

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.932.4

СЫЧЁВ
Андрей Валерьевич

**ТОНАЛЬНАЯ КОМПРЕССИЯ И ЦВЕТОВАЯ КОРРЕКЦИЯ
В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ
ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Минск 2016

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научные руководители:

Смирнов Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Устройства обработки и отображения информации» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Бланкенбах Карл Хайнц, профессор, заведующий лабораторией «ДисплейЛаб» учреждения образования «Высшая Школа (Университет)» (г. Пфорцхайм, Германия)

Официальные оппоненты:

Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории обработки и распознавания изображений государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики» НАН Беларуси

Хижняк Александр Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры автоматических систем управления войсками учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»

Защита состоится 12 мая 2016 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 11 » апреля 2016 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент



М. П. Ревотюк

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие на рынке дисплейных устройств существенно возросла доля жидкокристаллических дисплеев (ЖК-дисплеев) для портативных устройств электронной техники, которая, по прогнозам специалистов, будет только увеличиваться.

Рост производства ЖК-дисплеев обусловлен высоким уровнем развития современных технологий, которые позволяют производить дисплеи высокого и сверхвысокого разрешений с различными массогабаритными характеристиками, причем затраты на производство таких дисплеев постоянно снижаются.

Расширение функциональных возможностей, а также снижение стоимости ЖК-дисплеев открывают новые сферы для их применения, начиная от домашней техники и оканчивая автомобильной промышленностью, авионикой и космонавтикой. В автомобильной промышленности и авиационной технике низкоинформативные приборы аналогового типа, которые воспроизводили ограниченное количество информации (например, пробег, расход топлива и др. характеристики автомобиля), были заменены на цифроаналоговые и цифровые с графическим интерфейсом пользователя GUI (*англ.* Graphical User Interface) и улучшенным разрешением дисплея. Однако при этом производители автомобильной и авиационной техники столкнулись с проблемой засветки ЖК-дисплея внешними источниками света, существенно снижающей качество и удобочитаемость отображаемой информации, что может привести к катастрофическим последствиям, особенно в авиации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнялась в рамках международных научных проектов и зарубежных контрактов:

– Международный проект “Reinforcing research cooperation between the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics and the European Research Area” в рамках 7-й Рамочной программы Европейского Союза «BELERA» (№ 295043, 2012 – 2013 гг.).

– Совместный научно-исследовательский проект «Тональная компрессия и цветовая коррекция в жидкокристаллических дисплеях отображения информации», выполненный лабораторией «ДисплейЛаб» учреждения образования «Высшая Школа (Университет)» (г. Пфорцхайм, Германия) и компанией “BMW” (г. Мюнхен, Германия) (2011 – 2014 гг.).

– Зарубежный контракт «Исследовать возможности применения устройств отображения информации на основе органических светоизлучающих диодов в авионике и автомобильной технике» (2014 – 2017 гг.).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка алгоритма тональной и цветовой коррекции изображения, воспроизводимого ЖК-дисплеем, посредством адаптации яркости изображения под интенсивность внешней засветки, которая изменяет оптические характеристики ЖК-дисплея, сужая его динамический диапазон.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать зависимости значений яркости и координат цветности изображения от коэффициента отражения, минимальных и максимальных значений яркости ЖК-дисплея в условиях интенсивной внешней засветки, характеризующих качество восприятия отображаемой информации.

2. Разработать методы тональной компрессии, обеспечивающие увеличение яркости (тональную коррекцию) отображаемой информации в условиях изменения интенсивности внешней засветки поверхности ЖК-дисплея с учетом его параметров.

3. Разработать метод цветовой коррекции, обеспечивающий сохранение первоначальных координат цветности изображения в условиях изменения интенсивности внешней засветки поверхности ЖК-дисплея с учетом его параметров.

4. Разработать алгоритм тональной и цветовой коррекции изображения, обеспечивающий увеличение его яркости и исключающий изменение первоначальных координат цветности, с целью улучшения восприятия изображения в условиях интенсивной внешней засветки поверхности ЖК-дисплея.

5. Разработать измерительный программно-аппаратный комплекс для симуляции внешних источников освещения в салоне автомобиля и кабине самолета, позволяющий установить и исследовать зависимости изменения яркости изображения и цветового охвата ЖК-дисплея в условиях внешней засветки, а также верифицировать работу алгоритма тональной и цветовой коррекции.

Научная новизна

Установлена закономерность изменения относительной яркости изображения в зависимости от порядка градаций серого ЖК-дисплея в условиях внешней засветки различной интенсивности.

Установлена закономерность изменения цветового охвата ЖК-дисплея в зависимости от интенсивности внешней засветки его поверхности.

Впервые разработаны и исследованы метод тональной компрессии яркости пикселей ЖК-дисплея на основе формулы цветового отличия; метод тональной компрессии на основе закона Вебера; метод устранения искажений яркости пикселей светлых участков изображения путем сглаживания функции тональной компрессии; метод цветовой коррекции изображений с учетом яркости и трехцветности ЖК-матрицы дисплея, обеспечивающий уменьшение отклонения координат цвета.

Положения, выносимые на защиту

1. Методы тональной компрессии яркости элементов отображения ЖК-дисплея, основанные на формуле цветового отличия и законе Вебера, обеспечивающие увеличение их яркости не менее чем в 2 раза до 50-й градации серого включительно при увеличении интенсивности внешней засветки до $5 \cdot 10^3$ лк.

2. Метод цветовой коррекции изображений, основанный на учете яркости и трехцветности ЖК-матрицы дисплея, обеспечивающий уменьшение эвклидова расстояния координат цветности до 50 % до 50-й градации серого включительно, что приводит к устранению искажения цвета при увеличении интенсивности внешней засветки до $5 \cdot 10^3$ лк за счет их коррекции после преобразования методами тональной компрессии на основе формулы цветового отличия и закона Вебера соответственно.

3. Алгоритм тональной и цветовой коррекции изображений, основанный на преобразовании яркости пикселя с учетом яркости и трехцветности ЖК-матрицы дисплея, что позволяет увеличить яркость пикселя на 70 % до 50-й градации серого включительно и минимизировать изменение координат цветности при увеличении интенсивности внешней засветки до $5 \cdot 10^3$ лк.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад автора, который заключается в научном обосновании методов тональной компрессии и цветовой коррекции изображения в зависимости от параметров ЖК-дисплея и интенсивности внешней засветки; разработке методик и проведении экспериментов по исследованию характеристик дисплея в условиях внешней

засветки; оценке эффективности разработанных методов и средств, устраняющих влияние внешних источников света на поверхность дисплея, обработке и анализе полученных результатов, формулировке и обосновании выводов.

Определение цели и задач исследования, интерпретация и обобщение полученных результатов, подготовка научных публикаций по теме диссертационной работы проводились совместно с научными руководителями профессором К. Бланкенбахом и профессором А. Г. Смирновым.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: 19th International Display Workshops “IDW’12”, г. Киото, Япония, 2012; 20th International Display Workshops “IDW’13”, г. Саппоро, Япония, 2013; SID: International Symposium 2013, г. Ванкувер, Канада, 2013; SID: Mid-Europe Chapter Spring Meeting 2014, г. Стамбул, Турция, 2014; SID: International Symposium 2014, г. Сан-Диего, США, 2014; SID: Mid-Europe Chapter Fall Meeting, г. Штутгарт, Германия, 2014; Electronic Displays Conference 2014, г. Нюрнберг, Германия, 2014; SID: International Symposium 2015, г. Сан-Хосе, США, 2015; SID: International Symposium “EURODISPLAY 2015”, г. Гент, Бельгия, 2015.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 15 научных работах, из них 5 статей в рецензируемых научных журналах, 6 статей в сборниках материалов научных конференций, 4 тезиса докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3,6 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и четырех приложений. Общий объем диссертации составляет 121 страницу, из них 59 страниц основного текста, 68 рисунков на 64 страницах, 21 таблица на 13 страницах, библиографический список из 119 наименований на 9 страницах, включая список собственных публикаций автора из 15 наименований на 2 страницах, 4 приложения на 11 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** и в **общей характеристике работы** изложено обоснование актуальности темы диссертации; определены цель и задачи исследования; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; обоснована научная новизна; приведены сведения об апробации и опубликовании основных результатов исследования в отечественных и зарубежных источниках.

В **первой главе** представлены результаты анализа существующих алгоритмов обработки изображений, включающих методы тональной компрессии. Обоснована перспективность их использования для преобразования изображений в условиях интенсивной внешней засветки ЖК-дисплея [1, 3, 4, 5, 7]. Проанализированы типы поверхности дисплеев (матовая, глянцевая), выявлены закономерности их отражательных свойств применительно к конкретной области использования [6, 10, 11, 12, 13, 14].

Во **второй главе** описаны разработанные методы тональной компрессии.

Первый метод тональной компрессии, основанный на принципе цветового различия, описывается некоторым числом, выражающим разницу между двумя оттенками цвета в колориметрии [2]:

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}, \quad (1)$$

где ΔE_{uv}^* – цветовое различие по CIE LUV;

ΔL^* – разница между светимостью двух соседних тонов градации серого;

Δu^* , Δv^* – цветовые координаты (при увеличении яркости не учитываются).

Идея метода тональной компрессии на основе цветового различия заключается в корректировке светимости градаций серого, которая включает параметр яркости, в сторону ее увеличения до тех пор, пока не будет достигнуто максимально допустимое соотношение двух соседних ступеней ΔE , равное 1 [1, 2, 9]. В этом случае глаз человека еще не способен отличить преобразованные оттенки цвета от первоначальных.

Второй метод тональной компрессии основан на законе Вебера, а именно, на приведении отношения $\Delta L/L$ (где ΔL и L вычислены с учетом яркости внешнего освещения) к отношению $\Delta L_d/L_d$, которое вычислено для определенного ЖК-дисплея при нулевой засветке [2, 5, 8, 9].

Вычисление отношения $\Delta L/L$ производится по следующей формуле:

$$\frac{\Delta L}{L}(GL_n) = \frac{L_{n+1} - L_n}{\left(\frac{L_{n+1} + L_n}{2}\right)} = \frac{\Delta L_d}{L_d}, \quad (2)$$

где L – светимость градации серого при внешней засветке;
 GL – градация серого;
 n – текущая градация серого;
 L_d – светимость градации серого при нулевой засветке.

При выполнении условия (2) визуальное различие градаций серого при внешней засветке такое же, как и при ее отсутствии. Условие (2) является аналогом закона Вебера.

Недостаток использования описанных методов тональной компрессии заключается в «отсечении» светлых ступеней градаций серого – клиппинг-эффекте [1, 2]. Чтобы избежать нежелательного клиппинг-эффекта, был разработан метод оптимизации, который основан на сглаживании функции тональной компрессии после преобразования, а именно, градаций серого GL_n , показательной функцией GL^α :

$$GL_n = GL^\alpha, \quad (3)$$

где α – подгоночный коэффициент.

На рисунке 1 представлено изменение оригинальных (GL_{in}) и преобразованных (GL_{out}) ступеней градаций серого с помощью метода тональной компрессии на основе цветового различия (ΔE), показательная функция GL^α и оптимизированная функция $\Delta E + GL^\alpha$. Преобразования проводились в условиях внешней засветки интенсивностью $E_{amb} = 5 \cdot 10^3$ лк.

Из рисунка 1 видно, что первоначальная кривая соответствует прямо пропорциональной зависимости. На преобразованной методом тональной компрессии кривой наблюдается отсечение – клиппинг. Кривая $\Delta E + GL^\alpha$ описывает изменения GL_{in} и GL_{out} после оптимизации, тем самым исключается эффект клиппинга.

На рисунке 2 представлено сравнение GL_{in} и GL_{out} ступеней градаций серого с помощью метода тональной компрессии на основе закона Вебера (ΔL) как без, так и с оптимизацией GL^α . Преобразования проводились при внешней засветке интенсивностью $5 \cdot 10^3$ лк [2, 5].

Из рисунка 2 видно, «оптимизированная» кривая (GL^α) лучше описывает кривую тональной компрессии (ΔL), что обеспечивает лучший переход из метода тональной компрессии на основе закона Вебера в метод оптимизации (по сравнению с переходом из метода тональной компрессии на основе формулы цветового отличия).

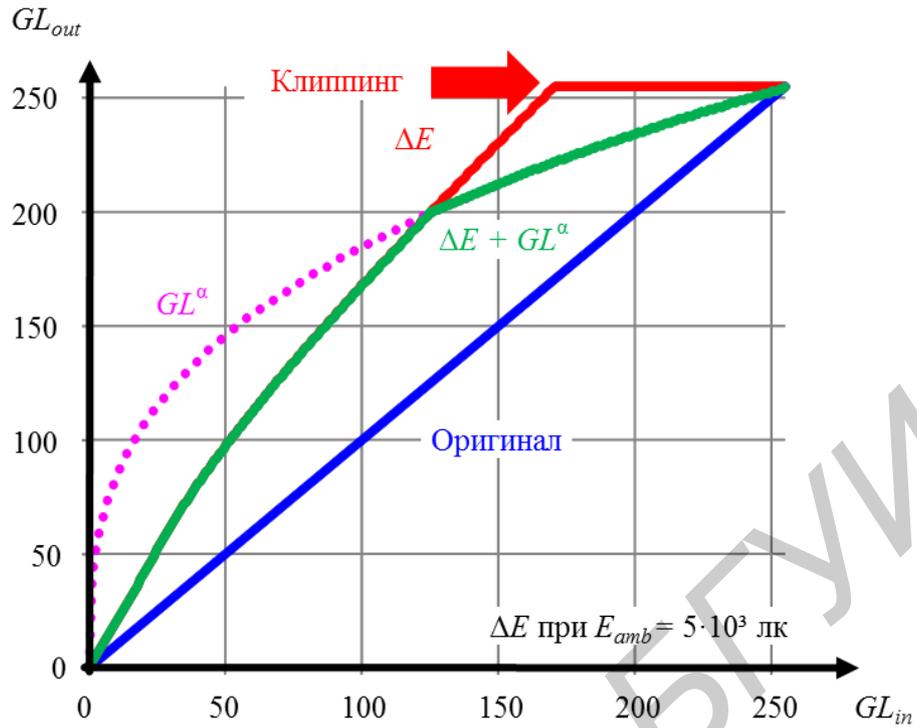


Рисунок 1. – Преобразование исходных ступеней градаций серого (GL_{in}) методом тональной компрессии на основе цветового различия (ΔE) без и с оптимизацией функцией GL^α

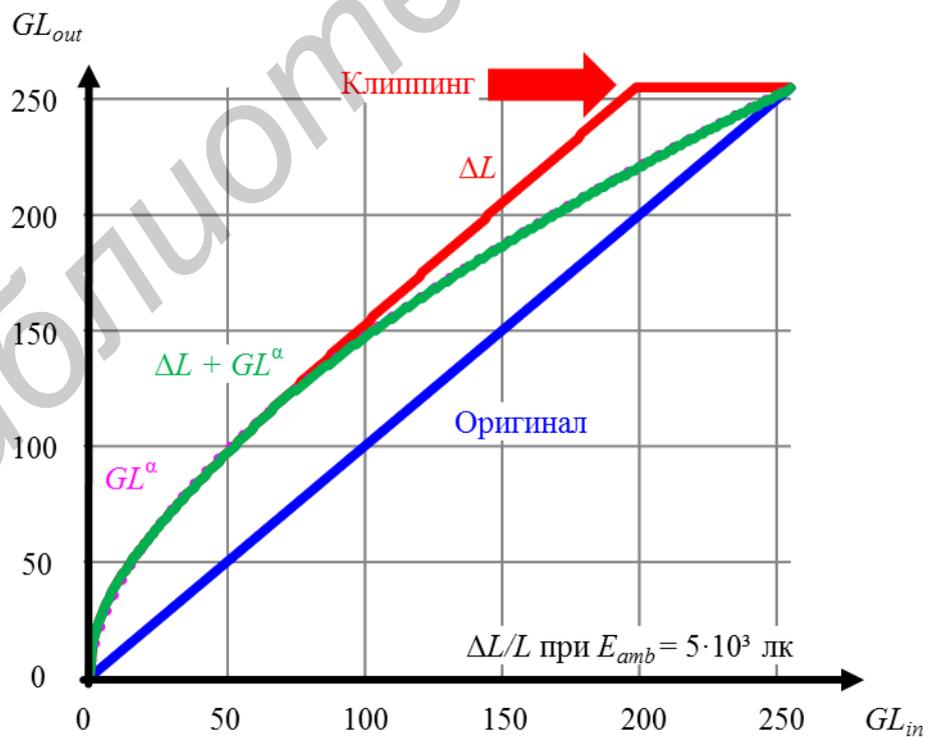


Рисунок 2. – Преобразование исходных ступеней градаций серого (GL_{in}) методом тональной компрессии на основе закона Вебера (ΔL) без и с оптимизацией функцией GL^α

Применение методов тональной компрессии приводит к дрейфу первоначальных координат цветности каждого пикселя изображения вследствие непропорционального увеличения яркости субпикселей. Для возврата первоначальных цветов изображения разработан метод цветовой коррекции, описанный в **третьей главе**.

При использовании разработанного метода цветовой коррекции сохранение цвета осуществляется в цветовом пространстве CIE 1931 (Yxy). Возврат цвета достигается путем изменения значений яркости градаций серого, т. е. адаптацией параметра Y (яркость), входящего в параметры трехцветности ЖК-матрицы дисплея, с сохранением координат цветности x и y . Влияние метода цветовой коррекции на яркость и координаты цветности изображения продемонстрировано на рисунке 3. Преобразования проводились при внешней засветке интенсивностью $5 \cdot 10^3$ лк [1, 3, 9].

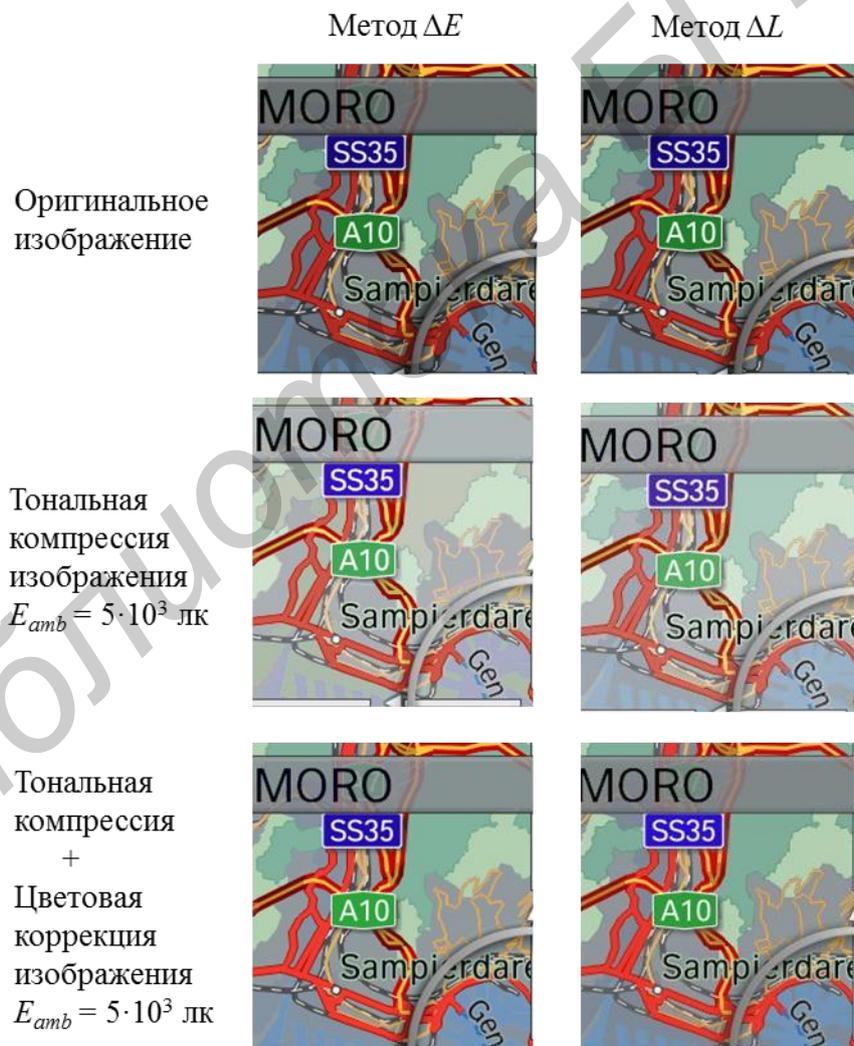


Рисунок 3. – Результат преобразования изображения методами тональной компрессии и цветовой коррекции при интенсивности внешней засветки $5 \cdot 10^3$ лк

После применения тональной компрессии насыщенность цвета снизилась (эффект «вымывания» цвета, см. рисунок 3) [1, 3]. После комбинации методов тональной компрессии и цветовой коррекции насыщенность цвета преобразованного изображения возросла до уровня насыщенности цвета оригинального.

В **четвертой главе** описан разработанный измерительный программно-аппаратный комплекс для симуляции внешних источников освещения в лабораторных условиях и установлены зависимости изменения яркости изображения и цветового охвата ЖК-дисплея при E_{amb} , равном 0, $1 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^3$ лк.

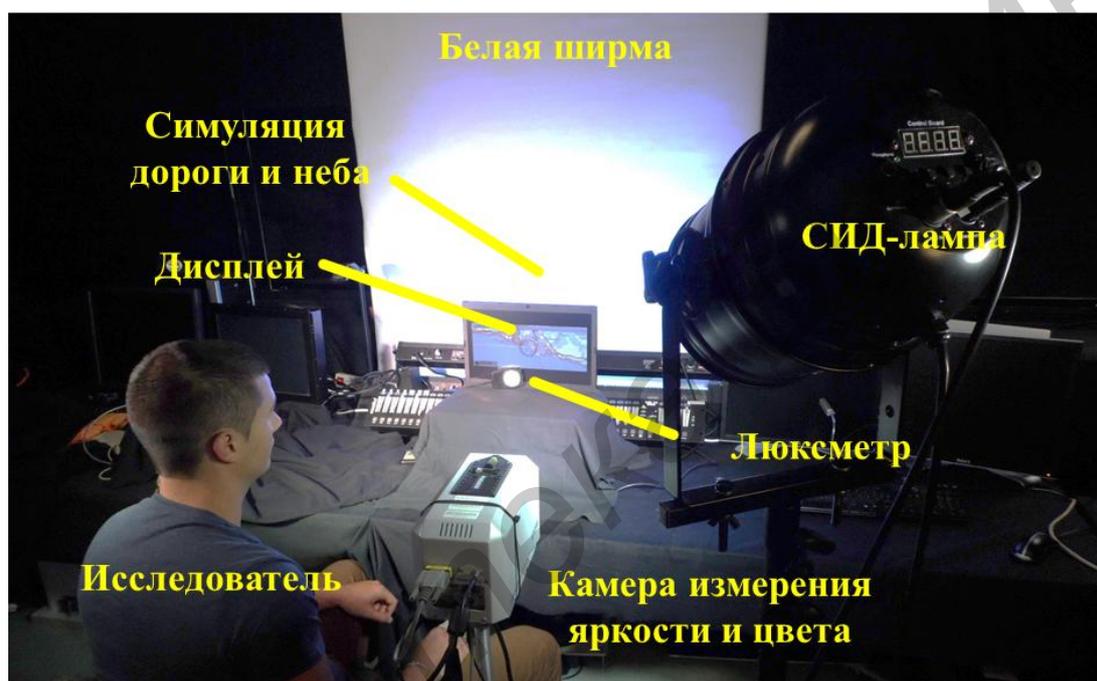


Рисунок 4. – Измерительный программно-аппаратный комплекс для симуляции воздействия внешней засветки на поверхность ЖК-дисплея

Измерительный программно-аппаратный комплекс включает две мощные светодиодные лампы (СИД-лампы), которые симулируют внешние источники света, такие как солнце или дорожное освещение [1, 7, 9, 10, 13,]. Использование дополнительного диффузора, установленного перед СИД-лампами, дает возможность симулировать яркие источники света большой площади или их диффузные отражения от поверхностей объектов, таких как облака и здания [11, 15]. Интенсивность отраженного света измеряется люксметром непосредственно по центру ЖК-дисплея. При помощи белой ширмы возможна симуляция дополнительного ослепления глаз человека, а именно, водителя автомобиля и пилота. На рисунке 4 показан исследователь, который визуально оценивает первоначальное и преобразованное изображения в условиях внешней засветки поверхности ЖК-дисплея.

На рисунке 5 показана закономерность изменения относительной яркости изображения в зависимости от порядка градаций серого ЖК-дисплея при E_{amb} , равном 0 , $1 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^3$ лк [5, 8].

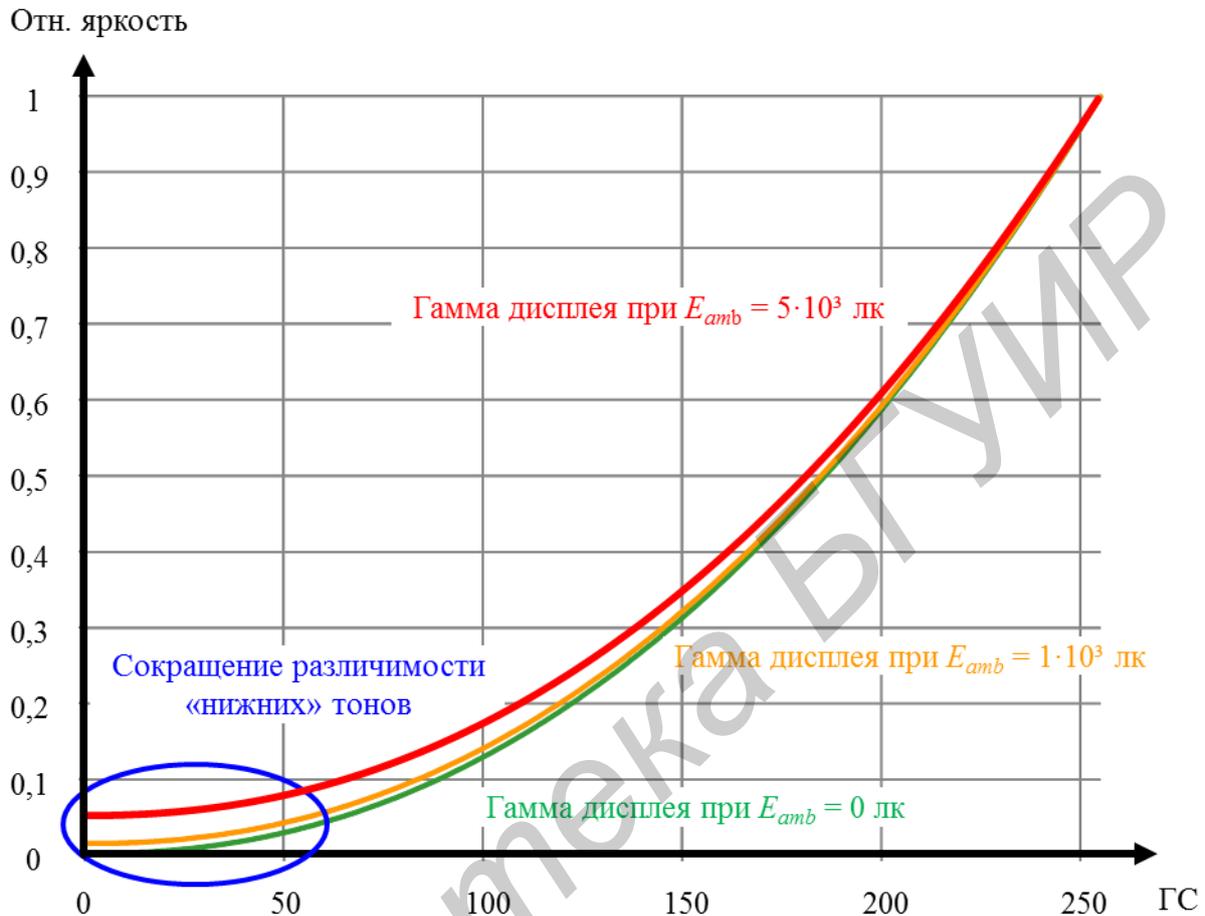


Рисунок 5. – Закономерность изменения относительной яркости изображения на ЖК-дисплее в условиях интенсивной внешней засветки

Из рисунка 5 следует, что относительная яркость «нижних» градаций серого возрастает пропорционально увеличению интенсивности внешней засветки на 4,4 % для 0-й и 4,3 % для 50-й градаций серого.

Увеличение яркости градаций серого приводит к тому, что отношение разности величин относительной яркости двух соседних тонов к максимальной уменьшается. Об этом свидетельствует более пологий характер изменения кривой яркости «нижних» градаций серого (на рисунке 4 данный участок кривой обведен овалом), что является причиной снижения их различимости и, соответственно, сужения диапазона. Неразличимость градаций серого приводит к потере информации и снижению удобочитаемости изображения.

На рисунке 6 показана закономерность изменения цветового охвата ЖК-дисплея в зависимости от интенсивности внешней засветки его поверхности [5, 8, 14].

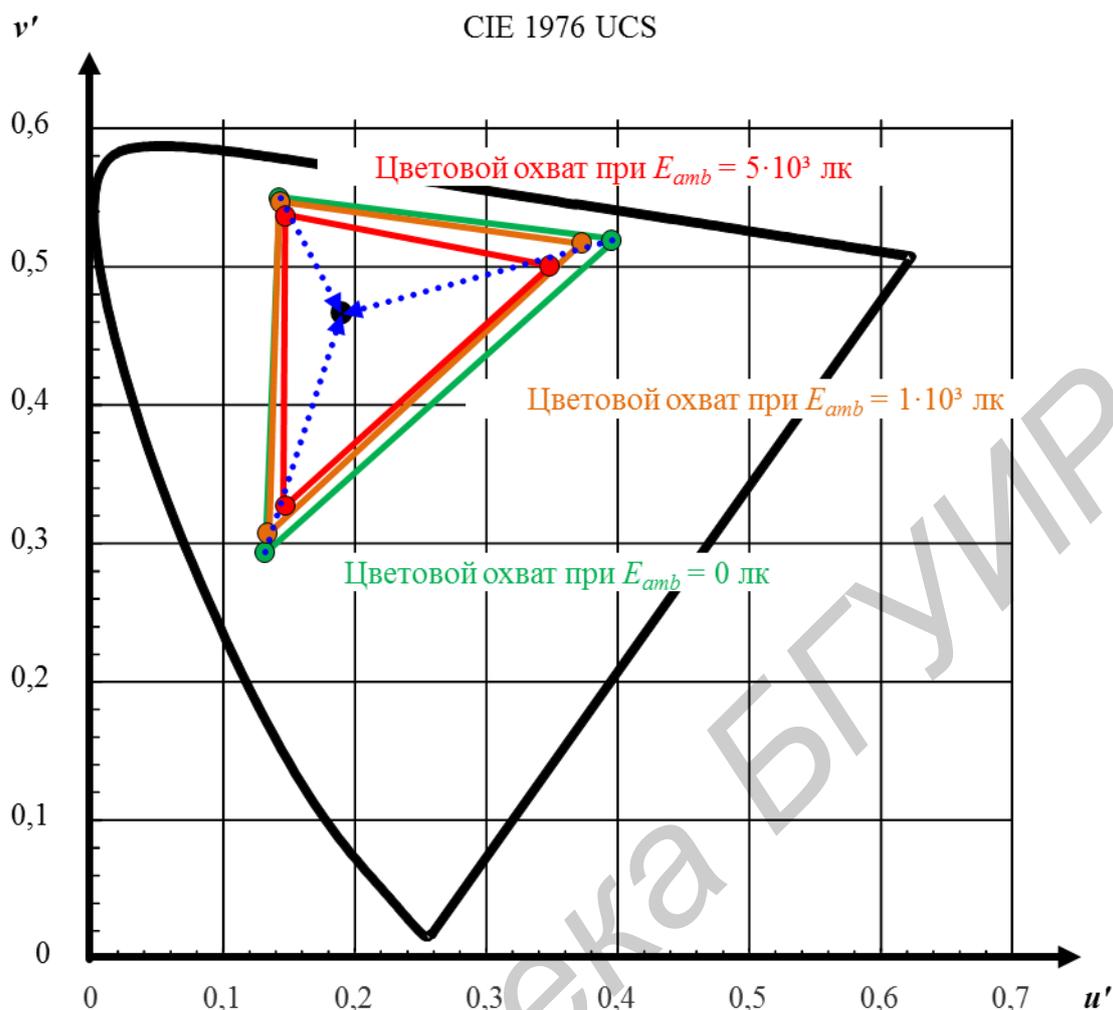


Рисунок 6. – Закономерность изменения цетового охвата ЖК-дисплея в условиях интенсивной внешней засветки

В условиях внешней засветки ($E_{amb} = 5 \cdot 10^3$ лк) цетовой охват ЖК-дисплея сокращается на 35,9 % из-за увеличения яркости градаций серого и, соответственно, смещения цетовых координат в сторону белой точки (см. рисунок 6). Следствием сужения цетового охвата является уменьшение набора воспроизводимых дисплеем цетов, что негативно влияет на цетопередачу изображения. При этом сокращение цетового охвата ЖК-дисплея при внешней засветке интенсивностью $1 \cdot 10^3$ лк составляет 16,8 %, а интенсивностью $5 \cdot 10^3$ лк – 35,9 %.

В **пятой главе** описан разработанный алгоритм тональной и цетовой коррекции изображения, блок-схема которого представлена на рисунке 7 [1, 2].

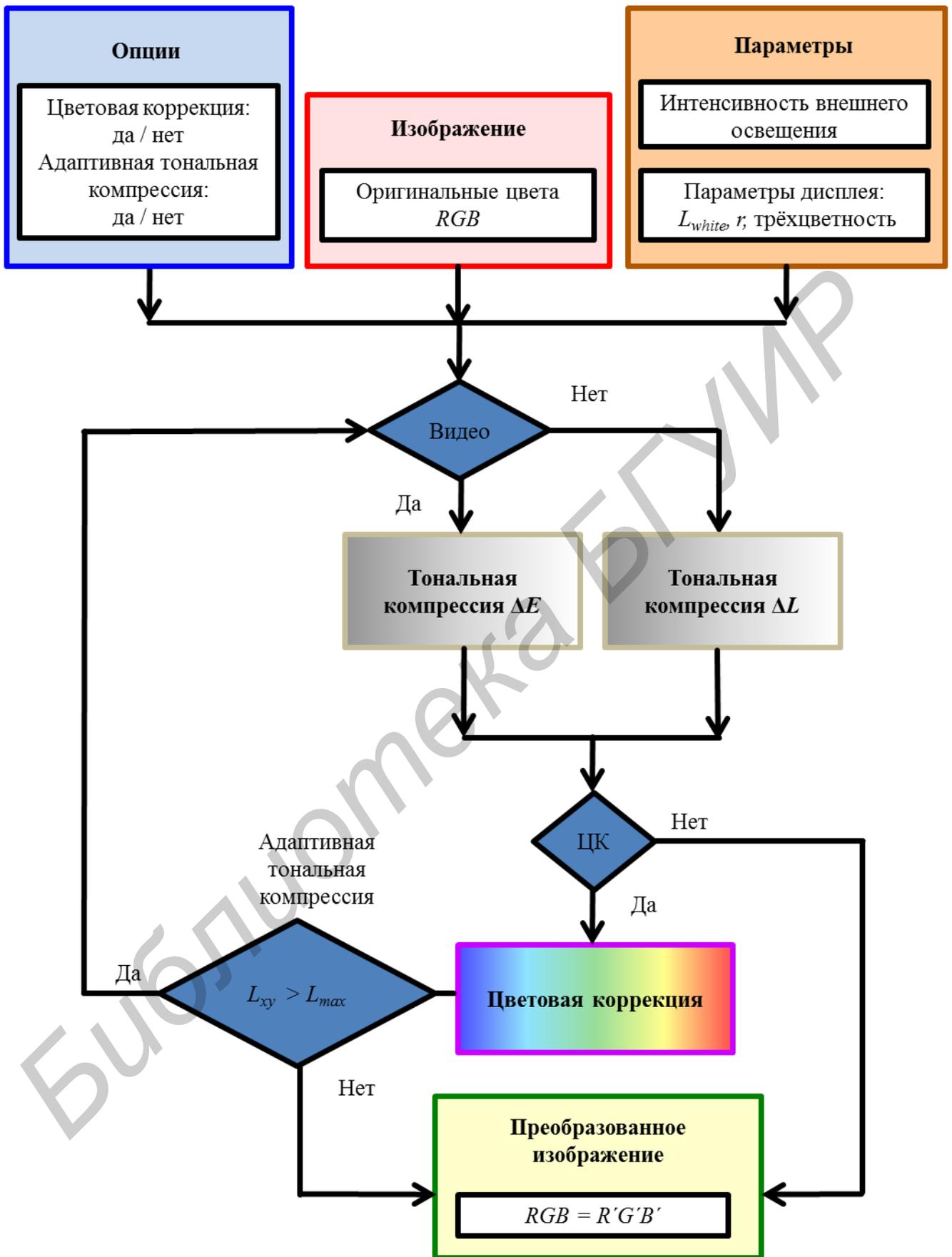


Рисунок 7. – Блок-схема алгоритма тональной компрессии и цветовой коррекции

При учете параметров ЖК-дисплея и интенсивности внешней засветки становится возможным адаптировать яркость и цвета преобразованного изображения.

Из рисунка 7 видно, что в блок «Тональная компрессия» включены оба метода – тональная компрессия на основе формулы цветового отличия для видеоизображений и тональная компрессия на основе закона Вебера для нефотореалистичного рендеринга (графики). Преобразование изображения может производиться как без, так и с цветовой коррекцией.

На рисунке 8 изображено изменение яркости цвета со значениями базовых цветов $R = 53$, $G = 70$, $B = 90$ после преобразования алгоритмом тональной и цветовой коррекции [3, 4].

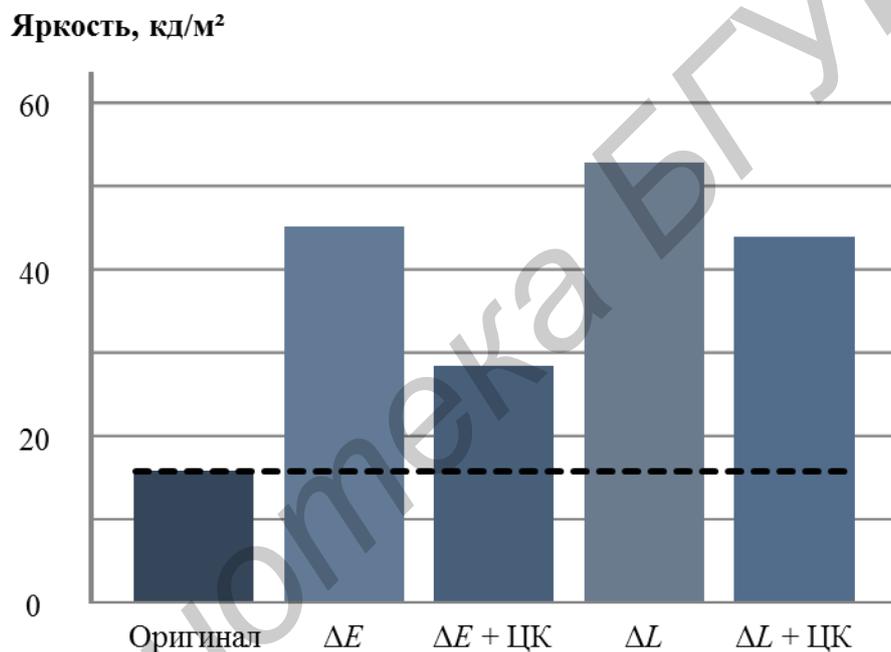


Рисунок 8. – Изменение яркости первоначального цвета изображения после применения алгоритма тональной и цветовой коррекции при интенсивности внешней засветки $5 \cdot 10^3$ лк

Первый столбец на рисунке 8 соответствует яркости оригинального цвета; второй – яркости цвета после преобразования алгоритмом тональной компрессии на основе формулы цветового отличия без цветовой коррекции; третий – яркости цвета после преобразования тем же алгоритмом, но с цветовой коррекцией. Четвертый столбец иллюстрирует яркость цвета после преобразовании алгоритмом тональной компрессии на основе закона Вебера без цветовой коррекции, пятый – яркость цвета после преобразования тем же алгоритмом, но с цветовой коррекцией. Сравнив измеренные значения яркости, можно отметить, что цвета, преобразованные алгоритмом тональной компрессии на основе

формулы цветового отличия и закона Вебера без цветовой коррекции, выглядят значительно ярче. Следовательно, применение цветовой коррекции уменьшает яркость изображения, но при этом она остается намного выше яркости оригинального.

На рисунке 9 показаны измеренные координаты цветности как оригинальных, так и преобразованных цветов изображения в цветовом пространстве CIE 1976 UCS [1, 4, 9].

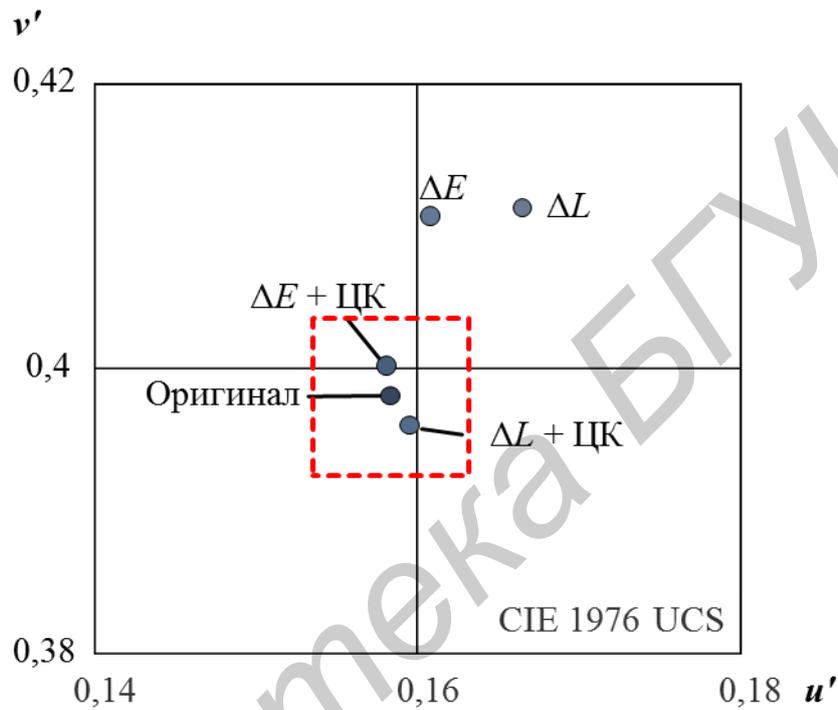


Рисунок 9. – Изменение координат цветности после применения алгоритма тональной и цветовой коррекции при интенсивности внешней засветки $5 \cdot 10^3$ лк

Визуальная оценка измеренных координат показала, что после применения цветовой коррекции координаты преобразованного цвета «возвращаются» к первоначальным (исключая погрешности измерений).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Выявлена зависимость яркости изображения от порядка градации серого ЖК-дисплея при интенсивности внешней засветки в диапазоне от 0 до $5 \cdot 10^3$ лк. Установлено, что гамма ЖК-дисплея, характеризующая восприятие человеком градаций серого, ухудшается при внешней засветке его поверхности на 4,4 % для 0-й и на 4,3 % для 50-й градации серого [1, 4, 5, 6, 9, 13].

2. Установлена зависимость изменения цветового охвата ЖК-дисплея от интенсивности внешней засветки его поверхности в диапазоне от 0 до $5 \cdot 10^3$ лк. Экспериментально подтверждено, что за счет уменьшения цветового охвата ЖК-дисплея с матовой поверхностью при внешней засветке количество распознаваемых цветов сокращается на 35,9 % [2, 3, 8, 13].

3. Исследованы закономерности изменения цветового охвата ЖК-дисплеев с матовой и глянцевой поверхностями при варьировании интенсивности внешней засветки в диапазоне от 0 до $5 \cdot 10^3$ лк. Установлено, что с учетом стандарта NTSC при интенсивности внешней засветки, равной $5 \cdot 10^3$ лк, цветовой охват матового ЖК-дисплея сокращается на 7,2 %, глянцевого – на 2,1 %. [1, 9].

4. Впервые разработан и исследован метод тональной компрессии яркости пикселей ЖК-дисплея на основе порога цветового различия, обеспечивающий увеличение яркости пикселя, состоящего из базовых цветов ($R = 53$, $G = 70$, $B = 90$), до 288 % при интенсивности внешней засветки до $5 \cdot 10^3$ лк [1, 2, 3, 5].

5. Впервые разработан и исследован метод тональной компрессии яркости пикселей ЖК-дисплея на основе закона Вебера, обеспечивающий увеличение яркости пикселя, состоящего из базовых цветов ($R = 53$, $G = 70$, $B = 90$), до 337 % при интенсивности внешней засветки до $5 \cdot 10^3$ лк [3, 10].

6. Впервые разработан и исследован метод устранения искажений яркости пикселей светлых участков изображения, воспроизводимого ЖК-дисплеем при интенсивности внешней засветки до $5 \cdot 10^3$ лк, путем сглаживания функции тональной компрессии с обеспечением плавного перехода между градациями серого от 170-й до 255-й при тональной компрессии на основе порога различия и от 200-й до 255-й при тональной компрессии на основе закона Вебера [1, 2, 4, 9].

7. Впервые разработан и исследован метод цветовой коррекции изображений с учетом яркости и трехцветности ЖК-матрицы дисплея, обеспечивающий уменьшение евклидова расстояния между преобразованными и первоначальными координатами цветности до 50 % за счет их коррекции после преобразования методами тональной компрессии на основе порога различия и закона Вебера при увеличении интенсивности внешней засветки до $5 \cdot 10^3$ лк [1, 2, 3, 9].

8. Разработан алгоритм тональной и цветовой коррекции изображения, воспроизводимого ЖК-дисплеем, основанный на преобразовании яркости пикселей с учетом яркости и трехцветности ЖК-матрицы дисплея и обеспечивающий:

– увеличение до 181 % яркости пикселей по базовым цветам ($R = 53$, $G = 70$, $B = 90$) при интенсивности внешней засветки до $5 \cdot 10^3$ лк за счет использования тональной компрессии на основе порога цветового различия и цветовой коррекции с учетом яркости и трехцветности ЖК-матрицы дисплея [1, 4];

– увеличение яркости пикселя, состоящего из базовых цветов ($R = 53$, $G = 70$, $B = 90$), до 279 % при интенсивности внешней засветки до $5 \cdot 10^3$ лк за счет использования тональной компрессии на основе закона Вебера и цветовой коррекции с учетом яркости и трехцветности ЖК-матрицы дисплея [1, 4];

– уменьшение евклидова расстояния между преобразованными координатами цветности и координатами цветности первоначального цвета, состоящего из базовых цветов ($R = 53$, $G = 70$, $B = 90$), более чем на 50 %.

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Разработан измерительный программно-аппаратный комплекс симуляции внешних источников освещения в салоне автомобиля и кабине самолета, соответствующий требованиям стандарта ISO 15008 и позволяющий определить цветовую палитру изображения на ЖК-дисплее при интенсивности внешней засветки, равной 0, $1 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^3$ лк. Для настройки цвета и температуры внешнего освещения рекомендуется использовать светодиодные лампы типа EUROLITE LED PAR-64 [1, 2, 9].

При отображении на ЖК-дисплее видеоизображений и фотореалистичного рендеринга (видео стандарта Rec. 709) в алгоритме тональной и цветовой коррекции рекомендуется использовать тональную компрессию на основе формулы цветового отличия [2, 4, 9].

При отображении на ЖК-дисплее статичных изображений и нефотореалистичного рендеринга в алгоритме тональной и цветовой коррекции рекомендуется использовать тональную компрессию на основе закона Вебера [2, 4, 9].

Разработанный комплекс может быть использован на предприятиях, выпускающих ЖК-дисплеи и их компоненты, приборные панели для автомобильной промышленности, космонавтики и авионики, а также в организациях по метрологии и стандартизации качества продукции [1, 9].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Optimizing and evaluating new automotive HMI image enhancement algorithms under bright light conditions using display reflectance characteristics / K. Blankenbach, A. Sycev, S. Kurbatfinski, M. Zobl // Journal of the Society for Information Display. – 2014. – Vol. 22, Is. 5. – P. 267–279.

2. Метод тональной компрессии и алгоритмы обработки изображений при интенсивной внешней засветке / А.В. Сычев, А.А. Степанов, А.Г. Смирнов, К. Бланкенбах // Доклады БГУИР. – Минск : БГУИР, 2015. – № 3 (89). – С. 23–28.

3. Сравнительный анализ методов тональной компрессии при обработке изображений жидкокристаллических дисплеев / А.В. Сычев, А.А. Степанов, А.Г. Смирнов, К. Бланкенбах // Доклады БГУИР. – Минск : БГУИР, 2015. – № 4 (90). – С. 87–92.

4. Цветовая коррекция при обработке изображений в условиях интенсивной внешней засветки / А.В. Сычев, А.А. Степанов, А.Г. Смирнов, К. Бланкенбах // Доклады БГУИР. – Минск : БГУИР, 2015. – № 8 (94). – С. 111–114.

5. Blankenbach, K. Ablesbarkeit verbessern / K. Blankenbach, A. Marsal, A. Sycev // Elektronik Displays. – 2015. – Vol. 2. – P. 42–45.

Статьи в сборниках материалов конференций

6. Blankenbach, K. Ambient Light Reflectivity and Readability of Flat and curved (Reflective) Displays / K. Blankenbach, A. Sycev // Proc. of 19th International Display Workshops “IDW/AD’12”, Kyoto, Japan, December 4 – 5, 2012. – Kyoto, 2012. – Vol. 3. – P. 1558 – 1562.

7. Blankenbach, K. Novel Measurement Method of Bright-Light Contrast Ratio Based on Binocular Vision / K. Blankenbach, A. Sycev // SID Symposium Digest of Technical Papers, Vancouver, Canada, 2013. – Vancouver, 2013. – Vol. 44, Is. 1. – P. 652 – 655.

8. Comparison of e-Paper Displays, Transflective and Transmissive LCDs under Bright Ambient Light and Image Enhancement Algorithms for Optimized Grey Level and Color Perception / K. Blankenbach, A. Sycev, S. Kurbatfinski, M. Zobl // Proc. of 20th International Display Workshops “IDW’13”, Sapporo, Japan, December 4 – 6, 2013. – Sapporo, 2013. – Vol. 20. – P. 1324 – 1327.

9. Optimization and Evaluation of Automotive Displays under Bright Ambient Light using Novel Image Enhancement Algorithms / K. Blankenbach, A. Sycev,

S. Kurbatfinski, M. Zobl // SID Symposium Digest of Technical Papers, San Diego, Canada, June 1 – 6, 2014. – San Diego, 2014. – Vol. 45, Is. 1. – P. 595 – 598.

10. Sycev, A. Measurements of Flexible Displays – Challenges and Solutions / A. Sycev, A. Marsal, K. Blankenbach // Proc. of SID Mid Europe Meeting, Stuttgart, Germany, October 9 – 10, 2014. – Stuttgart, 2014. – P 347–350.

11. Blankenbach, K. Comparison of key optical measurements of curved to flat LCD TVs and their impact on image quality / K. Blankenbach, A. Marsal, A. Sycev // SID Symposium Digest of Technical Papers, San Jose, Canada, May 21 – June 5, 2015. – San Jose, 2015. – Vol. 46, Is. 1. – P. 630–633.

Тезисы докладов на научных конференциях

12. Sycev, A. Optical Performance Evaluation of Reflective and Flexible Displays / A. Sycev, S. Kurbatfinski, K. Blankenbach // Proc. of Printed Electronics Europe Conference, Berlin, Germany, 2012. – Berlin, 2012. – P. 165–166.

13. Sycev, A. Ambient Light Characteristics of Flexible Displays / A. Sycev, K. Blankenbach // Proceedings of the Mid-Europe Chapter Spring Meeting of the Society for Information Displays, Istanbul, Turkey, April 7, 2014. – Istanbul, 2014. – P. 202–203.

14. Image Quality Simulations of Curved Displays / A. Marsal, A. Sycev, T. Kloth, C. Lehnert, K. Blankenbach // SID Symposium Digest of Technical Papers / EURODISPLAYS'2015, September 21 – 23, 2015, Het Pand, Ghent, Belgium. – Ghent, 2015. – Vol. 46, Is. S-1. – P. 60.

15. Fast and Easy-to-Use Approach of BRDF Measurements by Use of Fixed Small Light Source and Luminance Imager / A. Marsal, A. Sycev, K. Blankenbach, A. Smirnov // SID Symposium Digest of Technical Papers / EURODISPLAYS'2015, September 21 – 23, 2015, Het Pand, Ghent, Belgium. – Ghent, 2015. – Vol. 46, Is. S-1. – P. 98.

A. Syt

РЭЗІЮМЭ

Сычоў Андрэй Валер'евіч

Танальная кампрэсія і каляровая карэкцыя ў вадкакрышталічных прыладах адлюстравання інфармацыі

Ключавыя словы: танальная кампрэсія, каляровая карэкцыя, алгарытм пераўтварэння малюнка, ВК-дысплей.

Мэта працы: даследаванне залежнасці значэнняў яркасці і каляровых каардынатаў выявы на ВК-дысплеі ад каэфіцыента адлюстравання, мінімальных і максімальных значэнняў яркасці дысплея ва ўмовах знешняга засвятлення, якія характарызуюць якасць успрымання выявы, а таксама распрацоўка метадаў і сродкаў апрацоўкі візуальнай інфармацыі, якія забяспечваюць паляпшэнне яе ўспрымання пры адлюстраванні на ВК-дысплеях пры інтэнсіўным знешнім засвятленні.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: устаноўлена залежнасць яркасці выявы ад градацыі шэрага колеру на ВК-дысплеі пры інтэнсіўным знешнім засвятленні паверхні дысплея. Распрацаваны алгарытм танальнай і каляровай карэкцыі выяваў на ВК-дысплеі, заснаваны на пераўтварэнні яркасці пікселяў і ўліку яркасці і трыхрамата ВК-матрыц, які забяспечвае павелічэнне яркасці пікселяў пры інтэнсіўным знешнім засвятленні за кошт выкарыстання танальнай кампрэсіі і каляровай карэкцыі на аснове ўліку яркасці і трыхрамата ВК-матрыц.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: на аснове прапанаваных метадаў і алгарытму танальнай і каляровай карэкцыі распрацаваны вымяральны праграма-апаратны комплекс сімуляцыі знешніх крыніц асвятлення, прысутных у салоне аўтамабіля і ў кабіне пілота, які дазваляе вызначыць аптымальныя колеры каляровай палітры візуальнай інфармацыі на ВК-дысплеях ва ўмовах змены інтэнсіўнасці знешняга засвятлення паверхні дысплея.

Вобласць ужывання: распрацаваны апаратна-праграмны комплекс можа быць выкарыстаны на прадпрыемствах, якія выпускаюць ВК-дысплеі і іх кампаненты, прыборныя панэлі для аўтамабільная прамысловасці, касманаўтыкі і авіонікі, а таксама на прадпрыемствах па метралогіі і стандартызацыі якасці прадукцыі.

РЕЗЮМЕ

Сычѳв Андрей Валерьевич

Тональная компрессия и цветовая коррекция в жидкокристаллических устройствах отображения информации

Ключевые слова: тональная компрессия, цветовая коррекция, алгоритм преобразования изображения, ЖК-дисплей.

Цель работы: исследование зависимости значений яркости и координат цветности изображения на ЖК-дисплее от коэффициента отражения, минимальных и максимальных значений яркости дисплея в условиях внешней засветки, характеризующих качество восприятия изображения, а также в разработке методов и средств обработки визуальной информации, обеспечивающих улучшение ее восприятия при отображении на ЖК-дисплее при интенсивной внешней засветке.

Полученные результаты и их новизна: установлена зависимость яркости изображения от градации серого цвета на ЖК-дисплее при интенсивной внешней засветке его поверхности. Разработан алгоритм тональной и цветовой коррекции изображений, воспроизводимых ЖК-дисплеем, основанный на преобразовании яркости пикселей с учетом яркости и трехцветности ЖК-матриц, обеспечивающий увеличение яркости пикселей при интенсивной внешней засветке за счет использования тональной компрессии и цветовой коррекции на основе учета яркости и трехцветности ЖК-матриц.

Рекомендации по использованию: на основе предложенных методов и алгоритма тональной и цветовой коррекции разработан измерительный программно-аппаратный комплекс симуляции внешних источников освещения, присутствующих в салоне автомобиля и кабине пилота, позволяющий определить оптимальные цвета цветовой палитры визуальной информации на ЖК-дисплее в условиях изменения интенсивности внешней засветки его поверхности.

Область применения: разработанный комплекс может быть использован на предприятиях, выпускающих ЖК-дисплеи и их компоненты, приборные панели для автомобильной промышленности, космонавтики и авионики, а также в организациях по метрологии и стандартизации качества продукции.

SUMMARY

Andrej V. Sycev

Tone mapping methods and image enhancement algorithms under bright ambient light conditions

Key words: ambient light, tone mapping, color management, improvement readability, image enhancement.

The aim of the research: to study the dependence of the values of brightness and chromaticity coordinates of the image on the LCD screen of the reflection coefficient, the minimum and maximum brightness of a display under bright ambient light condition, characterizing the quality of perception of the image, as well as in the development of methods and tools of the processing of visual information, providing improved its perception of when displayed on the LCD displays under bright ambient light conditions.

The results obtained and their novelty: the dependence of the brightness of gray levels on the LCD display when the ambient light is reflected from the display surface. An algorithm is developed for the tone and color correction of a images that, based on the brightness transformation of pixel and account of the brightness and tristimulus of LCD matrices. This increase in the brightness of pixels in depends of intensity of the ambient light by using tone mapping and color correction based on consideration the brightness of the LCD and tristimulus values of LC matrices.

Degree of utilization: based on the proposed method and algorithm of tone and color correction was developed the measurement hardware and software complex to emulate of bright ambient light sources that are present in the passenger compartment and cockpit, which allows to determine the optimal color palette of visual information on the LCD under bright ambient light conditions.

Field of application: developed measurement set-up can be used in businesses, producing LCDs and their components, instrument panels cluster for the automotive industry, astronautics and avionics, as well as in metrology and standardization of LCDs product and there quality organizations.

Научное издание

Сычѳв Андрей Валерьевич

**ТОНАЛЬНАЯ КОМПРЕССИЯ И ЦВЕТОВАЯ КОРРЕКЦИЯ
В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ
ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Подписано в печать 6.04.2016. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура "Таймс".

Отпечатано на ризографе. Усл.-печ. л. 1,63. Уч.-изд. л.1,4. Тираж 60. Заказ 53.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014

№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6