

# **Исследования визуального восприятия красных железнодорожных светофоров на основе светодиодов.**

**Агафонов Д.Р., Мурашова М.А., Никифоров С.Г., Пинчук О.П., Столяревская Р.И.**

## **1. ВВЕДЕНИЕ.**

За последнее десятилетие в разработках полупроводниковых источников света – светодиодах произошел качественный скачок. Светодиоды повышенной яркости стали превосходить характеристики миниатюрных ламп накаливания по сроку службы, надежности, безопасности, что позволило широко применять светодиоды в разных областях светотехники и электроники.

Появление светоизлучающих диодов повышенной яркости со сроком службы до 150 тыс. часов, малым потреблением электроэнергии и необходимым углом пространственного распределения силы света позволило приступить к разработке светооптических систем железнодорожных светофоров на их основе.

Светооптические системы светодиодные (ССС) красного цвета в настоящее время можно разрабатывать только на основе светодиодов с доминирующей длиной волны в спектре излучения 640 – 645 нм, что соответствует координатам цветности, входящим в нормируемую область цветовых характеристик красного сигнала, принятую для сигнализации на железнодорожном транспорте России [1], но в части световых параметров не удовлетворяющим требованиям [1] по осевой силе света. Однако, светодиоды с доминирующей длиной волны в спектре излучения 625 – 630 нм обладают световым потоком, в 2 - 3 раза большим, чем светодиоды с длиной волны 640 – 645 нм, но их координаты цветности не входят в существующую нормируемую область цветности. Совокупность этих противоречащих обстоятельств для описываемого случая использования светодиодов делает невозможным применение светоизлучающих диодов (СИД) красного цвета свечения для использования в СССР.

Изучив данную проблему, специалисты «Корвет-Лайтс» совместно с сотрудниками фотометрической лаборатории отдела охраны труда ВНИИЖТ пришли к выводу о необходимости исследования возможности расширения границ области цветности сигналов красного цвета для СССР железнодорожных светофоров путём эксперимента по вероятности восприятия в качестве красного, сигнала с координатами цветности, соответствующими красным СИД с доминирующей длиной волны 625-630 нм. в реальных условиях эксплуатации светофоров.

## **2. ОБЗОР.**

По данным зарубежных стандартов [2,3] и стандарта России на светофоры дорожные [1] области цветности, регламентированные для световых сигналов, отличаются

от установленных в ГОСТ 24179-80 [4] допустимых областей цветности, принятых для световой сигнализации на железных дорогах России.

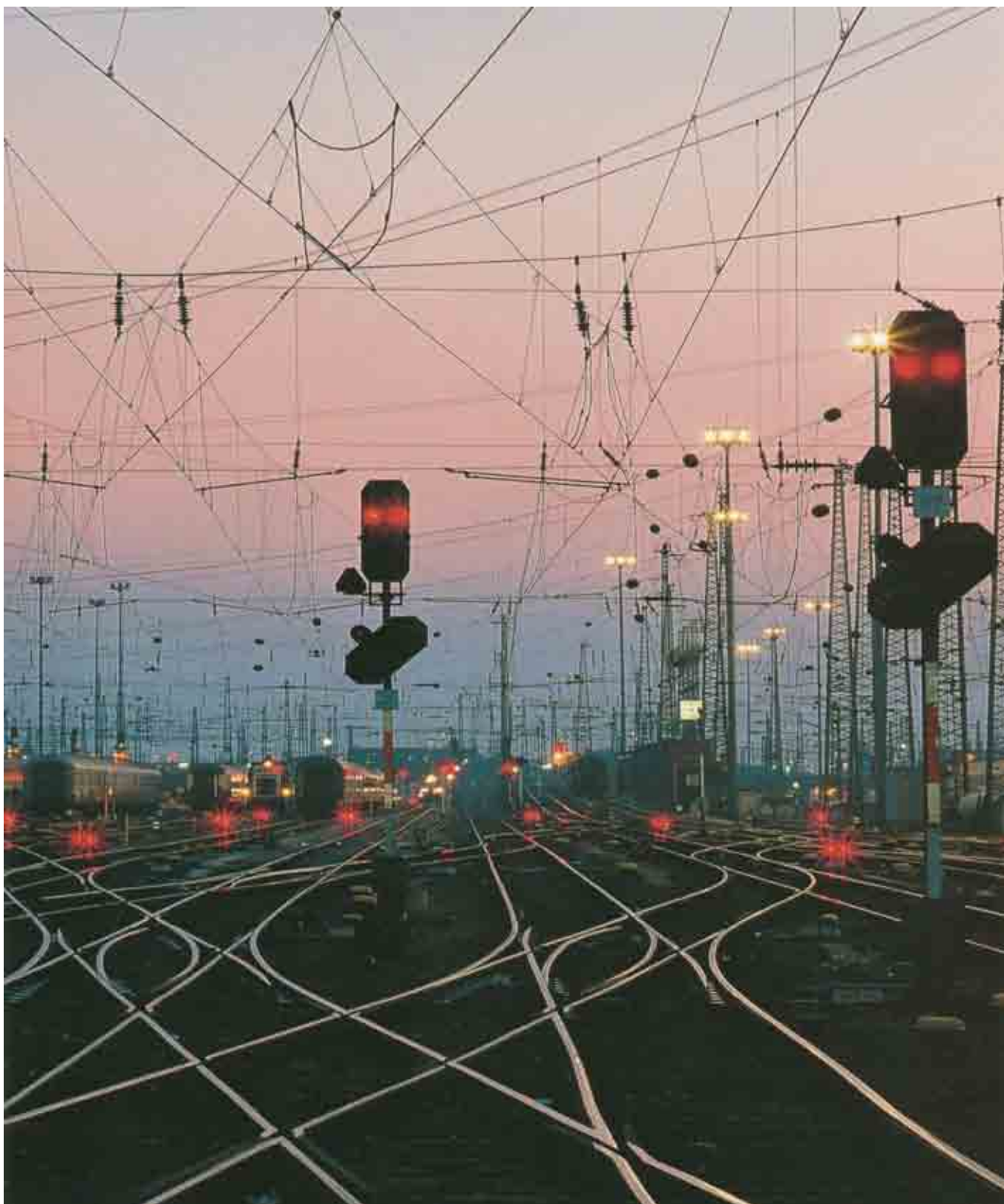


Рис. 1 Железнодорожная станция в ночном режиме сигналов.

Международная комиссия по освещению (МКО) в официальных рекомендациях 1975 года [5] для каждого цвета сигнала предлагает по две области. Одна область определяется достаточно широкими границами цветностей, а другая является более строгой. Область с широкими границами цветностей выбрана в соответствии с числом используемых в сигнальных системах различных цветов и возможным влиянием внешних источников света. Более строгие границы областей сигналов определяют более узкие области цветности, которые обеспечивают высокую вероятность распознавания цвета сигнала в заданной сигнальной системе как для наблюдателя с нормальным зрением, так и для наблюдателя с дефектами цветового восприятия. Данные рекомендации относятся к световым сигналам, используемым на всех видах транспорта – автомобильном, железнодорожном, морском, воздушном.

В стандартах Германии 1975г.[2] также даны границы цветностей двух областей для каждого цвета.

Далее рассматриваются области цветности со строгими границами, которые рекомендуется использовать в случаях, когда требуется высокая вероятность надежного распознавания сигнала.

На рис.2 представлена часть диаграммы цветности, на которой указаны границы областей красных и желтых сигналов по данным Публикации МКО № 2.2 (ТС-1.6), стандартов TGL 20684 и DIN 6163, ГОСТ 25695-91 на дорожные светофоры и ГОСТ 24179-80 на сигнальные приборы железнодорожного транспорта. Области цветности для красного сигнала по стандарту DIN 6163 и Публикации МКО совпадают.

Анализ данных рис.2 показывает, что верхняя граница области цветности красного сигнала по ГОСТ 24179-80 находится на большем расстоянии от области цветности желтого сигнала, чем аналогичные границы по другим данным. Это свидетельствует о возможности расширения границы допустимой области цветности для квазимонохроматического красного сигнала в сторону границ желтого цвета.

Исследование особенности восприятия красных сигналов светооптических систем, созданных на основе светодиодов с разными доминирующими длинами волн, позволит уточнить границу допустимой области цветности для сигналов красного цвета систем светооптических светодиодных.

# Области цветности жёлтых и красных сигналов по данным разных стран

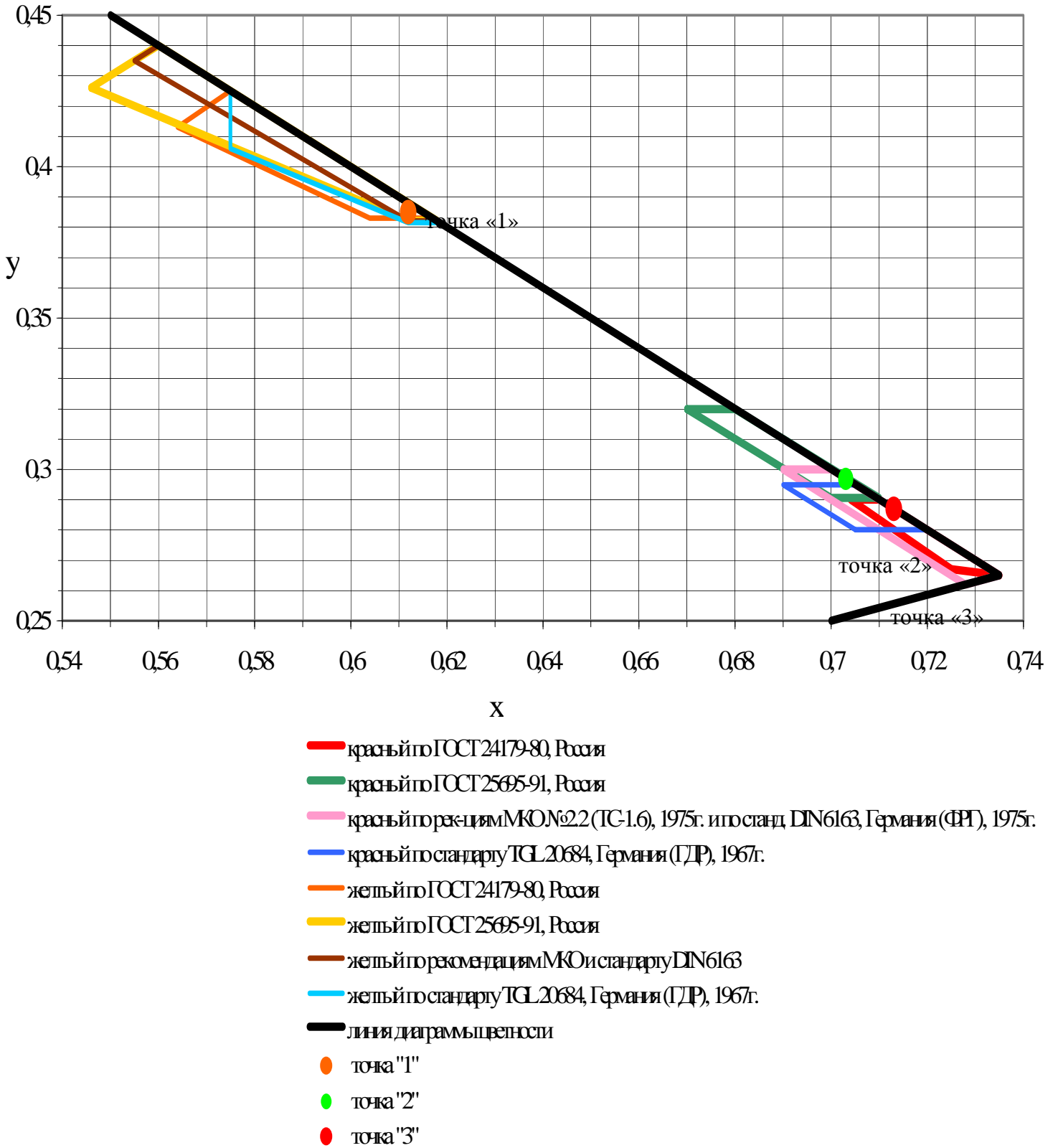


Рис. 2

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.

В ходе исследований особенности восприятия красного сигнала светооптической системы светодиодной (ССС) наблюдателю в случайном порядке предъявлялись сигналы с различными координатами цветности:

- точка 1 с координатами, лежащими на нижней границе области цветности желтого сигнала железнодорожного светофора;
- точка 2 с координатами, соответствующими излучению красного светодиода при температуре минус 60°C (рис 6);
- точка 3 с координатами, лежащими на верхней границе области цветности красного сигнала железнодорожного светофора (рис.5).

Серия наблюдаемых сигналов за один раз состояла из равновероятного предъявления сигналов трех цветностей по 10 раз в случайном порядке.

Изменение цветности предъявляемых сигналов проводилось изменением скважности свечения светодиодов красного и желтого цвета, из которых был собран наблюдаемый образец ССС.

Предварительно в лабораторных условиях были проведены измерения осевых сил света и координаты цветности излучений для различных вариантов интенсивности свечения светодиодов красного и желтого цветов. Во время исследований видимая яркость (светлота) сигналов различной цветности оставалась постоянной.

Задача наблюдателя состояла в определении цвета предъявляемого сигнала. При этом осуществлялась фиксация правильности ответа и времени от момента предъявления сигнала до момента опознавания его цвета наблюдателем.

Исследования проводились в натуральных условиях в дневное время в солнечные дни. Объект наблюдался с расстояния 1000 м на фоне открытого неба (рис. 9) и зелени. Постоянно фиксировалась яркость фона с помощью яркомера.

#### 3.1 УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка состояла из двух частей.

Первая часть включает в себя раму, на которой закреплена экспериментальная светооптическая система светодиодная (ССС) мачтового железнодорожного светофора, построенная по принципу смешения 2-х цветов. Светоизлучающая часть системы включает в себя светодиодную матрицу с чередующимися в шахматном порядке диодами с линзой Френеля и углом расходимости 3 град. красного и желтого цветов излучения и электронный блок управления режимами СИД (рис.3,4).



**Рис. 3. Светоблок и устройство управления цветом.**

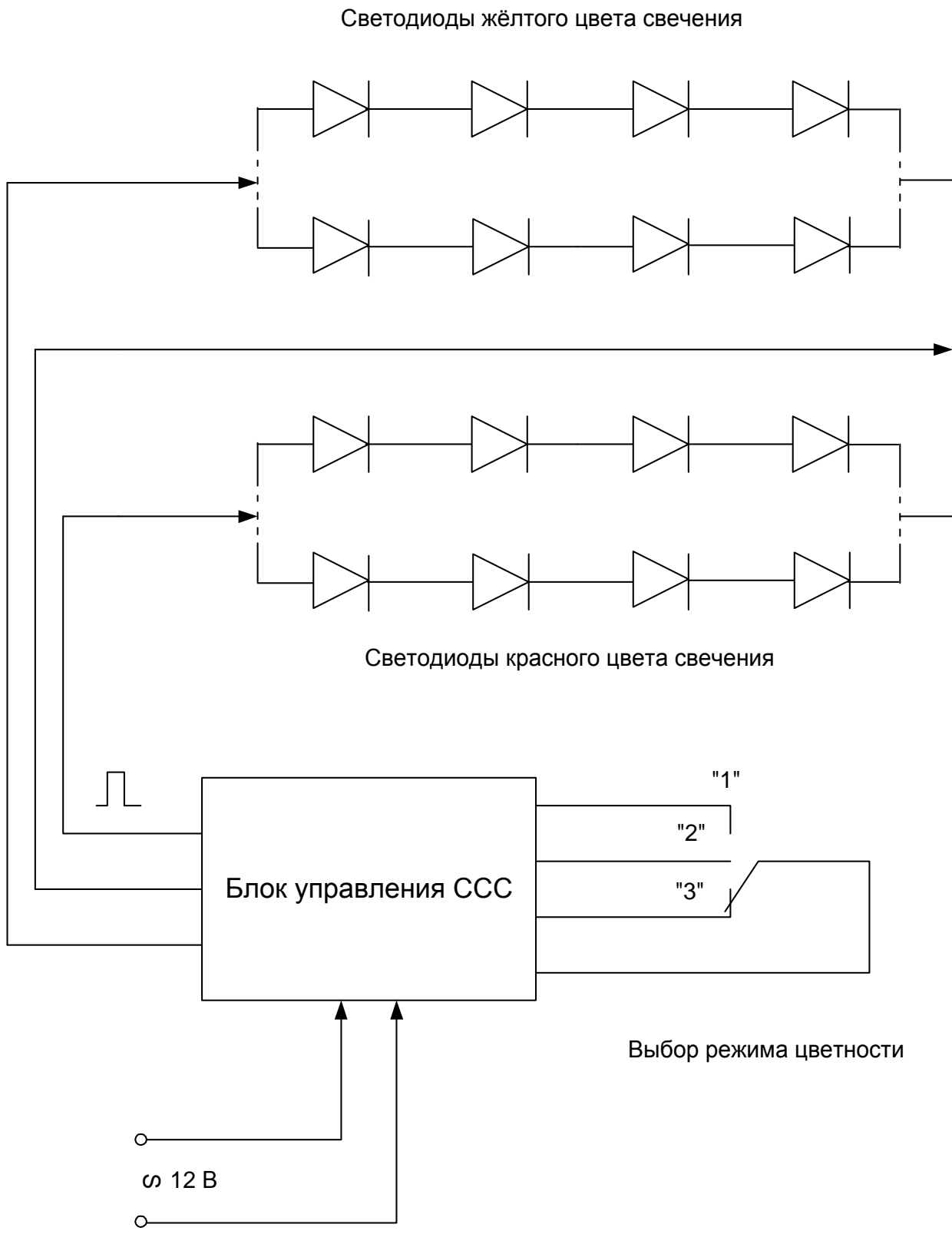


Рис. 4 Электрическая схема установки.



Интенсивности свечения светодиодов выбраны таким образом, что при любой комбинации оттенков (или чистых цветов в соответствии с [1]) общая осевая сила света ССС остаётся неизменной и соответствует [1]. Управление интенсивностями свечения реализовано на принципе ШИМ с большим количеством дискретов, что позволяет установить заданные координаты цветности и необходимую осевую силу света с высокой точностью. Также этот блок управления ССС реализует режим случайного порядка воспроизведения трёх цветностей сигнала с координатами (рис.2):

точка № 1  $x_1=0,612$ ,  $y_1=0,385$  (цветность желтого сигнала по [1]);

точка № 2  $x_2=0,703$ ,  $y_2=0,297$  (исследуемая цветность красного сигнала), (рис 6);

точка № 3  $x_3=0,713$ ,  $y_3=0,287$  (цветность красного сигнала по [1]), (рис. 5).

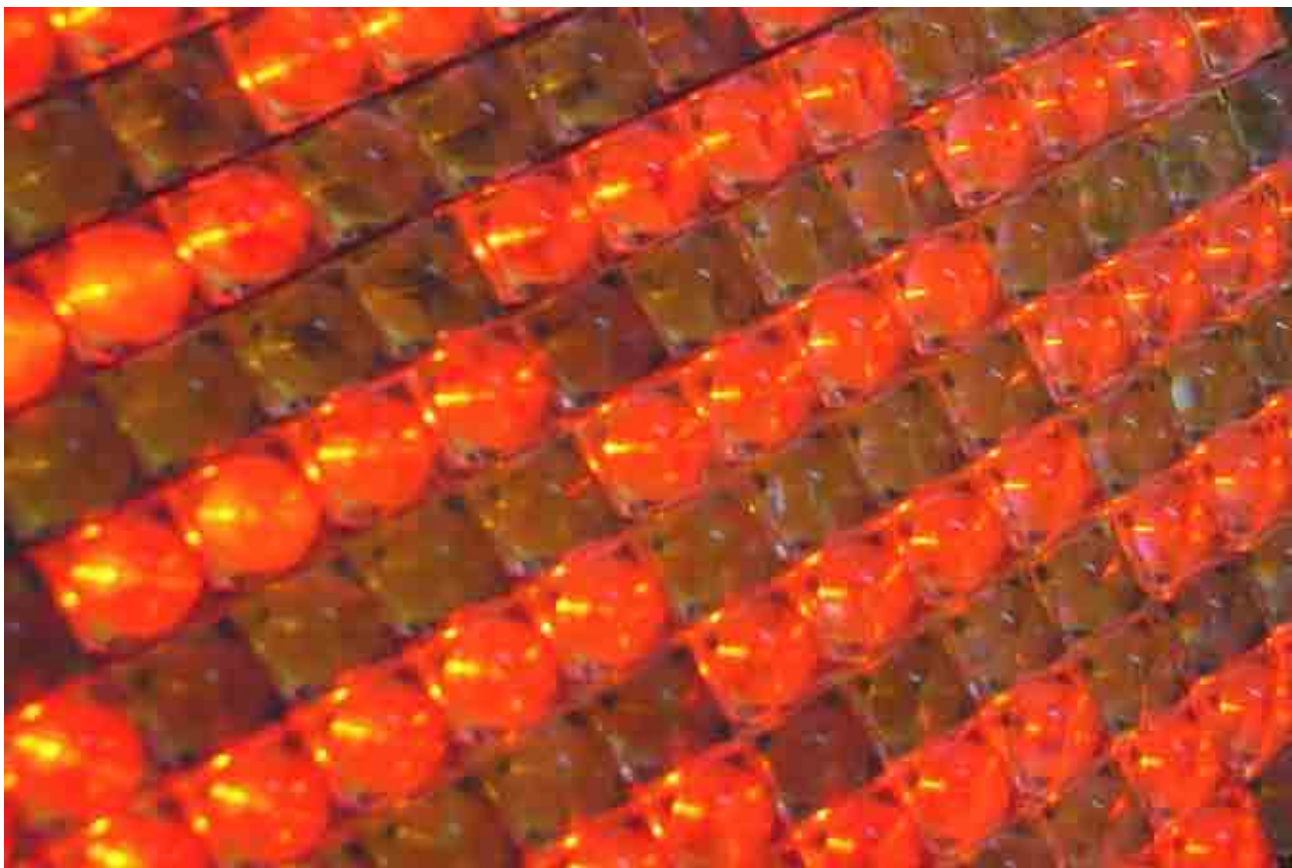


Рис. 5. Режим точки «3»



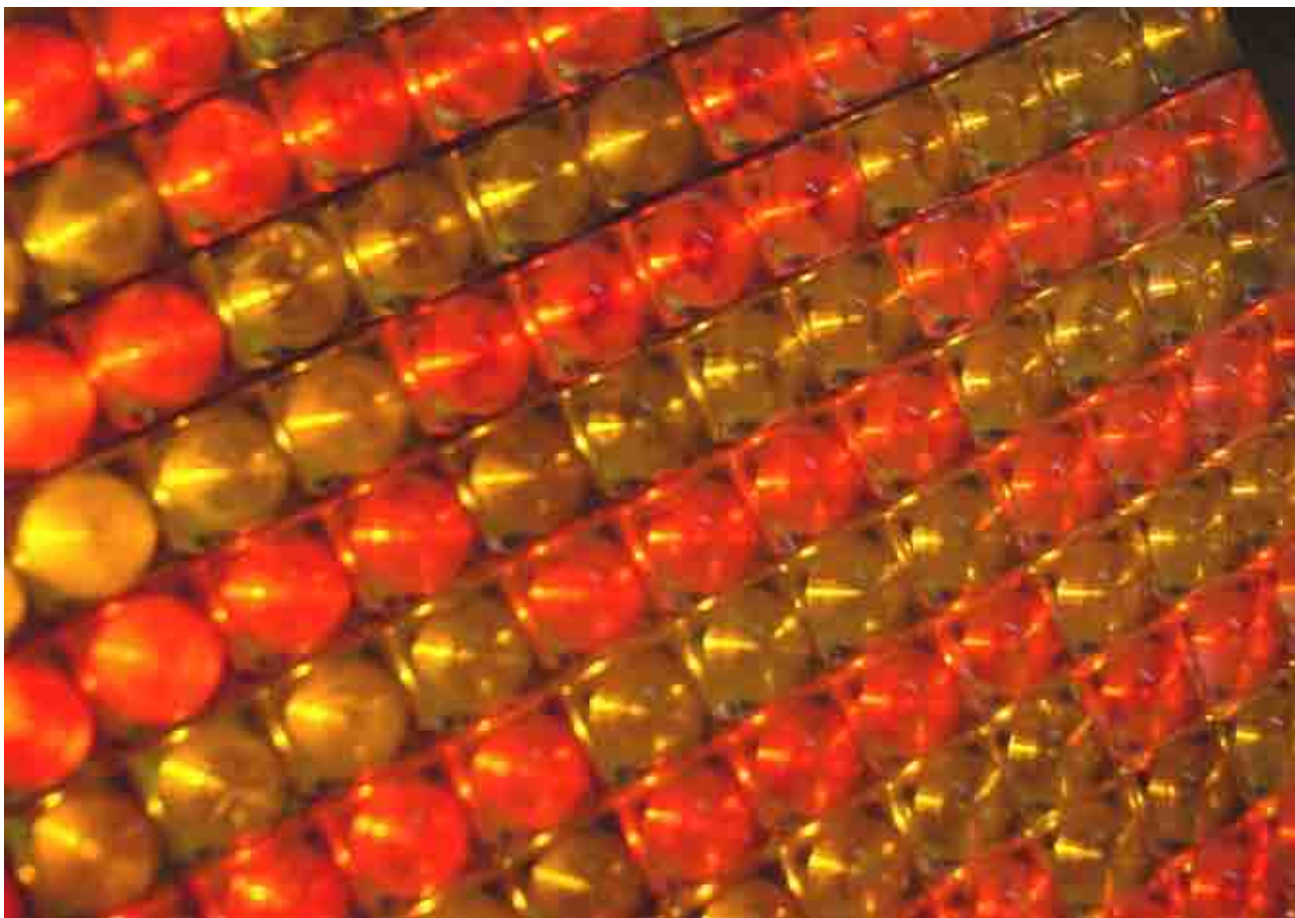


Рис. 6. Режим точки «2»

Первая часть установки была размещена на крыше 8-ми этажного административного здания экспериментального железнодорожного кольца ВНИИЖТ для наблюдения на фоне неба (рис. 7)., а затем на балконе 2-х этажного здания для наблюдения на фоне зелени.

Вторая часть экспериментальной установки (рис.8) включает в себя следующие элементы:

- штатив, на котором располагается шторка, перекрывающая сигнал экспериментальной ССС от глаз наблюдателя;
- пульт управления, с помощью которого открывается шторка с одновременным запуском электромиллисекундомера, на табло которого высвечивается определенный наблюдателем цвет сигнала и время от момента открытия шторки до принятия наблюдателем решения о цвете;
- две кнопки, соответствующие красному и желтому цвету, с помощью которых наблюдатель, принимая решение о цвете предъявленного сигнала, сообщает о нем экспериментатору и останавливает электромиллисекундомер.

Вторая часть экспериментальной установки была размещена на расстоянии 1000м от первой части.

Связь между экспериментаторами, находящимися у 1-ой и 2-ой частей экспериментальной установки, осуществлялась с помощью раций.

Экспериментальная установка была разработана и изготовлена специалистами ООО "Корвет-Лайтс" с участием ВНИИЖТ.



**Рис. 7 Первая часть экспериментальной установки**



**Рис. 8 Вторая часть экспериментальной установки**

#### **4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В проведении исследований в качестве операторов принимали участие сотрудники ВНИИЖТ и ООО «Корвет-Лайтс», а в качестве наблюдателей – машинисты, помощники машинистов и электромеханики службы СЦБ экспериментального кольца ВНИИЖТ.

Проведение исследований проходило в следующем порядке.

Наблюдатель находился перед шторкой, перекрывающей предъявляемый сигнал, на расстоянии 1000 м от светофора.

Первый оператор, находящийся возле светофора, предъявлял серию из тридцати сигналов, составленную из трех сигналов различной цветности в случайном порядке.

Второй оператор нажатием кнопки на пульте открывал шторку перед наблюдателем с одновременным запуском электронного секундомера.

Наблюдатель вслух произносил название цвета наблюдаемого сигнала (желтый или красный) и, нажимая кнопку, соответствующую принятому решению, останавливал секундомер и закрывал шторку.

Второй оператор записывал оценку в протокол (желтый – "1", красный – "2") и время решения о цвете сигнала.

Далее операторы и наблюдатель повторяли предыдущие действия, предъявляя и наблюдая серию из 30 сигналов разных цветностей.

После этого к работе приступал другой наблюдатель.

До начала исследований было составлено 20 серий случайных предъявлений трех сигналов. Серии чередовались. Ежедневно в исследованиях принимали участие от 4 до 6 наблюдателей, которые смотрели по 3 серии. Всего в эксперименте участвовали 15 наблюдателей.

Исследования проводились в натуральных условиях с 19.07.01г. по 2.08.01г. Первые два дня проводилась тренировка наблюдателей и результаты в обработке данных не учитывались.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований представлены в таблицах 1,2.

В таблицах указаны:

- номер серии, которая показывалась наблюдателю;
- фон и значение яркости фона;
- ответы наблюдателя об увиденном цвете сигнала;
- реальный цвет предъявляемых сигналов;
- время опознавания цвета сигнала наблюдателем.

В ходе эксперимента ответы наблюдателя о цвете сигнала заносились в журнал в столбец, при этом цифра "1" означала желтый цвет, а цифра "2" – красный. В другом столбце фиксировалось время опознавания сигнала в секундах. В третьем записана последовательность предъявляемой серии сигналов, где цифра "1" означает желтый цвет с координатами цветности  $x_1=0,612$ ,  $y_1=0,385$ ; цифра "2" – красный цвет с координатами  $x_2=0,703$ ,  $y_2=0,297$ , цифра "3" – красный цвет с координатами  $x_3=0,713$ ,  $y_3=0,287$ .

При анализе протоколов сравнением данных ответов и соответствия им предъявлений выявлялись ошибки наблюдателей при опознавании цвета сигналов.

Для каждой исследованной цветности были рассчитаны вероятности правильного опознавания цвета сигнала, средние значения времени опознавания, оценки их средних квадратических ошибок. Расчеты проводились для разных фонов отдельно.

Результаты расчетов, а также яркости фонов, количество предъявлений сигналов каждой цветности и количество ошибок опознавания цвета, приведены в табл.1.

Таблица 1

Фон; яркость, кд/м <sup>2</sup>	Небо, 5060 ÷ 17700			Зелень, 107 ÷ 640		
	"1"	"2"	"3"	"1"	"2"	"3"
Номер точки исследуемой цветности	"1"	"2"	"3"	"1"	"2"	"3"
Количество предъявлений (n), шт.	867	866	867	205	208	207
Количество ошибок опознавания цвета, шт.	3	3	2	0	0	0
Вероятность правильного опознавания цвета (P)	0,9965	0,9966	0,9977	1,0	1,0	1,0
Среднее время опознавания ( $\tau_{\text{ср.}}$ ), с	1,030	1,005	0,996	0,814	0,731	0,715
Оценка средней квадратической ошибки (s), с	0,237	0,251	0,242	0,199	0,167	0,124

Ошибки при опознавании цвета сигнала являются "пропуском" для данного цвета и "ложной тревогой" для сигнала другого цвета, которым был назван предъявленный сигнал. Практически одинаковое количество ошибок опознавания различных цветностей при наблюдении сигналов на фоне неба свидетельствует о постоянстве уровня "ложных тревог" у наблюдателей, то есть постоянстве принятых наблюдателями критериев опознавания цветности. Таким образом, можно сделать вывод о равенстве вероятностей опознавания каждой из трех рассматриваемых цветностей сигнала. При этом необходимо отметить, что сами вероятности не равны единице, хотя и близки к ней.

При наблюдении сигналов на фоне зелени, когда яркость в 30÷50 раз меньше, чем яркость неба, вероятности опознавания цветностей сигнала равны единице.

Более тонким критерием при оценке трудности восприятия различных цветностей сигналов является время опознавания цветности сигнала.

На первый взгляд, различия среднего времени опознавания цвета сигналов трех цветностей на одном фоне, являются незначительными, поэтому необходимо сравнить средние значения и определить достоверность их различий [6].

Для решения вопроса о случайном или неслучайном расхождении средних значений времени опознавания подсчитывается следующее отношение:

$$t = \frac{\tau_{\text{ср.1}} - \tau_{\text{ср.2}}}{S \cdot \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}},$$

где  $\tau_{\text{ср.1}}, \tau_{\text{ср.2}}$  – средние значения времени опознавания цвета сигналов двух сравниваемых цветностей;

$$S - \text{рассчитывается по формуле } S = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}},$$

$n_1, n_2$  – количество предъявлений сигналов двух сравниваемых цветностей;

$s_1, s_2$  – оценки средних квадратических ошибок времени опознавания двух сравниваемых цветностей.

Результаты расчетов соотношений для пар сравниваемых цветностей приведены в табл. 2. Там же приведено значение коэффициента Стьюдента  $t(P;k)$  для заданной вероятности вывода  $P=0,95$  и для числа степеней свободы  $k = n_1+n_2-2$ , с которым сравнивались рассчитанные значения  $t$ .

Таблица 2

Фон	Небо			Зелень		
Сравниваемые цветности	1 и 3	3 и 2	1 и 2	1 и 3	3 и 2	1 и 2
$n_1$	867	867	867	205	207	205
$n_2$	867	866	866	207	208	208
$\tau_{cp1}$	1,030	0,996	1,030	0,814	0,715	0,814
$\tau_{cp2}$	0,996	1,005	1,005	0,715	0,731	0,731
$t$	2,96	-0,76	2,13	6,04	-1,10	4,58
$t(P;k)$	1,96					

Если абсолютная величина значения  $t$  больше значения  $t(P;k)$ , то расхождение сравниваемых средних значений  $\tau_{cp.1}$  и  $\tau_{cp.2}$  можно считать неслучайным (значимым) с надежностью вывода  $P=0,95$ . В противном случае нет оснований считать расхождение значимым.

Анализ таблицы 2 показывает, что на любом фоне среднее значение времени опознавания желтого сигнала (точка "1") всегда значительно отличается от средних значений времени опознавания сигналов двух других цветностей (точки "2" или "3"), различия между которыми случайны. При этом среднее время опознавания желтого сигнала (табл.1) больше времени опознавания красных сигналов, что свидетельствует о более сложной зрительной задаче.

Из анализа данных таблиц 1 и 2 может быть сделан вывод о том, что зрительные задачи при опознавании сигналов с координатами цветности  $x_2=0,703$ ,  $y_2=0,297$  и  $x_3=0,713$ ,  $y_3=0,287$  (точки "2" и "3") являются одинаковыми, при этом цвет сигналов воспринимается как красный.

На основании результатов проведенных исследований возможно расширить допустимую область цветности красного сигнала для систем светооптических светодиодных железнодорожных светофоров, то есть координаты цветности граничной точки 1 по ГОСТ 24179-80 [1] допустимой области цветности красного сигнала могут быть заменены на  $x_1=0,703$ ,  $y_1=0,297$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проведенные исследования восприятия сигналов красного цвета различных цветностей систем светооптических светодиодных позволяют изменить границы области



цветности сигналов красного цвета для ССС железнодорожных светофоров в сторону жёлтого цвета без потери надёжности опознавания цвета сигнала машинистом локомотива. Данный вывод является подтверждением предположения об особом подходе к квазимонохроматическому излучению светоизлучающих диодов, используемых в качестве источников света для сигнальных устройств такого уровня, как железнодорожные светофоры, заключающемуся в особом восприятии глазом человека узкополосного света и связанной с этим системой стандартов, основанной исключительно на этом восприятии.

Расширение допустимой области цветности для красного сигнала ССС железнодорожных светофоров позволит применять в ССС более эффективные и надежные светодиоды красного цвета свечения.

## **Список литературы**

1. ГОСТ 24179–80 Светофильтры, светофильтры-линзы, линзы, рассеиватели и отклоняющие вставки стеклянные для сигнальных приборов железнодорожного транспорта. Технические условия.
2. Стандарт DIN 6163 Цвета и цветовые границы сигнальных огней. Германия, 1975.
3. Стандарт TGL 20684 Сигнальные огни. Цвета и пределы цвета на транспорте. Сигнальные огни железных дорог. Германия, 1967.
4. ГОСТ 25695–91 Светофоры дорожные. Типы. Основные параметры
5. Официальные рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО), публикация МКО № 2.2(ТС-1.6) Цвета световых сигналов. 1975.
6. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971. 192 с.

## **Авторы:**

**Агафонов Д.Р., д.ф.м.н.**

**Мурашова М.А., к.т.н.**

**Никифоров С.Г.**

**Пинчук О.П.**

**Столяревская Р.И., д.ф.м.н.**