

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,
METROLOGY,
AND INFORMATION-
MEASUREMENT
SYSTEMS

УДК 535.8, 535.6.07, 621.38

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-167-180

Система цветоделения с характеристиками, близкими к XYZ МКО 1931 г.*

В.Л. ЖБАНОВА

214013, РФ, г. Смоленск, Энергетический пр., 1, филиал Научно исследовательского университета МЭИ

vera-zhbanova@yandex.ru

В работе представлены исследования системы цветоделения $X_1X_2Y_1Z_1$ и его цветового пространства $M'_2N'_2P'_2$. Проведен анализ этих двух систем на соответствие колориметрической системе XYZ МКО 1931 г. Система цветоделения разработана для согласования систем регистрации обработки цветного изображения. Приемники $X_1X_2Y_1Z_1$ основаны на наборах цветных оптических стекол под характеристику матрицы *Sony*. Кривые подбирались таким образом, чтобы их форма и пики максимально совпадали с цветовым пространством $M'_2N'_2P'_2$. Были получены кривые, немного отличные по форме, однако был принят наилучший вариант из возможных. Цветовое пространство $M'_2N'_2P'_2$ имеет характеристики, схожие с XYZ МКО 1931 г., при этом является самостоятельным и даже имеет улучшенный цветовой треугольник с минимальным включением нереальных цветов. Приведены коэффициенты перехода из разработанных систем в систему XYZ, необходимые для более качественной оценки координат цветности и корректного перехода в другие колориметрические системы, в том числе равноконтрастные. Дано описание методики проведения математического моделирования для нахождения координат цвета и цветности образцов в разработанном цветовом пространстве $M'_2N'_2P'_2$ и созданной на его основе системы цветоделения $X_1X_2Y_1Z_1$. Для объективной оценки качества разработанных систем было найдено изменение цветности зеленых, желто-зеленых и желтых светофильтров. Указаны значения экспериментально найденных координат цветности выбранных светофильтров на оптико-электронной установке. Дан анализ экспериментальных и рассчитанных значений, на основе которого сделаны выводы по дальнейшей работе с системой цветоделения $X_1X_2Y_1Z_1$.

Ключевые слова: система цветоделения, колориметр, светофильтры, приемники, матрица, колориметрическая система, равноконтрастная система, цветовое различие

* Статья получена 12 сентября 2018 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00176.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые устройства регистрации цветных изображений основаны на различных системах цветоделения и по всем параметрам относятся к колориметрам. Основной проблемой этих устройств является метрологическое обеспечение цветковых измерений.

Широко применяются системы цветоделения с пространственным разделением светового потока, основанные на шаблонах светофильтров с основными цветами: красным, синим и зеленым. Эти системы обладают недостатками, не устраненными ни в одной модификации. Основной недостаток – характеристики светофильтров матриц.

Отдельно взятый ПЗС-элемент может регистрировать только яркость точки изображения [1, 2]. Для захвата цветного изображения перед ПЗС-элементом необходимо установить пленочный светофильтр. У каждой матрицы светофильтры имеют разные характеристики, согласующиеся с устройствами обработки и воспроизведения изображения лишь математически с помощью алгоритмов [3–6]. У каждой компании определен алгоритм обработки цветовой информации, позволяющий лишь частично исключить потери информации о цвете. Поэтому устройства захвата и обработки изображений требуют улучшения показателей уже на стадии ввода цвета – на техническом уровне.

На программном уровне в основу выбора цветковых пространств были положены основные цвета кинескопов телевизионных приемников, которые получены за счет свечения трех люминофоров. В соответствии с этим приняты следующие основные цвета колориметрических систем телевидения *NTSC* (американская система Национального комитета телевизионных систем) и *EC* (Европейский стандарт). Система *NTSC* является теоретической. *EC* основана на реальных цветах люминофоров. Система *SECAM* используется для определения спектральных характеристик передающих камер [3, 7].

Кривые сложения систем *NTSC* и *EC* имеют отрицательные ветви. Но так как в передающей камере нет возможности воспроизвести отрицательные значения кривых, то в реальных условиях приходится воспроизводить лишь положительные ветви, отбрасывая отрицательные. В результате *система цветов камеры в принципе не согласуется с системой цветового зрения человека*. Как следствие этого, при передаче реальных цветов возникают искажения.

Устройства регистрации и воспроизведения изображений должны быть согласованы на техническом и программном уровнях. В наши дни находят широкое применение дисплеи с цветовым охватом, включающим все цвета, видимые человеком. Дисплеи на квантовых точках способны охватить уже более 70 % цветового диапазона. Но оправдывается ли такой большой цветовой охват воспроизведения изображений при малом цветовом диапазоне регистрируемых приборов?

В основном все современные передающие цифровые камеры работают на системе *RGB*, разработанной и утвержденной в 1931 г. Международной комиссией по освещению. При фото- и видеосъемке цифровые устройства регистрируют только небольшой цветовой охват, составляющий около 40 % от всего воспринимаемого человеческим глазом цветового диапазона.

Поэтому при использовании в цифровом колориметре современных систем цветоделения не может быть достигнуто удовлетворительное согласова-

ние систем регистрации и обработки изображения, и требуется разработка фотоприемника со спектральной характеристикой, согласованной с колориметрической системой с цветовым треугольником, охватывающим весь цветовой диапазон, воспринимаемый человеком. Примером такого треугольника является международная колориметрическая система XYZ МКО 1931 г., используемая как в качестве основной, так и промежуточной системы для расчета цветовых характеристик различных колориметрических систем [7, 8].

Ранее были разработаны приемники на основе характеристик системы XYZ МКО, однако при их исследовании обнаружили слишком большие цветовые сдвиги [9]. Поэтому было предложено разрабатывать системы цветоделения под кривые сложения цветовых пространств, цветовые треугольники которых имеют минимальное включение нереальных цветов.

1. СИСТЕМА ЦВЕТОДЕЛЕНИЯ

В результате исследований было разработано цветовое пространство $M_2N_2P_2$ [10]. Пространство доработано до $M'_2N'_2P'_2$ для более удобного применения коэффициентов перехода в систему XYZ. Координаты нового цветового треугольника: $M'_2(0,74; 0,26)$, $N'_2(0; 1)$, $P'_2(0; -0,08)$. Цветовое пространство $M'_2N'_2P'_2$ имеет характеристики, схожие с XYZ МКО 1931 г., при этом является самостоятельным и даже имеет улучшенный цветовой треугольник с минимальным включением нереальных цветов (рис. 1).

Коэффициенты перехода необходимы для более качественной оценки координат цветности в системе XYZ и корректного перехода в другие колориметрические системы, в том числе равноконтрастные.

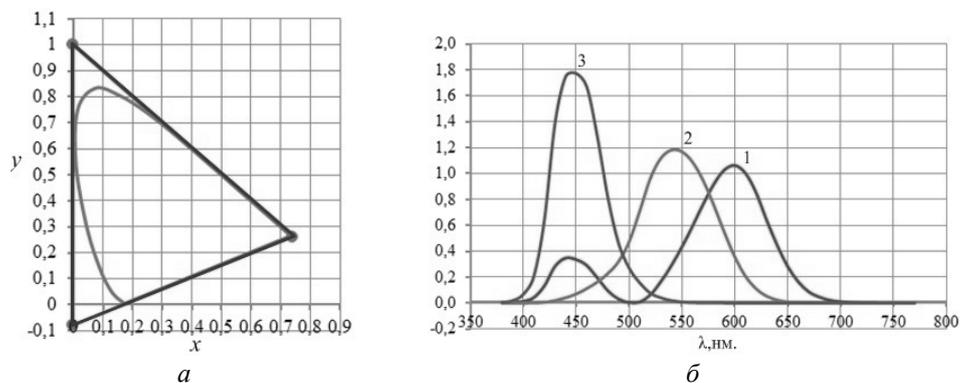


Рис. 1. Цветовое пространство $M'_2N'_2P'_2$:

a – цветовой треугольник пространства в системе xy ; b – кривые сложения:

$$1 - \overline{m'_2(\lambda)}; 2 - \overline{n'_2(\lambda)}; 3 - \overline{p'_2(\lambda)}$$

Fig. 1. The $M'_2N'_2P'_2$ color space:

a – a color triangle of space in the xy system; b – addition curves: 1 is $\overline{m'_2(\lambda)}$;

$$2 \text{ is } \overline{n'_2(\lambda)}; 3 \text{ is } \overline{p'_2(\lambda)}$$

Коэффициенты перехода из системы $M'_2N'_2P'_2$ в систему XYZ МКО, рассчитанные по методике [7], имеют следующий вид:

$$X_{M2'} = 1; \quad X_{N2'} = 0; \quad X_{P2'} = 0;$$

$$Y_{M2'} = 0,3514; \quad Y_{N2'} = 0,7227; \quad Y_{P2'} = -0,0741;$$

$$Z_{M2'} = 0; \quad Z_{N2'} = 0; \quad Z_{P2'} = 1,$$

где $X_{M2'}$, $X_{N2'}$, $X_{P2'}$ – коэффициенты для вычисления координаты цвета X в системе XYZ МКО; $Y_{M2'}$, $Y_{N2'}$, $Y_{P2'}$ – коэффициенты для вычисления координаты цвета Y в системе XYZ МКО; $Z_{M2'}$, $Z_{N2'}$, $Z_{P2'}$ – коэффициенты для вычисления координаты цвета Z в системе XYZ МКО.

На основе цветных оптических стекол была разработана система цветоделения для цифрового колориметра. Каждый набор светофильтров (СФ) позволяет создать приемники $X1$, $X2$, $Y1$ и $Z1$, корректирующие спектральную характеристику матрицы *Sony icx274* выбранной видеокамеры *PL-B959* под кривые сложения разработанного цветового треугольника $M'_2N'_2P'_2$. Кривые подбирались таким образом, чтобы их форма и пики максимально совпадали. Полученные характеристики представлены на рис. 2. Для каждого вида приемника был подобран свой набор корректирующих СФ, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Набор корректирующих светофильтров

A set of corrective light filters

Система $M'_2N'_2P'_2$	Приемники $X1X2Y1Z1$	Набор корректирующих СФ
для M'_2	$X1$	СЗС23, ОС5, ОС17
	$X2$	СЗС9, ФС1, ЖС3, СС15
для N'_2	$Y1$	ЗС10, СЗС23, ЖЗС6
для P'_2	$Z1$	ЖС3, СС15, СЗС21

Характеристики системы $M'_2N'_2P'_2$ и приемников $X1X2Y1Z1$ представлены на рис. 2.

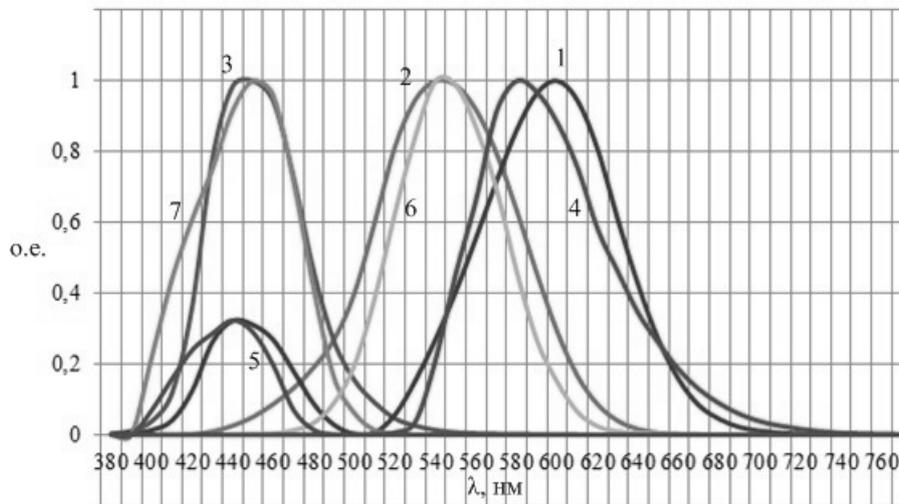


Рис. 2. Кривые сложения системы $M'_2N'_2P'_2$:

1 – $\overline{m'_2(\lambda)}$; 2 – $\overline{n'_2(\lambda)}$; 3 – $\overline{p'_2(\lambda)}$ и характеристики приемников X1X2Y1Z1:
4 – $\overline{x_1(\lambda)}$; 5 – $\overline{x_2(\lambda)}$; 6 – $\overline{y_1(\lambda)}$; 7 – $\overline{z_1(\lambda)}$

Fig. 2. The addition curves of the system $M'_2N'_2P'_2$:

1 – $\overline{m'_2(\lambda)}$; 2 – $\overline{n'_2(\lambda)}$; 3 – $\overline{p'_2(\lambda)}$ and receiver characteristics X1X2Y1Z1:
4 – $\overline{x_1(\lambda)}$; 5 – $\overline{x_2(\lambda)}$; 6 – $\overline{y_1(\lambda)}$; 7 – $\overline{z_1(\lambda)}$

Если качественно оценить полученные характеристики, то по рисунку видно, что кривые красного спектра имеют пики на разной длине волны, отличной на 15 нм. Также кривые немного отличны по форме. Однако стоит отметить, что полученные характеристики основаны на цветных оптических стеклах, имеющих ограниченный перечень СФ. Поэтому был принят наилучший вариант из возможных. Необходимо провести исследование разработанной системы цветоделения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для количественной оценки характеристик разработанной системы X1X2Y1Z1 необходимо найти координаты цветности исходного цветового треугольника $M'_2N'_2P'_2$ исследуемой системы и сравнить их с XYZ МКО.

Координаты каждого цвета в диапазоне от 400 до 770 нм рассчитываются по следующим формулам [11]:

$$X1 = \int_{400}^{770} \overline{x_1(\lambda)} d\lambda,$$

$$X2 = \int_{400}^{770} \overline{x_2(\lambda)} d\lambda,$$

$$Y1 = \int_{400}^{770} \overline{y_1}(\lambda) d\lambda,$$

$$Z1 = \int_{400}^{770} \overline{z_1}(\lambda) d\lambda,$$

где $\overline{x_1}(\lambda)$, $\overline{x_2}(\lambda)$, $\overline{y_1}(\lambda)$, $\overline{z_1}(\lambda)$ – характеристики системы $X1X2Y1Z1$. Далее показатели $X1$ и $X2$ складываются для формирования координаты цвета по красному спектру.

Для системы $M'_2N'_2P'_2$ формулы примут следующий вид:

$$M'_2 = \int_{400}^{770} \overline{m'_2}(\lambda) d\lambda,$$

$$N'_2 = \int_{400}^{770} \overline{n'_2}(\lambda) d\lambda,$$

$$P'_2 = \int_{400}^{770} \overline{p'_2}(\lambda) d\lambda,$$

где $\overline{m'_2}(\lambda)$, $\overline{n'_2}(\lambda)$, $\overline{p'_2}(\lambda)$ – удельные координаты цвета для системы $M'_2N'_2P'_2$.

Полученные координаты цвета переводятся в систему XYZ МКО 1931 г. по коэффициентам перехода. Далее находятся координаты цветности (x ; y) по следующим формулам [7, 11]:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad (1)$$

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

где X , Y , Z – координаты цвета; x , y – координаты цветности в системе xy .

Так как обе системы соответствуют XYZ МКО 1931 г., то полученные координаты x и y должны указывать на источник с равноэнергетическим спектром, который в системе XYZ имеет координаты $E(0,333; 0,333)$. Для $M'_2N'_2P'_2$ координаты источника E составили $(0,333; 0,333)$, для $X1X2Y1Z1$ – $(0,327; 0,339)$. Если сравнить с эталонным значением системы XYZ МКО, то получим, что для $X1X2Y1Z1$ отличие равно $\Delta x = 0,006$; $\Delta y = 0,006$. По ГОСТ Р 52489-2005* изменения по Δx и Δy не должны превышать 0,01. Поэтому разработанный набор светофильтров удовлетворяет требованиям ГОСТа. Стоит отметить, что без коэффициентов пересчета координаты равноэнергетического источника для системы $X1X2Y1Z1$ – $(0,325; 0,342)$, тогда

* ГОСТ Р 52489-2005. Материалы лакокрасочные. Колориметрия. Часть 1. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2005. – 12 с.

$\Delta x = 0,008$; $\Delta y = 0,009$. Последнее показывает влияние коэффициентов перехода на получение адекватного значения координат цветности объекта.

Перед началом экспериментальных исследований необходимо определить координаты цвета образцовых светофильтров из цветного оптического стекла в колориметрической системе XYZ для последующего сравнения с результатами эксперимента. Расчет выполняется численным методом. Интегрирование в формулах по $d\lambda$ заменяется суммированием по $\Delta\lambda$, при этом весь видимый участок разбивается на узкие одинаковые интервалы по 10 нм.

Расчет координат цвета производится следующим образом [8]:

$$X = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (3)$$

$$Y = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (4)$$

$$Z = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda , \quad (5)$$

где $\varphi(\lambda)$ – спектральная энергетическая плотность потока излучения; $\tau(\lambda)$ – спектральный направленный коэффициент пропускания светофильтра; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – удельные координаты цвета для системы XYZ.

При расчете координат цветности светофильтров в системе $M'_2 N'_2 P'_2$ удельные координаты цвета $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ заменяются на $\bar{m}'_2(\lambda)$, $\bar{n}'_2(\lambda)$, $\bar{p}'_2(\lambda)$ в формулах (3)–(5).

Для анализа приемника $X1X2Y1Z1$ необходимо рассчитывать $X1$ и $X2$ отдельно, тогда формулы (1)–(3) примут следующий вид:

$$X1 = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{x}_1(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (6)$$

$$X2 = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{x}_2(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (7)$$

$$Y1 = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{y}_1(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda ; \quad (8)$$

$$Z1 = \int_{\lambda=400}^{770} \varphi(\lambda) \bar{z}_1(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda . \quad (9)$$

При использовании наборов СФ $X1X2Y1Z1$ полученные показатели приемников $X1$ и $X2$ следует, как и ранее, складывать для полной информации по красному каналу. Далее рассчитанные значения координат цвета переводятся из системы $M'_2 N'_2 P'_2$ в систему XYZ МКО 1931 г. по коэффициентам перехода.

После чего определяются координаты цветности в системе xu по формулам (1) и (2). Для более объективной оценки результатов следует найти цветовое различие в равноконтрастной системе. Соотношения координат цветности международной системы xu с координатами в равноконтрастной системе $u'v'$ МКО 1974 г., выбранной как наиболее точная [12], определяются следующими уравнениями [7]:

$$u' = \frac{4x}{(-2x + 12y + 3)}; \quad (10)$$

$$v' = \frac{9y}{(-2x + 12y + 3)}, \quad (11)$$

где u', v' – координаты цветности в равноконтрастной системе u', v' ; x, y – координаты цветности в линейной системе xu .

Цветовое различие Δe координат цветности определяется по выражению

$$\Delta e = \sqrt{\Delta u'^2 + \Delta v'^2}, \quad (12)$$

где $\Delta u', \Delta v'$ – разность координат теоретической и практической цветности в равноконтрастной системе $u'v'$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве исследуемых образцов были выбраны группы светофильтров (СФ) из набора цветных оптических стекол: зеленые (ЗС1, ЗС3, ЗС7, ЗС8, ЗС10, ЗС11), желто-зеленые (ЖЗС1, ЖЗС5, ЖЗС6, ЖЗС0, ЖЗС12, ЖЗС17) и желтые (ЖС10, ЖС12, ЖС16, ЖС17, ЖС18, ЖС20), так как к точности воспроизведения именно этих цветов восприимчива зрительная система человека. В каждой группе по 6 образцов ввиду ограниченности набора зеленых СФ.

По формулам (3)–(5) были рассчитаны координаты цвета 18 образцов в системах XYZ МКО 1931 г. и $M'_2N'_2P'_2$. По формулам (6)–(9) были найдены координаты цветности в системе $X_1X_2Y_1Z_1$. Далее координаты цвета систем $M'_2N'_2P'_2$ и $X_1X_2Y_1Z_1$ были переведены в систему XYZ МКО 1931 г. по коэффициентам пересчета.

Рассчитанные координаты цветности по формулам (1) и (2) в системах XYZ МКО 1931 г. и $M'_2N'_2P'_2$ отличаются на 0,0001, в то время как отличие рассчитанных координат XYZ МКО 1931 г. от теоретических, приведенных в каталоге*, составило не более 0,01 по Δx и Δy . Последнее является либо небольшим отклонением спектральных направленных коэффициентов пропускания исследуемых светофильтров от приведенных характеристик в каталоге, либо погрешностью измерений этих характеристик на *SPECOL* 210. Однако будем считать данную погрешность приемлемой ввиду ГОСТ Р 52489-2005.

* Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог /под ред. проф. Г.Т. Петровского. – М.: Дом оптики, 1990. – 228 с.

Далее по формулам (4) и (5) были найдены координаты цветности светофильтров по каждой исследуемой системе. Результаты расчета для ЖЗС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета в системе XYZ MKO 1931 г.

The results of the calculation in the XYZ CIE 1931 system

Свето- фильтры	Координаты цветности	Исследуемые светофильтры					
		ЖЗС1	ЖЗС5	ЖЗС6	ЖЗС9	ЖЗС12	ЖЗС17
Системы $M'_2N'_2P'_2$	x	0,380	0,465	0,473	0,429	0,336	0,365
	y	0,586	0,450	0,469	0,511	0,629	0,614
Система $X1X2Y1Z1$	x	0,358	0,458	0,465	0,417	0,316	0,342
	y	0,621	0,476	0,496	0,546	0,675	0,655
Разность координат	Δx	0,022	0,007	0,008	0,012	0,02	0,023
	Δy	0,035	0,026	0,027	0,035	0,046	0,041
Среднее значение	Δx	0,015					
	Δy	0,035					

Разность координат цветности систем $M'_2N'_2P'_2$ и $X1X2Y1Z1$ в среднем составила $\Delta x = 0,015$, $\Delta y = 0,035$. Для объективной оценки координаты были переведены в равноконтрастную систему по формулам (10)–(11) и найдено цветовое различие Δe , составившее в среднем 0,017 (см. табл. 3). Результаты расчета по всем группам СФ представлены в табл. 4.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчета в равноконтрастной системе $u'v'$ MKOThe results of the calculation in the equal-contrast system $u'v'$ CIE

Свето- фильтры	Координаты цветности	Исследуемые светофильтры					
		ЖЗС1	ЖЗС5	ЖЗС6	ЖЗС9	ЖЗС12	ЖЗС17
Системы $M'_2N'_2P'_2$	u'	0,164	0,249	0,246	0,208	0,136	0,152
	v'	0,569	0,542	0,550	0,556	0,573	0,573
Система $X1X2Y1Z1$	u'	0,147	0,235	0,232	0,191	0,121	0,135
	v'	0,574	0,550	0,556	0,564	0,580	0,579
Разность координат	$\Delta u'$	0,017	0,014	0,014	0,017	0,015	0,017
	$\Delta v'$	0,005	0,007	0,007	0,008	0,007	0,006
Изменение цветности	Δe	0,018	0,016	0,016	0,018	0,017	0,018
Среднее значение	Δe_{cp}	0,017					

Таблица 4

Table 4

Результаты расчета групп светофильтров

Calculation results of the of groups of filters

Группа светофильтров	Δx_{cp}	Δy_{cp}	Δe_{cp}
ЗС	0,010	0,035	0,0166
ЖЗС	0,015	0,035	0,0170
ЖС	0,009	0,021	0,0158
Усредненные значения	0,01	0,03	0,016

По результатам в табл. 4 видно, что отклонение системы $X1X2Y1Z1$ от $M'_2N'_2P'_2$ особенно заметно по Δy (в 3 раза по сравнению с Δx), что может быть связано с более узкой характеристикой $y_1(\lambda)$ относительно $m_2(\lambda)$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

По методике исследования систем цветоделения на оптико-электронной установке, описанной в источнике [13], были проведены измерения выбранных образцов 18 СФ на основе разработанной системы $X1X2Y1Z1$.

Координаты цвета, найденные по коэффициентам яркости снимков каждого приемника $X1$, $X2$, $Y1$ и $Z1$, также по коэффициентам пересчета переводились в систему XYZ МКО 1931 г., складывались показатели $X1$ и $X2$, после чего находились координаты цветности по формулам (1) и (2) и в равноконтрастной системе – по формулам (10) и (11). В качестве эталонного значения были приняты рассчитанные координаты цветности для системы $M'_2N'_2P'_2$, на основе характеристик которой и были разработаны приемники $X1X2Y1Z1$. Результаты расчета для групп желто-зеленых СФ представлены в табл. 5.

Таблица 5

Table 5

Результаты расчета для желто-зеленых СФ

Calculation results for YGG

СФ	Координаты в системе XYZ МКО 1931 г.						Координаты в $u'v'$ МКО				Δe
	Рассчитанные $M'_2N'_2P'_2$		Эксперимент $X1X2Y1Z1$		Разность		Рассчитанные $M'_2N'_2P'_2$		Эксперимент $X1X2Y1Z1$		
	x	y	x	y	Δx	Δy	u'	v'	u'	v'	
ЖЗС1	0,38	0,586	0,392	0,607	0,012	0,021	0,164	0,569	0,165	0,575	0,006
ЖЗС5	0,465	0,45	0,498	0,456	0,033	0,006	0,249	0,542	0,266	0,549	0,019
ЖЗС6	0,473	0,469	0,51	0,46	0,037	0,009	0,246	0,549	0,272	0,552	0,026
ЖЗС9	0,429	0,511	0,469	0,517	0,04	0,006	0,207	0,556	0,227	0,563	0,021
ЖЗС12	0,336	0,629	0,304	0,705	0,032	0,076	0,136	0,573	0,112	0,585	0,027
ЖЗС17	0,365	0,614	0,386	0,624	0,021	-0,01	0,151	0,573	0,159	0,578	0,009
Среднее значение					0,029	0,018					0,018

Усредненные результаты эксперимента по группам СФ представлены в табл. 6.

Таблица 6

Table 6

Результаты эксперимента групп светофильтров

The results of the experiment groups of filters

Группа свето-фильтров	$\Delta x_{\text{ср}}$	$\Delta y_{\text{ср}}$	$\Delta e_{\text{ср}}$
ЗС	0,045	0,020	0,025
ЖЗС	0,029	0,018	0,018
ЖС	0,035	0,012	0,021
Усредненные значения	0,036	0,017	0,021

Получено достаточно хорошее изменение цветности – 0,021. Значения $\Delta x_{\text{ср}}$ и $\Delta y_{\text{ср}}$ не соответствуют рассчитанным (см. табл. 4), что указывает на возможные погрешности при проведении эксперимента. Несмотря на исключение части шумов матрицы (учет «темнового кадра», применение низкочастотного фильтра), повторяемость эксперимента (анализ пяти снимков каждого образца), исключение отклонения источника света от характеристики источника типа А, полностью от погрешности избавиться невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы разработанные системы $M_2N_2P_2'$ и $X1X2Y1Z1$. При анализе источника равноэнергетического спектра E доказана согласованность обеих систем с XYZ МКО 1931 г. На основе математического моделирования были найдены координаты цвета и цветности 18 подобранных зеленых, желто-зеленых и желтых светофильтров. Средний показатель по цветовому различию в равноконтрастной системе $u'v'$ МКО 1974 г. составил 0,016. При проведении экспериментальных исследований показатель увеличился до 0,021, что указывает на неучтенные погрешности при проведении эксперимента.

Полученные результаты расчета и эксперимента показывают хорошую перспективу внедрения систем цветоделения схожих по характеристикам с колориметрической системой XYZ МКО 1931 г. в современные цифровые устройства регистрации и обработки изображений. Полученные характеристики по форме превосходят современные аналоги и позволят минимизировать потери при воспроизведении цвета [3, 14].

В дальнейшем разработанная система цветоделения $X1X2Y1Z1$ будет внедрена в цифровой колориметр [15]. Поэтому при разработке методики эксперимента на цифровом колориметре необходимо будет учесть некоторые погрешности для получения точных координат цвета, максимально соответствующих результатам математического моделирования. Так как значения Δx и Δy для групп СФ разнятся, то необходимо предусмотреть градуировку по каждому основному цвету: зеленому, синему, красному, а также, возможно, по промежуточным цветам: желтому, оранжевому и фиолетовому.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бородулин Д.В., Горбачев А.А., Краснящих А.В.* Сравнение оптических приемников на основе ПЗС и КМОП-структур // Оптика-2005: труды Четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – С. 147.
2. Преобразователи изображения на приборах с зарядовой связью / Р.Е. Быков, А.А. Манцетов, Н.Н. Степанов, Г.А. Эйссенгардт. – М., 1992. – 184 с.
3. *Lyon R., Hubel P.M.* Eyeing the camera: into the next century [Electronic resource] // The Tenth Color Imaging Conference. – Scottsdale, AZ, 2002. – P. 349–355. – URL: http://www.foveon.com/files/CIC10_Lyon_Hubel_FINAL.pdf (accessed: 28.03.2019).
4. *Гребенникова О.Ф., Тихомирова Г.В.* Основы записи и воспроизведения информации. – СПб.: СПбГУКиТ, 2002. – 712 с.
5. *Джадд Д., Вышецкий Г.* Цвет в науке и технике / пер. с англ. под ред. Л.Ф. Артюшина. – М.: Мир, 1978. – 592 с.
6. *Нейман В.И.* Цифровая обработка изображений в современном приборостроении // Приборы. – 2007. – № 2. – С. 57–63.
7. *Мешков В.В., Матвеев А.Б.* Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 430 с.
8. *Кривошеев М.И., Кустарев А.К.* Цветовые измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
9. *Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б.* О реализации оптико-электронного колориметра в колориметрической системе XYZ МКО 1931 г. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63, № 1. – С. 112–119. – DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-1-112-119.
10. *Zhbanova V.L., Nubin V.V.* A method of improving colour rendition of digital photo- and videocameras // Light & Engineering. – 2014. – Vol. 22, N 2. – P. 84–89.
11. *Ландсберг Г.С.* Оптика. – 6-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.
12. *Иванов В.Е., Широких Т.В.* Сравнение равноконтрастных колориметрических систем // Светотехника. – 2014. – № 6. – С. 44–47.
13. *Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б.* Экспериментальное исследование системы цветоделения матричного фотоприемника // Оптический журнал. – 2019. – № 3. – С. 61–67.
14. *Новаковский С.В.* Цвет на экране телевизора. Основы телевизионной колориметрии. – М.: Радио и связь, 1997. – 168 с.
15. *Парвулюсов Ю.Б., Жбанова В.Л.* Колориметр для оценки насыщенных цветов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 5. – С. 122–126.

Жбанова Вера Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры оптико-электронных систем филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске. Основное направление – колориметрия и оптико-электронные приборы и системы. Имеет более 40 публикаций, в том числе монографию. E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

Zhbanova Vera Leonidovna, PhD (Eng.), an associate professor at the department of optical and electronic systems, Smolensk Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute". The main field of her research includes colorimetry and optoelectronic devices and systems. She is the author of more than 40 publications including 1 monograph. E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-167-180

A color separation system with characteristics close to CIEXYZ 1931*

V.L. ZHBANOVA

*Smolensk Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
1, Energeticheskiy Prospekt, Smolensk, 214013, Russian Federation**vera-zhbanova@yandex.ru***Abstract**

The paper presents the results of research in the X1X2Y1Z1 color separation system and its color space M'2N'2P'2. The analysis of these two systems was carried out for compliance with the XYZ MKO 1931 colorimetric system. The color separation system was developed to match the registration systems for color image processing. The X1X2Y1Z1 receivers are based on sets of colored optical glasses to comply with the characteristic of the Sony matrix. The curves were chosen in such a way that their shape and peaks coincided as much as possible with the M'2N'2P'2 color space. The curves obtained were a little different in shape, but the best option possible was adopted. The M'2N'2P'2 color space has characteristics similar to the XYZ CIE of 1931, while it is independent and even has an improved color triangle with a minimal inclusion of unreal colors. The transition coefficients from the developed systems to the XYZ system, which are necessary for a better assessment of chromaticity coordinates and a correct transition to other colorimetric systems including equal contrast, are given. A description of the methodology for conducting mathematical modeling to find color coordinates and color samples in the developed color space M'2N'2P'2 and based on its color separation system X1X2Y1Z1 is presented. For an objective assessment of the quality of the developed systems, a change in the chromaticity of green, yellow-green and yellow light filters was found. The values of the experimentally found chromaticity coordinates of the selected light filters on an optical-electronic setup are given. An analysis of the experimental and calculated values was carried out. In general, the system showed a satisfactory result, which proved its efficiency. Based on the analysis, conclusions were made on further work with the color separation system X1X2Y1Z1.

Keywords: color separation system, colorimeter, light filters, receivers, matrix, colorimetric system, equal contrast system, color difference

REFERENCES

1. Borodulin D.V., Gorbachev A.A., Krasnyashchikh A.V. [Comparison of optical receivers based on CCD and CMOS structures]. *Optika-2005: trudy Chetvertoi mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [Optics-2005. Proceedings of the Fourth International Conference of Young Scientists and Specialists]. St. Petersburg, 2005p. 147. (In Russian).
2. Bykov R.E., Mantsvetov A.A., Stepanov N.N., Eissengardt G.A. *Preobrazovateli izobrazheniya na priborakh s zaryadovoi svyaz'yu* [Image transducers on charge-coupled devices]. Moscow, 1992. 184 p.
3. Lyon R., Hubel P.M. Eyeing the camera: into the next century. *The Tenth Color Imaging Conference*, Scottsdale, AZ, 2002, pp. 349–355. Available at: http://www.foveon.com/files/CIC10_Lyon_Hubel_FINAL.pdf (accessed 28.03.2019).
4. Grebennikova O.F., Tikhomirova G.V. *Osnovy zapisi i vosproizvedeniya informatsii* [Basics of recording and playback information]. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Film and Television, 2002. 712 p.

* Received 12 September 2018.

The reported study was funded by RFBR according to research project № 18-37-00176

5. Judd D.B. *Color in business, science and industry*. New York, Wiley, 1975 (Russ. ed.: Dzhadd D., Vyshetskii G. *Tsvet v nauke i tekhnike*. Moscow, Mir Publ., 1978. 592 p.).
6. Neiman V.I. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v sovremennom priborostroenii [Digital image processing in modern instrument making]. *Pribory*, 2007, no. 2, pp. 57–63. (In Russian).
7. Meshkov V.V., Matveev A.B. *Osnovy svetotekhniki*. Ch. 2. Fiziologicheskaya optika i kolorimetriya [Basics of lighting. Pt. 2. Physiological optics and colorimetry]. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 430 p.
8. Krivosheev M.I., Kustarev A.K. *Tsvetovye izmereniya* [Color measurements]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 240 p.
9. Zhanova V.L., Parvulusov Yu.B. O realizatsii optiko-elektronnogo kolorimetra v kolorimetricheskoi sisteme XYZ MKO 1931 g. [On the implementation of the optic-electronic colorimeter in the CIE XYZ 1931 colorimetric system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka – Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2019, vol. 63, no. (1), pp. 112–119. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-1-112-119.
10. Zhanova V.L., Nubin V.V. A method of improving colour rendition of digital photo- and videocameras. *Light & Engineering*, 2014, vol. 22, no. 2, pp. 84–89.
11. Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 848 p.
12. Ivanov V.E., Shirokikh T.V. Sravnenie ravnokonstrastnykh kolorimetricheskikh sistem [Comparison of equal-contrast colorimetric systems]. *Svetotekhnika – Light & Engineering*, Moscow, 2014, no. 6, pp. 44–47. (In Russian).
13. Zhanova V.L., Parvulyusov Yu.B. Eksperimental'noe issledovanie sistemy tsvetodeleniya matrichnogo fotopriemnika [Experimental study of the color separation system of a matrix photodetector]. *Opticheskii zhurnal – Journal of Optical Technology*, 2019, no. 3, pp. 61–67. (In Russian).
14. Novakovskii S.V. *Tsvet na ekrane televizora. Osnovy televizionnoi kolorimetrii* [Color on the TV screen. The basics of television colorimetry]. Moscow, Radio I svyaz' Publ., 1997. 168 p.
15. Parvulusov Yu.B., Zhanova V.L. Kolorimetr dlya otsenki nasyshchennykh tsvetov [Principles of instrumental color measurement and further measurements assessment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka – Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2017, no. 5, pp. 122–126.

Для цитирования:

Жбанова В.Л. Система цветоделения с характеристиками, близкими к XYZ MKO 1931 г. // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 1 (74). – С. 167–180. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-167-180.

For citation:

Zhanova V.L. Sistema tsvetodeleniya s kharakteristikami, blizkimi k XYZ MKO 1931 g. [A color separation system with characteristics close to CIEXYZ 1931]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 1 (74), pp. 167–180. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-167-180.