów podstawowych i bieli odniesienia na wykresie chrominancji	27
8. Określenie na wykresie chrominancji dominującej długości fali i czystości koloru	32
9. Dostrzeganie zmian chrominancji. Elipsy Mc. Adam'a	34
10. Nowy wykres chrominancji /CIE 1976/	36
11. Parametry kolorymetryczne analizy i syntezy obrazu. Dopasowanie kolorymetryczne sceny i jej reprodukcji	38



PODSTAWY KOLORYMETRYCZNE SYSTEMÓW
TELEWIZJI KOLOROWEJ

1. WSTĘP

Wierne odtworzenie otaczającego nas świata wymagałoby /biorąc pod uwagę własności naszego zmysłu wzroku/ uzyskiwania na drodze telewizyjnej obrazów ruchomych, kolorowych i przestrzennych. Badania własności wzroku, a w szczególności jego ograniczeń pozwoliło jednak na znaczne uproszczenie tego zadania.

Wrażenie odtwarzania ruchu uzyskuje się, jak wiadomo, przez odtwarzanie dostatecznie dużej liczby obrazów nieruchomych różniących się pomiędzy sobą poszczególnymi fazami ruchu przedmiotów poruszających się, podobnie jak to się robi w kinematografii.

Natomiast wrażenie przestrzenności sceny uzyskuje się bądź przez wykorzystywanie praw perspektywy, bądź własności widzenia dwuocznego /w telewizji stereoskopowej/.

Odkrycie holografii umożliwi w przyszłości wykorzystanie jej także w telewizji, co pozwoli na odtwarzanie obrazów przestrzennych. Hologram zawiera bowiem pełną informację o przestrzennym rozkładzie światła odbitego od nadawanego obiektu. Przy przekazaniu więc tych informacji za pomocą sygnałów elektrycznych do miejsca odbioru można będzie uzyskiwać obrazy przestrzenne.

Wykorzystywanie holografii w telewizji nie jest jednak jeszcze możliwe ze względu na ograniczoną i niewystarczającą zdolność rozdzielczą urządzeń analizujących, jak również ze względu na bardzo szerokie pasmo częstotliwości potrzebne do przesyłania informacji zawartych w hologramie.

Obecnie więc i w bliskiej przyszłości musimy ograniczyć się do otwarzania obrazów kolorowych na płaszczyźnie, w

których wrażenie głębi uzyskuje się przez wykorzystywanie własności naszego wzroku. Wierne odtwarzanie kolorów nadawanej sceny jest przy tym możliwe przez powiązanie systemów i standardów telewizji kolorowej z mechanizmem odbierania wrażeń kolorowych przez człowieka oraz z prawami rządzącymi kolorymetrią.

2. ODBIERANIE WRAŻEN KOLOROWYCH PRZEZ ZMYŚL WZROKU

W celu zrozumienia procesów stosowanych przy nadawaniu i odbiorze informacji o kolorach sceny, należy przede wszystkim poznać specyfikę wzroku ludzkiego, a w szczególności mechanizm odbierania wrażeń kolorowych. Należy także zdefiniować samo pojęcie koloru oraz określić wielkości charakterystyczne dla tego pojęcia.

Mechanizm dostrzegania przez nas kolorów nie jest jeszcze całkowicie wyjaśniony. Według jednak istniejących obecnie hipotez /częściowo już potwierdzonych przez badania biologów/ widzenie kolorów można wytłumaczyć opierając się na teorii zakładającej istnienie trzech rodzajów czopków w siatkówce naszego oka: jednych, które zawierają substancję czułą na promieniowanie świetlne o zakresie częstotliwości odpowiadającym czerwieni, drugich czułych na promieniowanie odpowiadające zieleni oraz trzecich czułych na promieniowanie o barwie niebieskiej. Odpowiednio do tego mają istnieć również włókna nerwu wzrokowego, które selektywnie reagują na częstotliwości odpowiadające poszczególnym barwom. W siatkówce oka zachodziłaby więc trójkolorowa selekcja bodźców, pod wpływem których powstają w naszej świadomości odpowiednie wrażenia kolorowości.

Odczuwanie rodzaju koloru źródła promieniowania jest więc uzależnione od składu widmowego promieniowanej energii, pobudzającej w określony sposób selektywne elementy wzroku. Dostrzegalny przez człowieka zakres promieniowania widzialnego obejmuje przy tym fale o długościach ok. 380 nm do ok.

780 nm.

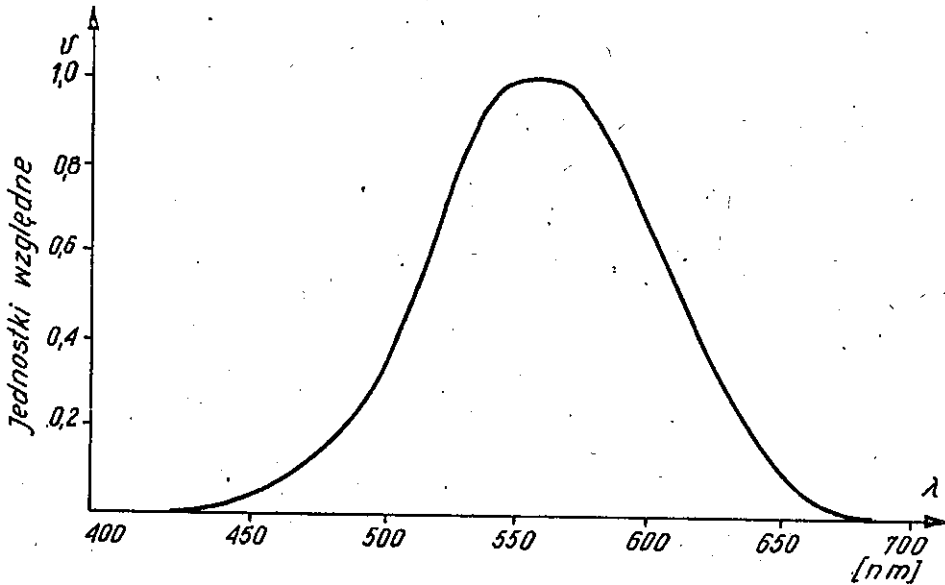
Jeżeli źródło światła emituje wszystkie długości fal zakresu widzialnego z jednakową energią, to kolor takiego światła jest odczuwany jako biały, charakteryzujący tzw. biel równoenergetyczną. Jest to w przybliżeniu kolor światła słonecznego rozproszonego przez chmury. Odwrotnie, jeżeli źródło promieniuje energię o jednej długości fali, lub w praktyce w bardzo wąskim przedziale długości fal, to mamy do czynienia z tzw. światłem monochromatycznym odczuwanym jako kolorowe. Kolor takiego światła jest przy tym zależny od długości fali energii świetlnej. Najkrótsze długości fal świetlnych obejmują kolory fioletowy i niebieski, długości fal leżących w środku zakresu widzialnego obejmują kolory zielone i żółte, a najdłuższe fale charakteryzują kolory pomarańczowe i czerwone. Również jeśli źródło promieniuje światło o wszystkich długościach fal, lecz o różnych energiach, to będzie ono także odczuwane jako kolorowe, przy czym rodzaj koloru będzie uzależniony od rozkładu energii w widmie promieniowania widzialnego.

Z kolei przedmiot oświetlony światłem białym równoenergetycznym będzie się wydawał tylko wówczas kolorowy, jeśli będzie odbijał jedną część widma oświetlającego go promieniowania silniej niż inne części tego widma, a przedmiot przezroczysty będzie wyglądał kolorowo, jeśli przepuszcza nie jednakowo poszczególne składowe widma promieniowania.

Kolor przedmiotu nie jest jednak jego cechą niezmienną, lecz - jak to już stwierdził Newton - zależy od rodzaju światła w jakim go oglądamy. Biała bowiem kartka papieru będzie się wydawała biała w świetle białym, natomiast czerwona przy oświetleniu światłem czerwonym, gdyż może odbijać jedy te składowe widma odpowiadające czerwieni. Podobnie np. przedmiot zielony będzie się wydawał zielony tylko wówczas, jeśli padające na niego światło będzie zawierać składowe odpowiadające zieleni. W przeciwnym przypadku może się on wydawać czarny, jeśli pochłonie wszystkie składowe widma światła padającego. Kolor oświetlonego przedmiotu zależy

więc od rozkładu energii w widmie światła odbijanego przez ten przedmiot.

Wzrok ludzki nie jest jednakowo czuły na promieniowanie świetlne o różnej długości fali, a więc i o różnej barwie. Na rys. 1 przedstawiono mianowicie charakterystykę spektralną



Rys. 1. Charakterystyka spektralna wzroku ludzkiego

ną wzroku ludzkiego /zwaną również krzywą widzialności, lub funkcją wizualną/ przedstawiającą natężenie wrażenia luminancji, jakie odczuwa przeciętny obserwator obserwując światło o jednakowej energii, lecz o zmieniającej się długości fali świetlnej. Największa czułość wzroku występuje dla promieniowania o długości fali ok. 555 nm, czyli odpowiadającej barwie zielono-żółtej. Czułość wzroku szybko maleje zarówno dla fal dłuższych, jak i krótszych od tej wartości.

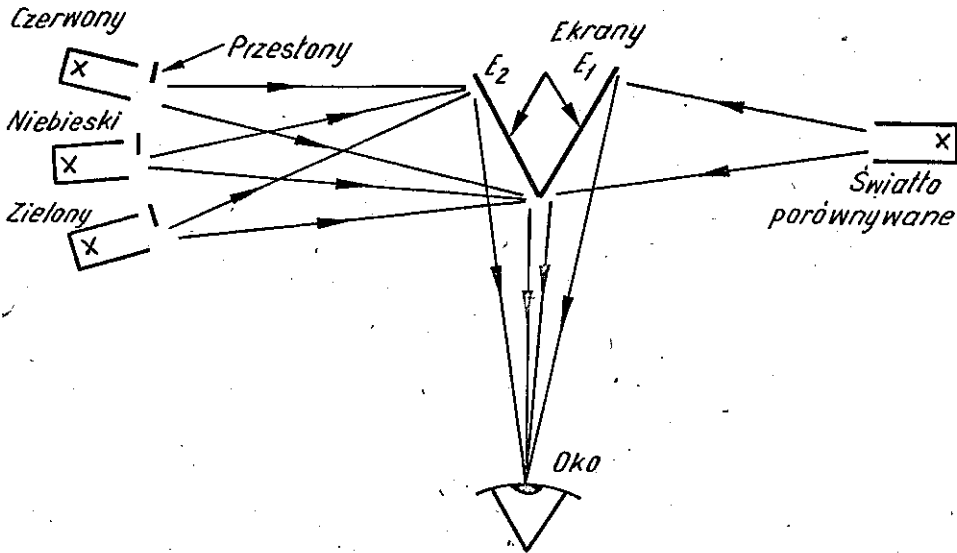
3. CECHY KOLORU I DOPASOWANIE KOLORYMETRYCZNE

Jeżeli dla odtworzenia koloru było by konieczne dokładne odtworzenie rozkładu energii w strumieniu światła trafiającego do oka widza, to możliwość praktycznej realizacji telewizji kolorowej była by wątpliwa ze względu na napotykaną w takim przypadku trudności. Okazuje się jednak, że nie jest to niezbędne, gdyż chociaż dwa źródła światła o jednakowym rozkładzie spektralnym dają zawsze wrażenie tego samego koloru, to jednocześnie dwa światła o całkowicie różnym rozkładzie spektralnym mogą również wywoływać wrażenie takiego samego koloru. Dla odtworzenia koloru nie jest więc niezbędne odtwarzanie całego rozkładu spektralnego koloru nadawanego.

Wrażenie koloru, zgodnie z trójbodźcową teorią widzenia, uzyskuje się bowiem przez jego rozkład w aparacie widzenia na trzy kolory, zwane podstawowymi: czerwony, zielony i niebieski. Dla odtworzenia koloru powinno więc również wystarczyć zsumowanie tych trzech kolorów podstawowych R G B^{x/} / w odpowiednich oczywiście proporcjach /. Łatwo daje się to potwierdzić w tzw. kolorymetrze, którego zasadę działania podaje rys. 2. Dwa rozpraszające ekrany E_1 i E_2 są w nim tak ustawione, aby można je było obserwować jednocześnie. Jeden z ekranów zostaje oświetlony światłem badanym C, a drugi jest oświetlany z trzech źródeł światła o kolorach podstawowych R G i B, przy czym strumienie świetlne z tych źródeł nakładają się na siebie /czyli sumują/ na powierzchni ekranu E_2 . Dozowanie poszczególnych światel R, G, B odbywa się za pomocą regulowanych diafragm.

Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że odpowiednio dozując światła kolorów podstawowych można dla bardzo dużej liczby dowolnych kolorów uzyskać wrażenie występowania tego

^{x/} Kolory podstawowe: czerwony, zielony i niebieski przyjęto oznaczać pierwszymi literami ich nazw w języku angielskim - Red /czerwony/, Green /zielony/ i Blue /niebieski/.

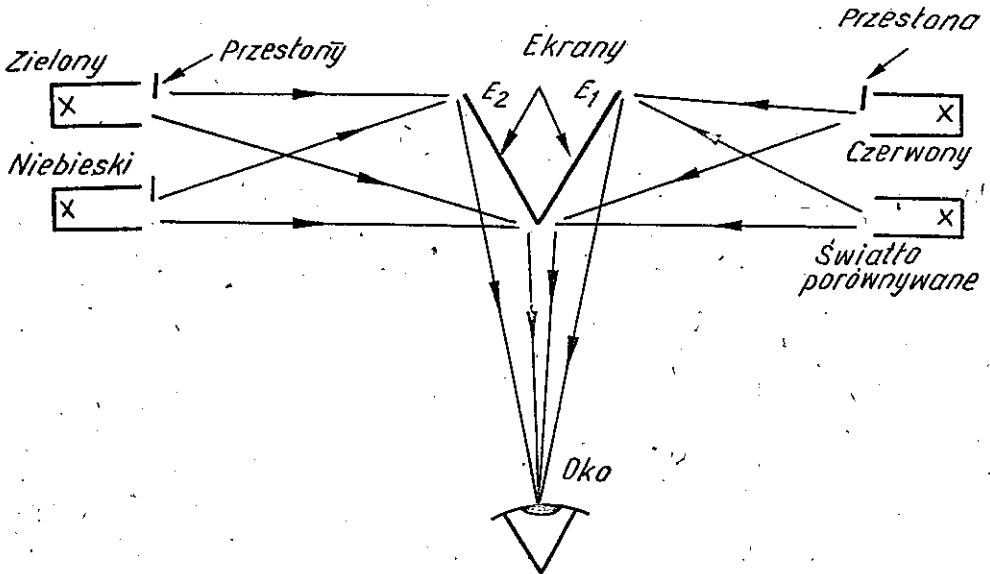


Rys. 2. Dopasowywanie kolorymetryczne trzech źródeł światła o kolorach podstawowych do światła porównywanego

samego koloru na obu ekranach E_1 i E_2 , czyli uzyskać dopasowanie kolorymetryczne mieszaniny światła RGB do światła o kolorze badanym C. Przy użyciu jedynie dwu światła uzyskanie dopasowania kolorymetrycznego do koloru światła badanego nie jest w ogólności możliwe. Przy użyciu natomiast więcej niż trzech źródeł światła kolorowych dopasowanie kolorymetryczne jest w ogólności możliwe, nie uzyskuje się jednak jednego, ściśle określonego rozwiązania, lecz nieskończenie wiele takich rozwiązań, wskutek nadmiernej liczby parametrów będących w dyspozycji.

Istnieje jednak pewna liczba przypadków, kiedy przy oświetlaniu ekranu E_2 trzema źródłami światła RGB nie można uzyskać dopasowania kolorymetrycznego do koloru C światła oświetlającego ekran E_1 /np. przypadek bardzo nasyconych kolorów zielonych/. Zachodzi wówczas konieczność przeniesienia jednego ze światła RGB /najczęściej czerwonego/ na

prawą stronę kolorymetru i spowodowanie, aby oświetlało ono ekran E_1 razem ze światłem C /rys.3/. Wówczas, za pomocą



Rys. 3. Dopasowywanie kolorymetryczne dwu źródeł światła o kolorach podstawowych do sumy światła porównywanego i światła w trzecim kolorze podstawowym

pozostałych dwu źródeł światła daje się uzyskać dopasowanie kolorymetryczne do koloru uzyskanego z sumowania światła badanego C oraz odpowiednio dozowanego, np. światła R.

Światło kolorowe, jeśli idzie o jego odtworzenie, może więc być zawsze charakteryzowane przez trzy parametry i dla uzyskania wrażenia takiego samego koloru nie jest konieczne odtwarzanie całego jego widma spektralnego.

Z drugiej strony, z naszej codziennej praktyki można również łatwo wywnioskować, że światło kolorowe czy przedmiot kolorowy z subiektywnego punktu widzenia charakteryzuje się trzema cechami. Światło lub przedmiot kolorowy, w zależności od stopnia jego naświetlenia, może się wydawać bardziej lub

mniej jaskrawy. Poza tym, charakteryzuje się on cechą zwaną potocznie barwą, określaną umownie jako np. żółta, zielona fioletowa czy inna. I wreszcie kolor może być "ostry", czyli silnie nasycony, bądź też pastelowy, czyli słabo nasycony, blade w zależności od stopnia jego zmieszania z kolorem białym. Tak to robią np. malarze dodając farby białej, aby uzyskać pastelowe odcienie kolorów. Cechami psychofizjologicznymi koloru będą więc jego jaskrawość, barwa i nasycenie.

Te subiektywnie oceniane cechy koloru mają jednak również swoje odpowiedniki fizyczne, dające się mierzyć metodami obiektywnymi. Jaskrawość jest to bowiem wrażenie wzrokowe wywołane luminancją powierzchni świecącej, czyli natężeniem światła emitowanego w określonym kierunku z jednostki powierzchni źródła promieniowania bezpośredniego lub odbitego. Barwa jest natomiast wrażeniem wzrokowym uzależnionym od dominującej długości fali promieniowania świetlnego, pod którą rozumiemy długość fali światła monochromatycznego, które zmieszane w odpowiedniej proporcji ze światłem białym przyjętym jako odniesienie^{x/} daje takie samo wrażenie wzrokowe jak obserwowane źródło światła, czy powierzchnia oświetlona. I wreszcie nasycenie jest to wrażenie wzrokowe, jakie wywołuje kolor o danej czystości, pod którą rozumiemy procentowy udział monochromatycznego promieniowania świetlnego o danej barwie w mieszaninie tego promieniowania z promieniowaniem dającym wrażenie wzrokowe światła białego, przyjętego jako odniesienie.

x/ Pojęcie "światło białe" lub kolor biały nie są pojęciami ściśle określonymi. Istnieje nieskończenie wielka liczba "odcieni" bieli, które można zresztą określić wielkościami fizycznymi np. temperaturą barwy.^{xx/} Biel odniesienia w telewizji kolorowej jest związana z własnościami ekranu kineskopu kolorowego i jest jednym z parametrów systemu.

xx/ Temperatura barwy danego ciała jest to temperatura, do której należy ogrzać ciało doskonale czarne, aby nadać mu tę samą barwę.

Dla reprodukcji koloru trzeba więc odtworzyć bądź trzy jego składowe w kolorach podstawowych RGB, które należy zmieszać przez sumowanie w odpowiednich proporcjach, bądź też trzy cechy koloru, a więc jego luminancję, dominującą długość fali i czystość, powodujące odczuwanie w sferze wrażeń psychofizjologicznych jaskrawości, barwy i nasycenia tego koloru.

Oba powyższe sposoby odtwarzania kolorów są wykorzystywane w telewizji kolorowej.

4. PODSTAWOWE PRAWA KOLORYMETRII

Procesami kolorymetrycznymi, a przede wszystkim sumowaniem kolorów rządzą trzy podstawowe prawa sprawdzalne doświadczalnie i ustalone przez fizyka niemieckiego Grassmanna.

Pierwsze prawo Grassmanna, wynikające z doświadczenia z kolorymetrem użytym do dopasowywania kolorów, brzmi: dla każdego koloru można uzyskać dopasowanie /a więc i odtworzyć go/ za pomocą sumy dodatnich czy ujemnych wartości trzech kolorów zwanych podstawowymi i to tylko w jeden określony sposób.

Wybór kolorów podstawowych powinien być przy tym taki, aby nie można było uzyskać dopasowania kolorymetrycznego do żadnego z nich za pomocą dwu pozostałych.

Prawo to można przedstawić w formie zapisu algebraicznego. Oznaczając mianowicie przez (R), (G), (B) jednostkową wartość odpowiedniego rodzaju koloru podstawowego /np. światła/, a przez R, G, B wielkość numeryczną, czyli liczbę jednostek danego koloru, to stan dopasowania kolorymetrycznego /zgodnie z rys. 2/ można zapisać jako:

$$C(C) = R(R) + G(G) + B(B) \quad /1/$$

Dla dopasowania C jednostek koloru badanego (C) należy zmieszać przez sumowanie R jednostek koloru (R), G jednostek koloru (G) i B jednostek koloru (B).

Podobnie stan dopasowania kolorometrycznego podany na rys. 3 może być zapisany, np. w formie

$$C(C) + R(R) = G(G) + B(B), \quad /2/$$

lub

$$C(C) = G(G) + B(B) - R(R) \quad /20/$$

Ponieważ nie można fizycznie uzyskać ujemnych liczb jednostek światła, więc w praktyce realizuje się dopasowanie zgodne z zależnością /2/.

Drugie prawo Grassmanna precyzuje, że: zmieniając energie każdego ze źródeł światła w takim samym stosunku k /tzn. zmieniając wartości współczynników C , R , G i B / nie zmieniamy stanu dopasowania kolorometrycznego. Równanie kolorometryczne /1/ pozostaje więc nadal słuszne.

Można to zapisać jako:

$$kC(C) = kR(R) + kG(G) + kB(B) \quad /3/$$

I wreszcie trzecie prawo Grassmanna dotyczy zachowania się kolorów w procesie ich sumowania, przy czym ustala ono, że: przy sumowaniu kolorów zamiana jednego z nich przez kolor równoważny mu kolorometrycznie nie zmienia wyniku sumowania, niezależnie od charakterystyk spektralnych kolorów.

Trzecie prawo Grassmanna jest szczególnie ważne, bowiem wynika z niego, że wrażenie określonego koloru nie określa jednoznacznie jego własności fizycznych, gdyż danemu kolorowi może odpowiadać wiele rozkładów widmowych światła.

Jeśli mamy np. trzy światła kolorowe oraz składowe ich dopasowania kolorometrycznego, a więc

$$C_1(C_1) = R_1(R) + G_1(G) + B_1(B)$$

$$C_2(C_2) = R_2(R) + G_2(G) + B_2(B)$$

$$C_3(C_3) = R_3(R) + G_3(G) + B_3(B)$$

to sumę kolorów $C_1(C_1) + C_2(C_2) + C_3(C_3)$, bądź niektóre jej składniki, można zastąpić przez sumę ich składowych w kolorach podstawowych, czyli

$$C_1(C_1) + C_2(C_2) + C_3(C_3) = (R_1 + R_2 + R_3)(R) + (G_1 + G_2 + G_3)(G) + (B_1 + B_2 + B_3)(B)$$

/4/

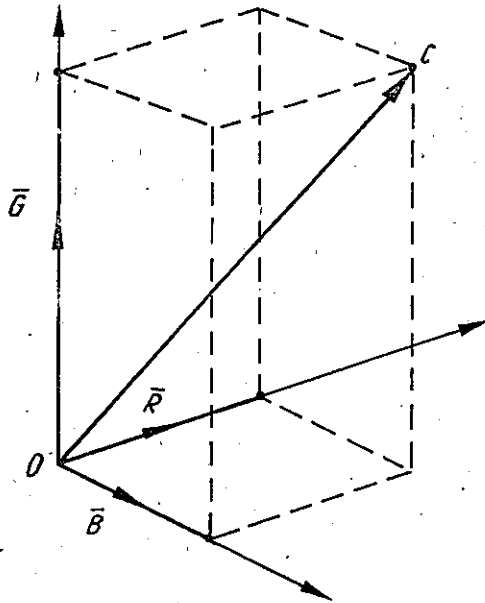
Należy przy tym zaznaczyć, że przy sumowaniu kolorów ich luminancje również się sumują. Współczynniki trójbodźcowe R G B oznaczają bowiem na przykład liczby jednostek luminancji /czy na przykład mocy promieniowanych/ poszczególnych kolorów podstawowych.

5. PRZESTRZEŃ KOLORÓW I JEJ GRAFICZNE PRZEDSTAWIENIE

Jeśli kolor reprezentują zawsze trzy wielkości, to może być on przedstawiony w przestrzeni trójwymiarowej. Każdemu z kolorów podstawowych można przy tym przypisać pewną oś, tworząc w ten sposób układ współrzędnych bądź ukośnokątny, bądź też - co będzie wygodniejsze - prostokątny.

Nanosząc na każdą z osi odpowiednią liczbę R G B jednostek kolorów podstawowych będziemy mogli przedstawić kolor jako punkt C w przestrzeni, lub jako wektor \overline{OC} , którego rzuty na trzy osie współrzędnych będą odpowiadały tzw. współczynnikom trójbodźcowym $\overline{R} \ \overline{G} \ \overline{B}$ /rys. 4/. Istnieje przy tym odpowiedniość pomiędzy prawem sumowania kolorów i prawem sumowania geometrycznego wektorów.

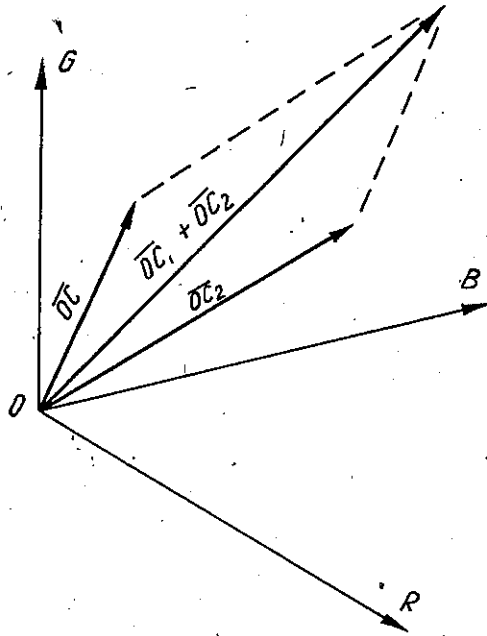
Jeśli bowiem mamy np. dwa kolory - jeden przedstawiony przez wektor \overline{OC}_1 o współrzędnych trójbodźcowych $\overline{R}_1 \ \overline{G}_1 \ \overline{B}_1$ i drugi przez wektor \overline{OC}_2 o współrzędnych $\overline{R}_2 \ \overline{G}_2 \ \overline{B}_2$, to suma $\overline{OC}_1 + \overline{OC}_2$ uzyskana geometrycznie /rys. 5/, będzie zgodna z wynikiem sumowania kolorometrycznego na podstawie trzeciego prawa Grassmanna.



Rys. 4. Kolor jako wektor otrzymywany z sumowania współrzędnych trójbodźcowych

Współczynniki trójbodźcowe koloru uzyskanego przez sumowanie wyniosą bowiem $\bar{R}_1 + \bar{R}_2$, $\bar{G}_1 + \bar{G}_2$ i $\bar{B}_1 + \bar{B}_2$.

Przedstawienie koloru w trójwymiarowym układzie współrzędnych daje nam informacje o wszystkich trzech jego parametrach fizycznych, a więc o: luminancji, dominującej długości fali i czystości. Przy rozwiązywaniu jednak zadań praktycznych najczęściej interesują nas parametry jakościowe koloru, a więc jego kolorowość, czyli chrominancja. Oznacza to, że interesujemy się przede wszystkim ilościowymi stosunkami wybranych kolorów podstawowych, w jakich powinny one wzajemnie występować, aby uzyskać żądany kolor /nie biorąc pod uwagę jego luminancji/. Dla takiego celu zamiast współczynnikami ilościowym R_1, G_1, B_1 /np. luminancjami, czy mocami promieniowania/ wystarczy posługiwać się współczynnikami wyrażonymi w jednostkach względnych, które będą dalej nazywane współrzędnymi chrominancji. Można je określić w sposób następujący. Na podstawie zależności /1/ można zapisać, że



Rys. 5. Kolorymetryczne sumowanie wektorów dwu kolorów

przy zrównoważeniu koloru (C) ilości C tego koloru odpowiada suma R G B ilości kolorów podstawowych, czyli

$$C = R + G + B$$

/5/

Dzieląc każdą z bezwzględnych wartości R G B przez ich sumę, otrzymujemy wartości stosunkowe, czyli współrzędne chrominancji r, g, b wyrażone w jednostkach względnych, a mianowicie:

$$r = \frac{R}{R+G+B} ; \quad g = \frac{G}{R+G+B} ; \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

/6/

oraz

$$c = \frac{C}{R+G+B} = 1$$

Podstawową własnością współrzędnych chrominancji danego koloru jest, że ich suma

$$r + g + b = 1 \quad //7/$$

Wystarczy więc znać dwie z nich, aby można było zawsze określić trzecią jako ich różnicę od jedności.

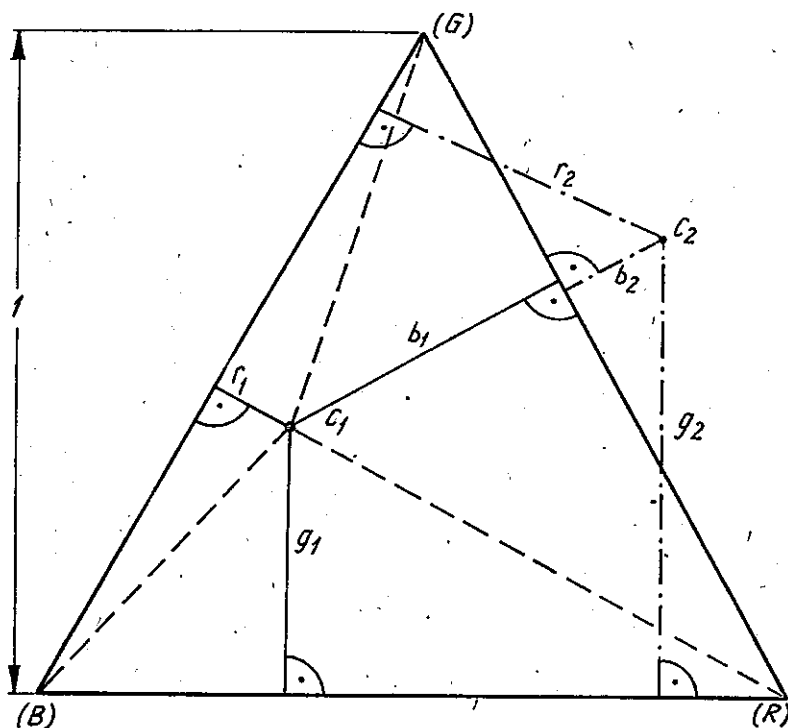
Wykorzystując powyższą własność współrzędnych chrominancji można rozwiązywać jakościowe zagadnienia kolorometryczne /np. syntezę kolorów/ za pomocą wykresów na płaszczyźnie.

Jeśli bowiem w układzie prostokątnych osi współrzędnych kolorów podstawowych przeprowadzić płaszczyznę przecinającą każdą z tych osi w punkcie odpowiadającym jednakowej wartości koloru podstawowego (R), (G) lub (B), to będzie to płaszczyzna jednostkowa opisana jak wiadomo równaniem $R+G+B=1$.

Wektor koloru $\overline{OC_1}$ przetnie tę płaszczyznę jednostkową np. w punkcie C_1 /rys. 6/, którego współrzędne będą wynosiły r_1, g_1, b_1 , przy czym $r_1 + g_1 + b_1 = 1$.

Punkty przecięcia osi współrzędnych z płaszczyzną jednostkową tworzą wierzchołki trójkąta równobocznego (R), (G), (B). Suma odległości punktu C_1 od boków trójkąta (R) (G) (B) jest więc równa jego wysokości /jak to jest w trójkącie równobocznym/. Przyjmując więc wysokość trójkąta równą jedności otrzymamy, że odległości punktu C_1 od boków trójkąta są współrzędnymi chrominancji r_1, g_1, b_1 , gdyż spełniają zależność //7/.

Jeśli współczynniki trójbodźcowe R G B rozpatrywanego koloru są wszystkie dodatnie, to punkt C_1 , reprezentujący jego chrominancję, leży wewnątrz trójkąta. Jeśli jednak któryś z tych współczynników ma wartość ujemną, to punkt C_2 , reprezentujący jego chrominancję, leży na zewnątrz trójkąta.



Rys. 6. Płaszczyzna jednostkowa kolorów

Współrzędną chrominancji otrzymuje się wówczas opuszczając prostopadłe na boki trójkąta, lub na ich przedłużenia. Współrzędne te mogą uzyskiwać zarówno wartości dodatnie jak i ujemne.

Współrzędnymi r , g , b są odpowiednie odcinki prostopadłe do boków trójkąta leżących na przeciw odpowiednich wierzchołków. Jeśli np. $b_1 = 1$, to $r_1 = g_1 = 0$, co oznacza, że mamy do czynienia z kolorem podstawowym (B), jeśli zaś np. $g = 0$, to oznacza to chrominancję koloru leżącą na boku (B) (R). Znak współrzędnej będzie dodatni, jeśli prostopadła jest opuszczona na bok /lub jego przedłużenie/ obrócony do wnętrza trójkąta, a ujemny - jeśli prostopadła jest opuszczona na zewnętrzną stronę boku trójkąta /lub na jego przedłuże-

nie/. Na przykład dla punktu C_2 mamy współrzędne r_2 i g_2 dodatnie, a współrzędną b_2 ujemną.

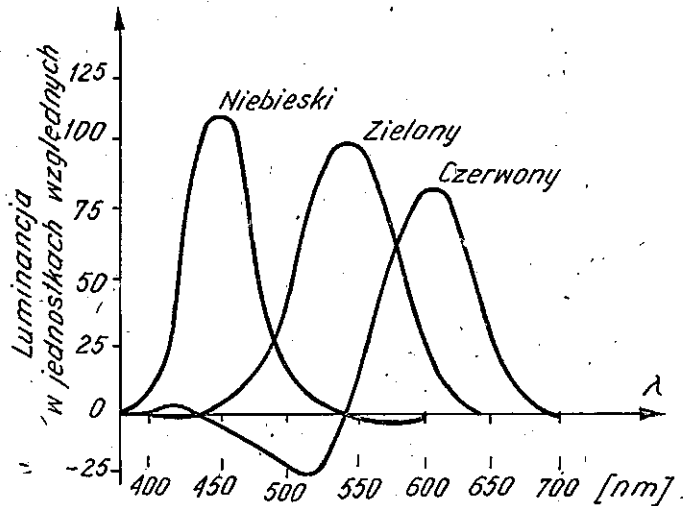
Położenie w przestrzeni kolorów wszystkich tzw. kolorów spektralnych /tj. takich, które występują w widmie światła białego równoenergetycznego/ może być znalezione przez określenie współczynników trójbodźcowych \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} /kreski nad literami oznaczają, że są to współczynniki trójbodźcowe używane przy równoważeniu kolorów spektralnych występujących w widmie światła białego równoenergetycznego/. Współczynniki te zostały uzyskane przy równoważeniu kolorów spektralnych w kolorymetrze, a więc zgodnie z zależnością:

$$\text{kolor spektralny} = \bar{r}(R) + \bar{g}(G) + \bar{b}(B)$$

Współczynniki trójbodźcowe mogą przy tym uzyskiwać zarówno wartości dodatnie jak i ujemne.

Pomiary takie ze względu na ich złożoność, a także ze względu na ich znaczenie dla obliczeń kolorymetrycznych zostały dokonane przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową /CIE/, przy pomocy tzw. standardowych obserwatorów, a wyniki ich zostały znormalizowane w skali międzynarodowej. Jako kolory podstawowe zostały przy tym ustalone: czerwony o długości fali $\lambda_r = 700$ nm, zielony o $\lambda_g = 546,1$ nm i niebieski o $\lambda_b = 435,8$ nm. Zmieszanie tych trzech światła promieniowanych z jednakową energią spowoduje uzyskanie światła białego równoenergetycznego. Światła te obserwowane oddzielnie będą jednak miały subiektywnie oceniane luminancje /w więc askrawości/ w stosunkach jak 1 dla czerwieni, 4,59 dla zieleni i 0,06 dla niebieskiego. Wynika to z kształtu krzywej względnej czułości wzroku ludzkiego /rys. 1/.

Przebiegi tak określonych współczynników trójbodźcowych dla kolorów spektralnych o długościach fal od 400 nm do 700 nm są podane na rys. 7. Jak widać, dla dopasowania szeregu kolorów monochromatycznych współczynniki trójbodźcowe \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} muszą mieć wartości ujemne.

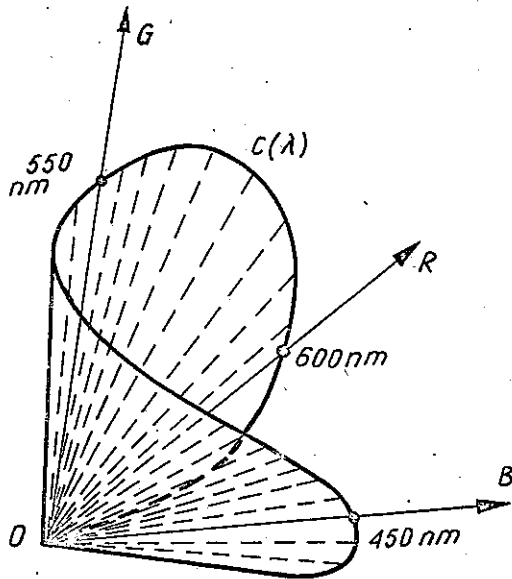


Rys. 7. Charakterystyki spektralne współczynników trójbodźcowych

Na podstawie wartości współczynników trójbodźcowych podanych na rys. 7 można z kolei wykreślić w układzie prostokątnych osi R G B wektory wszystkich kolorów spektralnych, przy czym wszystkie one będą wychodziły z początku "0" układu współrzędnych /rys. 8/, a końce tych wektorów będą tworzyły krzywą $C(\lambda)$. W obszarze ograniczonym przez część stożkową o wierzchołku O, krzywą $C(\lambda)$ i płaszczyzną utworzoną przez wektory czerwieni i fioletu leżące na krańcach widma będą się mieściły wszystkie wektory kolorów, jakie można uzyskać przez mieszanie wybranych współczynników trójbodźcowych.

Położenie wektorów kolorów spektralnych otrzymuje się odkładając dodatnie wartości współczynników trójbodźcowych od początku układu w kierunku wzrastających wartości na danej osi, a w przypadku jeśli dany współczynnik trójbodźcowy ma wartość ujemną, to w kierunku przeciwnym.

Płaszczyzna łącząca końcowe wektory widma widzialnego nosi nazwę płaszczyzny purpur, gdyż leżą na niej wszystkie kolory niespektralne nazywane purpurowymi. Nie występują one



Rys. 8. Wektory kolorów, jakie można uzyskać przez mieszanie wybranych współczynników trójbodźcowych

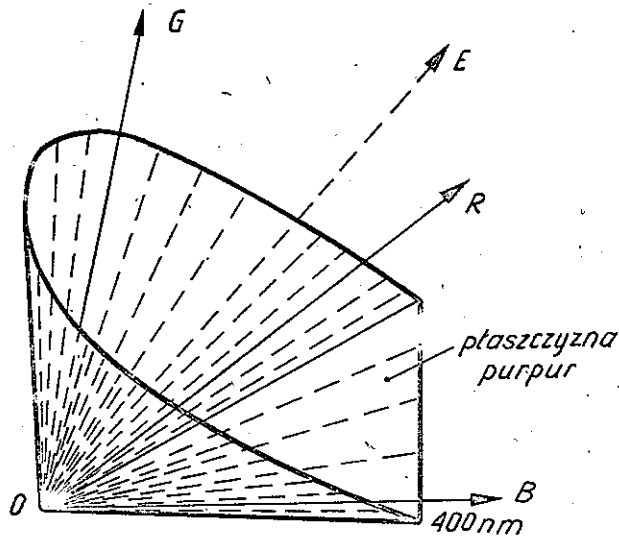
w widmie światła słonecznego i nie można im przypisać określonej długości fali świetlnej, a są uzyskiwane przez mieszanie w różnych proporcjach kolorów podstawowych: czerwonego i niebieskiego.

Ponieważ biel równoenergetyczną uzyskuje się przez zmieszanie w jednakowych proporcjach kolorów podstawowych, więc wektor reprezentujący biel równoenergetyczną będzie równoległy od wszystkich trzech osi współrzędnych i będzie przechodził przez początek układu O . Będzie to wektor achromatyczny, którego punkt O odpowiada czerni, a wszystkie inne różnym poziomom szarości, o luminancji wzrastającej wraz ze wzrostem odległości od punktu O . Również wszystkie inne wektory kolorów przechodzą przez punkt O , co oznacza, że każdy kolor staje się czarnym przy zerowej wartości luminancji.

Wektory kolorów nasyconych leżą w pobliżu powierzchni bocznej stożka, natomiast kolory pastelowe, blade jak również achromatyczne, a więc szare i białe, leżą w centralnej części stożka. Należy również zaznaczyć, że jeśli położenie wektora koloru zostało ustalone przy danym poziomie luminancji, to zachowuje on te same zależności kątowe przy wszystkich innych poziomach luminancji. Punkty przecięcia tego wektora z równoległymi płaszczyznami, lecz prostopadłymi do wektora szarego /reprezentującymi stałe wartości luminancji/ będą miały takie same względne położenie na poszczególnych płaszczyznach. Pozwala to określać kolor /a właściwie jego chrominancję/ w układzie dwuwymiarowym, tzn. jako punkt leżący na jednej z płaszczyzn o stałej luminancji. Położenie tego punktu w stosunku do położenia punktów odpowiadających kolorom podstawowym będzie dawało informacje o dominującej długości fali świetlnej oraz o czystości koloru, natomiast nie będzie dawać informacji o luminancji koloru. Będą to więc jedynie informacje o chrominancji koloru.

Jedną z płaszczyzn o stałej luminancji, mającą szczególne znaczenie w dalszych rozdziałach, będzie płaszczyzna o zerowej luminancji. Będzie ona równoległa do innych płaszczyzn o stałej luminancji i będzie przechodzić przez początek układu współrzędnych "0", który będzie zresztą jedynym jej wspólnym punktem ze stożkiem kolorów spektralnych. Wszystkie wektory wychodzące z punktu 0 i leżące na tej płaszczyźnie mają luminancję zerową i są tzw. kolorami urojonymi /gdyż leżą poza stożkiem kolorów rzeczywistych/. Są to więc kolory, które nie dają się realizować w praktyce, lecz są wykorzystywane przy obliczeniach kolorymetrycznych.

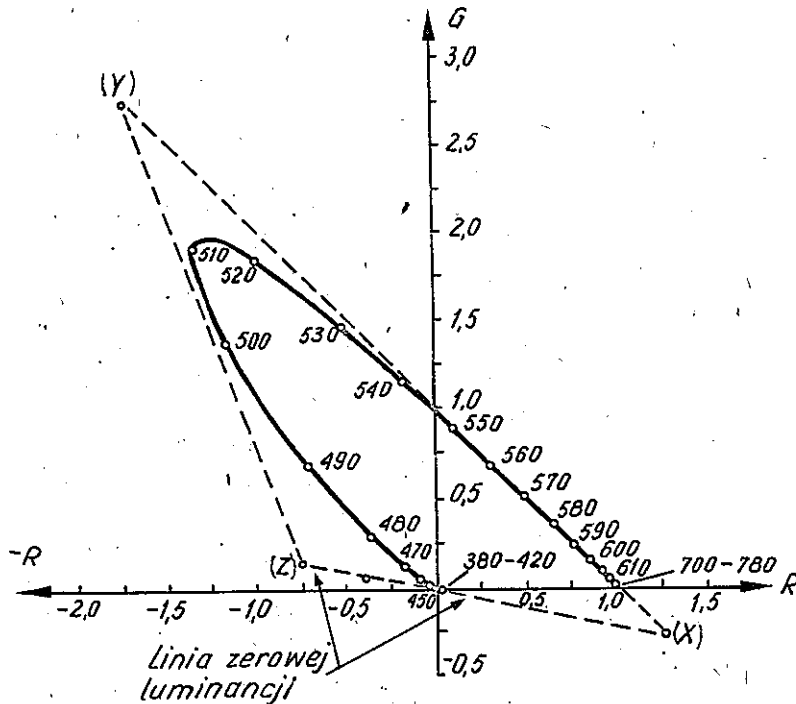
Jeśli w przestrzeni kolorów poprowadzimy płaszczyznę jednostkową, tzn. przechodzącą przez punkty na osiach współrzędnych o wartościach jednostkowych (R), (G), (B), to wektory kolorów, lub ich przedłużenia, przetną tę płaszczyznę w punktach tworzących charakterystyczną krzywą otwartą w kształcie podkowy /rys. 9/. Na krzywej tej będą



Rys. 9. Krzywa o kształcie podkowy leżąca na płaszczyźnie jednostkowej i przedstawiająca kolory spektralne, które można otrzymać z sumowania kolorów podstawowych

leżały wszystkie punkty reprezentujące kolory spektralne dające się uzyskać z sumowania kolorów podstawowych, a na prostej łączącej graniczne długości fal widna będą leżały punkty odpowiadające purpurem, uzyskiwanym z mieszania czerwieni i niebieskiego.

Rzut tej krzywej na płaszczyznę $R\ G$ daje nam z kolei nową krzywą /tzw. krzywa Wright'a i Guild'a/ podaną na rys. 10, która posłużyła do ustalenia przez CIE krzywych kolorowości powszechnie obecnie stosowanych w telewizji kolorowej.



Rys. 10. Rzut krzywej z rys. 9 na płaszczyznę RG

6. MIĘDZYNARODOWY UKŁAD WSPÓŁRZĘDNYCH KOLORYMETRYCZNYCH - XYZ

Dotychczas omawiany sposób przedstawiania kolorów w układzie współrzędnych R G B charakteryzuje się szeregiem niedogodności przy jego stosowaniu w praktyce, a przede wszystkim:

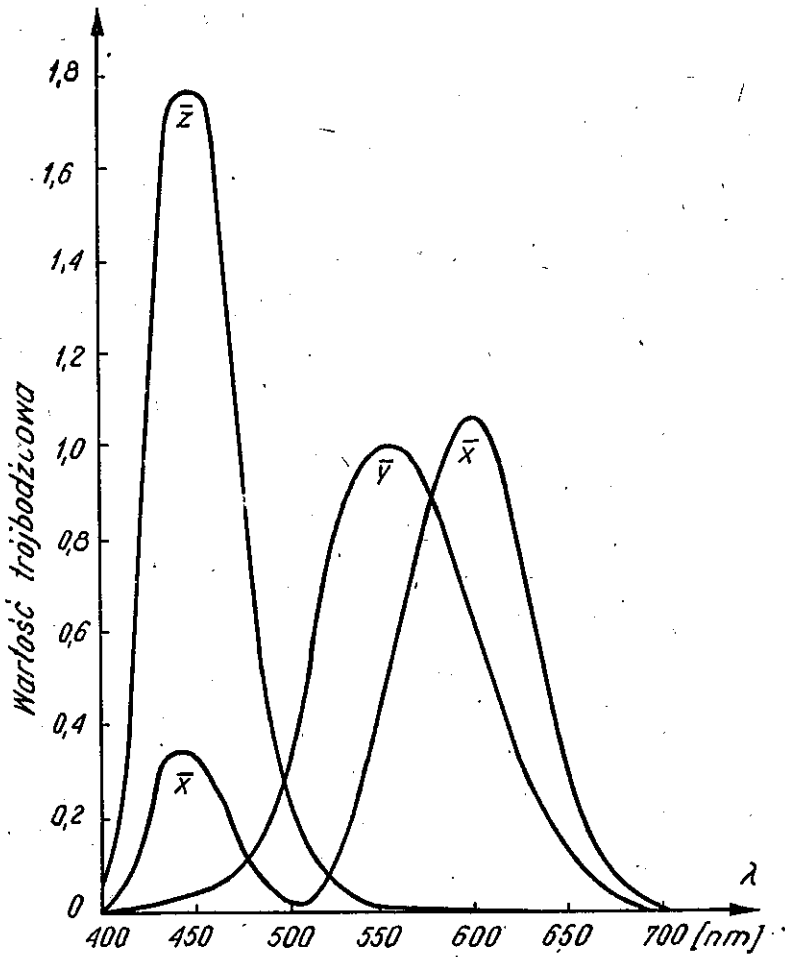
- a/ dla szeregu kolorów współczynniki trójbódcowe a także współrzędne chrominancji osiągają wartości ujemne, co utrudnia obliczenia kolorymetryczne;
- b/ w układzie współrzędnych R G B określenie luminancji koloru jest skomplikowane;

c/ sumowanie kolorów określonych współrzędnymi chrominancji i luminancją wymaga dość skomplikowanego przechodzenia na współczynniki trójbodźcowe.

W tej sytuacji CIE postanowiła w 1931 r. przyjąć nowy układ współrzędnych oparty na urojonych kolorach podstawowych oznaczonych przez X Y Z, który byłby pozbawiony niedogodności układu kolorów rzeczywistych R G B. Zasadnicze wymagania, jakie powinien spełniać taki układ powinny być następujące:

- a/ jedna z osi nowego układu współrzędnych powinna być osią luminancji, przy czym przyjęto, że będzie nią oś "O Y"; luminancja będzie więc niezależna od wartości X i Z. Wobec tego luminancje na osiach "O X i "O Z" będą równe zeru, czyli osie te muszą się znajdować na płaszczyźnie zerowej luminancji;
- b/ w celu eliminacji ujemnych wartości współczynników trójbodźcowych należy spowodować, aby płaszczyzny, na których leżą osie współrzędnych, znajdowały się na zewnątrz stożka kolorów. Powierzchnia boczna stożka kolorów jest prawie płaska w zakresie kolorów spektralnych o długościach fal w granicach od 546 nm do 700 nm. Płaszczyzna styczna do stożka w tym zakresie przecinając płaszczyznę zerowej luminancji pozwoli wyznaczyć jedną z osi leżących w tej płaszczyźnie, np. oś "O X". Trzecia płaszczyzna, na której leżyc będą osie "O Y" i "O Z" powinna być również styczna do stożka kolorów spektralnych i spełniać warunek, aby wektor bieli równoenergetycznej przechodził przez "środek ciężkości" trójkąta równobocznego uzyskanego przy przecięciu układu współrzędnych X Y Z przez płaszczyznę jednostkową, a więc przechodzącą przez punkty $X = 1$, $Y = 1$ i $Z = 1$. Warunek ten jest spełniony wówczas, gdy płaszczyzna jest styczna do stożka w miejscu odpowiadającym kolorowi spektralnemu o długości fali 507 nm. Przecięcia się tej płaszczyzny z poprzednią oraz z płaszczyzną zerowej luminancji określa położenie osi "O Y" i "O Z"

Położenie jednostkowych wartości nowych kolorów podstawowych (X), (Y), (Z) na wykresie R G jest podane na rys. 10. i wynosi ono:



Rys. 11. Wykresy współczynników trójbodźcowych X Y Z w funkcji długości fali.

- dla /X/: R = 1,2750; G = -0,2778 więc B = 0,0028
- dla /Y/: R = -1,7394; G = 2,7674 więc B = -0,0280
- dla /Z/: R = -0,7429; G = 0,1409 więc B = 1,6020

Każdy kolor rzeczywisty może być określony zarówno w układzie R G B jak i X Y Z, przy czym stan dopasowania kolorymetrycznego może być przedstawiony jako

$$C(C) = R(R) + G(G) + B(B) \quad /8/$$

bądź też jako

$$C(C) = X(X) + Y(Y) + Z(Z) \quad /9/$$

Zawsze przy tym jest możliwe przejście z jednego sposobu przedstawiania na drugi, gdyż w układach linearnych można, jak wiadomo, przechodzić z jednego układu współrzędnych na inny, stosując równania transformacyjne typu

$$\begin{aligned} X &= k_1 R + k_2 G + k_3 B \\ Y &= k_4 R + k_5 G + k_6 B \\ Z &= k_7 R + k_8 G + k_9 B, \end{aligned} \quad /10/$$

które dla naszego przypadku przybiorą postać

$$\begin{aligned} X &= 2,7690 R + 1,7518 G + 1,1300 B \\ Y &= 1,0000 R + 4,5907 G + 0,0601 B \\ Z &= 0,0000 R + 0,0565 G + 5,5943 B \end{aligned} \quad /11/$$

Współczynniki trójbodźcowe \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} , dla bieli równoenergetycznej są podane na rys. 11, przy czym - tak jak to było w założeniu - mają one jedynie wartości dodatnie. Poza tym, ponieważ osie O X i O Z leżą na płaszczyźnie zerowej luminancji, więc i krzywe \bar{X} oraz \bar{Z} mają luminancję zerową, a jedynie krzywa \bar{Y} reprezentuje luminancję koloru i jest identyczna z krzywą spektralnej czułości wzroku.

Podobnie jak poprzednio, również i dla wartości X, Y, Z

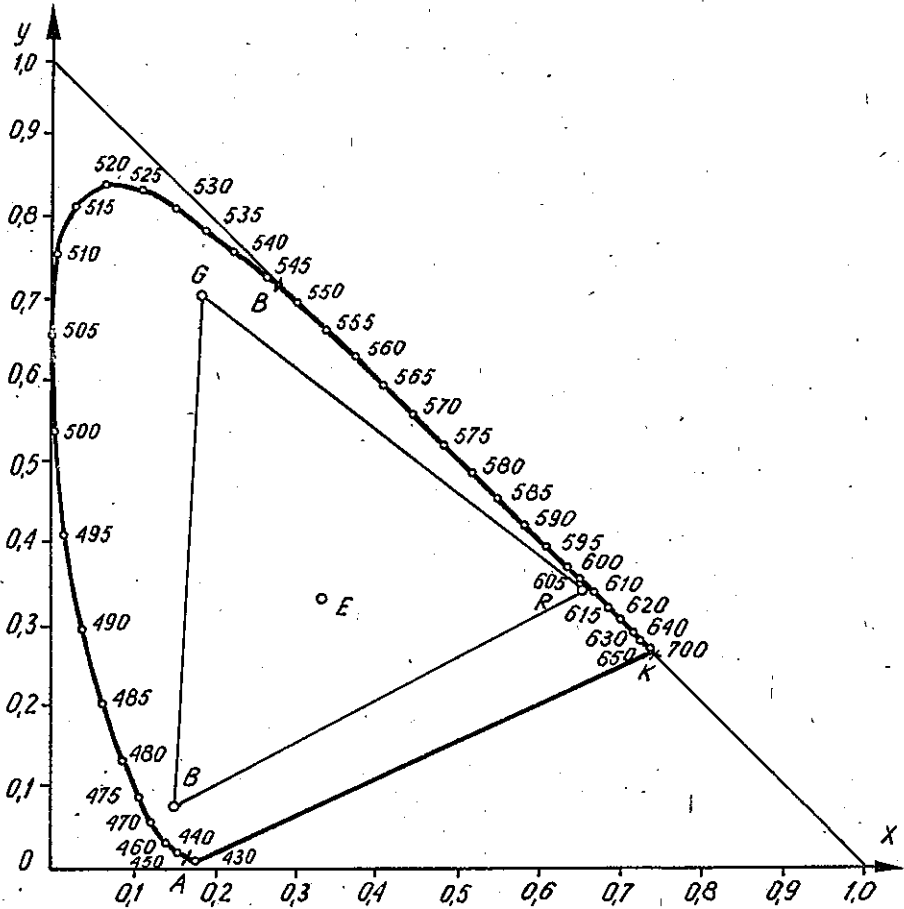
można określić współrzędne chrominancji:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} ; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} ; \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} ; \quad /12/$$

przy czym oczywiście

$$x + y + z = 1$$

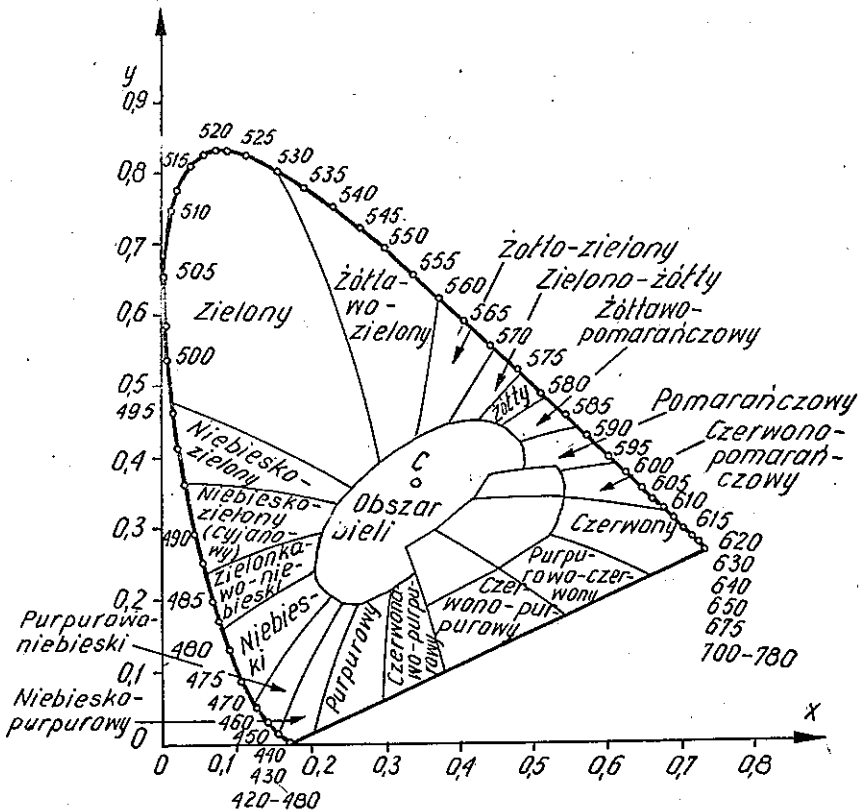
/13/



Rys. 12. Wykres chrominancji CIE

czyli znajomość dwu współrzędnych pozwala obliczyć trzecią jako ich różnicę od jedności.

Jeśli obecnie w układzie współrzędnych X Y Z przeprowadzić płaszczyznę jednostkową, to jej przecięcie ze stożkiem kolorów da krzywą kolorów spektralnych w formie podkowy, a jej rzut prostokątny na płaszczyznę "(Y) O (x)" da nam także krzywą kolorów spektralnych na płaszczyźnie trójkąta prostokątnego /rys. 12/, zwaną wykresem chrominancji CIE. Każdy punkt płaszczyzny odpowiadający kolorowi jest tu wyznaczony przez dwie współrzędne x i y /zmieniające się od



Rys. 13. Wykres chrominancji CIE z oznaczeniem obszarów odpowiadających określonym barwom

O do 1/, a więc przez współrzędne chrominancji określające barwę i czystość koloru. Trzecią współrzędną otrzymamy jako $z = 1 - (x + y)$. Wykres chrominancji z oznaczeniem obszarów odpowiadających określonym barwom, opracowany przez Kelleya, jest z kolei podany na rys. 13.

7. POŁOŻENIE KOLORÓW PODSTAWOWYCH I BIELI ODNIESIENIA NA WYKRESIE CHROMINANCJI

Kolory podstawowe przyjęte swego czasu przez CIE są nasyczonymi kolorami monochromatycznymi, leżącymi na krzywej kolorów spektralnych z rys. 12 i są oznaczone literami A, B i K.

W telewizji kolorowej obrazy są jednak odtwarzane prawie wyłącznie na luminujących ekranach kineskopów. Wybrane więc kolory podstawowe muszą być możliwe do uzyskania za pomocą luminoforów i mieć przy tym dostatecznie dużą wydajność świecenia.

Dlatego też przy normalizowaniu w Stanach Zjednoczonych A.P. w 1953 r. parametrów nowoczesnego systemu telewizji kolorowej zostały przez FCC /Federalny Komitet Komunikacyjny/ ustalone nieco inne kolory podstawowe, tj. takie, które można było realizować za pomocą istniejących luminoforów. Wybrano więc kolory o współrzędnych chrominancji

- czerwony R o $x = 0,67$ oraz $y = 0,33$

- zielony G o $x = 0,21$ oraz $y = 0,71$

/14/

- niebieski B o $x = 0,14$ oraz $y = 0,08$

Położenie tych kolorów podstawowych jest podane na rys.12. Przy tak wybranych kolorach podstawowych można prawidłowo odtworzyć wszystkie kolory zawarte wewnątrz trójkąta R G B. Dla kolorów leżących poza trójkątem będzie można prawidłowo odtworzyć jedynie barwę koloru, natomiast nie odtworzymy prawidłowo jego nasycenia /nasycenie będzie zawsze mniejsze/.

W naturze jednak bardzo rzadko występują kolory o bardzo dużym nasyceniu. Pomiaru kolorymetryczne wykazują, że kolory

tkanin, kwiatów, liści, minerałów, obrazów itd. są bardzo dalekie od kolorów nasyconych. Mają one z reguły dużą domieszkę bieli, są więc niejako rozpuszczone w bieli w większym lub mniejszym stopniu i w praktyce leżą wewnątrz trójkąta R G B. Można przy tym stwierdzić, że skala reprodukowanych w telewizji kolorów jest znacznie większa niż np. w fotografii kolorowej, czy w nowoczesnym druku kolorowym. Porównując jednak powierzchnię trójkąta R G B z powierzchnią, na której mieszczą się kolory rzeczywiste, widzimy, że największe straty zachodzą dla kolorów zielonego i odcieni zielono-niebieskich /rys. 12/. Nie ma to jednak bardzo istotnego znaczenia praktycznego, gdyż zieleni otaczających nas obiektów nie jest z reguły kolorem czystym - nasyconym, a poza tym, jak wykazały przeprowadzone badania, czułość wzroku przy dostrzeganiu różnicy barw jest mniejsza w zakresie kolorów zielonych niż w zakresie innych kolorów.

Przyjęte dotychczas w telewizji kolory podstawowe są obecnie krytykowane i istnieje wyraźna tendencja do ich zmiany. Wynika to stąd, że od 1953 r., kiedy to FCC ustaliło współrzędne chrominancji kolorów podstawowych obserwuje się stały postęp w produkcji luminoforów na ekrany kineskopów kolorowych. Są one obecnie bardziej wydajne, umożliwiają uzyskanie obrazów bardziej jaskrawych oraz kontrastowych. Ich kolory ulegają przy tym zmianie, co powoduje powstawanie pewnych zniekształceń odtwarzanych kolorów. Dlatego też Europejska Unia Radiofoniczna /UER/ zaleciła swoim członkom zmianę parametrów analizy obrazu kolorowego i przyjęcie kolorów podstawowych o współrzędnych chrominancji:

- dla R $x = 0,64$ i $y = 0,33$
- dla G $x = 0,29$ i $y = 0,60$
- dla B $x = 0,15$ $y = 0,06$

/15/

Oprócz kolorów podstawowych w systemie telewizji kolorowej należy również ustalić parametry tak zwanej bieli odniesienia.

Na rys. 13 cała centralna część wykresu jest oznaczona

jako obszar bieli. Wynika z tego, że każda para współrzędnych chrominancji wyznaczająca punkt leżący w tym obszarze przedstawia współrzędne koloru białego. Jest więc nieskończenie wielką liczbą nieco różniących się od siebie kolorów, które subiektywnie są oceniane jako białe. Pojęcie bieli jest więc pojęciem złożonym i ma charakter subiektywny. Fizycznie jest to światło /emitowane czy odbite/, którego charakterystyka spektralna zbliża się do światła o jednakowej energii w całym zakresie promieniowania widzialnego. Niezależnie od tego, wzrok ludzki ma zdolność adaptacji i ocenia jako białe światła o różniących się nawet dość znacznie rozkładach widmowych, w szczególności jeśli światła te nie występują jednocześnie. Przykładem tego może być uznawanie jako światło białe zarówno światła słonecznego, lampy naftowej, żarowej czy też światła świetlówek, pomimo że światła te mają dość znacznie różniące się rozkłady widma energii promieniowanej.

Z wielu możliwych rodzajów światła odczuwanego jako białe CIE znormalizowała dla potrzeb kolorymetrycznych kilka światła charakterystycznych, którym można przypisać określone temperatury barwy. Zostały one oznaczone literami A, B, C, D i E:

Światło typu A - wytwarza żarówka z włóknem wolframowym żarzącym się w atmosferze gazowej, przy czym odpowiada ono światłu emitowanemu przez ciało doskonale czarne o temperaturze 2848 K.

Światło typu B - jest równoważne światłu słonecznemu w letnie bezchmurne południe i odpowiada promieniowaniu ciała doskonale czarnego o temperaturze 4800 K.

Światło typu C - jest równoważne światłu słonecznemu przefiltrowanemu przez chmury i odpowiada w przybliżeniu promieniowaniu ciała doskonale czarnego o temperaturze 6500 K + 7000 K.

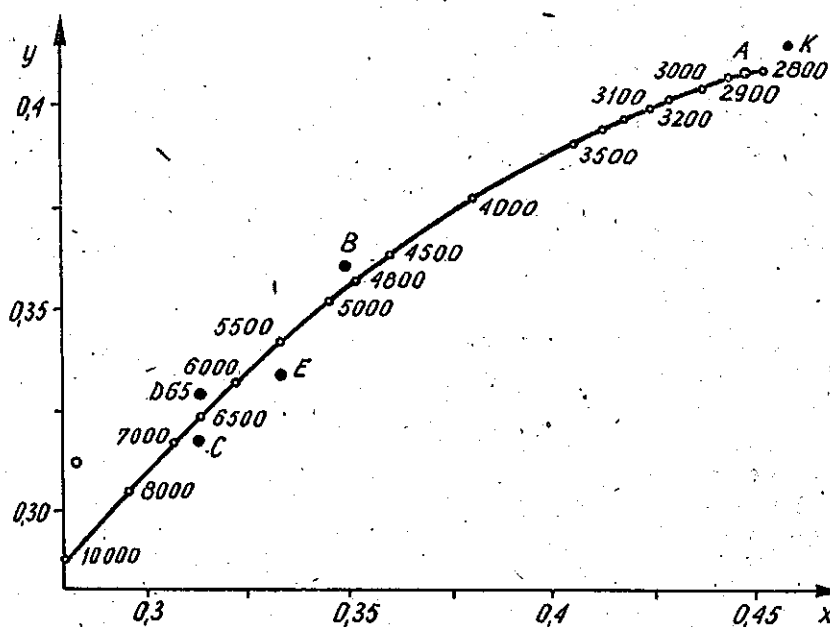
Światło typu D - oznaczone jako D_{6500} , lub D_{65} - jest odmianą światła typu C i również odpowiada w przybliżeniu promieniowaniu ciała doskonale czarnego o temperaturze

6500 K.

Światło typu E - jest światłem równoenergetycznym, ma charakter teoretyczny i nie jest realizowalne.

Podnosząc temperaturę ciała doskonale czarnego uzyskujemy w pewnym zakresie temperatur wrażenia światła białego.

Dla każdej podanej wyżej temperatury uzyskujemy światło, któremu można przyporządkować współrzędne chrominancji odpowiadające punktowi leżącemu w obszarze bieli wykresu z rys. 13. Zbiór tych punktów będzie leżał na tzw. krzywej Planck'a przechodzącej przez ten obszar. Część tej krzywej w powiększeniu podano na rys. 14, na którym oznaczono również położenie znormalizowanych rodzajów światła białego.

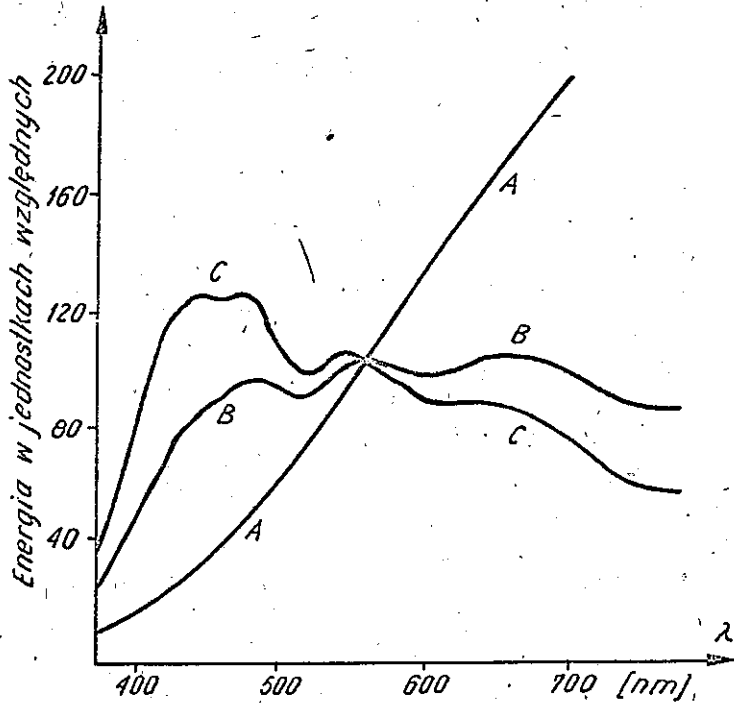


Rys. 14. Krzywa Planck'a

Charakterystyki spektralne niektórych rodzajów znormalizowanych światel pokazano na rys. 15. Dla tych rodzajów światła białego określono również współrzędne chrominancji,

które wynoszą:

	x	y
biel A	0,447	0,407
biel C	0,310	0,316
biel D ₆₅₀₀	0,313	0,329
biel E	0,333	0,333



Rys. 15. Charakterystyki spektralne niektórych znormalizowanych źródeł światła

W telewizji kolorowej używa się obecnie przeważnie jako bieli odniesienia biel typu C^{x/} /w USA/ oraz bieli typu D₆₅₀₀ /w Europie/.

8. OKREŚLANIE NA WYKRESIE CHROMINANCJI DOMINUJĄCEJ DŁUGOŚCI FALI I CZYSTOŚCI KOLORU

Jeśli mamy dane współrzędne chrominancji określonego koloru oraz położenie bieli odniesienia, to wykres chrominancji CIE pozwala nam w sposób prosty określić zarówno dominującą długość fali koloru, jak i jego czystość. Niech np. współrzędne kolorowości wynoszą $x = 0,4$ i $y = 0,5$. Łącząc wówczas na rys. 16 punkt C odpowiadający np. bieli odniesienia C z punktem K reprezentującym nasz kolor oraz przedłużając tę linię do przecięcia się z krzywą kolorów spektralnych otrzymujemy dominującą długość fali $\lambda_k = 568$ nm. Mamy więc do czynienia z kolorem żółto-zielonym. Nie jest to jednak kolor monochromatyczny, gdyż punkt K jest odległy od krzywej kolorów spektralnych. Ma więc on domieszkę bieli /w tym przypadku bieli typu C /. Jego czystość p będzie określona jako stosunek długości odcinków.

$$p = \frac{C-K}{C-M}$$

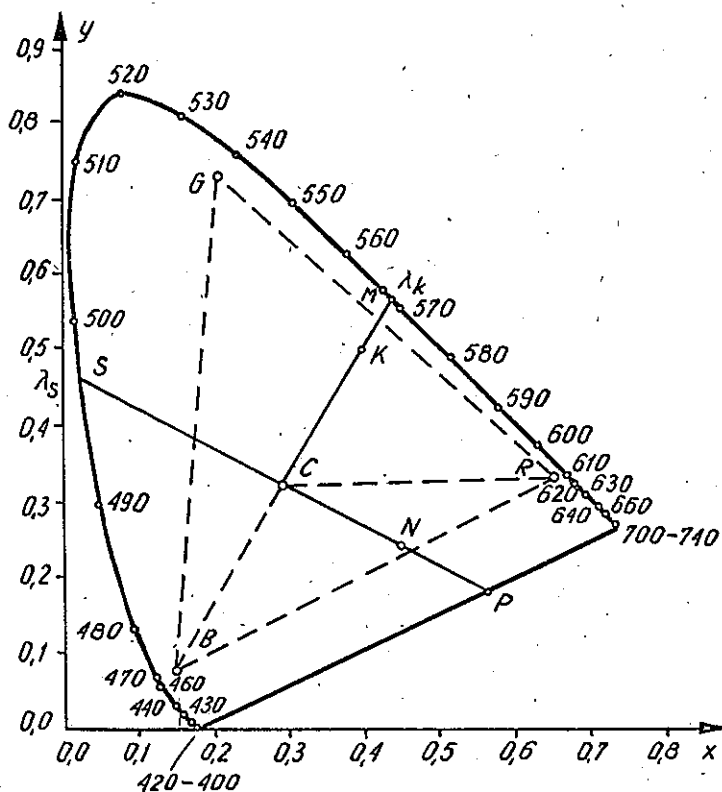
/16/

który najczęściej jest wyrażany w procentach.

Dla kolorów leżących wewnątrz trójkąta B C R nie można określić dominującej długości fali, gdyż nie są to kolory monochromatyczne, lecz purpury, a więc kolory dwuchromatyczne. Dla takich kolorów określa się zamiast dominującej długości fali długość fali koloru dopełniającego^{xx/}. Kolor do-

x/ W początkowym okresie rozwoju nowoczesnych systemów telewizji kolorowej niektóre kraje proponowały używanie również bieli odniesienia typu B.

xx/ Kolorem dopełniającym nazywamy taki kolor, który zmieszany w odpowiedniej proporcji z danym kolorem pozwala uzyskać biel odniesienia.



Rys. 16. Określenie dominującej długości fali koloru oraz jego czystości

pełniający leży z drugiej strony bieli odniesienia i uzyskuje się go przedłużając linię łączącą punkty odpowiadające bieli odniesienia i rozpatrywanego koloru, aż do przecięcia się z krzywą kolorów spektralnych. Jeśli więc na przykład punkt N odpowiada purpurze o współrzędnych chrominancji $x = 0,45$ $y = 0,25$, to kolor dopełniający będzie miał długość fali $\lambda_s = 497$ nm. Przyjęto dominującą długość fali koloru dopełniającego oznaczać małą literą c, więc należy pisać $\lambda_s = 497$ c nm. Kolorem dopełniającym w rozpatrywanym przypadku jest kolor zielono-niebieski. I w tym przypadku

czystość koloru N będzie określona stosunkiem

$$p = \frac{C^{\bar{N}}}{C^{\bar{P}}} \quad /17/$$

Kolor jest nasycony, gdy jego czystość p zbliża się do jedności czy 100%, natomiast jest nienasycony, gdy p zbliża się do zera.

Kolory monochromatyczne mają nasycenie równe 100%, wszystkie zaś kolory o zerowym nasyceniu robią wrażenie białych. Czystość koloru można oczywiście określić wykorzystując również współczynniki chrominancji, przy czym:

$$p = \frac{x_K - x_C}{x_M - x_C} = \frac{y_K - y_C}{y_M - y_C} \quad /18/$$

gdzie: x_K i y_K - współrzędne chrominancji rozpatrywanego koloru,

x_M i y_M - współrzędne chrominancji dominującej długości fali tego koloru,

x_C i y_C - współrzędne chrominancji bieli odniesienia.

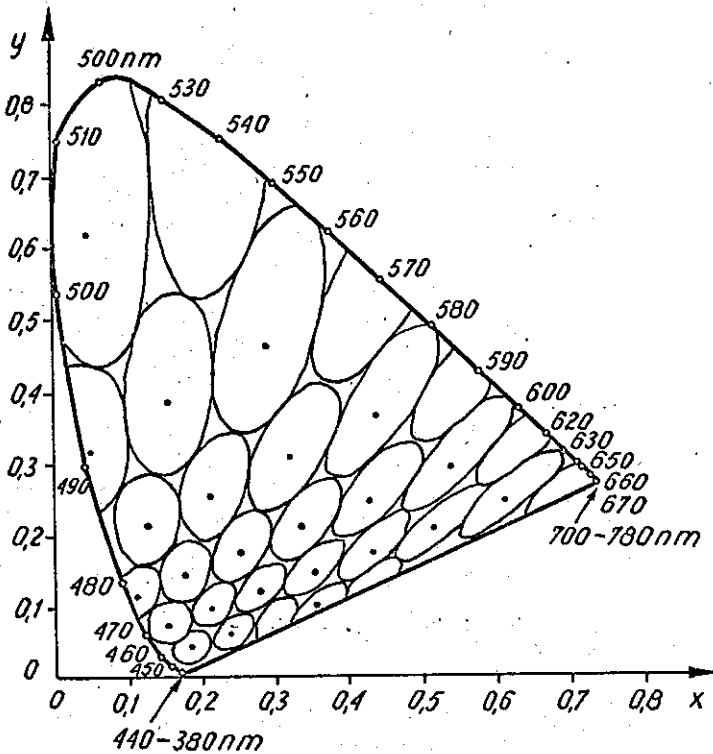
Dla purpury N czystość koloru wyniesie odpowiednio:

$$p = \frac{x_N - x_C}{x_P - x_C} = \frac{y_N - y_C}{y_P - y_C} \quad /19/$$

9. DOSTRZEGANIE ZMIAN CHROMINANCJI. ELIPSY Mc.ADAM'a

Podobnie jak ustalono próg różnicy dla luminancji, czyli próg dostrzegalności zmian luminancji /prawo Webera-Fechnera/, tak samo powinien istnieć próg dostrzegalności zmian kolorowości przy stałej wartości luminancji. Badania przeprowadzo-

ne przez Mc.Adam'a wykazały, że czułość wzroku na zmiany parametrów chrominancji /tzw. barwy i nasycenia koloru/ nie jest jednakowa na całej powierzchni wykresu chrominancji. Wokół bowiem każdego koloru, oznaczonego na rys. 17 punktem, można wykreślić obszar, wewnątrz którego zmiana barwy oraz



Rys. 17. Elipsy Mc.Adam'a

nasycenia koloru nie są dostrzegalne przez wzrok ludzki. Obszar ten ma kształt elipsy i obrazuje czułość wzroku na zmiany kolorowości. Dla większej wyrazistości elipsy te zostały na rys. 17 powiększone 100 razy. Pokazują one, że oko jest np. bardziej czułe na zmiany chrominancji kolorów niebieskich niż zielonych. Ta właściwość wzroku została np. wykorzystana przy wyborze parametrów technicznych niektó-

rych systemów telewizji kolorowej /np. systemu NTSC/.

10. NOWY WYKRES CHROMINANCJI /CIE 1976/

5 Pokazane na wykresie chrominancji x, y progi dostrzegania różnic chrominancji /określone przez Mac Adam'a/ dla różnych kolorów wskazują na bardzo nieliniarny charakter tej własności wzroku ludzkiego. Korzystanie więc z takich wykresów chrominancji utrudnia przeprowadzanie niektórych obliczeń kolorymetrycznych, a w szczególności ustalanie jednakowej wartości progu rozróżnialności różnic chrominancji dla różnych kolorów.

W celu więc uzyskania takiego wykresu chrominancji, aby próg rozróżniania jej różnic był możliwie jednakowy dla wszystkich kolorów postanowiono przeprowadzić odpowiednią transformację liniarną.

Podobnie zatem, jak przy przejściu od systemu podstawowych kolorów rzeczywistych RGB do kolorów urojonych XYZ zastosowano tu również przejście na nowy system oznaczony jako $U V W$. System ten pozwala uzyskać wykres kolorowości u, v , na którym próg rozróżnialności różnic chrominancji ma wartość w przybliżeniu jednakową dla wszystkich kolorów. Wprowadzona transformacja zaproponowana przez CIE w 1960 r. była następująca:

$$U = \frac{2}{3} X ; \quad V = Y ; \quad W = \frac{-X + 3Y + Z}{2} \quad /20/$$

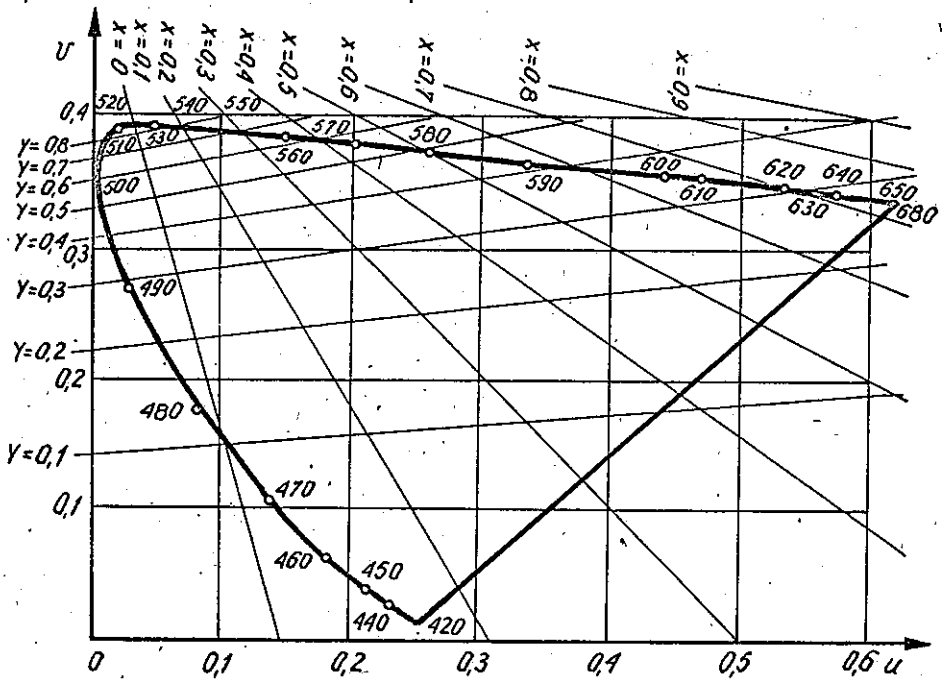
skąd współczynniki chrominancji u, v wynoszą

$$u = \frac{4x}{12y - 2x + 3} \quad i \quad v = \frac{6y}{12y - 2x + 3} \quad /21/$$

Transformacja ta została przez CIE w 1976 r. dodatkowo zmodyfikowana i zalecona do stosowania, przy czym współczynniki chrominancji ustalono ostatecznie jako

$$u = \frac{4x}{12y - 2x + 3} \quad \text{i} \quad v = \frac{9y}{12y - 2x + 3} \quad /22/$$

Wykres chrominancji w nowych współczynnikach u , v pokazano na rys. 18. Na rysunku tym pokazano jednocześnie przebieg osi współczynników chrominancji x , y , które pozostają nadal liniami prostymi, lecz leżącymi w odległościach nieproporcjonalnych do proporcjonalnego wzrostu ich wartości.



Rys. 18. Wykres chrominancji we współczynnikach u , v wraz z przebiegiem osi współczynników chrominancji x , y

Wykres chrominancji we współrzędnych u , v , na którym próg rozróżnialności różnic chrominancji pozostaje w przybliżeniu wartością stałą dla wszystkich kolorów, pozwala ustalić

jednostkę progu takiej różnicy, oznaczoną jako J N D^{x/}. Wartość progu dostrzegalności różnicy chrominancji dla wykresu u, v ustalono jako równą 0,00384, chociaż niektórzy autorzy uważają, że jest ona zbyt duża i proponują wartość 0,002.

Znajomość wartości progu rozróżnialności pozwala liczbowo określić np. różnicę dwu kolorów C₁ i C₂: Jeśli kolory te mają współczynniki u₁ v₁ i u₂ v₂, to różnica c tych kolorów wyniesie

$$\Delta c = \frac{1}{0,00384} \sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2} \quad /23/$$

Wykresy kolorymetryczne we współrzędnych u, v są obecnie wykorzystywane stosunkowo najczęściej.

11. PARAMETRY KOLORYMETRYCZNE ANALIZY I SYNTEZY OBRAZU. DOPASOWANIE KOLORYMETRYCZNE SCENY I JEJ REPRODUKЦИИ

Podstawowym zadaniem telewizji kolorowej jest oczywiście możliwie wierne odtwarzanie kolorów nadawanej sceny.

Zakres kolorów, które mogą być prawidłowo odtworzone na ekranie odbiornika jest jak wiadomo, objęty powierzchnią trójkąta na wykresie chrominancji, w którego wierzchołkach umieszczono przyjęte kolory podstawowe R G B. Kolory podstawowe wybrane zarówno przez FCC, jak i przez UER są kolorami rzeczywistymi dającymi się uzyskiwać za pomocą odpowiednich luminoforów. Są to więc kolory podstawowe syntezy obrazu kolorowego, a właściwie ekranu odbiornika. Uzyskiwanie zatem dopasowania kolorymetrycznego sceny i jej reprodukcji sprowadzało by się właściwie do uzyskiwania po stronie analizy obrazu sygnałów elektrycznych proporcjonalnych do R G B.

x/ Od angielskiej nazwy "Just Noticeable Difference".

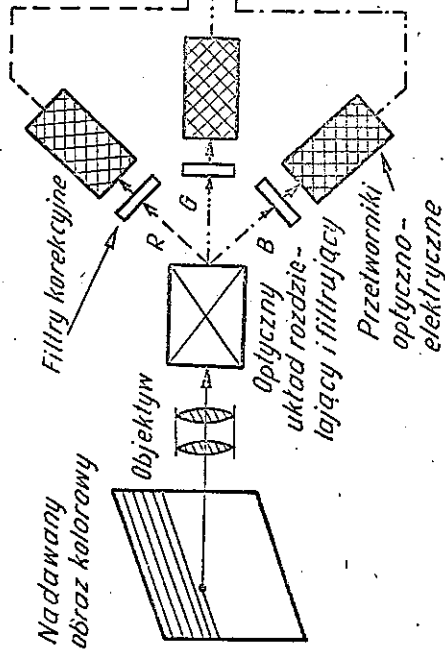
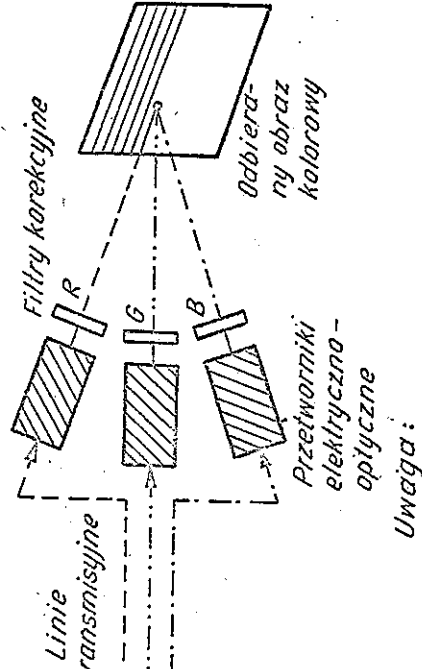
Najprościej było by wybrać po stronie analizy obrazu te same kolory podstawowe R G B, które zostały wybrane dla odbiornika. Jednak, jak się niżej przekonamy, nie będzie to właściwe zarówno ze względu na istnienie po stronie analizy obrazu szeregu elementów, które mają określone charakterystyki spektralne, jak i ze względu na przebiegi współczynników trójbodźcowych wybranych kolorów podstawowych syntezy obrazu.

Na rys. 19 pokazano schematycznie elementy toru telewizji kolorowej, które mogą wpływać na dopasowanie kolorymetryczne pomiędzy sceną nadawaną i jej reprodukcją po stronie odbiorczej. Schemat ten oparto na zasadzie wykorzystywania trójbodźcowej hipotezy kolorowego widzenia. Kolorowy strumień świetlny emitowany przez element sceny pada poprzez obiektyw na optyczny układ rozdzielający i filtrujący - powodujący rozłożenie światła kolorowego na trzy składowe R, G i B, które poprzez dodatkowe filtry korekcyjne padają na fotokatody przetworników optyczno-elektrycznych /np. na fotokatody lamp analizujących/. Na wyjściu tych przetworników otrzymujemy trzy sygnały, które wspólnie niosą informacje o kolorze analizowanego elementu sceny.

Po stronie odbiorczej sygnały informacji kolorowych są doprowadzane do trzech przetworników elektryczno-optycznych /np. trzech kineskopów z ekranami luminującymi każdy w jednym z kolorów podstawowych R G B, czy też do trójkolorowego kineskopu i po zsumowaniu wytworzonych strumieni świetlnych na jednym ekranie czy też w oku obserwatora odtwarzają kolor wybieranego elementu sceny nadawanej.

W takim układzie elementami o określonych charakterystykach spektralnych są co najmniej filtrujące układy rozdzielające, łącznie z ewentualnie stosowanymi filtrami korekcyjnymi oraz fotokatody przetworników optyczno-elektrycznych. Oprócz tego, źródło światła oświetlającego nadawaną sceną również ma określoną charakterystykę spektralną.

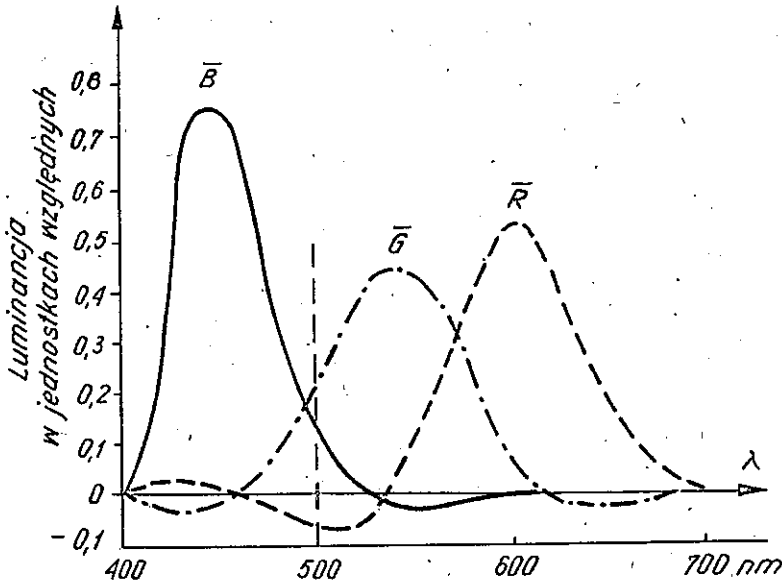
Jeśli więc ustalimy trzy kolory podstawowe R G B kineskopu kolorowego, to będzie można określić krzywe współczynni-

NadawanieOdbiór

Zamiast przetworników elektryczno- optycznych, filtrów korekcyjnych i ekranu zewnętrznego w typowych, domowych odbiornikach stosuje się z reguły kineskopy trójkolorowe o kolorach podstawowych RGB.

Rys. 19. Uproszczony schemat toru telewizyjki kolorowej, od sceny nadawanej do jej reprodukcji

ków trójbodźcowych $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ i $B(\lambda)$, które dają dopasowanie kolorymetryczne dla bielei równoenergetycznej. Krzywe takich współczynników są przykładowo podane na rys. 20.



Rys. 20. Charakterystyki spektralne współczynników trójbodźcowych syntezy obrazu

Mają one przebieg podobny do krzywych z rys. 7 z tym jednak że obecnie składowe bielei równoenergetycznej były równoważone za pomocą kolorów podstawowych wybranych dla syntezy obrazu, tzn. np. kolorów wybranych przez FCC czy UER, które różnią się nieco pomiędzy sobą.

Otrzymane krzywe mają istotne znaczenie, gdyż określają one wypadkowe charakterystyki spektralne, jakie powinien mieć układ rozdziału światła łącznie z filtrami korekcyjnymi i fotokatodami lamp analizujących. Jeśli więc będzie spełniony taki warunek, to na wyjściu każdej z lamp analizujących otrzymamy sygnały elektryczne proporcjonalne do trój-

bodźcowych współczynników R G B koloru, który ma być odtworzony. Można więc zapisać, że kamera telewizji kolorowej dostarczy wówczas trzech sygnałów proporcjonalnych do:

$$R = \int_{435 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} \bar{R}(\lambda) \cdot \xi(\lambda) \cdot C(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int_{435 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} \bar{G}(\lambda) \cdot \xi(\lambda) \cdot C(\lambda) \cdot d\lambda$$

/24/

$$B = \int_{435 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} \bar{B}(\lambda) \cdot \xi(\lambda) \cdot C(\lambda) \cdot d\lambda$$

gdzie - $\xi(\lambda)$ jest charakterystyką spektralną współczynnika odbicia światła od analizowanego elementu,

- $C(\lambda)$ jest charakterystyką spektralną światła oświetlającego scenę np. światło białe typu C.

Jak widać z zależności /24/, treść sceny i jej oświetlenie określają nam iloczyn $\xi(\lambda) \cdot C(\lambda)$. Jeśli więc kamera dostarczy sygnałów proporcjonalnych do $\bar{R}(\lambda)$, $\bar{G}(\lambda)$ i $\bar{B}(\lambda)$ to otrzymamy sygnały proporcjonalne do R G B, a więc zrealizujemy dopasowanie kolorymetryczne pomiędzy kolorami sceny i jej reprodukcji. Oczywiście rozumowanie to jest prawidłowe pod warunkiem, że tor telewizji kolorowej jest linearny. W przeciwnym przypadku zostaną wprowadzone zniekształcenia kolorów, jak będzie to omówione niżej.

Uzyskanie jednak wypadkowych charakterystyk spektralnych kamery zgodnych z krzywymi z rys. 20 napotyka na pewne trudności. Krzywe współczynników trójbodźcowych mają bowiem wartości ujemne. W szczególności krzywa $\bar{R}(\lambda)$ ma część ujemną o znacznej amplitudzie, jak również część dodatnią przebiegającą w zakresie długości fal odpowiadających kolo-

rom niebieskim. Zbudowanie filtrów optycznych, które miałyby charakterystyki spektralne z zakresami wartości ujemnych nie jest jednak technicznie możliwe. Można jednak opracować filtr optyczny o charakterystyce, którą będzie odpowiadać swoim kształtem i położeniem w widmie częstotliwości ujemnej części np. charakterystyki $\bar{R}(\lambda)$. Filtr taki łącznie z dodatkową lampą analizującą dostarczać będzie napięcia, które po odwróceniu jego fazy będzie mogło być zsumowane z napięciem wejściowym lampy współpracującej z filtrem optycznym realizującym dodatnią część krzywej $\bar{R}(\lambda)$. Pozwoli to uzyskać całkowitą charakterystykę $\bar{R}(\lambda)$ /po uwzględnieniu podobną metodą jeszcze części charakterystyki w zakresie kolorów niebieskich/.

Stosowanie takiego sposobu uzyskiwania prawidłowych charakterystyk współczynników trójbodźcowych prowadzi jednak do konieczności stosowania w danym przypadku aż ośmiu lamp w jednej kamerze telewizji kolorowej zamiast trzech. Oprócz tego, odejmowanie napięć daje zmniejszenie amplitudy sygnału użytecznego i pogorszenie stosunku sygnał/szum. Takie rozwiązanie nie jest więc do przyjęcia z technicznego punktu widzenia.

Zamiast jednak stosowania jako współczynników trójbodźcowych $\bar{R}(\lambda)$, $\bar{G}(\lambda)$ i $\bar{B}(\lambda)$ opartych na rzeczywistych kolorach podstawowych można użyć przy analizie obrazu współczynników $\bar{X}(\lambda)$, $\bar{Y}(\lambda)$ i $\bar{Z}(\lambda)$ opartych na urojonych kolorach podstawowych. Wiadomo bowiem, że charakterystyki tych współczynników nie mają części ujemnych.

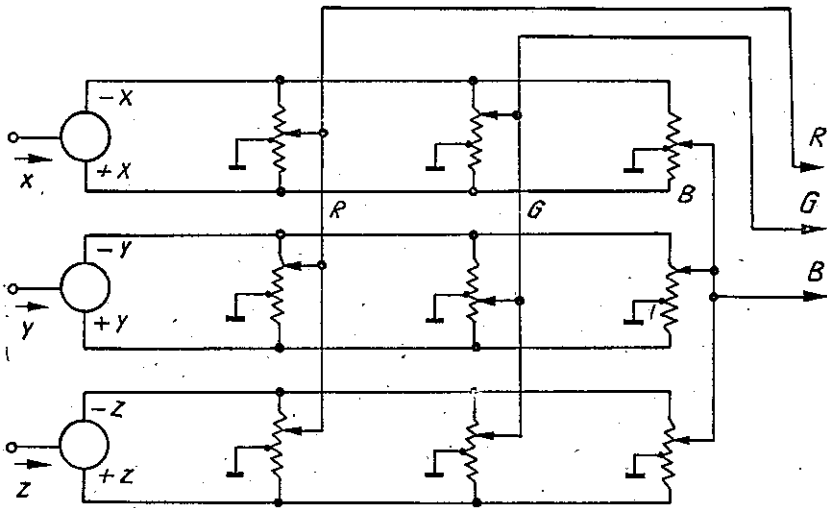
Po dokonaniu analizy obrazu trzeba będzie jednak przejść na rzeczywiste kolory podstawowe, aby uzyskać dopasowanie kolorymetryczne z rzeczywistymi kolorami podstawowymi syntezy obrazu. Przejście z jednego układu współrzędnych na inny jest, jak już było mówione, zawsze możliwe przez zastosowanie równań transformacyjnych podobnych do podanych w zależności /10/. W tym przypadku przejście z układu \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} na układ \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} można uzyskać za pomocą równań

$$\bar{R} = 1,191 \bar{X} - 0,532 \bar{Y} - 0,288 \bar{Z}$$

$$\bar{G} = -0,982 \bar{X} + 2,00 \bar{Y} - 0,028 \bar{Z} \quad /21/$$

$$\bar{B} = 0,058 \bar{X} - 0,119 \bar{Y} - 0,900 \bar{Z}$$

Realizacja techniczna takiej transformacji może się odbywać np. w układzie podanym na rys. 21.

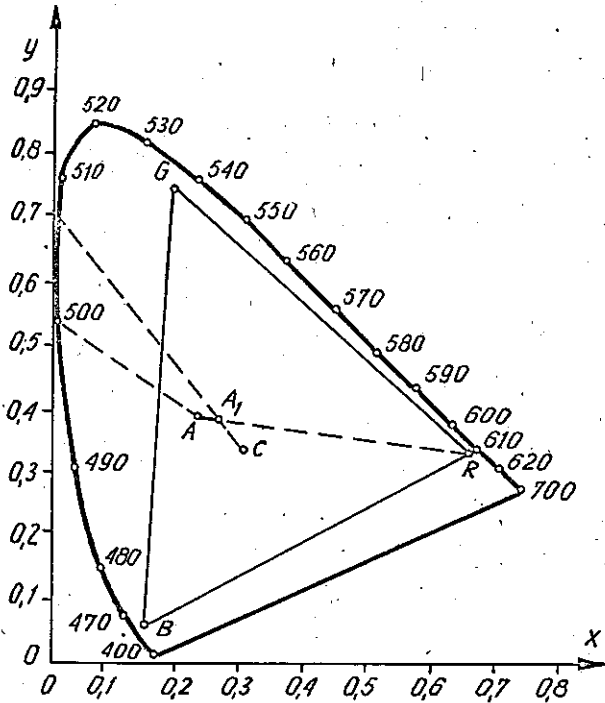


Rys. 21. Realizacja techniczna transformacji z układu X Y Z na układ R G B

Należy jednak zauważyć, że w równaniach tych występuje również szereg składników ujemnych o znacznych wartościach bezwzględnych, a więc w poważnym stopniu zmniejszających napięcia odpowiednich sygnałów. Powoduje to pogorszenie stosunku sygnał/szum sygnałów w poszczególnych kolorach podstawowych. I ten sposób nie może więc również dać w pełni zadowalających wyników w praktyce.

W praktyce przyjęto więc jako rozwiązanie jedynie słuszne pomijanie ujemnych części charakterystyk współczynników trój-

bodźcowych przy analizie obrazu, kosztem pewnego zniekształcenia odtwarzanych kolorów. Zniekształcenie koloru w takim przypadku łatwo wykazać na rys. 22.



Rys. 22. Zniekształcenie kolorów przy pomijaniu ujemnych części charakterystyk spektralnych współczynników trójbodźcowych analizy obrazu

Rozpatrzmy np. pewien kolor A, czyli kolor zielony o długości fali 500 nm. Charakterystyka spektralna składowej trójbodźcowej $\bar{R}(\lambda)$ ma w tym zakresie wartość ujemną. Gdyby więc był zachowany ujemny zakres charakterystyki, to energia bodźca koloru czerwonego odejmowałaby się od energii dwu pozostałych bodźców. Jeśli jednak kamera nie uwzględnia

ujemnych wartości bodźców, to znaczy, że na wyjściu lampy R będziemy mieli zerową wartość sygnału, czyli w kolorze odtworzonym "nadmiar" czerwieni. Kolor A przesunie się więc po prostej AR w kierunku R, a więc np. do p. A_1 . Dominująca długość fali koloru A_1 będzie więc nieco dłuższa, a czystość koloru zmniejszy się. Barwa i nasycenie koloru uległy więc zniekształceniu. Oprócz tego, pominięcie ujemnych wartości bodźców wywołuje dla każdego koloru, jak widzieliśmy, pewien wzrost współczynników trójbodźcowych wywołujących ten kolor. Luminancja koloru nieco więc wzrasta jak i wartość sygnału Y , który reprezentuje tę luminancję.

Reasumując można stwierdzić, że pominięcie ujemnych wartości współczynników trójbodźcowych w kamerze telewizji kolorowej powoduje powstawanie zniekształcenia koloru odtwarzanego, a mianowicie:

- 1/ pewną, niewielką zresztą, zmianę dominującej długości fali;
- 2/ zmniejszenie czystości koloru;
- 3/ wzrost luminancji koloru.

Dla prawidłowego dopasowania kolorymetrycznego obrazu odtwarzanego i sceny nadawanej nie wystarcza jednak przyjęcie tych samych kolorów podstawowych R G B przy analizie sceny nadawanej, jakie stosuje się przy syntezie obrazu po stronie odbiorczej.

W torze przesyłowym, pomiędzy sceną nadawaną i jej reprodukcją, występują bowiem elementy nieliniarne, nie uwzględnione na rys. 19. Należą do nich przede wszystkim lampy obrazowe /np. kineskopy trójkolorowe/, a również i niektóre lampy analizujące. Jeśli więc nie uwzględnić tego faktu, to wystąpią znaczne zniekształcenia, gdyż charakterystyka całkowitego toru przesyłowego jest w rzeczywistości wykładnicza. Oczywiście można by odpowiednią kompensacją tej charakterystyki przewidzieć w odbiorniku, lecz niepotrzebnie komplikowałoby to i rozbudowywało odbiornik. Przyjęto więc zasadę, że kompensacja nieliniarności charakterystyki toru przesyłowego

wego będzie dokonywana po stronie nadawczej. Sygnałami wi-
 zyjnymi przesyłanymi do odbiorników nie będą więc sygnały
 E_R , E_G i E_B , lecz sygnały E'_R , E'_G i E'_B tzn. sygnały, które
 kompensują nieliniarność toru w układach o charakterystykach
 odwrotnych do charakterystyki toru przesyłowego.

Oprócz tego, jak już wspomniano wyżej, kolory podstawowe
 R G B wybrane dla systemu NTSC nie są obecnie najkorzystnie-
 jsze. Postęp w dziedzinie technologii produkcji luminoforów
 umożliwił uzyskiwanie luminoforów o większej wydajności po-
 zwalającej otrzymywać obrazy o większej jaskrawości, co jest
 szczególnie korzystne dla widza. Luminofory te mają jednak
 nieco inne współczynniki chrominancji. Parametry tych współ-
 czynników w jednostkach u , v , w porównaniu do parametrów
 przyjętych przez FCC podaje poniższe zestawienie, a przebieg
 ich charakterystyk spektralnych pokazuje rys. 23.

Porównanie kolorów podstawowych przyjętych przez FCC i UER

	<u>system NTSC</u>			<u>systemy europ. PAL i SECAM</u>		
	u	v	nm	u	v	nm
czerwony	0,477	0,352	612	0,451	0,349	612
zielony	0,076	0,384	530	0,121	0,374	518
niebieski	0,152	0,130	472	0,175	0,105	455
biel odnie- sienia	0,201	0,307	/biel C/	0,198	0,312	/biel D6500/

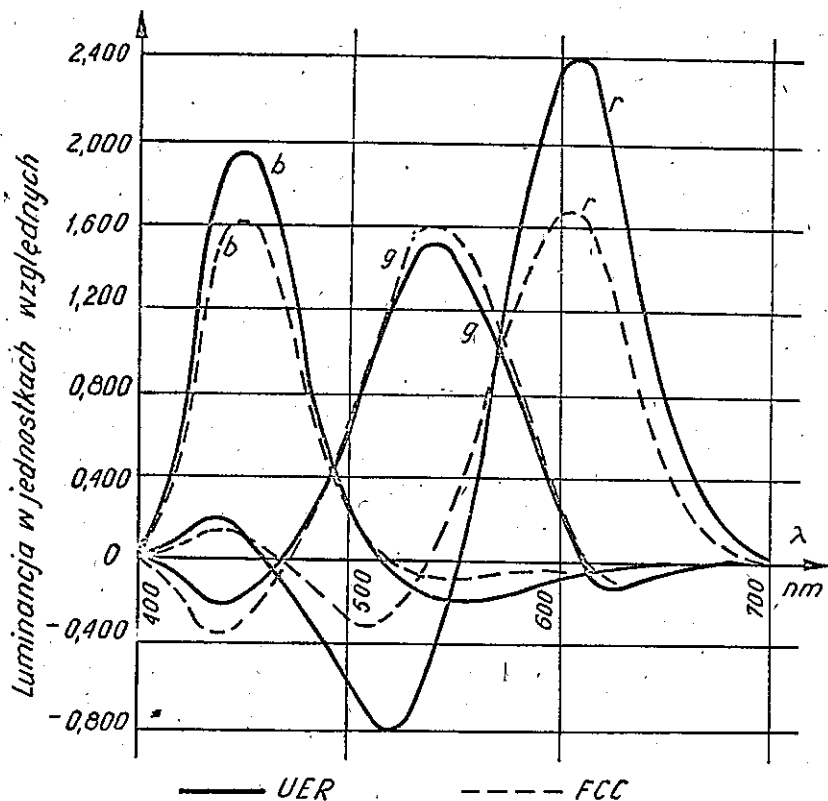
Jak widać z powyższego zestawienia, kolory podstawowe sy-
 stemów europejskich różnią się nieco /z wyjątkiem czerwieni/
 od kolorów podstawowych systemu NTSC. Inna jest również nie-
 co biel odniesienia. Sygnały luminancji w systemach koloro-
 wych oraz obrazów czarnobiałych odtwarzanych na ekranie ki-
 neskopu kolorowego także się różnią i powinny wynosić odpo-
 wiednio:

$$E'_Y = 0,299 E'_R + 0,587 E'_G + 0,114 E'_B \quad \text{dla systemu NTSC}$$

oraz

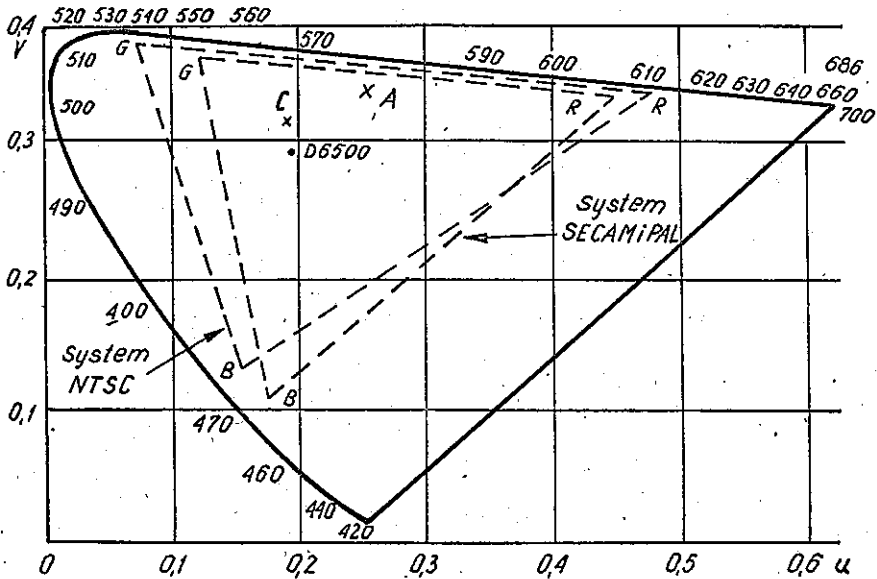
$$E'_Y = 0,222 E'_R + 0,707 E'_G + 0,071 E'_B \quad \text{dla systemów europejskich}$$

z tym jednak, że w praktyce również i w Europie używa się w eksploatacji tej samej zależności na sygnał luminancji E_Y co i w systemie NTSC. Zostało to podane zarówno w Zaleceniu Nr 93 TK OIRT, jak i w Sprawozdaniu Nr 624-1 CCIR.



Rys. 23. Porównanie przebiegów charakterystyk spektralnych współczynników trójbodźcowych syntezy obrazu dla systemów amerykańskich i europejskich

Położenie kolorów podstawowych we współrzędnych u , v podano na rys. 24.



Rys. 24. Położenie kolorów podstawowych dla systemów amerykańskich i europejskich na wykresie chrominancji w współczynnikach u , v

Jak widać z tego rysunku, zakres prawidłowo odtwarzanych kolorów jest nieco większy w systemie NTSC niż w systemach europejskich /większa powierzchnia trójkąta R G B/, a używanie dla sygnału luminancji takiego samego wyrażenia jak dla systemu NTSC daje przy odtwarzaniu obrazów czarno-białych pewne zniekształcenie kontrastów, które jest jednak na tyle małe, że zostało uznane jako możliwe do pominięcia.

WYKAZ LITERATURY

1. Dubec Augustin, Goussot Louis: Télévision en couleur, photometrie, colorimetrie, le tube image. Radiodiffusion télévision Doc. N° 1.80.
2. Goussot Louis: La télévision monochrome et en couleur. Edition Eyrolles, Paris, 1972.
3. Kamler Jacek: Fotometria i kolorymetria ekranów luminescencyjnych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1963.
4. Kędzierski Lesław: Podstawy telewizji. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1966.
5. Mc Ilwain Knox, Dean Charles E.: Principle of color television. John Wiley and Sons and Chapman and Hall, New York, 1956.
6. Pritchard D.H.: U.S. Color television fundamentals, a review. SMPTE Journal. Volume 86, November 1977.
7. Sprawozdanie Nr 624-1 CCIR.
8. Zalecenie Nr 93 Tk OIRT.

ISSN 0209-1046

