

УДК 629.73.02; 629.73.05/.06; 535.643

МЕТОД ПРОГРАММНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗБРОСА КООРДИНАТ ЦВЕТНОСТИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

И.О. Жаринов^a, О.О. Жаринов^b

^a ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация

^b Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Адрес для переписки: igor_rabota@pisem.net

Информация о статье

Поступила в редакцию 22.12.14, принята к печати 16.03.15

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-387-397

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Жаринов И.О., Жаринов О.О. Метод программной компенсации технологического разброса координат цветности жидкокристаллических панелей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 387–397.

Аннотация

Предмет исследования. Рассматривается задача программной компенсации технологического разброса координат цветности жидкокристаллических панелей. Предлагается метод программной компенсации технологического разброса координат цветности. Метод позволяет снизить влияние технологического разброса координат цветности и обеспечивает характеристики цветовоспроизведения серийно изготавливаемых образцов бортовых средств индикации, соответствующие образцу индикатора, принятому в качестве эталона.

Метод. Для выбранной разработчиком модели жидкокристаллической панели осуществляется математический расчет профиля. Коэффициенты, соответствующие типовым значениям координат цветности для вершин треугольника цветового охвата, образуют эталонную математическую модель цветовоспроизведения ЖК-панели определенного производителя. На этапе входного контроля планируемый к использованию экземпляр жидкокристаллической панели устанавливается на светотехническую установку, где обеспечивается подключение экрана и формирование с применением Nokia-Test управляющего воздействия в компонентах кода *RGB* для индикации изображения однородного поля в красном, зеленом, синем и белом цветах. С помощью колориметра с известной величиной абсолютной погрешности осуществляется измерение (x,y) -координат цветности красного, зеленого, синего и белого цветов. Подобные измерения возможно осуществлять также непосредственно на образце индикатора на этапе настройки изделия. По измеренным значениям на основе преобразования Грассмана вычисляются уникальные для данного экземпляра коэффициенты профиля жидкокристаллической панели, связывающие *XYZ*-координаты цвета и десятичные коды *RGB* индицируемого на жидкокристаллической панели изображения. Полученные коэффициенты вводятся в память графического контроллера одновременно с функциональным программным обеспечением и используются для вывода изображения.

Основные результаты. Эффективность предлагаемого метода программной компенсации технологического разброса координат цветности жидкокристаллических панелей индикаторов оценена по критерию отношения площадей сечений гистограмм распределения $p(x,y)$ на заданном уровне доверительной вероятности до и после применения процедуры компенсации. Сечения гистограмм распределения координат цветности получены методом математического моделирования в среде MathCad 15.0. Программа математического моделирования метода программной компенсации позволяет получать взаимное расположение фигур, образованных сечениями гистограммы распределения (x,y) -координат цветности, при этом наблюдается как существенное уменьшение площади фигуры сечения после осуществления компенсации, так и изменение геометрии фигуры. В ряде случаев после выполнения процедуры компенсации на гистограмме распределения координат цветности появляются дополнительные относительные частоты, отсутствовавшие в исходном распределении. Получены семейства зависимостей критерия эффективности программной компенсации от разрешающей способности колориметра, используемого для измерения координат цветности.

Практическая значимость. Результаты работы могут использоваться разработчиками средств отображения информации и изготовителями жидкокристаллических панелей для выполнения колориметрических расчетов и для оценки технологического разброса координат цветности индицируемой информации по множеству серийно выпускаемых образцов дисплеев.

Ключевые слова

координаты цвета, координаты цветности, технологический разброс, компенсация.

METHOD OF SOFTWARE-BASED COMPENSATION OF TECHNOLOGICAL VARIATION IN CHROMATICITY COORDINATES OF LCD PANELS

I. O. Zharinov^a, O. O. Zharinov^b

^a Spb Scientific Design Bureau "Electroavtomatica" n.a. P. A. Efimov, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation

^b Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: Igor_rabota@pisem.net

Article info

Received 22.12.14, accepted 16.03.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-387-397

Article in Russian

For citation: Zharinov I.O., Zharinov O.O. Method of software-based compensation of technological variation in chromaticity coordinates of LCD panels I. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 3, pp. 387–397.

Abstract

Subject of research. The problem of software-based compensation of technological variation in chromaticity coordinates of liquid crystal panels is considered. A method of software-based compensation of technological variation in chromaticity coordinates is proposed. The method provides the color reproduction characteristics of the series-produced samples on-board indication equipment corresponding to the sample equipment, which is taken as the standard.

Method. Mathematical calculation of the profile is performed for the given model of the liquid crystal panel. The coefficients that correspond to the typical values of the chromaticity coordinates for the vertices of the triangle color coverage constitute a reference mathematical model of the plate LCD panel from a specific manufacturer. At the stage of incoming inspection the sample of the liquid crystal panel, that is to be implemented within indication equipment, is mounted on the lighting test unit, where Nokia-Test control is provided by the formation of the *RGB* codes for display the image of a homogeneous field in the red, green, blue and white. The measurement of the (x,y) -chromaticity coordinates in red, green, blue and white colors is performed using a colorimeter with the known value of absolute error. Instead of using lighting equipment, such measurements may be carried out immediately on the sample indication equipment during customizing procedure. The measured values are used to calculate individual LCD-panel profile coefficients through the use of Grassman's transformation, establishing mutual relations between the *XYZ*-color coordinates and *RGB* codes to be used for displaying the image on the liquid crystal panel. The obtained coefficients are to be set into the memory of the graphics controller together with the functional software and then used for image displaying.

Main results. The efficiency of the proposed method of software-based compensation for technological variation of chromaticity coordinates of liquid crystal panel was estimated by the ratio criterion of the areas of cross sections of the histograms $p(x,y)$ at a given probability confidence level, calculated before and after compensation procedure. The sections of histograms, representing distributions of chromaticity coordinates were obtained by mathematical simulation in MathCad 15.0. The simulation software of the method of software-based compensation gives the possibility to obtain the mutual arrangement between the figures formed by sections of the histograms of (x,y) -chromaticity coordinates, and it may be observed as significant reduction of the area after compensation procedure is performed, and changes in the geometry of the cross section shape as well. Sets of dependency curves were obtained, depicting the efficiency criterion value versus resolution of the colorimeter that is used for measuring the chromaticity coordinates.

Practical relevance. Research results are usable for engineers who are designing modern indication equipment based on LCD-panels and by manufacturers for colorimetric calculations and for estimation of technological tolerance of chromaticity coordinates among display units in mass production as well.

Keywords

color coordinates, chromaticity coordinates, technological variation, compensation.

Введение

Результаты испытаний и практический опыт эксплуатации бортовых индикаторов класса МФЦИ (многофункциональные цветные индикаторы), выполненных на базе жидкокристаллической (ЖК) панели [1], показывают, что ЖК-панели одного производителя имеют существенный технологический разброс координат цвета (цветности) индицируемого изображения.

Визуально разброс координат цветности воспринимается наблюдателем в виде цветовых отличий одинаковых элементов изображения, индицируемых на однотипных средствах отображения информации. Инструментально технологический разброс может быть оценен по результатам серии измерений координат цветности, выполняемых с использованием специальной аппаратуры – колориметров [2–5].

Достигнутый в настоящее время уровень качества производства ЖК-панелей позволяет изготовителям обеспечивать повторяемость колориметрических характеристик цветовоспроизведения экранов с допустимым технологическим разбросом координат цветности на уровне $\pm 0,05$ ед. по обеим координатным осям на *XU*-плоскости. Более совершенные технологии изготовления жидких кристаллов или светодиодных матриц позволяют получать технологический разброс координат цветности на уровне $\pm 0,03$ ед. по обеим осям. Дальнейшее совершенствование физической технологии изготовления пока не привело к появлению ЖК-панелей лучшего качества [6–8]. Для аппаратуры бытового исполнения (мониторы, телевизоры, i-Pad и т.д.), когда наблюдателю предъявлено изображение на одном-единственном образце ЖК-панели, такой разброс визуально не воспринимается, однако, когда наблюдателю одновременно предъявлено изображение на группе однотипных средств индикации, расположенных рядом друг с другом, отличия в цветовоспроизведении изображения проявляются в полной мере.

В авиационном приборостроении решение задачи обеспечения повторяемости колориметрических характеристик цветовоспроизведения ЖК-панелей имеет особое значение, обусловленное существующей практикой разработки объектов по нормам летной годности, допускающим установку на приборной панели объекта группы МФЦИ (от 3 до 6 шт.). Таким образом, актуальной является задача разработки метода программной компенсации технологического разброса координат цветности ЖК-панелей, позволяющего снизить визуальные отличия колориметрических характеристик цветовоспроизведения группы экранов до приемлемого уровня.

Преобразование Грассмана для ЖК-панелей

Из теории колориметрии известно, что преобразование Грассмана [9, 10] математически связывает XYZ -координаты цвета и десятичные коды RGB индицируемого на ЖК-панели изображения. По координатам цвета XYZ впоследствии рассчитываются (x,y) -координаты цветности.

Для обеспечения равенства колориметрических характеристик изображения на двух ЖК-панелях с отличающимися коэффициентами математической модели цветовоспроизведения должно выполняться следующее равенство:

$$\begin{bmatrix} X_{r_2} & X_{g_2} & X_{b_2} \\ Y_{r_2} & Y_{g_2} & Y_{b_2} \\ Z_{r_2} & Z_{g_2} & Z_{b_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r_1} & X_{g_1} & X_{b_1} \\ Y_{r_1} & Y_{g_1} & Y_{b_1} \\ Z_{r_1} & Z_{g_1} & Z_{b_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r_2} & X_{g_2} & X_{b_2} \\ Y_{r_2} & Y_{g_2} & Y_{b_2} \\ Z_{r_2} & Z_{g_2} & Z_{b_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{r_1} & X_{g_1} & X_{b_1} \\ Y_{r_1} & Y_{g_1} & Y_{b_1} \\ Z_{r_1} & Z_{g_1} & Z_{b_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $X_{r_i}, X_{g_i}, X_{b_i}, Y_{r_i}, Y_{g_i}, Y_{b_i}, Z_{r_i}, Z_{g_i}, Z_{b_i}$ – коэффициенты профиля ЖК-панелей, установленных в разных МФЦИ; R, G, B – код цвета изображения, $i=1, 2$.

Принимая во внимание, что коэффициенты профиля ЖК-панели не являются целыми числами, в системе (1) в качестве значения каждого компонента R_2, G_2, B_2 выбирается ближайшее большее целое число для каждого компонента кода. Такой выбор обусловлен принципом соответствия большей яркости изображения более насыщенному цвету, т.е. цвету, заданному большим значением кода RGB .

Модель технологического разброса координат цветности

Технологический разброс параметров профиля ЖК-панели одного производителя учитывается в модели:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r + \Delta \cdot \xi_{X_r} & X_g + \Delta \cdot \xi_{X_g} & X_b + \Delta \cdot \xi_{X_b} \\ Y_r + \Delta \cdot \xi_{Y_r} & Y_g + \Delta \cdot \xi_{Y_g} & Y_b + \Delta \cdot \xi_{Y_b} \\ Z_r + \Delta \cdot \xi_{Z_r} & Z_g + \Delta \cdot \xi_{Z_g} & Z_b + \Delta \cdot \xi_{Z_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \xi_{X_r} &\in [-X_r/2; +X_r/2], \quad \xi_{X_g} \in [-X_g/2; +X_g/2], \quad \xi_{X_b} \in [-X_b/2; +X_b/2], \quad \xi_{Y_r} \in [-Y_r/2; +Y_r/2], \\ \xi_{Y_g} &\in [-Y_g/2; +Y_g/2], \quad \xi_{Y_b} \in [-Y_b/2; +Y_b/2], \quad \xi_{Z_r} \in [-Z_r/2; +Z_r/2], \quad \xi_{Z_g} \in [-Z_g/2; +Z_g/2], \\ \xi_{Z_b} &\in [-Z_b/2; +Z_b/2], \end{aligned}$$

– равномерно распределенные случайные величины, Δ – параметр технологического разброса, обусловленного качеством производства одного и того же изготовителя.

Модель (2) определяет равномерный разброс допусков на значения коэффициентов $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ профиля ЖК-панели, возникающий в процессе изготовления с использованием полупроводниковых светосинтезирующих элементов.

На графике цветового пространства XY технологический разброс значений коэффициентов $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ может быть представлен семейством треугольников цветового охвата, в совокупности образующих геометрическое место точек, воспроизводимое множеством образцов серийно выпускаемых экранов одного изготовителя. Опытным путем установлено, что $\Delta \approx 2\delta x_R = 2\delta y_R = 2\delta x_G = 2\delta y_G = 2\delta x_B = 2\delta y_B$, где $\delta x_R, \delta y_R, \delta x_G, \delta y_G, \delta x_B, \delta y_B$ – разброс значений координат цветности вершин треугольника цветового охвата ЖК-панели на XY -плоскости.

Геометрическое место точек множества треугольников цветового охвата на XY -плоскости приведено на рис. 1, а. График (рис. 1, а) получен методом математического моделирования выражения (2) в среде MathCad 15.0 с параметром $\Delta=0,1$. Совмещено 10^5 треугольников. Пример индикационного кадра на экране МФЦИ приведен на рис. 1, б.

Расчет координат цветности вершин треугольника цветового охвата выполнен по формулам [9, 10]:

$$\begin{aligned} x_R &= X_r / (X_r + Y_r + Z_r), \quad y_R = Y_r / (X_r + Y_r + Z_r), \quad x_G = X_g / (X_g + Y_g + Z_g), \\ y_G &= Y_g / (X_g + Y_g + Z_g), \quad x_B = X_b / (X_b + Y_b + Z_b), \quad y_B = Y_b / (X_b + Y_b + Z_b). \end{aligned}$$

Графическое представление технологического разброса значений вершин множества треугольников цветового охвата модели (2) адекватно существующему на практике у изготовителей ЖК-панелей разбросу. В соответствии с технической документацией на ЖК-панели координаты цветности (x_R, y_R) , (x_G, y_G) , (x_B, y_B) вершин треугольника цветового охвата и точки белого цвета (x_W, y_W) задаются изготовителем в виде интервальных значений, имеющих минимальное, максимальное и типовое (среднее) значение.

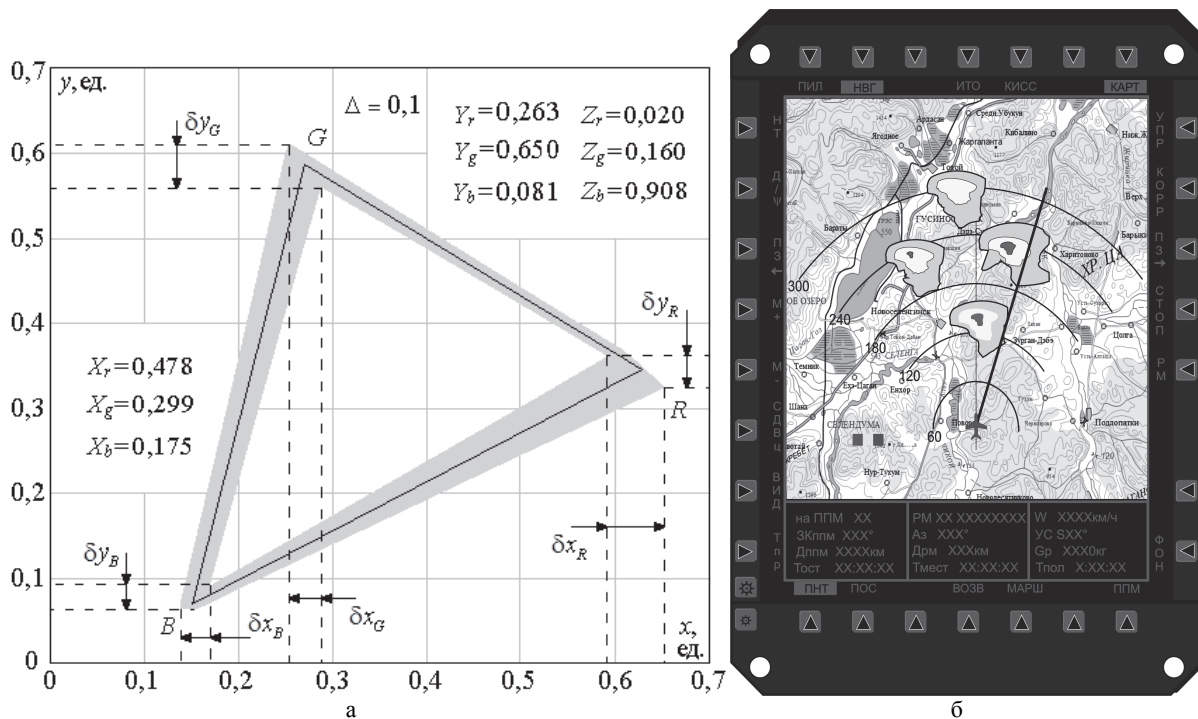


Рис. 1. Геометрическое место точек множества треугольников цветового охвата на XY-плоскости (а) и пример индикационного кадра на многофункциональном цветном индикаторе (б)

Принцип расчета коэффициентов модели цветовоспроизведения ЖК-панели

Расчет коэффициентов профиля предполагает, что (x_R, y_R) – координата вершины треугольника цветового охвата в красном цвете, полученная на основе прямого преобразования Грассмана по десятичному коду $RGB=(255,0,0)$; (x_G, y_G) – вершина в зеленом цвете для кода $RGB=(0,255,0)$; (x_B, y_B) – вершина в синем цвете для кода $RGB=(0,0,255)$; (x_W, y_W) – вершина в белом цвете для кода $RGB=(255,255,255)$. Соответствующие правила вычислений могут быть представлены в виде системы уравнений:

$$\begin{cases}
 x_R (\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) = \hat{X}_r = \frac{x_R}{y_R} \hat{Y}_r \\
 y_R (\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) = \hat{Y}_r = \frac{y_R}{x_R} \hat{X}_r \\
 x_G (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) = \hat{X}_g = \frac{x_G}{y_G} \hat{Y}_g \\
 y_R (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) = \hat{Y}_g = \frac{y_G}{x_G} \hat{X}_g \\
 x_B (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) = \hat{X}_b = \frac{x_B}{y_B} \hat{Y}_b \\
 y_B (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) = \hat{Y}_b = \frac{y_B}{x_B} \hat{X}_b \\
 x_W (\hat{X}_r + \hat{X}_g + \hat{X}_b + \hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b + \hat{Z}_r + \hat{Z}_g + \hat{Z}_b) = \hat{X}_r + \hat{X}_g + \hat{X}_b \\
 y_W (\hat{X}_r + \hat{X}_g + \hat{X}_b + \hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b + \hat{Z}_r + \hat{Z}_g + \hat{Z}_b) = \hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b
 \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) состоит из восьми уравнений и имеет девять неизвестных: $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ – искомые коэффициенты профиля ЖК-панели. В существующем виде система (3) не имеет однозначного решения.

Для решения системы (3) необходимо ввести девятое уравнение, связывающее коэффициенты профиля. Недостающее уравнение имеет вид

$$\hat{Y}_r + \hat{Y}_g + \hat{Y}_b = 1. \quad (4)$$

Связь Y -коэффициентов обусловлена принятым [11] в колориметрии балансом белого цвета, в котором Y -составляющая относительной яркости в белом цвете при коде $RGB=(255,255,255)$ обладает максимальным значением, принимаемым за 100%.

Совместное решение уравнений (3), (4) имеет следующий вид:

$$\hat{X}_r = \frac{x_R}{y_R} \hat{Y}_r, \quad \hat{X}_g = \frac{x_G}{y_G} \hat{Y}_g, \quad \hat{X}_b = \frac{x_B}{y_B} \hat{Y}_b, \quad \hat{Y}_r = 1 - \hat{Y}_g - \hat{Y}_b, \quad \hat{Y}_g = \frac{\frac{x_W - x_R}{y_W - y_R} + \left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B} \right) \hat{Y}_b}{\frac{x_G - x_R}{y_G - y_R}},$$

$$\hat{Y}_b = \frac{\frac{1 - x_W}{y_W} + \frac{x_R - 1}{y_R} + \frac{x_W y_R - y_W x_R}{x_G y_R - y_G x_R} \cdot \frac{y_G}{y_W} \cdot \left(\frac{1 - x_R}{y_R} + \frac{x_G - 1}{y_G} \right)}{\frac{x_R y_B - y_R x_B}{x_G y_R - y_G x_R} \cdot \frac{y_G}{y_B} \cdot \left(\frac{1 - x_G}{y_G} + \frac{x_R - 1}{y_R} \right) + \frac{1 - x_B}{y_B} + \frac{x_R - 1}{y_R}},$$

$$\hat{Z}_r = \hat{Y}_r \left(\frac{1 - x_R - y_R}{y_R} \right), \quad \hat{Z}_g = \hat{Y}_g \left(\frac{1 - x_G - y_G}{y_G} \right), \quad \hat{Z}_b = \hat{Y}_b \left(\frac{1 - x_B - y_B}{y_B} \right). \quad (5)$$

Метод программной компенсации технологического разброса координат цветности

Метод программной компенсации технологического разброса координат цветности ЖК-панелей заключается в следующем.

1. Осуществляется математический расчет (5) коэффициентов $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ профиля ЖК-панели, соответствующих типовым значениям координат $(x_R, y_R), (x_G, y_G), (x_B, y_B), (x_W, y_W)$, приведенным в технической документации производителем для выбранной разработчиком МФЦИ модели ЖК-панели. Впоследствии коэффициенты, соответствующие типовым значениям координат цветности для вершин треугольника цветового охвата, образуют эталонную математическую модель цветовоспроизведения ЖК-панели данного производителя.
2. Каждый экземпляр ЖК-панели, планируемый к использованию в МФЦИ, устанавливается на светотехническую установку [10], где обеспечивается подключение экрана и формирование управляющего воздействия для индикации на ЖК-панели изображения однородного поля в красном, зеленом, синем и белом цветах. Формирование управляющего воздействия обеспечивает, в частности, Nokia-Test, широко применяемый в светотехнических испытаниях средств индикации индивидуального и коллективного пользования. Управляющее воздействие на ЖК-панель формируется в компонентах кода RGB для красного цвета $(255,0,0)$; для зеленого цвета $(0,255,0)$; для синего цвета $(0,0,255)$; для белого цвета $(255,255,255)$.
3. Колориметром с заданной абсолютной погрешностью h прямого измерения [12, 13] осуществляется измерение на XU -плоскости (x,y) -координат цветности красного (x_R, y_R) , зеленого (x_G, y_G) , синего (x_B, y_B) и белого (x_W, y_W) цветов.

Такие измерения координат цветности основных цветов и белого цвета необходимо проводить на этапе входного контроля комплектующих изделий (ЖК-панелей), поступающих на предприятие-изготовитель МФЦИ. Документальная фиксация результатов измерений может быть осуществлена в технологическом паспорте изделия. Также измерение координат цветности ЖК-панелей можно осуществлять непосредственно на образце МФЦИ на этапе настройки изделия и занесения в него данных программирования (тестового и функционального программного обеспечения). Колориметрические измерения в составе образца предпочтительнее, так как встроенными в изделие аппаратными средствами обеспечивается заданный температурный и электрический режим работы ЖК-панели, приближенный к реальным условиям будущей эксплуатации.

4. По измеренным значениям (x_R, y_R) , (x_G, y_G) , (x_B, y_B) , (x_W, y_W) в соответствии с уравнениями (5) вычисляются коэффициенты $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ профиля ЖК-панели, которые являются уникальными для данного экземпляра ЖК-панели данного производителя. Очевидно, что из-за технологического разброса координат цветности коэффициенты профиля эталонной ЖК-панели и конкретного образца ЖК-панели одного и того же производителя в общем случае могут не совпасть.
5. Коэффициенты $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$ вводятся в данные программирования [14, 15], заносимые в память графического контроллера МФЦИ, одновременно с функциональным программным обеспечением. Учет влияния технологического разброса координат цветности обеспечивается преобразованием (1), реализуемым программно при выводе изображения. В качестве коэффициентов $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ профиля эталонной ЖК-панели в (2) подставляются оценки $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$, полученные по результатам расчета (5). В качестве параметров $X_{r_2}, X_{g_2}, X_{b_2}, Y_{r_2}, Y_{g_2}, Y_{b_2}, Z_{r_2}, Z_{g_2}, Z_{b_2}$ профиля используемой в конкретном образце МФЦИ ЖК-панели в (2) подставляются коэффициенты $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$, полученные по результатам измерений (x_R, y_R) , (x_G, y_G) , (x_B, y_B) , (x_W, y_W) .

Критерий эффективности метода программной компенсации и результаты моделирования

Эффективность метода программной компенсации технологического разброса координат цветности ЖК-панелей может быть оценена по критерию отношения площадей $S_{исх}(\Delta, P_D, x, y) / S_{комп}(\Delta, P_D, x, y, h)$ сечений гистограмм распределения $p(x, y)$ на уровне доверительной вероятности P_D до компенсации, $S_{исх}(\Delta, P_D, x, y)$, и после нее, $S_{комп}(\Delta, P_D, x, y, h)$. Соответствующие примеры эффективности предлагаемого метода на XY-плоскости приведены на рис. 2. Сечения получены методом математического моделирования в среде MathCad 15.0.

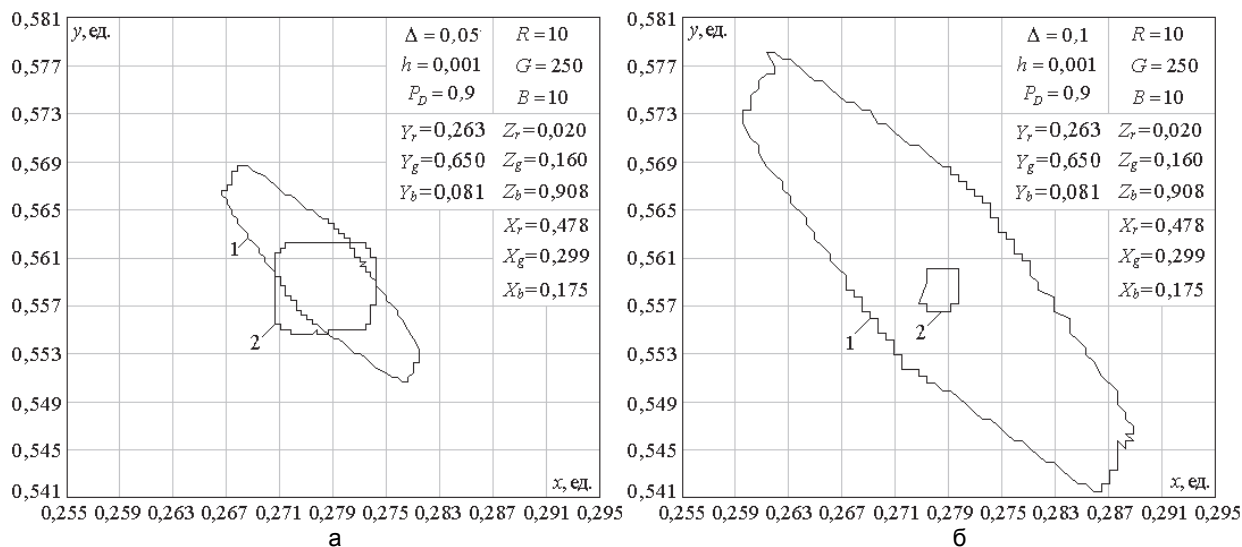


Рис. 2. Сечения гистограмм распределения координат цветности: $\Delta=0,05$ (а); $\Delta=0,1$ (б).
 1 – без использования метода компенсации; 2 – после использования метода компенсации на основе измерений (x, y) для цвета $RGB=(10, 255, 10)$

Анализ рис. 2 показывает, что метод программной компенсации позволяет получать взаимное расположение фигур, образованных сечениями гистограммы распределения (x, y) -координат цветности, как с существенным уменьшением площадей фигур, так и с изменением геометрии фигуры сечения (рис. 2, б) до круглой (квадратной) формы. В ряде случаев (рис. 2, а) после выполнения процедуры компенсации в гистограмме распределения координат цветности появляются дополнительные относительные частоты, которых в исходной гистограмме не было.

В результате моделирования получены также семейства зависимостей критерия эффективности программной компенсации технологического разброса координат цветности от разрешающей способно-

сти h колориметра, используемого для измерения координат основных цветов и белого цвета при $\Delta=0,1$ (рис. 3, а); и при $\Delta=0,05$ (рис. 3, б).

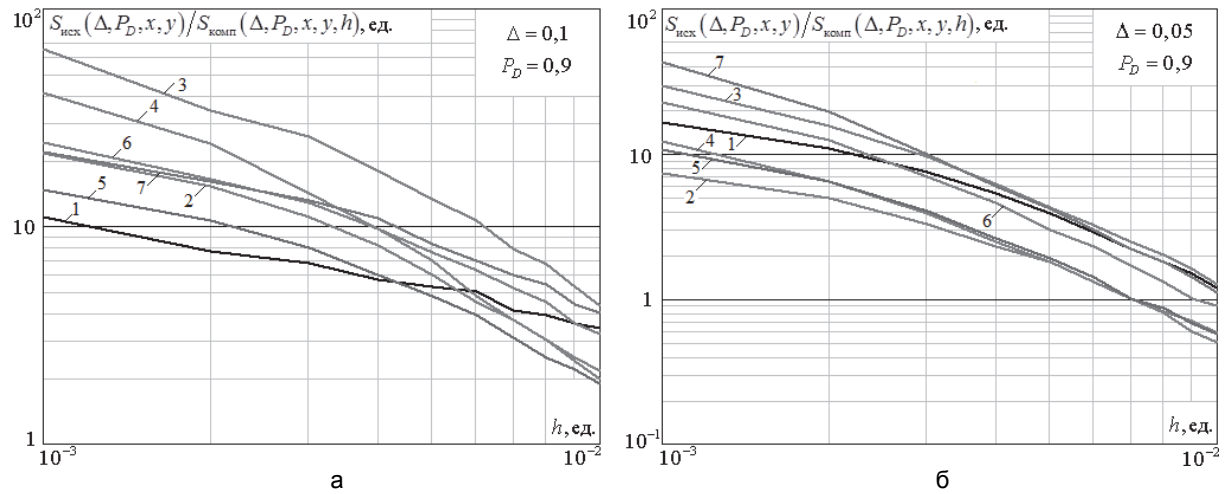


Рис. 3. Оценка эффективности критерия программной компенсации технологического разброса (x,y) -координат цветности: $\Delta=0,1$ (а); $\Delta=0,05$ для метода, основанного на измерении координат (x,y) (б).

- 1 – белый $RGB=(250,250,250)$; 2 – красный $RGB=(250,10,10)$; 3 – зеленый $RGB=(10,250,10)$;
- 4 – синий $RGB=(10,10,250)$; 5 – желтый $RGB=(250,250,10)$; 6 – пурпурный $RGB=(250,10,250)$;
- 7 – голубой $RGB=(10,250,250)$

Для снижения влияния погрешности h измерений координат цветности колориметром на оценочные значения коэффициентов профиля ЖК-панели измерения координат цветности каждого образца ЖК-панели могут быть выполнены многократно для разных цветов с последующим усреднением результатов расчетов $\hat{X}_r, \hat{Y}_r, \hat{X}_g, \hat{Y}_g, \hat{X}_b, \hat{Y}_b, \hat{Z}_r, \hat{Z}_g, \hat{Z}_b$. Усреднение позволяет получать статистически достоверный результат оценки коэффициентов.

Предлагаемая методика позволяет осуществлять расчет коэффициентов профиля ЖК-панели на основе цветов, заданных произвольным образом кодами RGB .

Уравнения расчета коэффициентов для четырех произвольно задаваемых цветов $(R_1, G_1, B_1), (R_2, G_2, B_2), (R_3, G_3, B_3), (R_4, G_4, B_4)$, последовательно индицируемых на экране ЖК-панели, и соответствующих этим цветам результатов измерений координат цветности $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \hat{X}_r \\ \hat{X}_g \\ \hat{X}_b \\ \hat{Y}_g \\ \hat{Y}_b \\ \hat{Z}_r \\ \hat{Z}_g \\ \hat{Z}_b \end{cases} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} & d_{17} & d_{18} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} & d_{27} & d_{28} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} & d_{37} & d_{38} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & d_{45} & d_{46} & d_{47} & d_{48} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} & d_{56} & d_{57} & d_{58} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} & d_{64} & d_{65} & d_{66} & d_{67} & d_{68} \\ d_{71} & d_{72} & d_{73} & d_{74} & d_{75} & d_{76} & d_{77} & d_{78} \\ d_{81} & d_{82} & d_{83} & d_{84} & d_{85} & d_{86} & d_{87} & d_{88} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 R_1 \\ R_1(1-y_1) \\ x_2 R_2 \\ R_2(1-y_2) \\ x_3 R_3 \\ R_3(1-y_3) \\ x_4 R_4 \\ R_4(1-y_4) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\hat{Y}_r = 1 - \hat{Y}_g - \hat{Y}_b$$

где

$$\begin{aligned} d_{11} &= R_1(1-x_1), \quad d_{12} = G_1(1-x_1), \quad d_{13} = B_1(1-x_1), \quad d_{14} = x_1(R_1 - G_1), \quad d_{15} = x_1(R_1 - B_1), \quad d_{16} = -x_1 R_1, \\ d_{17} &= -x_1 G_1, \quad d_{18} = -x_1 B_1, \quad d_{21} = R_1 y_1, \quad d_{22} = G_1 y_1, \quad d_{23} = B_1 y_1, \quad d_{24} = (R_1 - G_1)(1-y_1), \\ d_{25} &= (R_1 - B_1)(1-y_1), \quad d_{26} = R_1 y_1, \quad d_{27} = G_1 y_1, \quad d_{28} = B_1 y_1, \quad d_{31} = R_2(1-x_2), \quad d_{32} = G_2(1-x_2), \\ d_{33} &= B_2(1-x_2), \quad d_{34} = x_2(R_2 - G_2), \quad d_{35} = x_2(R_2 - B_2), \quad d_{36} = -x_2 R_2, \quad d_{37} = -x_2 G_2, \quad d_{38} = -x_2 B_2, \\ d_{41} &= R_2 y_2, \quad d_{42} = G_2 y_2, \quad d_{43} = B_2 y_2, \quad d_{44} = (R_2 - G_2)(1-y_2), \quad d_{45} = (R_2 - B_2)(1-y_2), \quad d_{46} = R_2 y_2, \\ d_{47} &= G_2 y_2, \quad d_{48} = B_2 y_2, \quad d_{51} = R_3(1-x_3), \quad d_{52} = G_3(1-x_3), \quad d_{53} = B_3(1-x_3), \quad d_{54} = x_3(R_3 - G_3), \end{aligned}$$

$$d_{55} = x_3(R_3 - B_3), d_{56} = -x_3R_3, d_{57} = -x_3G_3, d_{58} = -x_3B_3, d_{61} = R_3y_3, d_{62} = G_3y_3, d_{63} = B_3y_3, \\ d_{64} = (R_3 - G_3)(1 - y_3), d_{65} = (R_3 - B_3)(1 - y_3), d_{66} = R_3y_3, d_{67} = G_3y_3, d_{68} = B_3y_3, d_{71} = R_4(1 - x_4), \\ d_{72} = G_4(1 - x_4), d_{73} = B_4(1 - x_4), d_{74} = x_4(R_4 - G_4), d_{75} = x_4(R_4 - B_4), d_{76} = -x_4R_4, d_{77} = -x_4G_4, \\ d_{78} = -x_4B_4, d_{81} = R_4y_4, d_{82} = G_4y_4, d_{83} = B_4y_4, d_{84} = (R_4 - G_4)(1 - y_4), d_{85} = (R_4 - B_4)(1 - y_4), \\ d_{86} = R_4y_4, d_{87} = G_4y_4, d_{88} = B_4y_4.$$

Система (6) получена путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \hat{X}_r R_1 + \hat{X}_g G_1 + \hat{X}_b B_1 = x_1 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_1 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_1 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_1 \right) \\ \hat{Y}_r R_1 + \hat{Y}_g G_1 + \hat{Y}_b B_1 = y_1 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_1 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_1 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_1 \right) \\ \hat{X}_r R_2 + \hat{X}_g G_2 + \hat{X}_b B_2 = x_2 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_2 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_2 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_2 \right) \\ \hat{Y}_r R_2 + \hat{Y}_g G_2 + \hat{Y}_b B_2 = y_2 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_2 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_2 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_2 \right) \\ \hat{X}_r R_3 + \hat{X}_g G_3 + \hat{X}_b B_3 = x_3 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_3 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_3 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_3 \right) \\ \hat{Y}_r R_3 + \hat{Y}_g G_3 + \hat{Y}_b B_3 = y_3 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_3 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_3 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_3 \right) \\ \hat{X}_r R_4 + \hat{X}_g G_4 + \hat{X}_b B_4 = x_4 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_4 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_4 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_4 \right) \\ \hat{Y}_r R_4 + \hat{Y}_g G_4 + \hat{Y}_b B_4 = y_4 \left((\hat{X}_r + \hat{Y}_r + \hat{Z}_r) R_4 + (\hat{X}_g + \hat{Y}_g + \hat{Z}_g) G_4 + (\hat{X}_b + \hat{Y}_b + \hat{Z}_b) B_4 \right) \\ \hat{Y}_r = 1 - \hat{Y}_g - \hat{Y}_b \end{cases}$$

Для колориметров, осуществляющих измерение координат цвета XYZ, формулы расчета коэффициентов профиля ЖК-панели имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_r \\ \hat{X}_g \\ \hat{X}_b \\ \hat{Y}_r \\ \hat{Y}_g \\ \hat{Y}_b \\ \hat{Z}_r \\ \hat{Z}_g \\ \hat{Z}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_1 & G_1 & B_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & G_2 & B_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & G_2 & B_2 \\ R_3 & G_3 & B_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 & G_3 & B_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & G_3 & B_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $R_1G_1B_1, R_2G_2B_2, R_3G_3B_3$ – коды трех произвольно заданных цветов, индицируемых на экране ЖК-панели; $X_1Y_1Z_1, X_2Y_2Z_2, X_3Y_3Z_3$ – измеренные колориметром значения координат цвета, соответствующие $R_1G_1B_1, R_2G_2B_2, R_3G_3B_3$.

Матричное уравнение (7) формируется путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \hat{X}_r R_1 + \hat{X}_g G_1 + \hat{X}_b B_1 = X_1 \\ \hat{Y}_r R_1 + \hat{Y}_g G_1 + \hat{Y}_b B_1 = Y_1 \\ \hat{Z}_r R_1 + \hat{Z}_g G_1 + \hat{Z}_b B_1 = Z_1 \\ \hat{X}_r R_2 + \hat{X}_g G_2 + \hat{X}_b B_2 = X_2 \\ \hat{Y}_r R_2 + \hat{Y}_g G_2 + \hat{Y}_b B_2 = Y_2 \\ \hat{Z}_r R_2 + \hat{Z}_g G_2 + \hat{Z}_b B_2 = Z_2 \\ \hat{X}_r R_3 + \hat{X}_g G_3 + \hat{X}_b B_3 = X_3 \\ \hat{Y}_r R_3 + \hat{Y}_g G_3 + \hat{Y}_b B_3 = Y_3 \\ \hat{Z}_r R_3 + \hat{Z}_g G_3 + \hat{Z}_b B_3 = Z_3 \end{cases}$$

Примеры сечений гистограмм распределения (x,y) -координат цветности без использования метода программной компенсации и после использования метода компенсации на основе измеренных колориметром координат цвета XYZ приведены на рис. 4. Аналогичные рис. 3 оценки эффективности предложенного метода на основе измерения XYZ -координат приведены на рис. 5.

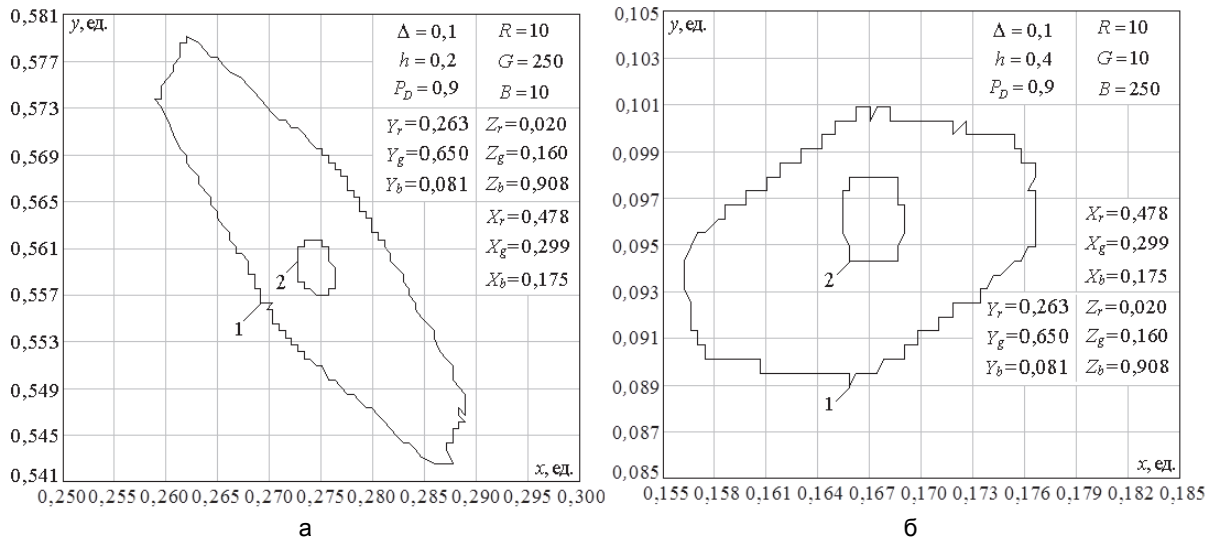


Рис. 4. Сечения гистограмм распределения координат цветности: $RGB=(10,250,10)$ (а); $RGB=(10,10,250)$ (б). 1 – без использования метода компенсации, 2 – после использования метода компенсации на основе измерений координат XYZ

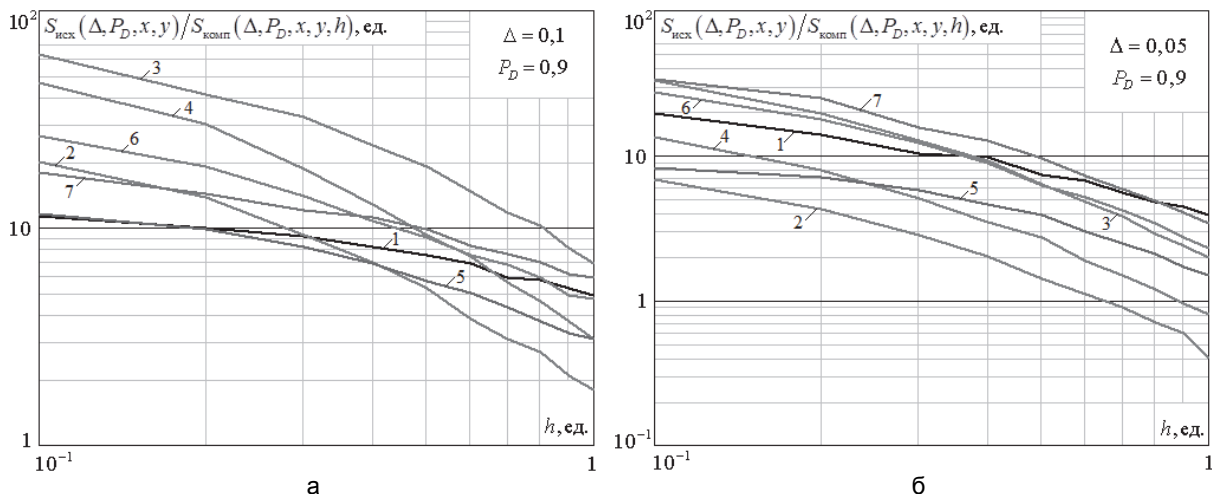


Рис. 5. Оценка эффективности критерия программной компенсации технологического разброса (x,y) -координат цветности: $\Delta=0,1$ (а); $\Delta=0,05$ для метода, основанного на измерении координат XYZ (б). 1 – белый $RGB=(250,250,250)$; 2 – красный $RGB=(250,10,10)$; 3 – зеленый $RGB=(10,250,10)$; 4 – синий $RGB=(10,10,250)$; 5 – желтый $RGB=(250,250,10)$; 6 – пурпурный $RGB=(250,10,250)$; 7 – голубой $RGB=(10,250,250)$

Заключение

Разброс значений компонентов кода RGB при нулевых (пренебрежимо малых) значениях случайных погрешностей измерений координат (x_R, y_R) , (x_G, y_G) , (x_B, y_B) , (x_W, y_W) определяется абсолютной погрешностью измерения h координат цветности колориметра. Наличие случайной составляющей погрешностей измерений снижает эффективность предлагаемого метода за счет формирования более грубой оценки значений (x_R, y_R) , (x_G, y_G) , (x_B, y_B) , (x_W, y_W) .

Совершенствование колориметрических измерителей и методики измерений позволит повысить точность оценки координат цветности вершин треугольника цветового охвата, по которым рассчитываются (6), (7) коэффициенты профиля каждой конкретной ЖК-панели.

Представленные в работе результаты получены для модели цветовоспроизведения жидкокристаллической панели с восьмиразрядным представлением кода каждого из основных цветов (красный, зеле-

ный, синий). Аprobация результатов проводилась на ЖК-панели с разрешением 1024×768 пикселей и с размерами жидкокристаллического экрана по горизонтали и по вертикали 8 и 6 дюймов соответственно [16–18]. Эффективность метода программной компенсации подтверждена на цветовой палитре с ограниченным набором отображаемых цветов, что особенно актуально в бортовых системах индикации.

References

1. Zharinov I.O., Zharinov O.O. *Bortovye Sredstva Otobrazheniya Informatsii na Ploskikh Zhidkokristallicheskikh Panelyakh* [On-Board means of information display on flat liquid-crystal panels]. St. Petersburg, SPbSUAI Publ., 2005, 144 p.
2. Ishihara K., Kadota Sh. *Optical Scanning Apparatus and Scanning Image Display Apparatus*. Patent US, no. 7492495, 2009.
3. Barber S., Dunbar L.L., Hardin D., Seah K. *Aeronautical Chart Display Apparatus and Method*. Patent US, no. 7417641, 2008.
4. Lee B.-S., Bala R., Sharma G. Scanner characterization for color measurement and diagnostics. *Journal of Electronic Imaging*, 2007, vol. 16, no. 4, art. 043009.
5. Barnard K., Funt B. Camera characterization for color research. *Color Research and Application*, 2002, vol. 27, no. 3, pp. 152–163. doi: 10.1002/col.10050
6. Yamashita J., Uchino K. *Display Apparatus and Display Apparatus Driving Method*. Patent US, no. 8872740, 2014.
7. Yoshida Y., Kimura H. *Liquid Crystal Display Device and Driving Method Thereof*. Patent US, no. 20080180385, 2008.
8. Kamoto S., Ishikawa M., Umeji T., Konno K., Nitta K., Okazaki H. *Image Display Device and Light Emission Device*. Patent US, no. 7982384, 2011.
9. Zharinov I.O., Zharinov O.O. Issledovanie raspredeleniya otsenki razreshayushchei sposobnosti preobrazovaniya Grassmana v sistemakh kodirovaniya tsveta, primenyaemykh v avionike [Research of properties of an assessment of the resolution of Grassmann's transformation in chromaticity coding systems, applied in avionic equipment]. *Programmnyaya Inzheneriya*, 2014, no. 8, pp. 40–47.
10. Kostishin M.O., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Issledovanie vizual'nykh kharakteristik sredstv otobrazheniya pilotazhno-navigatsionnykh parametrov i geoinformatsionnykh dannykh v avionike [Visual characteristics of displaying air navigation parameters and geoinformation data in avionics]. *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2014, no. 4, pp. 61–67.
11. Zargaryants G.S., Mikhailov O.M. Integral remote colorimeter bases on the RGB colorimetric system. *Light & Engineering*, 2008, vol. 16, no. 3, pp. 69–77.
12. Zharinov I.O., Zharinov O.O. Otsenka instrumental'noi pogreshnosti kosvennogo izmereniya koordinat tsveta v tsvetovoi modeli dannykh, primenyaemoi v avionike [The evaluation of hardware-caused inaccuracy of indirect measurements of chromaticity coordinates in color model data used in avionics]. *Programmnyaya Inzheneriya*, 2014, no. 12, pp. 39–46.
13. Zharinov I.O., Zharinov O.O. Issledovanie svoystva ravnokontrastnosti tsvetovykh prostranstv, primenyaemykh v avionike [The research of uniformchromaticity property of color spaces, used in avionics equipment]. *Programmnyaya Inzheneriya*, 2014, no. 11, pp. 35–43.
14. Kostishin M.O., Shukalov A.V., Paramonov P.P., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Algoritmy avtomatizatsii konfigurirovaniya zagruzochnykh komponentov aeronavigatsionnoi informatsii i geoinformatsionnykh dannykh avioniki [Algorithms automation configuration bootable components aeronautical information and geoinformation data avionics]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 9, pp. 64–72.
15. Zharinov I.O., Zharinov O.O., Paramonov P.P., Kostishin M.O., Sudarchikov S.A. Printsipy postroeniya avtomaticheskikh sistem v kanale upravleniya teplovymi i svetotekhnicheskimi kharakteristikami bortovykh sredstv indikatsii [Principles of automatic system design for control over thermal and lighting characteristics of airborne indication means]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 12, pp. 34–38.
16. Paramonov P.P., Kononov P.V., Zharinov I.O., Kirsanova Yu.A., Utkin S.B. Realizatsiya struktury dannykh, ispol'zuemykh pri formirovanii indikatsionnogo kadra v bortovykh sistemakh kartograficheskoi informatsii [Implementation of data structure in indication frame formation for onboard geospatial data computer systems]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 2 (84), pp. 165–167.
17. Paramonov P.P., Kostishin M.O., Zharinov I.O., Nechaev V.A., Sudarchikov S.A. Printsip formirovaniya i otobrazheniya massiva geoinformatsionnykh dannykh na ekran sredstv bortovoi indikatsii [Formation and display principles for an array of geoinformation data by means of onboard display screen]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6 (88), pp. 136–142.
18. Kostishin M.O., Zharinov I.O., Zharinov O.O., Nechaev V.A., Suslov V.D. Otsenka tochnosti vizualizatsii mestopolozheniya ob'ekta v geoinformatsionnykh sistemakh i sistemakh indikatsii navigatsionnykh kompleksov pilotiruemykh letatel'nykh apparatov [Accuracy evaluation of the object location visualization for geo-information

and display systems of manned aircrafts navigation complexes]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1 (89), pp. 87–93.

Жаринов Игорь Олегович

– доктор технических наук, доцент, руководитель учебно-научного центра, ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» имени П.А. Ефимова», Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, Igor_rabota@pisem.net

Жаринов Олег Олегович

– кандидат технических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, zharinov73@hotmail.ru

Igor O. Zharinov

– D.Sc., Associate professor, Chief of Learning Scientific Center, SPb Scientific Design Bureau «Electroavtomatika» n.a. P. A. Efimov, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, Igor_rabota@pisem.net

Oleg O. Zharinov

– PhD, Associate professor, Associate professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, zharinov73@hotmail.ru