

УДК 535.645.646

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-06-17-23

Оптимальная цветокоррекция в телевидении

© 2018 г. **Л. Д. Ложкин, доктор техн. наук; Осипов О. В., доктор физ.-мат. наук;**
А. А. Вороной, канд. физ.-мат. наук; А. А. Солдатов, канд. физ.-мат. наук;
Д. П. Табаков, доктор физ.-мат. наук

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара

E-mail: leon.lozhkin@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.03.2018

В данной статье рассматриваются вопросы цветовых искажений на телевизионном экране, полученных существующей стандартной телевизионной системой. Графически показаны искажения цветности между оригиналом и его изображением на телевизионном экране в случае применения стандартных схем цветовой коррекции в камерном канале телевизионной системы. В связи с тем, что в настоящее время используются различные телевизионные экраны, имеющие большие отличия цветовых охватов, то величина искажений цветностей между оригиналом и изображением на конкретном телевизионном экране будет значительно различаться при воспроизведении одного и того же изображения. Для уменьшения цветовых искажений предлагается метод цветовой коррекции, установленной в телевизионном приёмнике.

Ключевые слова: колориметрическая система координат, цветовой охват телевизионного экрана, цветовой треугольник цветовоспроизводящего устройства.

Коды OCIS: 330.1690, 330.1710.

СТАНДАРТНАЯ СХЕМА ЦВЕТКОРРЕКТОРА

В эпоху чёрно-белого телевидения на качество телевизионного изображения влияли контрастность, яркость и чёткость изображения, геометрические искажения, а также помехи в виде «снега», муаров и других, мешающих (раздражающих) факторов.

В 1976 г. в нашей стране появилось регулярное цветное телевидение. В связи с этим качество телевизионного изображения ухудшилось в связи с цветовыми искажениями, точнее, верности воспроизведения цветности на телевизионном экране. Для коррекции цветовых искажений в аппаратуру телецентра в камерный канал было введено специальное устройство — цветокорректор.

Схематически цветокорректор включается в схему камерного канала после гаммакорректоров, которые корректируют световые характеристики «красного», «зелёного» и «синего» каналов телевизионного экрана [1].

Принципиально схема цветокорректора представляет собой, как правило, матричную схему. Электронная коррекция видеосигналов с матрич-

ной схемой, установленной в камерный канал, описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} E'_{RO} &= a_{11}E'_R + a_{12}E'_G + a_{13}E'_B, \\ E'_{GO} &= a_{21}E'_R + a_{22}E'_G + a_{23}E'_B, \\ E'_{BO} &= a_{31}E'_R + a_{32}E'_G + a_{33}E'_B, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где E'_{RO} , E'_{GO} , E'_{BO} — выходные сигналы цветокорректора, E'_R , E'_G и E'_B — входные сигналы, a_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) — коэффициенты маскирования.

На выходе такого корректора получают характеристики, близкие по форме к идеальным спектральным характеристикам чувствительности (рис. 1). Значения двух коэффициентов маскирования должны быть малыми в сравнении с третьим. В противном случае происходит ухудшение отношения сигнал/шум и увеличение цветных окантовок при неточном совмещении сигналов во времени. Кроме того, возникают заметные искажения цвета в зонах переходных процессов сигналов E'_R и E'_G . Члены с коэффициентами a_{11} , a_{22} и a_{33} представляют собой основные видеосигналы. Остальные члены системы уравнений (1)

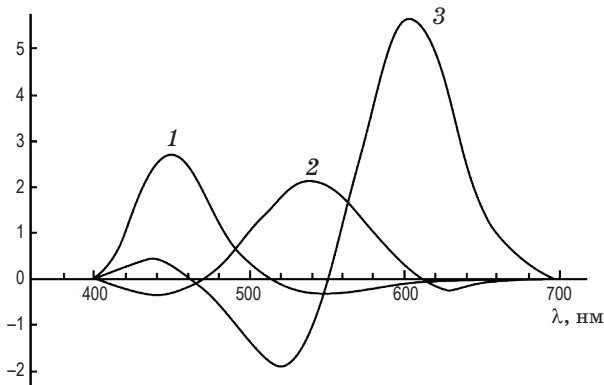


Рис. 1. Идеальные спектральные характеристики чувствительности, рассчитанные по формуле (1). Кривая 1 — «синий» канал, 2 — «зелёный» канал, 3 — «красный» канал телевизионной камеры.

образуют сигнал «маски». Процесс линейной цветокоррекции состоит в подборе значений всех девяти коэффициентов. Для создания баланса белого (неискаженной передачи опорного белого цвета) при изменении коэффициентов маскирования с целью коррекции цвета необходимо выполнить условия

$$\begin{aligned} a_{11} + a_{12} + a_{13} &= 1, \\ a_{21} + a_{22} + a_{23} &= 1, \\ a_{31} + a_{32} + a_{33} &= 1. \end{aligned} \tag{2}$$

Подставив a_{11}, a_{22}, a_{33} из (2) в (1) получим

$$\left. \begin{aligned} E'_{RO} &= E'_R + a_{12}(E'_G - E'_R) + a_{13}(E'_B - E'_R), \\ E'_{GO} &= E'_G + a_{21}(E'_R - E'_G) + a_{23}(E'_B - E'_G), \\ E'_{BO} &= E'_B + a_{31}(E'_R - E'_B) + a_{32}(E'_G - E'_B). \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Тогда, согласно (3), в цветокорректорах установку выходных видеосигналов можно выполнить шестью независимыми регуляторами.

На рис. 2 приведена структурная схема электронного цветокорректора, предложенная Кингом [2]. В этой схеме цветные сигналы подаются на входы парафазных усилителей 1, 2, 3, на выходах которых появляются разнополярные сигналы. Регуляторы цветового тона 4 и насыщенности цвета 5 включены попарно так, что изменение положения этих регуляторов не меняет размах видеосигналов во время передачи изображения белых объектов.

На рис. 3 показаны цветовые искажения, обозначенных цифрами от 1 до 17 (оригинальные цвета), а линии, проведённые от этих точек, представляют собой величину искажений цветности изображений на экране.

Точка, обозначенная буквой W, имеет координаты цветности опорного «белого», которые равны относительным цветовым координатам стандартного источника D65. Из рис. 3 видно, что искаже-

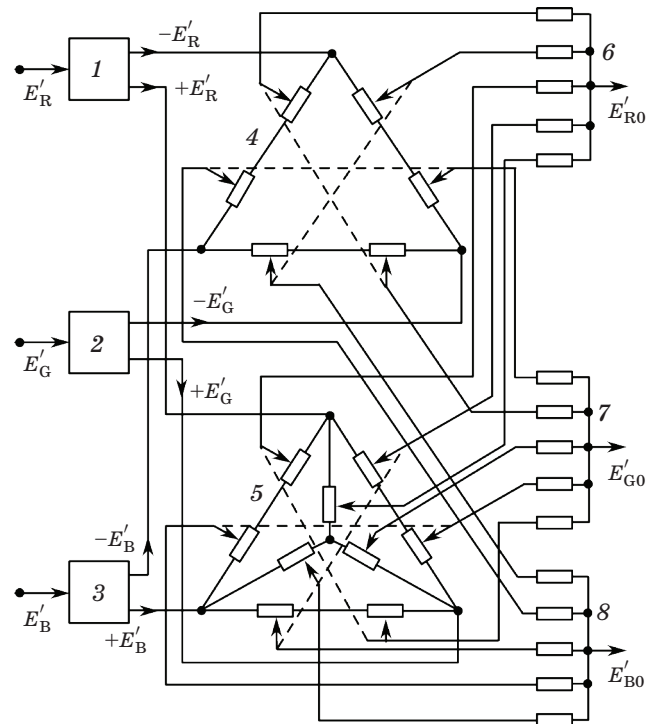


Рис. 2. Структурная схема электронного цветокорректора Кинга [2] с матрицами. 1, 2, 3 — парафазные усилители, 4 — регулятор цветового тона, 5 — регулятор насыщенности, 6, 7, 8 — пассивные матрицы. Штриховые линии означают механическую связь.

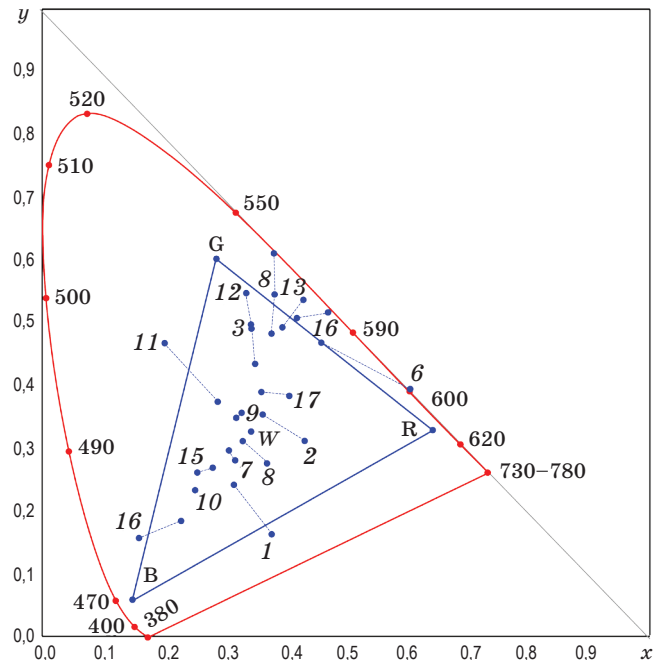


Рис. 3. Искажения цветопередачи телевизионной системы при приёме на телевизор с цветным кинескопом.

ния цветности этого источника равны нулю. Это осуществляет цветокорректор, т.е. цветокорректор может произвести идеальную коррекцию только одного белого цвета, а остальные цвета будут

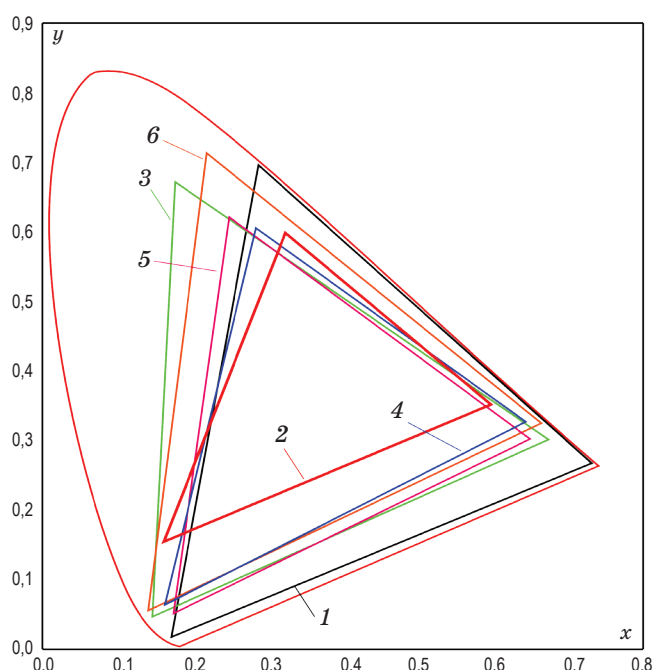


Рис. 4. Координаты цветностей основных цветов современных приборов для телевизионных экранов. 1 — жидкокристаллический экран с подсветкой люминесцентной лампой, 2 — жидкокристаллический экран с подсветкой белыми светодиодами, 3 — жидкокристаллический экран с подсветкой полноцветными светодиодами, 4 — цветной кинескоп, 5 — цветной кинескоп стандарта NTSC, 6 — плазменная панель.

воспроизводиться на телевизионном экране с ошибками, что является существенным недостатком.

Треугольник RGB на рис. 3 обозначает цветовой охват телевизионного экрана.

Необходимо отметить, что с начала 21-го века в качестве телевизионных экранов стали применяться приборы, отличные от кинескопов и, как следствие, имеющие различные координаты цветности основных цветов, как это показано на рис. 4.

Этот факт приводит к различным цветовым искажениям, что влияет на качество изображения. И действительно, при покупке нового телевизора в специализированных магазинах очень трудно выбрать конкретный телевизор, так как все представленные и включенные телевизоры, как правило, даже при одной и той же воспроизводимой картины, имеют различные цветовые оттенки изображения.

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИ ТОЧНОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ В ТВ

Профессор Н.Д. Ньюберг предложил в 1948 г. использовать три понятия точности воспроизведения цвета [3].

Роберт Хант дал академическое определение шести возможных уровней цветоспроизведения [4]:

1. Спектральное цветоспроизведение.
2. Колориметрическое цветоспроизведение.
3. Точное цветоспроизведение.
4. Эквивалентное цветоспроизведение.
5. Согласованное цветоспроизведение.
6. Выделенное цветоспроизведение.

Из шести определений, сформулированных Р. Хантом, остановимся на втором, а именно «Колориметрическое цветоспроизведение».

Колориметрическое цветоспроизведение (colorimetric color reproduction) определяется метамерным соответствием репродукции оригинальному изображению, при котором оба имеют одинаковые трёхстимульные значения МКО (Международная комиссия по освещению). Итогом является воспроизведение по восприятию, но только в тех случаях, когда оригинал и его репродукция имеют одинаковый размер, окружение и рассматриваются при свете источников с одинаковым спектральным распределением энергии и фотометрической яркостью.

Цветовоспроизводящее устройство, например, цветной телевизор, имеет три источника света, создающие основные цвета приёмника. Яркостью каждого основного цвета нужно управлять так, чтобы пропорции смеси основных цветов могли изменяться в широких пределах для получения гаммы цветов. В качестве основных цветов аддитивного воспроизводящего устройства (телеприёмника) выбираются красный, зелёный и синий цвета, которые можно обозначить R, G и B соответственно. На диаграмме цветности, например, XYZ (рис. 3, 4) (или в любой другой системе) эти основные цвета образуют цветовой треугольник, называемый треугольником цветового охвата. Очевидно, что воспроизводящее устройство может создать только те цветности, которые на диаграмме цветности находятся внутри треугольника цветов R, G, B. Воспроизведение цветов, лежащих вне этого треугольника, невозможно. Цвета оригинала, лежащие за пределами треугольника, будут воспроизводиться с искажениями насыщенности и цветового тона. Для колориметрически правильного воспроизведения цвета оригинала, находящегося на хроматической диаграмме внутри треугольника цветового охвата, необходимо, чтобы основные цвета отвечали следующим требованиям: имели правильные относительные количества (пропорции смеси) для создания необходимой цветности изображения, имели правильные абсолютные количества (яркости) для создания необходимой яркости изображения.

Пусть имеется следующая линейная зависимость для каждого элемента передаваемого изображения (оригинала) и его изображения:

$$X_O = k_1 X_I, \quad Y_O = k_2 Y_I, \quad Z_O = k_3 Z_I, \quad (4)$$

где k_1, k_2, k_3 — константы, индекс O означает оригинал (original), а индекс I — изображение (image). Тогда координаты цветности будут равны

$$\left. \begin{aligned} x_O &= \frac{X_O}{X_O + Y_O + Z_O} = \frac{k_1 X_I}{k_1 X_I + k_2 Y_I + k_3 Z_I}, \\ y_O &= \frac{Y_O}{X_O + Y_O + Z_O} = \frac{k_2 Y_I}{k_1 X_I + k_2 Y_I + k_3 Z_I}, \\ z_O &= \frac{Z_O}{X_O + Y_O + Z_O} = \frac{k_3 Z_I}{k_1 X_I + k_2 Y_I + k_3 Z_I}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Если

$$k_1 = k_2 = k_3 = k, \quad (6)$$

то из (5) получим

$$x_O = kx_I; \quad y_O = ky_I; \quad z_O = kz_I. \quad (7)$$

Итак, при выполнении (4) и (6) цветности передаваемого объекта и его изображение на экране телеприёмника колориметрически тождественны. Так как яркости (в абсолютных или относительных величинах) передаваемой сцены и изображения равны соответственно

$$L_O = Y_O, \quad L_I = Y_I,$$

то, подставляя (8) в (4), получим

$$L_O = kL_I. \quad (9)$$

Это есть следствие из первого условия колориметрически точной цветопередачи (4).

Зависимость между L_O и L_I обычно в телевидении выражается в виде

$$L_I = C L_O^G, \quad (10)$$

где C — константа, G — градиент передачи яркости.

Функция $\lg L_I = \lg C + \lg L_O^G$ является линейной в логарифмическом масштабе.

Следовательно, для выполнения условия (10) необходимо иметь

$$G = 1, \quad (11)$$

В этом случае градации яркости воспроизводятся без искажений.

В телевизионной системе $G = \gamma\gamma_z$, где γ — градиент яркости передающего тракта, включая датчик телевизионного сигнала (передающая камера), γ_z — градиент преобразователя сигнал-свет (экран телеприёмника) вместе с трактом приёмника.

Для выполнения условия (11) необходимо иметь

$$\gamma = \gamma_z^{-1}. \quad (12)$$

Это условие обычно достигается с помощью гамма-корректора, удовлетворительная работа которого возможна только тогда, когда величина γ_z постоянна во всем диапазоне яркостей изображения (для всех трёх основных цветов экрана теле-

приёмника) и величина γ постоянна во всем диапазоне яркостей передаваемого объекта для трёх передаваемых основных цветов.

Согласно [1] отклонения величины γ в цветном телевидении должны быть не более $\pm 4\%$ от номинальной величины как для трёх цветных каналов одного экрана телеприёмника, так и для всех экранов отдельных приёмников. На рис. 5 показана схема преобразования свет в сигнал и сигнал в свет в цветном телевидении для случая, когда экран телеприёмника является линейным прибором (т.е. значение γ_z для его модуляционной характеристики равно единице). Такой приёмник называется линейный.

Передающая камера содержит светорасщепляющую оптику (CPO), разделяющую световой поток F_O от передаваемой сцены на три световых потока — красный F_{RO} , зелёный F_{GO} и синий F_{BO} . Эти световые потоки попадают на преобразователи свет-сигнал соответственно красного, зелёного и синего каналов (ПСС_R, ПСС_G и ПСС_B).

Далее, электрические сигналы E_i , где $i = R, G$ и B (эти индексы будут сохранены и далее), поступают на соответствующие видеоусилители ВУ_{*i*}, имеющие коэффициенты передачи b_1, b_2 и b_3 соответственно. Усиленные сигналы поступают на экран телеприёмника, излучающего световые потоки F_{iI} . При аддитивном сложении эти световые потоки создают количества основных цветов экрана (screen), равные R_{SI}, G_{SI} и B_{SI} , смесь которых воспроизводит цветность передаваемой сцены. Эти количества должны быть равны (или пропорциональны) координатам цвета R_{SO}, G_{SO} и B_{SO} передаваемой сцены. Последние можно определить как

$$\begin{aligned} R_{SO} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_S P_\lambda \partial\lambda, \\ G_{SO} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g_S P_\lambda \partial\lambda, \\ B_{SO} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b_S P_\lambda \partial\lambda, \end{aligned} \quad (13)$$

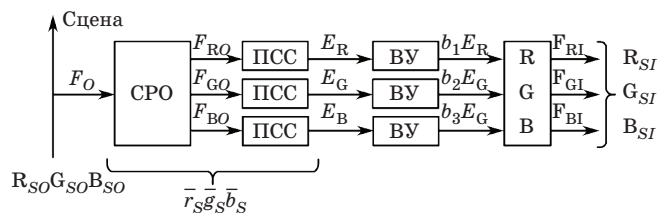


Рис. 5. Схема преобразования света в сигнал и сигнала в свет в цветном телевидении с линейным приёмником ($\gamma_z = 1$).

где $\bar{r}_S, \bar{g}_S, \bar{b}_S$ — удельные координаты спектральных цветов в системе $R_S G_S B_S$, P_λ — спектральная плотность энергии, излучаемой передаваемой сценой, λ_1, λ_2 — длины волн границ оптического диапазона спектра.

Но, с другой стороны, сигналы E_R, E_G, E_B на выходе видеоусилителей передающей камеры равны

$$\begin{aligned} E_R &= a'_R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_R P_\lambda \partial\lambda, \\ E_G &= a'_G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_G P_\lambda \partial\lambda, \\ E_B &= a'_B \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_B P_\lambda \partial\lambda, \end{aligned} \quad (14)$$

где S_R, S_G, S_B — спектральные характеристики чувствительности камеры (мкА/Вт), a'_R, a'_G, a'_B — размерные коэффициенты для перехода от значения фототока к напряжению на выходе видеоусилителей. Если

$$\begin{aligned} S_R &= \bar{r}_S, \\ S_G &= \bar{g}_S, \\ S_B &= \bar{b}_S, \end{aligned} \quad (15)$$

то можно получить

$$E_R = a'_R R_{SO}, \quad E_G = a'_G G_{SO}, \quad E_B = a'_B B_{SO}. \quad (16)$$

Эти сигналы можно назвать линейными и должны быть широкополосными, чтобы в телеприёмниках чёрно-белого и цветного телевидения изображения имели полную чёткость независимо от цвета.

Для передаваемой сцены и её изображения имеем по определению координаты цвета

$$R_{SO} = \frac{L_{RO}}{L_{[RO]}}, \quad G_{SO} = \frac{L_{GO}}{L_{[GO]}}, \quad B_{SO} = \frac{L_{BO}}{L_{[BO]}}, \quad (17)$$

$$R_{SI} = \frac{L_{RI}}{L_{[RI]}}, \quad G_{SI} = \frac{L_{GI}}{L_{[GI]}}, \quad B_{SI} = \frac{L_{BI}}{L_{[BI]}}, \quad (18)$$

где $L_{RO}, L_{GO}, L_{BO}, L_{RI}, L_{GI}, L_{BI}$ — яркости основных цветов приёмника R_S, G_S, B_S , необходимые для согласования с цветом передаваемой сцены и с цветом изображения соответственно; $L_{[RO]}, L_{[GO]}, L_{[BO]}, L_{[RI]}, L_{[GI]}, L_{[BI]}$ — яркости единичных количеств основных цветов R_I, G_I, B_I в системе $R_S G_S B_S$, установленные на одной и той же равно стимульной (equally stimulating) цветности (chromaticity) C_{es} .

Условия неискаженного воспроизведения цветности в телеприёмнике (4) и (6) означает необходимость выполнить следующие равенства

$$R_{SI} = kR_{SO}, \quad G_{SI} = kG_{SO}, \quad B_{SI} = kB_{SO}; \quad (19)$$

Условие (19) выполняется, если (15) справедливо, а также если

$$R_{SI} = a_1 E_R, \quad G_{SI} = a_1 E_G, \quad B_{SI} = a_1 E_B, \quad (20)$$

$$a'_R = a'_G = a'_B = a_0. \quad (21)$$

Действительно, подставив (16) в (20), получим (19), если $a_1 a_0 = k$. Здесь a_1 и k — постоянные коэффициенты. Подставим (17) в (19) и получим при правильной цветопередаче

$$\left. \begin{aligned} L_{RI} &= k \frac{L_{[RI]}}{L_{[RO]}} L_{RO}, \\ L_{GI} &= k \frac{L_{[GI]}}{L_{[GO]}} L_{GO}, \\ L_{BI} &= k \frac{L_{[BI]}}{L_{[BO]}} L_{BO}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Вследствие выбора одной и той же равно стимульной цветности C_{es} для оригинала и изображения справедливо следующее

$$\frac{L_{[RI]}}{L_{[RO]}} = \frac{L_{[GI]}}{L_{[GO]}} = \frac{L_{[BI]}}{L_{[BO]}} = a, \quad (23)$$

где a — постоянная величина.

Обозначив полную яркость изображения L_I и полную яркость передаваемой сцены L_O , можно записать

$$L_I = L_{RI} + L_{GI} + L_{BI}, \quad L_O = L_{RO} + L_{GO} + L_{BO}. \quad (24)$$

Подставив (22) в (24) и учитывая (23), получим

$$L_I = akL_O,$$

что соответствует (11).

Итак, для колориметрически верной цветопередачи необходимо соблюдать условие (19), для чего должны выполняться условия (15), (20) и (21), и при этом обеспечивается линейная зависимость между яркостью передаваемой сцены и яркостью изображения, т.е. выполняется условие (11).

Условие (15) означает, что спектральные характеристики чувствительности датчиков телевизионного сигнала представляют собой кривые зависимости удельных коэффициентов r_I, g_I, b_I от длины волны света видимого диапазона в системе определения цвета, в которой за основные цвета приняты основные цвета экрана приёмника R_S, G_S, B_S , что является линейно независимыми преобразованиями этих величин.

В существующей телевизионной системе телевизионная трёхцветная камера формирует три видеосигнала, которые некоторым образом кодируются и передаются на телевизионный приёмник. Амплитуды видеосигналов видеокамеры пропорциональны координатам цвета.

Тогда необходимые значения видеосигнала можно определить из матричного уравнения, а именно

$$\begin{bmatrix} U_R \\ U_G \\ U_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Из этого следует, что для воспроизведения цвета с координатами X, Y, Z необходимы видеосигналы U_R, U_G и U_B , а значит и координаты цветности. При расчёте величин видеосигналов для передаваемых цветов, цветности которых находятся за пределами цветового охвата экрана телевизионного приёмника, будет иметь место отрицательное значение параметров видеосигнала, и чтобы избежать этого, необходимо приравнять отрицательные значения нулю. На рис. 5 показаны цветовые искажения при использовании идеальной цветной трёхцветной камеры, а в телевизионном приёмнике в качестве экрана применён кинескоп стандарта ЕС.

Как видно из рис. 6, цветности, находящиеся внутри цветового треугольника основных цветов экрана телевизионного приёмника, оригинала

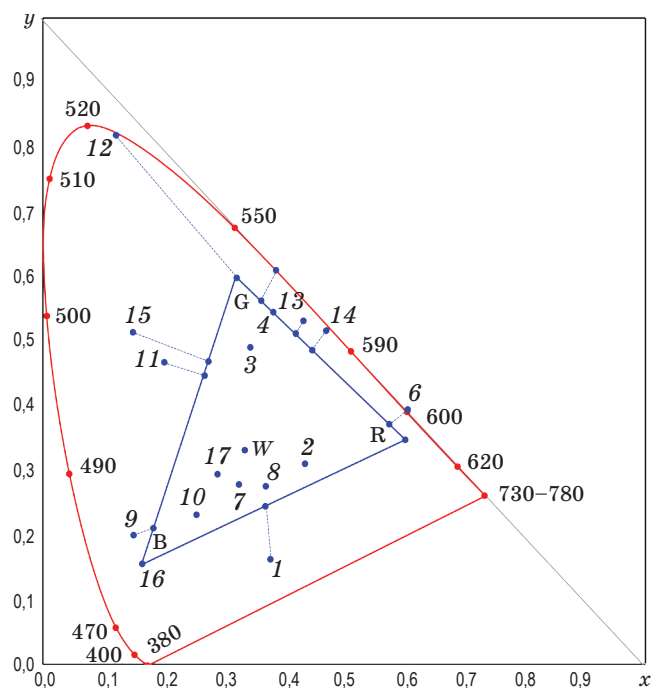


Рис. 6. Цветовые искажения в телевизионной системе, полученные путём передачи сигналов цвета и воспроизведённые на экране (кинескоп стандарта ЕС).

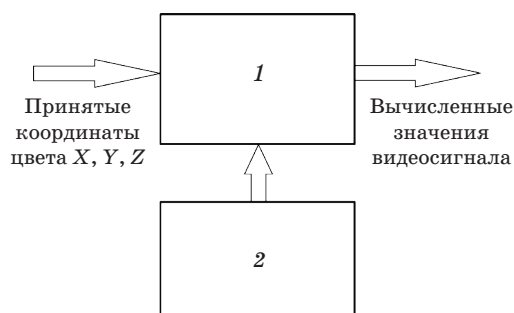


Рис. 7. Дополнительный узел в телевизионном приёмнике.

изображения совпадают с воспроизводимым изображением на экране телевизионного приёмника. Остальные координаты воспроизводимых цветов (за пределами треугольника цветового охвата) находятся на наиболее кратчайшем расстоянии от стороны треугольника основных цветов экрана телевизионного приёмника.

На рис. 7 показана добавляемая схема. Рассмотрим эту схему. Принятый сигнал с телецентра поступает на первый вход вычислительного устройства 1. На второй вход этого устройства поступают из постоянного запоминающего устройства 2 девять величин обратной матрицы, приведённой в выражении (5). Значения этих коэффициентов определяется единожды и зависят от типа экрана телевизионного приёмника, т.е. соответствуют однажды измеренным координатам цветности основных цветов для конкретного телевизионного экрана и расчёта коэффициентов обратной матрицы, приведённой в выражении (25). В вычислительном устройстве происходит вычисление значений видеосигналов U_R, U_G, U_B для воспроизведения на экране цвета с координатами X, Y, Z . В вычислительном устройстве 1 должна быть использована простая логика, а именно, если значение любого вычисленного значения меньше нуля, то его значение приравнивается нулю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современной системе телевидения можно значительно повысить качество цветовоспроизведения, т.е. уменьшить цветовые искажения, и при этом цветовая картинка на множестве телевизионных приёмниках будет восприниматься одинаково. Для этого достаточно принять, что видеосигнал телецентра содержит координаты цвета каждого пиксела изображения. Эти координаты цвета представляются в некой колориметрической системе телевизионной камеры, которые линейно отличаются от колориметрической системы МКО, например, XYZ . Используя выражение (25), опре-

деляются значения видеосигнала. При этом на телевизионном экране воспроизводится цвет каждого пиксела изображения, равный (пропорциональный) оригиналу. Таким образом, на экране

воспроизводится цвет без искажений, т.е. произойдет цветокоррекция для всех цветов, которые находятся внутри треугольника цветового охвата телевизионного приёмника.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Новаковский С.В.* Цветное телевидение. Основы теории цветовоспроизведения. М.: Связь, 1975. 376 с.
2. *King J.W., Washburn C.A., Thornwood N.Y.* Television color masker // Patent USA № 2845482. 1958.
3. *Нюберг Н.Д.* Теоретические основы цветовой репродукции. М.: Советская наука, 1948. 45 с.
4. *Хант Р.И.Г.* Цветовоспроизведение. Пер. с англ. Шадрина А.Е. Санкт-Петербург: 2009. 888 с.
5. *Ложкин Л.Д.* Дифференциальная колориметрия. Под ред. Тяжева А.И. Самара: Издательство учебной и научной литературы поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, 2010. 320 с.