

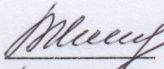
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники

Кафедра светотехники

УТВЕРЖДАЮ

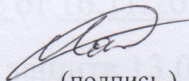
Зав. кафедрой  
канд. техн. наук, доц.

 О. Е. Железникова  
(подпись)

«20» 06 2019 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА  
РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ  
ЯРКОСТИ РАЗНОЦВЕТНЫХ СТИМУЛОВ ФЛИКЕР-  
МЕТОДОМ**

Автор бакалаврской работы

  
(подпись)

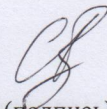
08.06.2019  
(дата)

М.О. Лапшов

Обозначение бакалаврской работы БР-02069964-12.03.02-11-19

Направление 12.03.02 Опотехника

Руководитель работы

  
(подпись)

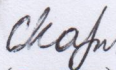
08.06.2019

(дата)

С. В. Прытков

канд. техн. наук, доц.

Нормоконтролер

  
(подпись)

08.06.2019

(дата)

С. С. Карякина

зав. лаб.

Саранск

2019



РЕФЕРАТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

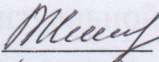
Институт электроники и светотехники

Кафедра светотехники

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

канд. техн. наук, доц.

 О. Е. Железникова  
(подпись)

«18» 04 2019 г.

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

(в форме бакалаврской работы)

Студент Лапшов Михаил Олегович

Тема «Разработка устройства для визуальной оценки яркости разноцветных стимулов фликер-методом»

Утверждена приказом № 9642-с от 16.11.2018

2 Срок представления работы к защите 13.06.2019

3 Исходные данные для исследования (проектирования): файлы измерений спектральной плотности излучения RGB - ленты, научно-техническая литература.


4 Содержание выпускной квалификационной работы

4.1 Зрительная инерция

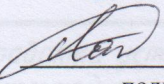
4.2 Разработка устройства

4.3 Описание работы устройства и проведение экспериментов

Руководитель работы  
канд. техн. наук, доц.

 18.04.2019 С. В. Прытков  
подпись, дата

Задание принял к исполнению

 18.04.2019  
подпись, дата



## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 63 листа, 18 рисунков, 1 таблицу, 10 формул, 18 использованных источников, 4 приложения.

**ИНЕРЦИЯ ЗРЕНИЯ, ФЛИКЕР-МЕТОД КРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА СЛИЯНИЯ МЕЛЬКАНИЙ, ЭФФЕКТИВНАЯ ЯРКОСТЬ, СТРОБОСКОП PУТНОН, RASPБERRY PИ, RGB СВЕТОДИОДЫ.**

Объектом исследования являются инерционные свойства зрения человека.

Цель работы — разработать устройство для визуальной оценки яркости разноцветных стимулов фликер-методом.

В процессе работы было изучено устройство одноплатного компьютера Raspberry Pi, были исследованы способы взаимодействия с портами ввода вывода общего назначения GPIO, изучены литературные источники, посвящённые инерционности зрения человека.

В результате проведённой работы было разработано устройство на электронно-компонентной базе и комплект программного обеспечения, позволяющие произвести визуальную оценку яркости разноцветных стимулов фликер-методом.

Степень внедрения — разработанное устройство может быть использовано в образовательном процессе при проведении лабораторных занятий по следующим дисциплинам: «Основы светотехники и колориметрии», «Основы физиологической оптики и колориметрии» и «Основы физиологической оптики».

БР-02069964-12.03.02-11-19

№	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата	Разработка устройства для визуальной оценки яркости разноцветных стимулов фликер-методом	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Лопшов	<i>Лопшов</i>	08.06.19		ИЭС, каф. СТ, д/о, 471		
Провер.		Прытков	<i>Прытков</i>	08.06.19			3	63
Реценз.								
Н. Контр.		Карякина	<i>Карякина</i>	08.06.19				
Эксперт		Железникова	<i>Железникова</i>	20.06.19				



# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Зрительная инерция	7
1.1 Инерционность органа зрения	7
1.2 Критическая частота слияния мельканий	11
1.3 Быстрая последовательность цветовых стимулов	14
1.4 Сравнение яркости двух разноцветных стимулов	15
2 Разработка устройства	18
2.1 Генератор импульсов	20
2.2 Блок усиления	29
2.3 Камера смещения излучения	33
3 Описание работы устройства и проведение экспериментов	34
3.1 Определение критической частоты слияния мельканий П-образных стимулов	34
3.2 Определение эффективной яркости	36
3.3 Визуальная оценка яркости разноцветных стимулов фликер-методом	36
3.4 Изменение эффективной яркости для определения визуальной оценки яркости двух разноцветных стимулов	42
3.5 Использование разработанной установки для определения кривой спектральной чувствительности органа зрения	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	46
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Спектральное распределение энергетической яркости R — канала стробоскопа	48
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Спектральное распределение энергетической яркости G — канала стробоскопа	52
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Спектральное распределение энергетической яркости B — канала стробоскопа	57

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

## ВВЕДЕНИЕ

Орган зрения человека очень сложно устроен, и поэтому при воздействии некоторого образа на сетчатку картинка не попадает мгновенно в кору головного мозга, отвечающую за зрение, это происходит с некоторым запозданием. Физиологи называют такое явление инерцией зрения. Инерционные свойства зрения, безусловно, широко освещены в научной, научно-популярной и учебной литературе. Но лабораторный стенд позволяет сделать учебный процесс более наглядным и эффективным.

Итак, *целью* бакалаврской работы является разработка устройства для визуальной оценки яркости фликер-методом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующее *задачи*:

- провести обзор научных публикаций и учебной литературы посвящённых вопросу инерционности зрения человека;
- изучить руководство по эксплуатации одноплатного компьютера Raspberry Pi;
- разработать устройство позволяющее производить визуальную оценку яркости разноцветных стимулов фликер-методом
- разработать набор программ для управления установкой.

Для реализации задач были задействованы следующие методы и средства.

*Методы*: эксперимент; средства: язык программирования Python, одноплатный компьютер Raspberry Pi 3B, люксметр/яркомер «ТКА-ПКМ».

*Актуальность* темы бакалаврской работы заключается в том, что она позволяет сделать образовательный процесс более эффективным.

*Новизна* бакалаврской работы заключается в том, что разработанное устройство является аналогом установки Кобленца и Эмерсона, реализованное на электронно-компонентной базе.

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докum.	Подпис	Дата		

# 1 Зрительная инерция

## 1.1 Инерционность органа зрения

Инерция зрения – это физиологическое явление, заключающееся в отставании возникновения и исчезновения зрительного ощущения от воздействия светового раздражителя. Инерция зрения проявляется наличием латентного периода, возникновением последовательных образов, слиянием световых мельканий.

Инерционность зрительной системы обусловлена инерционностью фотохимических процессов, протекающих в фоторецепторах сетчатки и инерционностью процессов распространения сигналов в нейронных сетях зрительной системы. Важно учитывать, что мгновенное исчезновение воздействующего на глаз стимула не приводит к такому же мгновенному исчезновению сигналов в зрительном нерве и зрительном центре мозга. Дело в том, что возбуждение химических процессов в рецепторах происходит относительно быстро (линейно), а их угасание происходит с экспоненциальным запаздыванием с достаточно большим временем затухания процесса. На рисунке 1 изображен график зависимости ощущения светлоты  $S$  от яркости  $L$ , которая воздействует на глаз в течение 0,1 с. П-образный импульс яркости вызывает подъем ощущения яркости, которое за 0,1 с не достигает значения, соответствующего долговременному действию той же яркости. После прекращения действия света  $S$  постепенно спадает, приближаясь к нулю (рисунок 1).

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

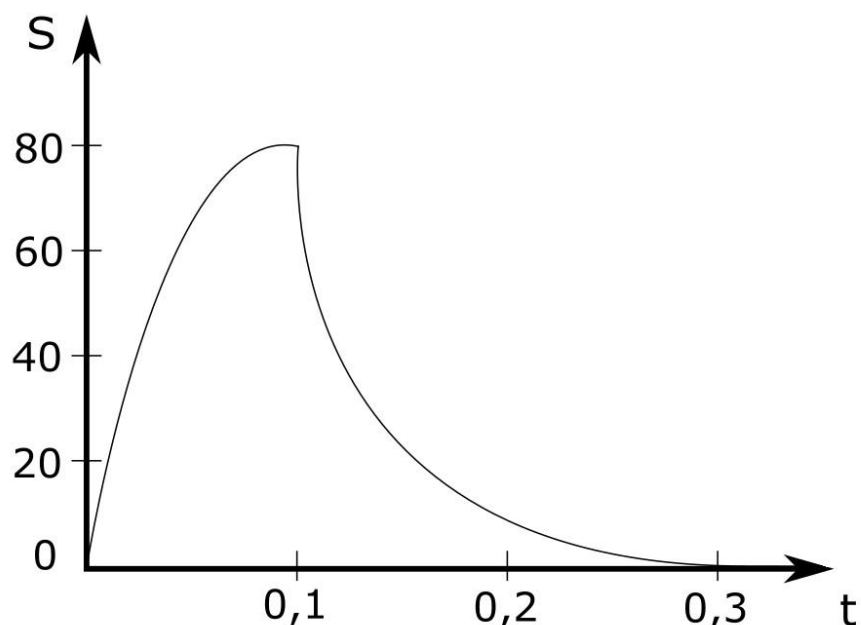


Рисунок 1 – График зависимости светлоты  $S$  от времени

Зрительная инерция в отличие от адаптации определяется постепенным ростом зрительного ощущения после начала освещения сетчатки и постепенным уменьшением (затуханием) зрительного ощущения после прекращения освещения.

Ход затухания зрительного ощущения во времени после прекращения действия излучения на глаз принято называть функцией затухания, а продолжительность процесса затухания — временем инерции. Наличие у органа зрения инерционности биологически целесообразно, так как она способствует сглаживанию флуктуаций действующего на глаз излучения и этим обеспечивает устойчивость зрительного процесса.

Зрительная инерция обнаруживается в последовательных образах, возникающих после прекращения действия на глаз излучений большой яркости, в слитии периодических мельканий при высокой частоте повторяющихся кратковременных излучений. Зрительная инерция, так же как и зрительная адаптация, приводит к зависимости светлоты и ощущения цветности не только от яркости и цветности действующего в данный момент излучения, но также и от уровней и качества предшествующих возбуждений.



Для количественной оценки зрительного ощущения при воздействии на глаз излучения, изменяющегося во времени, А. В. Луизов [7; 8] предложил пользоваться понятием эффективной яркости. Эффективная яркость в любой момент времени по Луизову эквивалентна такой постоянной яркости, которая при длительном действии на глаз наблюдателя вызывала бы зрительное ощущение, одинаковое с исследуемым мгновенным значением ощущения. Из этого определения следует, что в неустановившихся зрительных процессах эффективная яркость непрерывно изменяется даже в условиях постоянного фотометрического значения яркости излучения, кратковременно действующего на глаз наблюдателя. Следовательно, вводя понятие эффективной яркости неустановившегося процесса, мы говорим о мгновенных её значениях, которые являются лишь отдельными фазами этого переменного по времени зрительного процесса.

Из определения эффективной яркости можно видеть, что любому её значению соответствует вполне определённое значение светлоты. Из определения также явствует, что для любого установившегося зрительного процесса эффективная яркость численно равна фотометрическому значению яркости действующего на глаз излучения. Однако связь её со светлотой нелинейна.

По аналогии с эффективной яркостью можно ввести понятие эффективного блеска точечного излучателя  $Q_t$  и эффективного контраста объекта наблюдения с фоном  $W_t$ . Эти величины являются мгновенными, так же как и эффективная яркость в условиях неустановившегося зрительного процесса.

Эффективным блеском точечного излучателя с переменной по времени освещённостью зрачка глаза принято считать в каждый исследуемый момент времени такую постоянную по времени освещённость на зрачке, которая создаёт зрительное ощущение, тождественное исследуемому мгновенному значению ощущения. Понятие эффективного блеска приемлемо также для

оценки кратковременных вспышек. Приемлемость этого понятия определяется тем, что малая продолжительность вспышки не сможет обеспечить полного формирования зрительного ощущения  $Q_t < Q_\infty$ . Так, например, если вспышка с длительностью  $t=0,02$  с создающая на зрачке наблюдателя освещённость  $E_{эр} = 150$  мклк, будет воспринята наблюдателем равносветлой с непрерывно действующим точечным огнём, обладающим блеском  $E_\infty = 50$  мклк, численное значение эффективного блеска вспышки следует принять  $Q_t = 0.02 = 50$  мклк

Эффективный контраст объекта наблюдения с фоном можно определить как относительную разность эффективных яркостей объекта наблюдения и фона в каждый данный момент неустановившегося зрительного процесса

$$W(t) = (N_o(t) - N_\phi(t)) / N_\phi(t), \quad (1)$$

где  $W(t)$  — эффективный контраст;

$N_o(t)$  — эффективная яркость объекта;

$N_\phi(t)$  — эффективная яркость фона

Эффективный контраст можно также определить по аналогии с эффективной яркостью и эффективным блеском как такое значение контраста объекта и фона, наблюдаемых неограниченное время, при котором зрительное ощущение тождественно мгновенному ощущению переменного по времени или кратковременно наблюдаемого контраста.

Впервые понятие об эффективной яркости ввели в 1902 г. Брока и Зульцер, исследовавшие ход развития зрительного ощущения во времени. Они проводили фотометрическое сравнение яркостей непрерывно действующего на глаз наблюдателя излучения и кратковременных вспышек на двух полях сравнения в виде квадратов с угловыми размерами сторон  $\alpha =$



2° в условиях темновой адаптации с искусственным зрачком  $d = 2.5$  мм.

При определении баланса процессов затухания и развития зрительного ощущения необходимо учитывать суммирующую способность органа зрения. Эта способность выражается зависимостью уровня его реакции от совокупности числа фотонов, эффективно поглощённых сетчаткой в течение всего времени зрительной инерции, а также их распределением по этому промежутку времени. Следовательно, можно предположить, что бесконечно малому приросту действия излучения будет соответствовать некоторое, также бесконечно малое приращение эффективной яркости [13].

Изменение эффективной яркости после действия можно принять в первом приближении пропорциональным уменьшению концентрации отрицательных ионов, скопившихся в сетчатке после прекращения действия излучения.

## 1.2 Критическая частота слияния мельканий

Стробоскопические эффекты, которые возникают в некоторых ситуациях, например, видимая неподвижность движущего вала фрезы, так же объясняются инерцией зрения. Для прерывного наблюдения служит прибор, называемый стробоскопом (от греческих слов *strobos* – волчок, вихрь и *skoreo* – смотреть, наблюдать). Основная часть простейшего стробоскопа – диск-обтюратор с секторной прорезью. Диск может вращаться с частотой  $\nu$ , которую можно регулировать в широких пределах. Диск ставится между подлежащей наблюдению картиной и наблюдателем или перед источником света, в результате чего картина то появляется, то исчезает с периодом  $T$ . Очевидно, что

$$T = 1/\nu \quad (2)$$

Обозначим через  $\phi$  отношение дуги, соответствующей сектору прорези,

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		11

ко всей окружности диска. Тогда та часть периода, в течение которой картина видна наблюдателю, будет

$$T_1 = \varphi T \quad (3)$$

Часть периода, в течение которой картина не видна,

$$T_2 = (1 - \varphi)T \quad (4)$$

При практических применениях обтюратора частота вращения  $\nu$ , как правило, должна быть не меньше критической частоты слияния мельканий  $\nu_{кр}$ . Критической частотой слияния мельканий (КЧС) называют частоту, при которой наблюдатель перестаёт видеть понижения и повышения яркости. Каждая деталь картины приобретает стабильную эффективную яркость  $L_э$ , которая согласно закону Гальбота [6] равна средней яркости за период  $T$ . Если  $\nu \geq \nu_{кр}$ , то  $L_э = \varphi L$ , где  $L$  — яркость детали при неподвижном, открытом обтюраторе.

КЧС зависит от многих факторов. Укажем хотя бы некоторые из них:

1. Яркость  $L$  наблюдаемой картины.
2. Отношение  $\varphi$  светлой части периода  $\tau_1$  ко всему периоду  $T$ .

$$\varphi = \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \quad (5)$$

3. Глубина модуляций яркости при мельканиях (амплитуда модуляций)

$$a_m = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} \quad (6)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  — максимальная и минимальная яркость при мельканиях. В



простейшем случае  $L_2 = 0$  и  $a = 1$ .

4. Угловой размер поля зрения.

5. Форма кривой, выражающей повышение и понижение яркости в процессе мельканий.

Дать единую формулу, определяющую КЧС в зависимости от пяти перечисленных параметров, пока не представляется возможным. Приведём здесь формулы двух частных случаев, выражающих зависимость КЧС при П-образных световых импульсах, из работ Портера [6] и Айвса [2]. Именно работы Портера, и в особенности Айвса, используются обычно для практических расчётов, например, в кинотехнике [2].

При  $\varphi = 0.5$

$$\nu_{кр} = 12.4 \lg aL + 39.5 \quad (7)$$

При  $a = 0.5$  и любом  $\varphi$

$$\nu_{кр} = 12.4 \lg Lf(\varphi) + 44.4 \quad (8)$$

Здесь  $\nu(\varphi)$  — некоторая функция  $\varphi$ , которую Айвс изображает графически и которую приближённо можно представить так:

$$\nu_{кр}(\varphi) = 0.58[\varphi(1 - \varphi)] + [\varphi(1 - \varphi)]^2 \quad (9)$$

Из формулы видно, что  $\nu_{кр}$  симметрична относительно значения  $\varphi = 0.5$ , т. е. что, например, обтюраторы, у одного из которых  $\varphi = 0.2$ , а у другого  $\varphi = 0.8$ , должны давать одинаковую критическую частоту. Ещё раньше Плато назвал такие диски дополнительными и заметил, что им соответствует одинаковая критическая частота.

### 1.3 Быстрая последовательность цветовых стимулов

Если мы имеем дело с тремя разноцветными источниками модулированного света, то стробоскоп можно превратить в колориметр. Если смена одного цветового стимула другим происходит достаточно быстро, цвета отдельных стимулов вообще не воспринимаются; не воспринимается даже мерцание, сопутствующее такой смене. Однако воспроизводится устойчивый однородный цвет, отличающийся от цвета каждого из обоих используемых стимулов. Существует очень простое соотношение между цветом смеси и составляющими её цветами.

Давайте проанализируем, что происходит с группой колбочек сетчатки, испытывающих такое попеременное возбуждение. Каждой колбочке требуется лишь доля секунды, чтобы отреагировать на любой стимул. Но если частота смены стимулов достаточно велика, в течение этой доли секунды колбочка испытывает воздействие многих кратковременных импульсов потока излучения попеременно изменяющегося цвета. Она окажется не в состоянии реагировать на подобный пульсирующий стимул иначе, чем на однородный стимул с тем же самым средним спектральным распределением потока излучения для каждой части спектра. Поэтому соотношение будет следующим: цвет смеси попеременно сменяющихся друг друга двух стимулов равен цвету их среднего по времени, причём усреднение происходит так, что вклад каждого из стимулов пропорционален времени его воздействия [4]. Глаз увидит цвет, соответствующий однородному во времени распределению двух потоков излучения.

Основываясь на третьем законе Грассмана [17; 18], мы можем записать следующее правило смешения цветов по времени. Если цветовые координаты первого стимула  $R_1, G_1, B_1$ , а координаты второго стимула в той же системе основных цветов —  $R_2, G_2, B_2$ , то координаты цвета  $R, G, B$ , полученного в результате описанного смешения, выразятся как



$$\begin{aligned}
 R &= f_1 R_1 + f_2 R_2, \\
 G &= f_1 G_1 + f_2 G_2, \\
 B &= f_1 B_1 + f_2 B_2,
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где  $f_1$  — доля полного времени воздействия обоих стимулов, в течение которого на сетчатку воздействует только первый стимул,

$f_2$  — доля этого же промежутка, в течение которой воздействует только второй стимул.

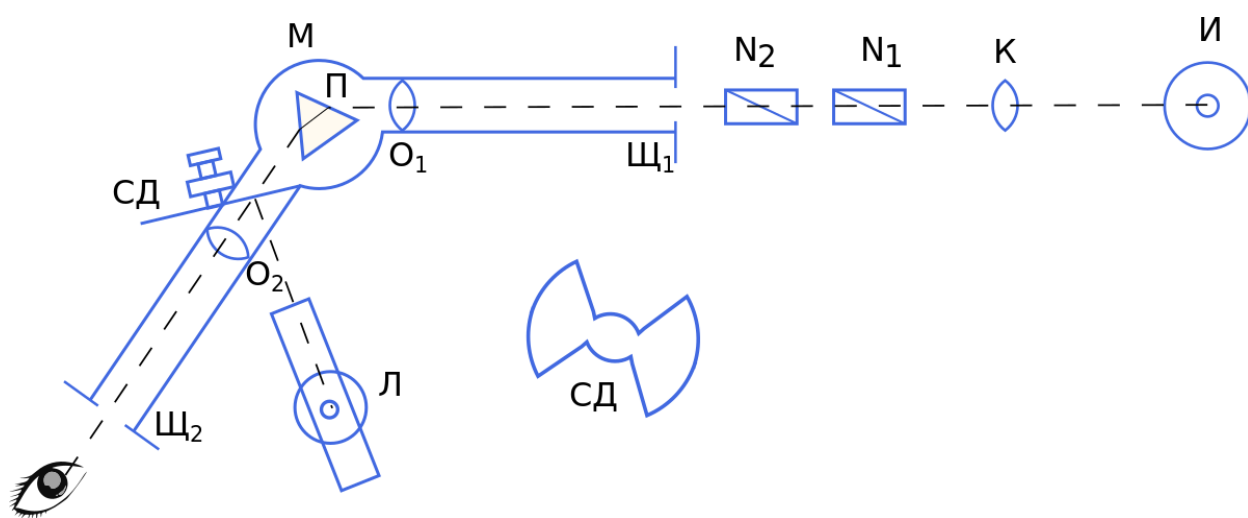
Это правило отчасти напоминает закон уравнивания цветов путём аддитивного смешения стимулов. Вследствие этого сходства смешение цветов посредством быстрого чередования стимулов часто неточно называют аддитивным смешением. Однако оно отличается от аддитивного смешения хотя бы даже тем, что  $f_1$  и  $f_2$  — величины, меньшие единицы ( $f_1 + f_2 = 1$ ). Поэтому смешение при быстрой смене стимулов более правильно именуют смешением путём усреднения [14].

#### 1.4 Сравнение яркости двух разноцветных стимулов

Как известно излучение, воздействующее на зрительный аппарат человека в количественном и в качественном отношении, зависит от мощности и спектрального состава. При мощности излучения характерной дневному зрению в органе зрения основную роль играют колбочки, которые способны различать спектральный состав попадающего в глаз излучения [3].

Если бы человеческий глаз не был цветочувствительным, то он бы реагировал качественно одинаково на все излучения. Тогда, определение его спектральной чувствительности сводилось бы к простому измерению мощностей попадающих на глаз излучений. Экспериментально установлено, что нормальный глаз воспринимает монохроматические излучения разных

длин волн как разноцветные. Как результат, уравнивание ощущения яркости от двух разноцветных стимулов более сложной задачей, но выполнимой [11]. Одним из способов решения данной проблемы является так называемый фликер-метод (от англ. «flicker» — «мерцание»). Человек наблюдает последовательность двух стимулов монохроматического излучения различной длиной волны и различной яркости. Этот метод использовался при определении спектральной чувствительности глаза человека. Данный эксперимент проводился на стробоскопе Кобленца и Эмерсона, а «фликер-эффект» достигался при помощи диска с секторными прорезями.



М – монохроматор с двумя щелями  $\text{Щ}_1$  и  $\text{Щ}_2$ , с двумя объективами  $\text{O}_1$  и  $\text{O}_2$  и призмой П, СД – секторный диск (боковой вид справа), белая поверхность которого освещается лампой накаливания Л

Рисунок 2 – Схема установки Кобленца и Эмерсона.

В качестве источника света И в данной установке используется ацетиленовое пламя, излучение от которого проходит через призмы Николя  $\text{N}_1$  и  $\text{N}_2$  на входную щель  $\text{Щ}_1$  призматического монохроматора. Выходная щель  $\text{Щ}_2$  прибора выпускает пучок монохроматического излучения. Глаз



наблюдателя располагается непосредственно за щелью Щ<sub>2</sub> тем самым сравнивая яркость монохроматического света с яркостью секторного диска СД.

В данном стробоскопе одним из ключевых элементов является диск, который приводится во вращение с определенной скоростью. На выходной щели, за которой помещался глаз наблюдателя, переменного попадает излучение, отраженное от поверхности диска и излучение, проходящее сквозь секторную прорезь. Частота мелькания определяется скоростью вращения диска. При этом угловой размер зрительной оси на выходной щели Щ<sub>2</sub> равен 2°, в соответствии с размером центрального углубления сетчатки глаза.

Как говорилось выше, поле зрения наблюдателя попеременно заполняется двумя различными по спектральному составу излучениями, другими словами он наблюдает мигание двух разноцветных стимулов. Причем частота мигания подбирается таким образом, чтобы мигания по цветности не были заметны, но важно, чтобы были заметны мигания по яркости. Например, при малой частоте 2-3 мигания в секунду наблюдатель будет отчетливо замечать смену излучения в поле зрения, а при очень большой частоте (90-100 миганий в секунду), из-за инерции зрения глаз будет получать среднее впечатление от двух излучений. В итоге даже при сильно отличающихся друг от друга мощностях излучения их будет просто невозможно визуально сравнить.

## 2 Разработка устройства

Разработанное устройство представляет собой стробоскоп с программным управлением сигналов.

Устройство состоит из:

1. Блока генерации импульсов (БГИ) для создания П-образных световых импульсов на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 3.
2. Блока усиления (БУ) для сопряжения одноплатного компьютера Raspberry Pi с RGB-лентой.
3. Камеры смешения для формирования однородного излучения.

Структурная схема стробоскопа приведена на рисунке 3.

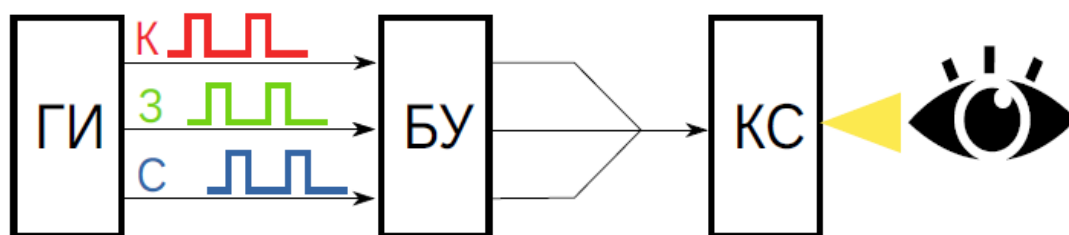


Рисунок 3 – Структурная схема устройства

Работая с одним каналом излучения можно, задавая определенные команды, провести эксперименты по определению КЧСМ и эффективной яркости. На рисунке 4 представлен график  $L(t)$ , длительность импульса равна полупериоду.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

БР-02069964-12.03.02-11-19

Лист

18

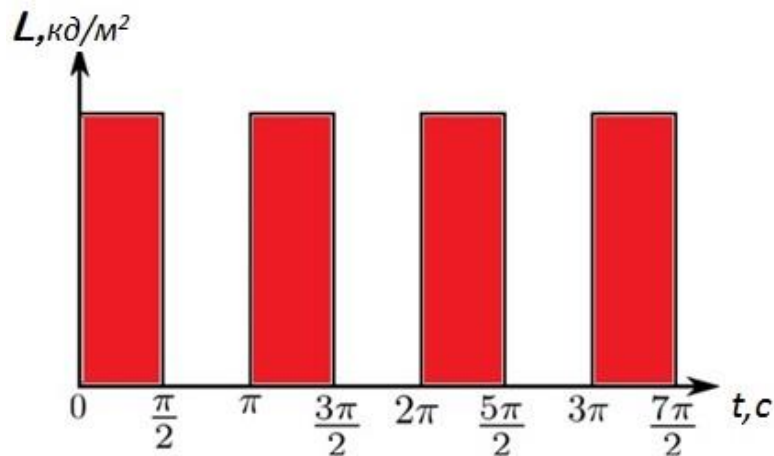


Рисунок 4 – Одиночные П-образные световые импульсы

В случае двух каналов демонстрируется суммирование двух разноцветных стимулов с повышением частоты. Причём наглядно иллюстрируется тот факт, что при приближении к критической частоте слияния мельканий цвета отдельных стимулов уже начинают смешиваться, а яркости ещё нет

Так же с помощью БГИ можно формировать три П-образный импульса, которые сдвинуты относительно друг друга таким образом, что максимум одного из импульсов совпадает с минимумами двух других [5].

Длительность каждого импульса задаётся отдельно. Период равен их сумме:  $T = t_1 + t_2 + t_3$ . Если  $1/T < \text{КЧС}$ , то наблюдатель видит последовательность стимулов: красного зелёного и синего [1]. Если  $1/T > \text{КЧС}$ , то для наблюдателя происходит усреднение стимулов, он перестаёт различать отдельные цвета, а воспринимает один суммарный цвет (рисунок 5).

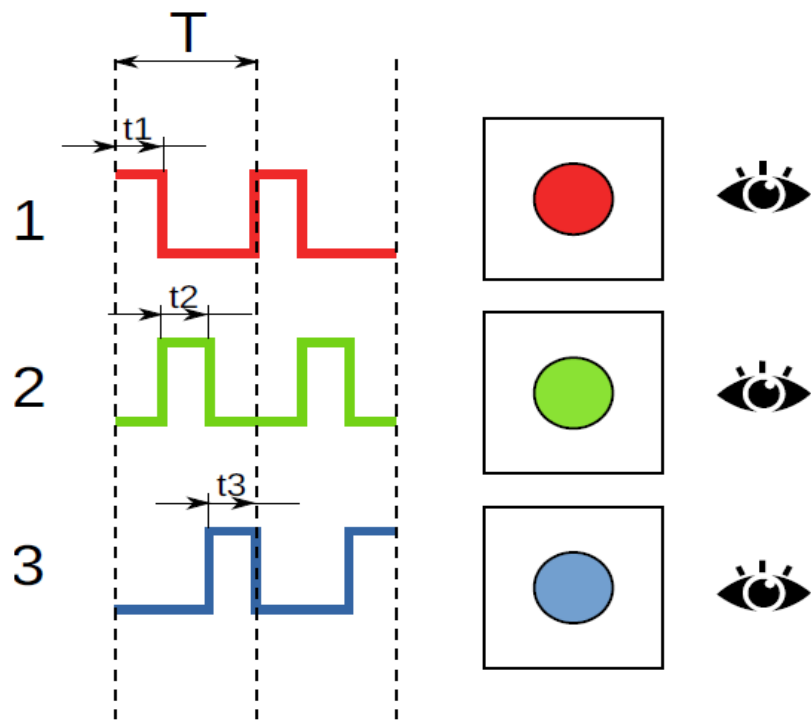


Рисунок 5 – Генерация последовательности цветных стимулов

## 2.1 Генератор импульсов

Генератор импульсов реализован на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 (рисунок 6). Компьютер размером с банковскую карту имеет на борту привычные ПК составляющие: процессор, оперативную память, разъём HDMI, композитный выход, USB, Ethernet, Wi-Fi и Bluetooth [10; 12].

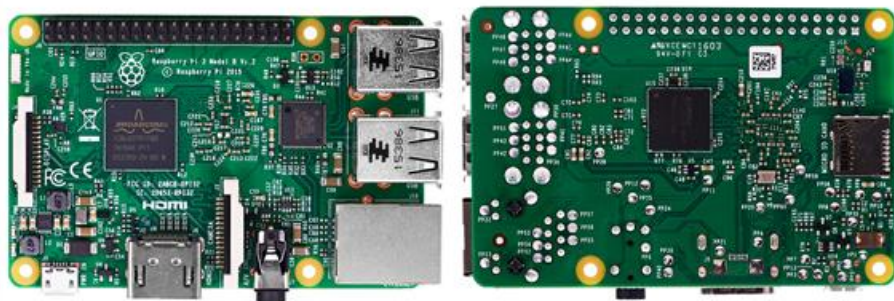


Рисунок 6 – Raspberry Pi 3



Главное преимущество Raspberry Pi — 40 контактов ввода/вывода общего назначения (GPIO). К ним можно подключать периферию для взаимодействия с внешним миром: исполнительные устройства, любые сенсоры и всё, что работает от электричества. Штатной операционной системой для Raspberry Pi является Linux. Она установлена на microSD карту, а та — в специальный слот на плате. Raspberry Pi 3 Model B является прямым наследником Raspberry Pi 2 Model B. Плата полностью совместима с предшественником, но наделена большей производительностью и новыми средствами коммуникации:

- 64-х битным четырёхядерным процессором ARM Cortex-A53 с тактовой частотой 1,2 ГГц на однокристальном чипе Broadcom BCM2837;
- встроенными Wi-Fi 802.11n и Bluetooth 4.1.

Кроме того, процессор имеет архитектуру ARMv53, а значит вы сможете использовать любимую операционную систему: Debian Wheezy, Ubuntu Mate, Fedora Remix и даже MS Windows 10 IoT.

На Raspberry Pi 3 установлен 64-х битный четырёхядерный процессор ARM Cortex-A53 с тактовой частотой 1,2 ГГц на ядро в составе однокристальной платформы Broadcom BCM2837. Данный чип обеспечивает прирост производительности на 50–60% в сравнении с Raspberry Pi 2 и почти десятикратное преимущество перед первым Raspberry Pi. Благодаря этому компьютер открывает ещё больше возможностей для «интернета вещей» и встраиваемых проектов. Raspberry Pi 3 Model B наделили 1 ГБ оперативной памяти, но эта память делится с графической подсистемой. Графический двухъядерный процессор VideoCore IV® поддерживает стандарты OpenGL ES 2.0, OpenVG, MPEG-2, VC-1 и способен кодировать, декодировать и выводить Full HD-видео (1080p, 30 FPS, H.264 High-Profile). Для подключения монитора или телевизора используйте композитный видеовыход или разъём HDMI. Разрешение варьируется от 640×350 (EGA) до 1920×1200 (WUXGA) для HDMI. Композитный выход работает в форматах

PAL и NTSC. Колонки или наушники подключаются через стандартное гнездо 3,5 мм. Также звук может передаваться по HDMI. Raspberry Pi 3 Model B предоставляет 4 USB-порта, объединённых внутренним хабом. К ним, помимо прочего, можно подключить клавиатуру и мышь. Для экономии ресурсов центрального процессора, Raspberry Pi предлагает подключения штатных модулей через 15-пиновые слоты:

- CSI-2 — для подключения камеры по интерфейсу MIPI;
- DSI — для подключения штатного дисплея.

В качестве низкоуровневых интерфейсов доступны:

- 40 портов ввода-вывода общего назначения;
- UART (Serial);
- I<sup>2</sup>C/TWI;
- SPI с селектором между двумя устройствами;
- пины питания: 3,3 В, 5 В и земля.

Для коммуникации на Raspberry Pi 3 Model B доступны интерфейсы:

- Ethernet на 10/100 Мбит с выходом на стандартное гнездо 8P8C (RJ45);
- Wi-Fi 802.11n и Bluetooth 4.1, обеспечиваемые микросхемой Broadcom BCM43438.

Питание Raspberry Pi 3 осуществляется от 5-вольтового адаптера через разъём micro-USB или пины питания. Рекомендуем использовать источник питания с силой тока не менее 2 А, чтобы иметь возможность подключать к USB-портам более энергоёмкие устройства. Аппаратный выключатель питания на плате отсутствует. Для включения компьютера достаточно подключить кабель питания. Для выключения используйте штатные функции операционной системы. Размер платы: 85×54 мм. USB-порты, Ethernet-гнездо, HDMI, аудио-гнездо выступают за обозначенные рамки на несколько миллиметров. Вместо традиционного для обычных компьютеров жёсткого диска, Raspberry Pi использует microSD флеш-карту. Она должна быть

предварительно подготовлена — на неё следует установить операционную систему. Имея несколько флеш-карт, вы можете поочередно использовать их, получив несколько изолированных образов компьютеров. Флеш-карта в комплект *не* входит. Поддерживаются карты размером от 4 ГБ. Рекомендуемый объём — не менее 8 ГБ.

### *Характеристики Raspberry Pi 3*

- Процессор: 64-битный 4-ядерный ARM Cortex-A53 с тактовой частотой 1,2 ГГц на однокристальном чипе Broadcom BCM2837;
- оперативная память: 1ГБ LPDDR2 SDRAM;
- цифровой видеовыход: HDMI;
- композитный выход: 3,5 мм (4 pin);
- USB порты: USB 2.0×4;
- сеть: WiFi 802.11n, 10/100 Мб RJ45 Ethernet;
- Bluetooth: Bluetooth 4.1, Bluetooth Low Energy;
- разъем дисплея: Display Serial Interface (DSI);
- разъем видеокмеры: MIPI Camera Serial Interface (CSI-2);
- карта памяти: MicroSD;
- порты ввода-вывода: 40;
- габариты: 85x56x17 мм.

### *Особенности работы с GPIO*

При работе с портами GPIO следует помнить о некоторых их особенностях и соблюдать определенные меры предосторожности, чтобы не повредить Raspberry Pi.

Ниже приведены основные меры предосторожности:

- максимальный суммарный ток обоих выводов 3,3 В равен 50 мА, и эти выводы могут использоваться для питания внешних устройств только в том случае, если их потребляемый ток меньше 50 мА;
- максимальный суммарный ток обоих выводов 5 В равен 300 мА, и эти выводы также могут использоваться для питания внешних устройств

только в том случае, если их потребляемый ток меньше 300 мА;

– на GPIO нельзя подавать напряжение больше 3,3 В! Цифровые выводы GPIO имеют уровни напряжения 0–3,3 В и не совместимы с традиционными уровнями напряжения 0–5 В. Если подать на вывод GPIO логическую единицу, представляющую собой 5 В (а не 3,3 В), — этот вывод может выйти из строя;

### *Характеристики Raspberry Pi 3*

– выводы GPIO14 и GPIO15 по умолчанию выполняют альтернативную функцию и являются выводами UART (RXD и TXD), поэтому после включения на них присутствует высокий уровень 3,3 В, однако программно их можно переконфигурировать в обычные выводы. Все остальные выводы GPIO после включения Raspberry Pi выполняют основную функцию и работают как обычные цифровые;

– все настраиваемые выводы GPIO — кроме GPIO0 (SDA) и GPIO1 (SCL) — по умолчанию являются входами, и поэтому имеют высокое входное сопротивление, при этом подтяжка логического уровня у них не включена, так что после включения Raspberry Pi напряжение на них может "плавать";

– выводы GPIO0 (SDA) и GPIO1 (SCL) по умолчанию "подтянуты" к питанию, поэтому после включения Raspberry Pi на них присутствует напряжение логической единицы (3,3 В);

– сигнал на любом из цифровых выводов может служить источником внешнего прерывания.

Нужно помнить, что GPIO — это выводы, непосредственно подключенные к процессору Raspberry Pi, они являются инструментом для взаимодействия с ним. Поэтому неосторожное обращение с GPIO может привести к необратимым последствиям для процессора.

Работать с GPIO можно двумя способами:

– используя оболочку bash и файловую систему Raspbian;

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докum.	Подпис	Дата		24



– используя языки программирования.

### *Управление контактами GPIO из оболочки bash*

ОС Raspbian представляет собой один из дистрибутивов Linux, а концепция Linux предполагает, что любой объект является файлом. Именно это позволяет выводить и считывать сигналы с GPIO обычными командами оболочки bash прямо в терминале. Вывод логической единицы при этом выглядит как команда записи "1" в файл, соответствующий нужному выводу:

```
$ echo "25" > /sys/class/gpio/export
$ echo "out" > /sys/class/gpio/gpio25/direction
$ echo "1" > /sys/class/gpio/gpio25/value
$ echo "0" > /sys/class/gpio/gpio25/value
```

Для чтения входов надо использовать команду cat и путь к файлу:

```
$ echo "24" > /sys/class/gpio/export
$ echo "in" > /sys/class/gpio/gpio0/direction
$ cat /sys/class/gpio/gpio24/value
```

### *Управление контактами GPIO из языка Python*

Для работы с GPIO на языке Python требуется специальная библиотека Rpi.GPIO. В новом дистрибутиве Raspbian она уже установлена, а если у вас дистрибутив старый, то для установки библиотеки RPi.GPIO выполните команду:

```
$ sudo apt-get install python-rpi.gpio
```

Чтобы использовать эту библиотеку, необходимо в программу на Python добавить строку импорта библиотеки Rpi.GPIO:

```
In [1]: import RPi.GPIO as GPIO
```

При подготовке программы можно выбрать один из двух способов нумерации портов GPIO. Первый — GPIO.BOARD — использует систему нумерации портов на плате Raspberry Pi. Преимущество этой системы нумерации в том, что ваше оборудование будет работать всегда, независимо от номера ревизии платы, — вам не придется перемонтировать свой разъем или изменять имеющийся код. Вторая система нумерации — GPIO.BCM (номера BCM). Это более низкий уровень работы — с прямым обращением к номерам каналов на процессоре (SoC) Broadcom. Выбор способа нумерации определяется соответствующими командами:

```
In [2]: GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
```

```
In [3]: GPIO.setmode(GPIO.BCM)
```

Следующие команды устанавливают режим работы контакта на вход или выход:

```
In [4]: GPIO.setup(channel, GPIO.IN)
```

```
In [5]: GPIO.setup(channel, GPIO.OUT)
```

Если входной канал ни к чему не подключен, его значение может "плыть". Следующие команды устанавливают начальную "подтяжку" вывода к питанию или к "земле":

```
In [6]: GPIO.setup(channel, GPIO.IN, GPIO.PUD_UP)
```

```
In [7]: GPIO.setup(channel, GPIO.IN, GPIO.PUD_DOWN)
```

Для выходов OUT можно установить начальное значение 0 или 1:

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докum.	Подпис	Дата		

```
In [8]: GPIO.setup(channel, GPIO.OUT, GPIO.LOW)
```

```
In [9]: GPIO.setup(channel, GPIO.OUT, GPIO.HIGH)
```

Для чтения значения контакта GPIO, настроенного как вход IN , служит следующая команда:

```
In [10]: GPIO.input(channel)
```

Значение контакта, настроенного как выход OUT , устанавливается следующей командой:

```
In [11]: GPIO.output(channel, state)
```

В листинге 1 приведен пример использования команд работы с GPIO.

Листинг 1 — Пример использования команд работы с GPIO

```
import RPi.GPIO as GPIO #подключаем библиотеку
GPIO.setmode(GPIO.BCM) #устанавливаем режим нумерации
GPIO.setup(7, GPIO.OUT) #конфигурируем GPIO 7 как выход
GPIO.setup(8, GPIO.IN) #конфигурируем GPIO 8 как вход
GPIO.output(7, True) #выводим на GPIO 7 логическую "1" (3.3 V)
GPIO.output(7, False) #выводим на GPIO 7 логический "0"
signal = GPIO.input(8) #считываем с GPIO 8 в переменную signal
GPIO.cleanup() #завершаем работу с GPIO
```

Библиотека RPi.GPIO позволяет использовать контакты GPIO в качестве выходов ШИМ (сигналов широтно-импульсной модуляции). В листинге 2 представлен пример плавного включения/выключения светодиода, подключенного к контакту.

## Листинг 2 — Пример плавного включения/выключения светодиода

```
import time
import RPi.GPIO as GPIO

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
GPIO.setup(12, GPIO.OUT)
p = GPIO.PWM(12, 50) # контакт 12 частота 50 Гц
p.start(0)
try:
    while 1:
        for dc in range(0, 101, 5):
            p.ChangeDutyCycle(dc)
            time.sleep(0.1)
        for dc in range(100, -1, -5):
            p.ChangeDutyCycle(dc)
            time.sleep(0.1)
except KeyboardInterrupt:
    pass
p.stop()
GPIO.cleanup()
```

Функция ожидания события — изменения состояния на входе IN — выглядит следующим образом:

```
GPIO.wait_for_edge(channel, GPIO.RISING)
GPIO.wait_for_edge(channel, GPIO.FALLING)
GPIO.wait_for_edge(channel, GPIO.BOTH)
```

Эта функция прерывает выполнение программы до изменения состояния на входе GPIO. В отличие от нее функция `add_event_detected()` выполняется в цикле программы, и для того, чтобы узнать об изменении состояния на контакте GPIO, необходимо в цикле проверять наступление события `event_detected()` :



```
GPIO.add_event_detect(channel, GPIO.RISING)
```

```
.....
```

```
if GPIO.event_detected(channel):  
    print('Button pressed')
```

Каждый контакт GPIO может быть настроен на работу в режиме прерывания, в этом случае при наступлении события на контакте управление передается функции обработки прерывания. Функция обработки прерывания работает в отдельном потоке, не прерывая выполнения основной программы:

```
def my_callback(channel):  
    print('обработка прерывания!')
```

```
GPIO.add_event_detect(channel, GPIO.RISING, callback=my_callback)
```

В конце любой программы рекомендуется очистить все ресурсы, которые могли использоваться. Для такой очистки в конце скрипта надо предусмотреть команду: `GPIO.cleanup()`. Для сброса одного контакта служит команда: `GPIO.cleanup(channel)` [9].

## 2.2 Блок усиления

Схема усиления (рисунок 7) предназначена для сопряжения платы Raspberry Pi 3 с линейкой светодиодов. Схема имеет три входа R, G, B. Каждый каскад представляет собой ненасыщенный ключ, в коллекторе которого находится светодиоды определённого цвета. В эмиттерах диода усилителя находятся резисторы  $R_2$ ,  $R_4$ ,  $R_6$ , которые обеспечивают отрицательную обратную связь по току и не дают транзисторам  $VT_1$ ,  $VT_2$ ,  $VT_3$  входить в глубокое насыщение, тем самым повышая частотные свойства каскадов усиления. Резисторы  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_5$  служат для компенсации тока

коллектора  $I_{к0}$ . Внешний вид блока и назначение разъёмов представлены на рисунках 8-10.

Так же на выходе блока усиления установлен реостат для регулирования тока на канале G для регулирования тока на линейке светодиодов с зеленым излучением. Блок усиления имеет активную систему охлаждения (рисунок 11). Для работы усилителя используется блок дающий на выходе 12 В, 2 А.

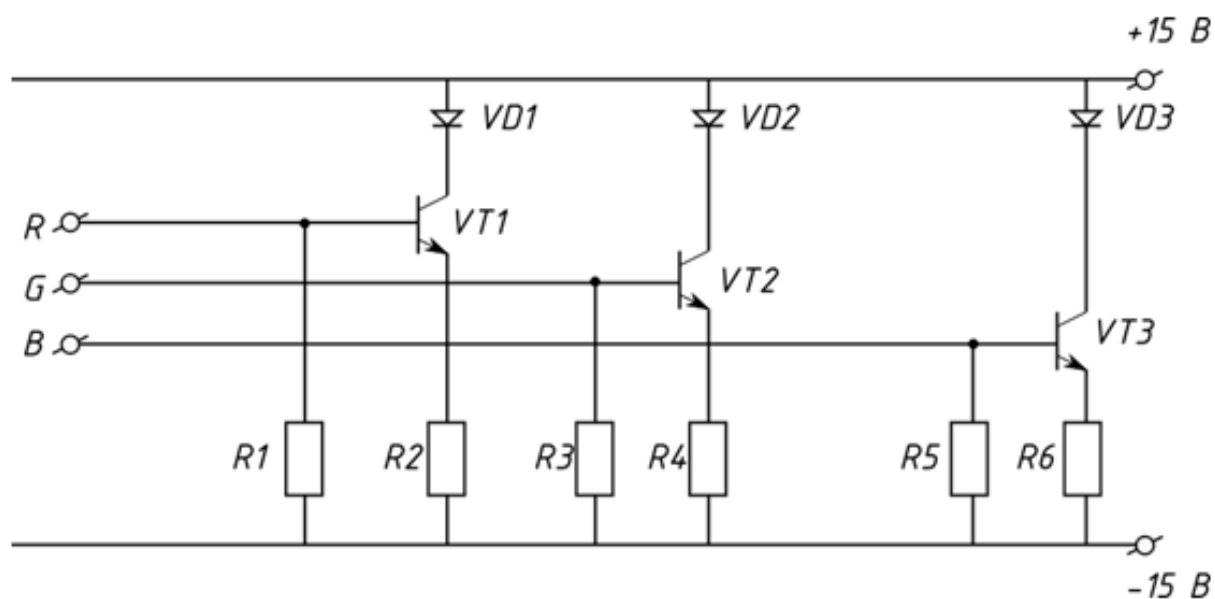


Рисунок 7 – Схема усиления

Разъём для подключения RGB - ленты

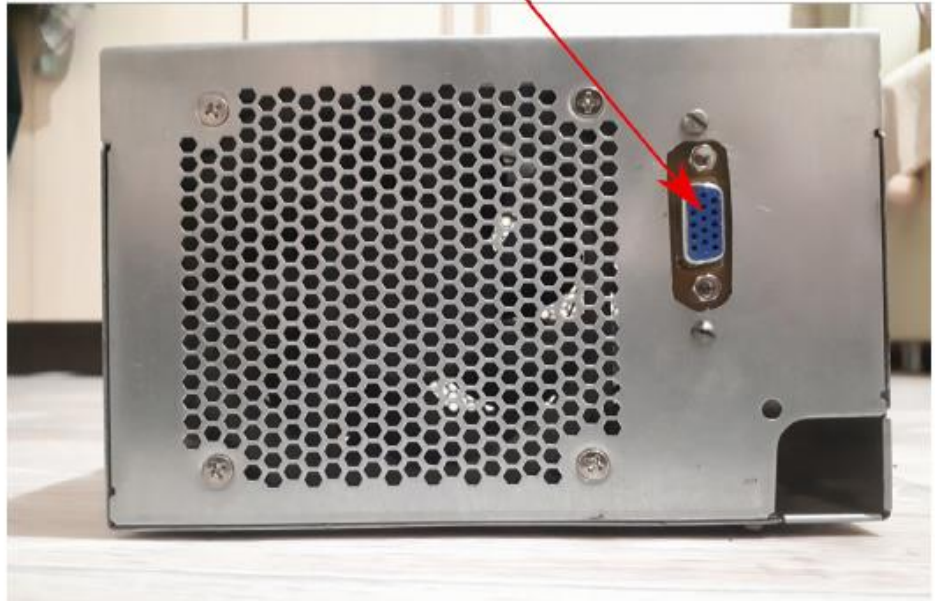


Рисунок 8 – Блок усиления. Разъем подключения RGB – ленты.

Разъём для подключения  
управляющих каналов

Разъём для подключения  
блока питания

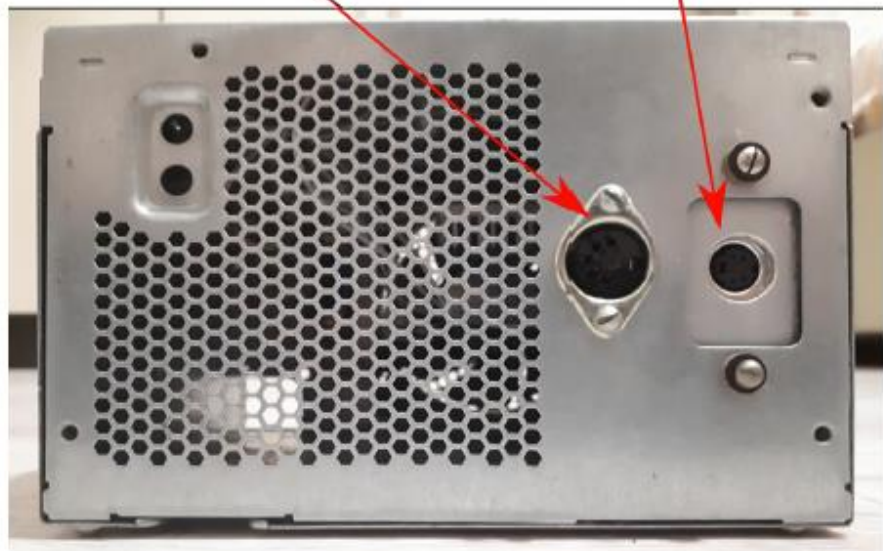


Рисунок 9 – Блок усиления. Разъем для подключения блока питания.  
Разъем для подключения управляющих каналов

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

БР-02069964-12.03.02-11-19

Лист

31



Рисунок 10 – Активная система охлаждения блока усиления



Рисунок 11 – Блок питания усилителя



## 2.3 Камера смешения излучения

Камера смешения излучения предназначена для формирования однородного по спектру излучения. Она представляет собой металлический короб, внутренняя поверхность которого выкрашена белой краской. Внутри КСИ находится RGB-лента [16] (рисунок 12). Напряжение питания ленты составляет 12 В. Источник излучения смонтирован таким образом, чтобы прямое излучение от него не попадало на выходное отверстие.



Рисунок 12 — RGB – лента

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

БР-02069964-12.03.02-11-19

Лист

33

### 3 Описание работы устройства и проведение экспериментов

Данное устройство было разработано для демонстрации явления визуальной оценки яркости разноцветных стимулов фликер-методом. Однако, в ходе выполнения работы, стало очевидным, что функционал устройства позволяет демонстрировать некоторые другие эффекты, связанные с инерцией зрения. Ниже приводятся описания некоторых из них.

#### 3.1 Определение критической частоты слияния мельканий П-образных стимулов

Критической частотой слияния мельканий называют частоту, при которой наблюдатель перестает видеть мелькания (максимальная и минимальная яркость). В нашей установке осуществлена возможность мгновенного перехода от  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$ , с П-образным графиком зависимости действующей яркости от времени. Исходный код программы приведен в листинге 1 [2].

Программа имеет интерфейс командной строки (см. листинг 3). Ей передаются 2 числа, причём 1-е число — это длительность светового импульса  $\tau_1$ , а 2-е число — это длительность паузы  $\tau_2$ . Период определяется суммой этих двух чисел. Программа написана на интерпретируемом языке Python [9]

Листинг 3 — Определение критической частоты слияния мельканий

```
#!/usr/bin/env python3
# импортируем библиотеку для работы с портами GPIO
import RPi.GPIO as GPIO
# импортируем библиотеку для взаимодействия с
# операционной системой
from os import sys
```



### 3.2 Определение эффективной яркости

Как известно, эффективная яркость – физическая величина, связанная с ощущением яркости объекта  $S$ . При длительном действии яркости  $L$ , эффективная яркость  $L_э$  будет напрямую зависеть от  $L$ , и можно считать, что в данном случае обе величины будут равны  $L_э = L$ . Но эффективная яркость  $L_э$  перестает быть равной яркости  $L$ , как только  $L$  становится величиной, переменной во времени. Здесь уже нарушается однозначная зависимость между действующей в данный момент яркостью и ощущением яркости. Эффективная яркость начинает выполнять функцию количественной характеристики зрительного ощущения [11].

Методика эксперимента заключается в том, чтобы показать связь между ощущаемой яркостью модулированного света и коэффициентом заполнения  $\varphi$ . Согласно закону Табольта [15], при  $\nu \geq \nu_{кр}$  эффективную яркость можно определить как:

$$L_э = \varphi L, \quad (10)$$

где  $L$  – яркость с длительностью равной полному периоду  $\pi$ .

В ходе эксперимента наблюдатель изменяют  $\tau_1$  и  $\tau_2$  изменяя, таким образом, коэффициент заполнения  $\varphi$ .

### 3.3 Визуальная оценка яркости разноцветных стимулов фликер-методом

Разработанное устройство является аналогом установки Кобленца и Эмерсона, о которой говорилось в пункте 1.4. С помощью нашего устройства можно сравнить разноцветные стимулы фликер-методом и визуально

уровнять их по яркости.

В устройстве используется блок генерации импульсов (БГИ) состоящий из одноплатного компьютера Raspberry Pi 3. Используя два порта GPIO, мы можем изменять частоту сигналов, проходящих по этим каналам, с помощью программы на языке Python. Исходный код программы приведен в листинге 4.

Листинг 4 — Управление двумя световыми стимулами

```
#!/usr/bin/env python3
# импортируем библиотеку для работы с портами GPIO
import RPi.GPIO as GPIO
# импортируем библиотеку для взаимодействия с
# операционной системой
from os import sys
# импортируем библиотеку для работы со временем
import time
# настраиваем порты №18, 23 на вывод
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(18, GPIO.OUT)
GPIO.setup(23, GPIO.OUT)
# цикл включения-выключения светодиодов
try:
    while True:
        GPIO.output(18, True)
        GPIO.output(23, False)
        time.sleep(float(sys.argv[1]))
        GPIO.output(18, False)
        GPIO.output(23, True)
        time.sleep(float(sys.argv[2]))
except KeyboardInterrupt:
    GPIO.cleanup()
    sys.exit(0)
```



На выходе блока усиления смонтирован реостат, с помощью него, с помощью него можно изменять силу тока проходящего по каналу, тем самым изменяя мощность излучения. Минимальная яркость излучения соответствует дневному зрению человека, при котором основными цветочувствительными рецепторами являются колбочки.

Для проведения эксперимента необходимо было подобрать частоту, при которой наблюдатель все еще будет замечать мигания по яркости. При малых частотах мелькания стимулов (10-15 Гц) наблюдатель отчетливо замечает равные по длительности мигания красного и зеленого сигнала. При высокой частоте (100 Гц) происходит сложение цветов, и глаз получает изображение однородного смешенного цвета. Для проведения эксперимента была выбрана частота 66 Гц, эта частота ниже КЧСМ и глаз все еще замечать мигания по яркости, но уже перестает замечать мигания по цветности.

Мигания по яркости объясняются различной яркостью излучения, а точнее разностью между известной яркости стимула и эффективной яркости на сетчатке. На рисунке 13 изображен график, на котором представлены П - образные сигналы зелёного и красного излучений, генерируемые устройством.

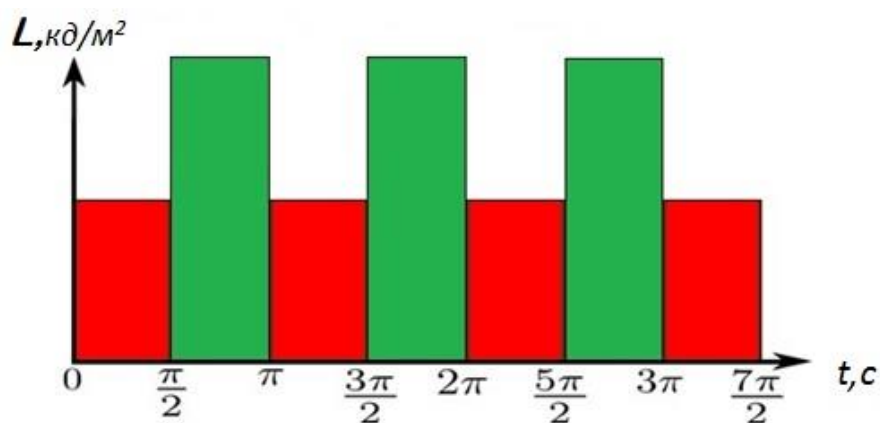


Рисунок 13 — График зависимости различных по мощности световых сигналов

Наблюдая выше описанную картину в выходное отверстие установки, регулируется яркость зеленого стимула. Изменение мощности сигнала достигается при помощи реостата на 100 Ом. При вращении ручки реостата достигается минимальное мелькание стимулов или полное отсутствие. В этот момент происходит выравнивание сигналов по яркости. Стоит отметить, что для каждого наблюдателя значение на реостате будет различным ввиду индивидуальных особенностей строения органа зрения, но как показывает практика, расхождение в значениях будет незначительное.

Для начала построили градуировочную кривую яркости светодиода от его тока. В качестве прибора для измерения яркости использовался люксметр/яркомер «ТКА-ПКМ», представленный на рисунке 14 .



Рисунок 14 – Люксметр/яркомер «ТКА-ПКМ»

При измерения силы тока проходящего по каналу питания зеленого светодиода использовался мультиметр М-838, представленный на рисунке 15.



Рисунок 15 – Мультиметр М-838

Для определения зависимости яркости зеленого сигнала от силы тока были сняты соответствующие значения, результат представлен в таблице 1.

Таблица 1 — Зависимость яркости от силы тока зеленого светодиода

I, mA	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
L, кд/м <sup>2</sup>	63	79	97	114	127	141	159	171	189	200	211	222	235	250

Далее по снятым значениям был построен градуировочный график, представленный на рисунке 16.

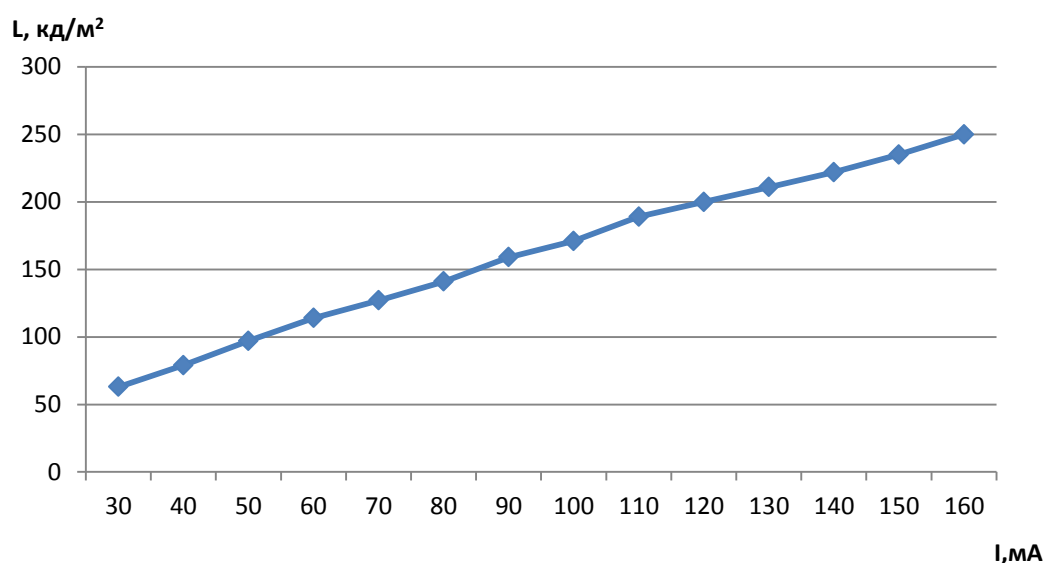


Рисунок 16 — График зависимости яркости зеленого стимула от силы тока

Далее был проведён эксперимент по определению яркости красного излучения. Для чего экспериментальным путём было установлено, что при частоте мельканий разноцветных стимулов 66 Гц наиболее очевидно проявляется эффект, когда с одной стороны при выравнивании их яркости мелькания минимизируются, а с другой при разных яркостях мелькания заметны. После чего изменяя положение поворотной ручки реостата, мы добились минимальных мельканий на выходном отверстии камеры смещения. Затем мы замерили значение тока на канале зеленого светодиода и сопоставили его с графиком зависимости  $L(I)$ . Благодаря этому была определена яркость зеленого светодиода, она равна  $141 \text{ кд/м}^2$ . На рисунке 17 представлен график, после визуального выравнивания яркости фликер-

методом. Таким образом, яркость красного светодиода также составила 141 кд/м<sup>2</sup>.

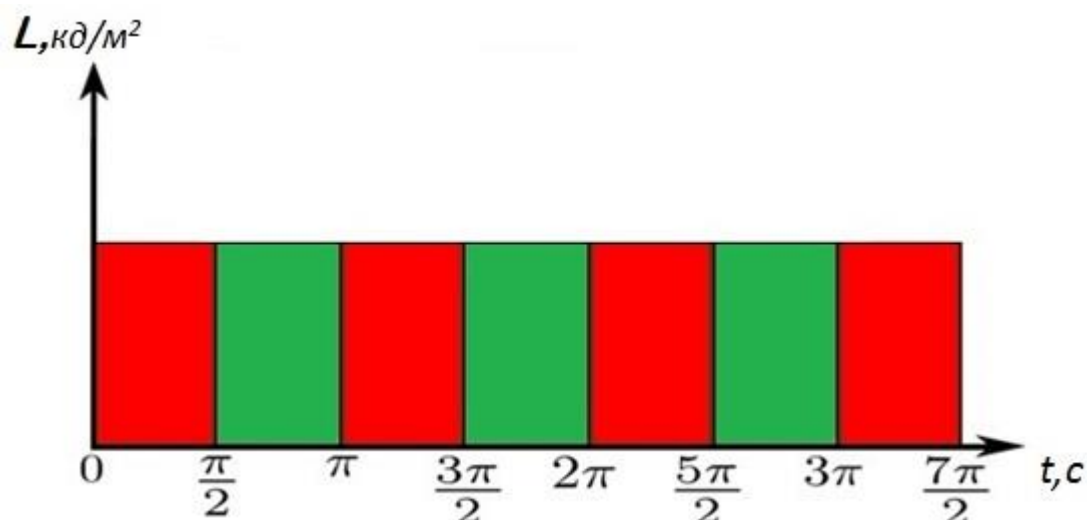


Рисунок 17 — График зависимости равных по яркости световых сигналов

Далее мы измерили яркость красного светодиода уже люксометром/яркомером ТКА-ПКМ. Она составила 140 кд/м<sup>2</sup>. Из этого мы делаем вывод, что яркость зеленого стимула максимально приближена к красной. Другими словами произошло визуальное уравнивание яркости последовательно мелькающих зеленого и красного стимулов.

### 3.4 Изменение эффективной яркости при использовании фликер-метода для определения визуальной оценки яркости двух разноцветных стимулов

Проведем подобный эксперимент в котором изменение яркости зеленого сигнала будет происходить не с помощью силы питающего тока, а при помощи при помощи программного кода. Смысл заключается в том,





разработан эксперимент в ходе которого получена относительная спектральная чувствительность глаза человека. Для проведения подобного эксперимента необходимо установить на один из световых каналов монохроматор. Это позволит с точностью воспроизводить определенные длины волн в видимом диапазоне излучения. В данном случае открывается возможность для повторения эксперимента на устройстве, выполненном на электронно-компонентной базе. Точность будет отличаться из-за того, что в установке Кобленца и Эмерсона использовался диск с секторными прорезями и поэтому при вращении через прорезь свет проходил не мгновенно, а плавно, что негативно сказывается на точности эксперимента. В нашей же установке, световой стимул на зрачок наблюдателя подается и исчезает мгновенно (тысячные доли секунды).

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы, поставленные цель и задачи были полностью решены. Так было разработано устройство, позволяющее визуально сравнить яркости разноцветных стимулов фликер-методом. Так же в ходе выполнения работы было установлено, что функционал устройства позволяет демонстрировать такие понятия связанные с инерцией зрения как: критическая частота слияния мельканий, эффективная яркость. При дальнейшей установке в схему монохроматора открывается возможность повторить эксперимент по определению относительной спектральной кривой глаза человека.

Устройство представляет собой стробоскоп, генерирующий П-образные последовательности цветных стимулов. Основной задачей устройства изменять яркость одного светового стимула для сопоставления с яркостью стимула другого цвета. Так же изменяя частоту пульсации излучения можно определить критическую частоту слияния мельканий, а изменяя время горения одного стимула в течении периода можно демонстрировать такое явления как эффективная яркость. Управление стробоскопом осуществляется посредством одноплатного компьютера Raspberry Pi. Исходный код программ представлен в листингах 3 и 4.

Бакалаврская работа была нацелена на удовлетворение потребностей института электроники и светотехники в учебном оборудовании.

В заключение скажем, что данная установка является эффективным инструментом для изучения данного явления в образовательных целях. Предполагается задействовать установку для лабораторного практикума по следующим дисциплинам: «Основы светотехники и колориметрии», «Основы физиологической оптики и колориметрии» и «Основы физиологической оптики».

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпис	Дата		45

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 55703 - 2013 Источники света электрические. Методы измерений спектральных и цветовых характеристик. – Введ. 2014 - 07 - 01. – М.: Стандартиформ, 2015. – 54 с.
2. Голдовский Е.М. Физические основы кинотехники / Е.М. Голдовский. – Москва: Госкиноиздат, 1939. – 635 с.
3. Гуревич М.М. Цвет и его измерение / М.М. Гуревич. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1950. – 234 с.
4. Джадд Д.Р. Цвет в науке и технике: Пер. с англ / Д.Р. Джадд, Г. Вышецки, Л.Ф. Артюшин. – Москва: Мир, 1978. – 592 с.
5. Домасев М.В. Цвет, управление цветом, цветовые расчёты и измерения. / М.В. Домасев, С.П. Гнатюк. – СПб.: Питер, 2009. – 224 с.
6. Кравков С.В. Глаз и его работа: Психофизиология зрения. Гигиена освещения : 170 рис. в тексте / С.В. Кравков. – Москва ; Ленинград: Биомедгиз, 1936. – 354 с.
7. Луизов А.В. Глаз и свет / А.В. Луизов. – Л: Энергоатомиздат Ленингр. отд-ние, 1983. – 135 с.
8. Луизов А.В. Инерция зрения / А.В. Луизов. – Москва: Оборонгиз, 1961. – 249 с.
9. Лутц М. Изучаем Python: эффективное объектно-ориентированное программирование / М. Лутц. – Санкт-Петербург ; Москва: Символ, 2011. – 1272 с.
10. Магда Ю.С. Raspberry Pi. Руководство по настройке и применению / Ю.С. Магда. – Москва: ДМК Пресс, 2014. – 183 с.
11. Мешков В.В. Основы светотехники ч. II. / В.В. Мешков, А.В. Матвеев. – М.: Энергия, 1989. – 386 с.
12. Петин В.А. Микрокомпьютеры Raspberry Pi: практическое руководство : [подбор и настройка оборудования, операционные системы для

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		46

Raspberry Pi, проекты использования Raspberry Pi, медиаплеер RaspBMC, контакты GPIO и платы расширения] : Электроника / В.А. Петин. – Санкт-Петербург, 2015. – 240 с.

13. Роженцов В.В. Методы и средства контроля функционального состояния человека на основе временных характеристик зрительного анализатора: диссертация ... доктора технических наук: 05.11.13 / В.В. Роженцов. – Казань, 2007. – 214-227 с.

14. Русяйкин В.С. Разработка и применение библиотеки подпрограмм для колориметрических расчётов / В.С. Русяйкин, С.В. Прытков, К.А. Смолин. – 2017. – 389-395 с.

15. Справочная книга по светотехнике / ред. Ю.Б. Айзенберг, М.М. Гуторов. – М: Энергоатомиздат, 1995. – 526 с.

16. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / Ф.Е. Шуберт. – Москва: Физматлит, 2008. – 488 с.

17. Ohta N. Colorimetry. Fundamentals and Applications / N. Ohta, A.R. Robertson. – John Wiley & Sons, Ltd, 2005. – 329 с.

18. Schanda J. Colorimetria : understanding the CIE system / J. Schanda. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 453 с.

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

47

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

### Спектральное распределение энергетической яркости R — канала стробоскопа

$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм	$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм	$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм	$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм
1	2	3	4	5	6	7	8
380	2,29E-06	404	1,90E-06	428	2,72E-07	452	1,33E-07
381	2,24E-06	405	2,36E-06	429	1,16E-06	453	6,36E-07
382	2,11E-06	406	1,48E-06	430	9,49E-07	454	6,11E-07
383	2,32E-06	407	5,52E-07	431	9,08E-08	455	5,84E-07
384	2,94E-06	408	0,00E+00	432	3,12E-07	456	5,86E-07
385	3,03E-06	409	0,00E+00	433	1,70E-06	457	2,26E-07
386	2,99E-06	410	1,06E-06	434	3,09E-06	458	9,06E-08
387	3,19E-06	411	2,11E-06	435	2,19E-06	459	4,79E-07
388	2,23E-06	412	1,08E-06	436	1,54E-07	460	4,14E-07
389	3,94E-07	413	0,00E+00	437	2,85E-08	461	5,68E-08
390	0,00E+00	414	0,00E+00	438	7,48E-07	462	4,53E-07
391	1,25E-07	415	1,03E-06	439	7,77E-07	463	1,26E-06
392	5,36E-07	416	2,00E-06	440	2,71E-07	464	1,72E-06
393	1,21E-06	417	1,01E-06	441	2,98E-08	465	1,28E-06
394	1,75E-06	418	0,00E+00	442	7,86E-07	466	5,71E-07
395	1,10E-06	419	0,00E+00	443	1,12E-06	467	8,91E-07
396	3,47E-08	420	3,99E-07	444	2,94E-07	468	1,82E-06
397	0,00E+00	421	6,59E-07	445	1,53E-07	469	2,32E-06
398	3,55E-07	422	3,48E-07	446	5,81E-07	470	1,54E-06
399	1,30E-06	423	4,96E-09	447	1,53E-07	471	1,70E-07
400	2,35E-06	424	2,10E-08	448	2,34E-07	472	0,00E+00
401	2,32E-06	425	1,19E-07	449	1,47E-06	473	8,70E-08
402	6,59E-07	426	7,30E-08	450	1,36E-06	474	8,24E-08
403	2,98E-07	427	0,00E+00	451	1,35E-07	475	4,73E-08

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

БР-02069964-12.03.02-11-19

Лист

48



1	2	3	4	5	6	7	8
476	5,68E-08	506	7,91E-09	536	1,87E-06	566	1,02E-05
477	0,00E+00	507	6,50E-07	537	1,84E-06	567	1,19E-05
478	1,03E-07	508	9,44E-07	538	1,08E-06	568	1,34E-05
479	4,38E-07	509	3,40E-07	539	1,97E-07	569	1,47E-05
480	4,71E-07	510	0,00E+00	540	8,59E-08	570	1,70E-05
481	1,08E-07	511	0,00E+00	541	9,61E-07	571	1,88E-05
482	0,00E+00	512	8,97E-07	542	2,33E-06	572	1,94E-05
483	2,59E-07	513	1,48E-06	543	2,68E-06	573	2,12E-05
484	1,62E-06	514	1,15E-06	544	1,69E-06	574	2,49E-05
485	2,18E-06	515	7,94E-07	545	8,81E-07	575	2,93E-05
486	1,64E-06	516	9,28E-07	546	9,45E-07	576	3,28E-05
487	9,49E-07	517	1,44E-06	547	1,67E-06	577	3,56E-05
488	4,19E-07	518	1,23E-06	548	1,66E-06	578	4,01E-05
489	1,07E-07	519	1,80E-07	549	1,21E-06	579	4,58E-05
490	5,04E-08	520	4,99E-07	550	2,71E-06	580	5,09E-05
491	6,23E-08	521	1,85E-06	551	4,11E-06	581	5,68E-05
492	0,00E+00	522	2,30E-06	552	2,89E-06	582	6,48E-05
493	1,88E-07	523	2,46E-06	553	2,45E-06	583	7,43E-05
494	1,15E-06	524	2,63E-06	554	3,84E-06	584	8,40E-05
495	1,71E-06	525	1,41E-06	555	4,20E-06	585	9,35E-05
496	1,54E-06	526	5,81E-08	556	3,59E-06	586	1,05E-04
497	1,22E-06	527	8,13E-07	557	3,38E-06	587	1,20E-04
498	1,72E-06	528	1,37E-06	558	4,11E-06	588	1,36E-04
499	2,93E-06	529	3,50E-07	559	5,30E-06	589	1,54E-04
500	2,23E-06	530	1,62E-08	560	5,76E-06	590	1,75E-04
501	1,99E-07	531	9,16E-07	561	5,97E-06	591	1,98E-04
502	0,00E+00	532	2,09E-06	562	6,76E-06	592	2,21E-04
503	1,16E-07	533	2,17E-06	563	7,71E-06	593	2,47E-04
504	1,28E-07	534	1,13E-06	564	8,49E-06	594	2,78E-04
505	0,00E+00	535	1,12E-06	565	9,14E-06	595	3,14E-04

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

49

1	2	3	4	5	6	7	8
596	3,53E-04	626	1,08E-02	656	2,97E-04	686	1,77E-05
597	3,97E-04	627	1,14E-02	657	2,65E-04	687	1,75E-05
598	4,47E-04	628	1,19E-02	658	2,37E-04	688	1,80E-05
599	5,05E-04	629	1,21E-02	659	2,13E-04	689	1,84E-05
600	5,71E-04	630	1,22E-02	660	1,92E-04	690	1,85E-05
601	6,45E-04	631	1,19E-02	661	1,74E-04	691	1,86E-05
602	7,30E-04	632	1,14E-02	662	1,56E-04	692	1,84E-05
603	8,31E-04	633	1,05E-02	663	1,38E-04	693	1,59E-05
604	9,44E-04	634	9,51E-03	664	1,21E-04	694	1,30E-05
605	1,06E-03	635	8,38E-03	665	1,07E-04	695	1,40E-05
606	1,21E-03	636	7,27E-03	666	9,51E-05	696	1,58E-05
607	1,39E-03	637	6,22E-03	667	8,32E-05	697	1,51E-05
608	1,58E-03	638	5,28E-03	668	7,18E-05	698	1,42E-05
609	1,80E-03	639	4,45E-03	669	6,27E-05	699	1,37E-05
610	2,06E-03	640	3,75E-03	670	5,55E-05	700	1,28E-05
611	2,36E-03	641	3,18E-03	671	4,93E-05	701	1,29E-05
612	2,69E-03	642	2,70E-03	672	4,42E-05	702	1,42E-05
613	3,06E-03	643	2,29E-03	673	4,00E-05	703	1,40E-05
614	3,46E-03	644	1,95E-03	674	3,65E-05	704	1,27E-05
615	3,92E-03	645	1,65E-03	675	3,40E-05	705	1,18E-05
616	4,41E-03	646	1,40E-03	676	3,24E-05	706	1,19E-05
617	4,94E-03	647	1,19E-03	677	3,05E-05	707	1,23E-05
618	5,52E-03	648	1,00E-03	678	2,80E-05	708	1,20E-05
619	6,11E-03	649	8,52E-04	679	2,53E-05	709	1,12E-05
620	6,72E-03	650	7,23E-04	680	2,42E-05	710	1,07E-05
621	7,37E-03	651	6,14E-04	681	2,38E-05	711	1,12E-05
622	8,05E-03	652	5,24E-04	682	2,19E-05	712	1,15E-05
623	8,72E-03	653	4,49E-04	683	2,05E-05	713	9,47E-06
624	9,43E-03	654	3,88E-04	684	2,04E-05	714	7,81E-06
625	1,02E-02	655	3,38E-04	685	1,93E-05	715	8,36E-06

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

50

1	2	3	4	5	6	7	8
716	8,99E-06	746	6,79E-06	776	6,32E-06		
717	8,70E-06	747	5,73E-06	777	3,28E-06		
718	7,84E-06	748	5,28E-06	778	2,61E-06		
719	7,81E-06	749	6,13E-06	779	4,29E-06		
720	8,35E-06	750	6,85E-06	780	5,96E-06		
721	7,01E-06	751	6,26E-06				
722	4,42E-06	752	4,36E-06				
723	3,01E-06	753	3,40E-06				
724	5,32E-06	754	4,75E-06				
725	8,89E-06	755	6,07E-06				
726	7,79E-06	756	6,17E-06				
727	5,89E-06	757	5,18E-06				
728	7,14E-06	758	3,48E-06				
729	8,75E-06	759	2,13E-06				
730	8,59E-06	760	2,79E-06				
731	6,39E-06	761	4,27E-06				
732	5,68E-06	762	4,72E-06				
733	7,20E-06	763	5,28E-06				
734	6,91E-06	764	6,26E-06				
735	5,49E-06	765	6,42E-06				
736	5,19E-06	766	5,27E-06				
737	4,57E-06	767	3,35E-06				
738	3,77E-06	768	2,64E-06				
739	4,73E-06	769	2,88E-06				
740	5,83E-06	770	2,66E-06				
741	5,41E-06	771	3,37E-06				
742	4,84E-06	772	4,52E-06				
743	5,13E-06	773	2,65E-06				
744	6,43E-06	774	1,66E-06				
745	7,28E-06	775	5,40E-06				

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

51

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

### Спектральное распределение энергетической яркости G — канала стробоскопа

$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм	$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм	$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм	$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм
1	2	3	4	5	6	7	8
380	3,12E-05	406	9,82E-05	432	2,50E-03	458	1,62E-02
381	3,30E-05	407	9,88E-05	433	2,92E-03	459	1,49E-02
382	3,55E-05	408	1,03E-04	434	3,40E-03	460	1,38E-02
383	4,06E-05	409	1,13E-04	435	3,95E-03	461	1,27E-02
384	4,51E-05	410	1,21E-04	436	4,58E-03	462	1,17E-02
385	4,34E-05	411	1,29E-04	437	5,34E-03	463	1,08E-02
386	3,98E-05	412	1,41E-04	438	6,19E-03	464	1,00E-02
387	4,08E-05	413	1,54E-04	439	7,07E-03	465	9,25E-03
388	4,59E-05	414	1,69E-04	440	8,06E-03	466	8,52E-03
389	5,05E-05	415	1,86E-04	441	9,15E-03	467	7,91E-03
390	5,01E-05	416	2,08E-04	442	1,04E-02	468	7,33E-03
391	4,80E-05	417	2,40E-04	443	1,17E-02	469	6,73E-03
392	4,98E-05	418	2,78E-04	444	1,31E-02	470	6,18E-03
393	5,38E-05	419	3,22E-04	445	1,45E-02	471	5,67E-03
394	5,71E-05	420	3,71E-04	446	1,58E-02	472	5,16E-03
395	5,66E-05	421	4,30E-04	447	1,71E-02	473	4,69E-03
396	5,59E-05	422	5,09E-04	448	1,82E-02	474	4,27E-03
397	5,99E-05	423	6,01E-04	449	1,92E-02	475	3,88E-03
398	6,44E-05	424	7,00E-04	450	1,99E-02	476	3,50E-03
399	6,72E-05	425	8,17E-04	451	2,05E-02	477	3,16E-03
400	6,98E-05	426	9,62E-04	452	2,07E-02	478	2,86E-03
401	7,24E-05	427	1,14E-03	453	2,05E-02	479	2,61E-03
402	7,45E-05	428	1,34E-03	454	2,00E-02	480	2,38E-03
403	7,69E-05	429	1,58E-03	455	1,92E-02	481	2,17E-03
404	8,12E-05	430	1,85E-03	456	1,83E-02	482	2,00E-03
405	9,02E-05	431	2,14E-03	457	1,73E-02	483	1,83E-03

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

БР-02069964-12.03.02-11-19

Лист

52

1	2	3	4	5	6	7	8
484	1,67E-03	437	5,34E-03	467	7,91E-03	497	5,51E-04
485	1,53E-03	438	6,19E-03	468	7,33E-03	498	5,09E-04
486	1,40E-03	439	7,07E-03	469	6,73E-03	499	4,79E-04
487	1,29E-03	440	8,06E-03	470	6,18E-03	500	4,48E-04
488	1,19E-03	441	9,15E-03	471	5,67E-03	501	4,16E-04
489	1,09E-03	442	1,04E-02	472	5,16E-03	502	3,88E-04
490	9,91E-04	443	1,17E-02	473	4,69E-03	503	3,62E-04
491	9,07E-04	444	1,31E-02	474	4,27E-03	504	3,40E-04
492	8,36E-04	445	1,45E-02	475	3,88E-03	505	3,21E-04
493	7,69E-04	446	1,58E-02	476	3,50E-03	506	3,04E-04
494	7,04E-04	447	1,71E-02	477	3,16E-03	507	2,86E-04
495	6,47E-04	448	1,82E-02	478	2,86E-03	508	2,69E-04
496	5,98E-04	449	1,92E-02	479	2,61E-03	509	2,55E-04
497	5,51E-04	450	1,99E-02	480	2,38E-03	510	2,41E-04
498	5,09E-04	451	2,05E-02	481	2,17E-03	511	2,27E-04
499	4,79E-04	452	2,07E-02	482	2,00E-03	512	2,17E-04
500	4,48E-04	453	2,05E-02	483	1,83E-03	513	2,09E-04
501	4,16E-04	454	2,00E-02	484	1,67E-03	514	2,04E-04
502	3,88E-04	455	1,92E-02	485	1,53E-03	515	1,96E-04
503	3,62E-04	456	1,83E-02	486	1,40E-03	516	1,86E-04
504	3,40E-04	457	1,73E-02	487	1,29E-03	517	1,80E-04
505	3,21E-04	458	1,62E-02	488	1,19E-03	518	1,76E-04
506	3,04E-04	459	1,49E-02	489	1,09E-03	519	1,72E-04
507	2,86E-04	460	1,38E-02	490	9,91E-04	520	1,63E-04
508	2,69E-04	461	1,27E-02	491	9,07E-04	521	1,54E-04
509	2,55E-04	462	1,17E-02	492	8,36E-04	522	1,49E-04
510	2,41E-04	463	1,08E-02	493	7,69E-04	523	1,47E-04
434	3,40E-03	464	1,00E-02	494	7,04E-04	524	1,45E-04
435	3,95E-03	465	9,25E-03	495	6,47E-04	525	1,42E-04
436	4,58E-03	466	8,52E-03	496	5,98E-04	526	1,39E-04

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

53

1	2	3	4	5	6	7	8
527	1,37E-04	556	9,51E-05	585	7,28E-05	614	5,34E-05
528	1,34E-04	557	9,41E-05	586	7,28E-05	615	4,97E-05
529	1,29E-04	558	9,34E-05	587	7,18E-05	616	4,82E-05
530	1,26E-04	559	9,31E-05	588	6,96E-05	617	4,83E-05
531	1,24E-04	560	9,20E-05	589	6,76E-05	618	4,71E-05
532	1,21E-04	561	9,01E-05	590	6,76E-05	619	4,64E-05
533	1,20E-04	562	8,85E-05	591	6,63E-05	620	4,77E-05
534	1,21E-04	563	8,86E-05	592	6,42E-05	621	4,89E-05
535	1,19E-04	564	8,90E-05	593	6,65E-05	622	4,81E-05
536	1,16E-04	565	8,61E-05	594	6,84E-05	623	4,50E-05
537	1,16E-04	566	8,37E-05	595	6,37E-05	624	4,42E-05
538	1,15E-04	567	8,50E-05	596	6,14E-05	625	4,61E-05
539	1,13E-04	568	8,50E-05	597	6,35E-05	626	4,46E-05
540	1,10E-04	569	8,27E-05	598	6,10E-05	627	4,26E-05
541	1,10E-04	570	8,20E-05	599	5,74E-05	628	4,41E-05
542	1,10E-04	571	8,13E-05	600	5,81E-05	629	4,47E-05
543	1,10E-04	572	7,92E-05	601	5,76E-05	630	4,32E-05
544	1,09E-04	573	7,89E-05	602	5,57E-05	631	4,25E-05
545	1,09E-04	574	8,01E-05	603	5,85E-05	632	4,33E-05
546	1,08E-04	575	7,97E-05	604	5,99E-05	633	4,40E-05
547	1,05E-04	576	7,85E-05	605	5,46E-05	634	4,11E-05
548	1,03E-04	577	7,78E-05	606	5,11E-05	635	3,75E-05
549	1,02E-04	578	7,63E-05	607	5,21E-05	636	3,93E-05
550	1,01E-04	579	7,39E-05	608	5,34E-05	637	4,12E-05
551	1,00E-04	580	7,23E-05	609	5,37E-05	638	3,88E-05
552	9,99E-05	581	7,19E-05	610	5,33E-05	639	3,71E-05
553	9,88E-05	582	7,24E-05	611	5,34E-05	640	3,70E-05
554	9,65E-05	583	7,27E-05	612	5,44E-05	641	3,61E-05
555	9,55E-05	584	7,26E-05	613	5,51E-05	642	3,58E-05

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

54



1	2	3	4	5	6	7	8
643	3,65E-05	673	2,13E-05	703	1,54E-05	733	7,33E-06
644	3,57E-05	674	2,35E-05	704	1,37E-05	734	8,34E-06
645	3,42E-05	675	2,47E-05	705	1,32E-05	735	8,73E-06
646	3,47E-05	676	2,33E-05	706	1,28E-05	736	8,90E-06
647	3,53E-05	677	2,16E-05	707	1,22E-05	737	8,46E-06
648	3,47E-05	678	2,04E-05	708	1,23E-05	738	8,58E-06
649	3,34E-05	679	1,95E-05	709	1,22E-05	739	1,13E-05
650	3,23E-05	680	1,86E-05	710	1,14E-05	740	1,27E-05
651	3,22E-05	681	1,85E-05	711	1,23E-05	741	9,64E-06
652	3,27E-05	682	1,97E-05	712	1,41E-05	742	5,85E-06
653	3,22E-05	683	2,00E-05	713	1,36E-05	743	4,97E-06
654	2,87E-05	684	1,88E-05	714	1,21E-05	744	8,25E-06
655	2,65E-05	685	1,91E-05	715	1,15E-05	745	1,02E-05
656	2,84E-05	686	2,04E-05	716	1,25E-05	746	7,97E-06
657	2,80E-05	687	2,06E-05	717	1,36E-05	747	5,21E-06
658	2,52E-05	688	2,01E-05	718	1,28E-05	748	4,08E-06
659	2,54E-05	689	1,92E-05	719	1,14E-05	749	5,12E-06
660	2,71E-05	690	1,74E-05	720	1,04E-05	750	7,21E-06
661	2,74E-05	691	1,65E-05	721	9,16E-06	751	8,39E-06
662	2,55E-05	692	1,76E-05	722	8,25E-06	752	6,84E-06
663	2,39E-05	693	1,83E-05	723	8,22E-06	753	5,04E-06
664	2,57E-05	694	1,83E-05	724	8,58E-06	754	5,16E-06
665	2,73E-05	695	1,92E-05	725	9,25E-06	755	5,08E-06
666	2,67E-05	696	1,89E-05	726	1,04E-05	756	4,28E-06
667	2,66E-05	697	1,62E-05	727	9,95E-06	757	3,90E-06
668	2,57E-05	698	1,40E-05	728	7,77E-06	758	4,72E-06
669	2,22E-05	699	1,36E-05	729	8,59E-06	759	6,82E-06
670	2,17E-05	700	1,45E-05	730	1,05E-05	760	9,27E-06
671	2,42E-05	701	1,58E-05	731	8,33E-06	761	9,57E-06
672	2,31E-05	702	1,64E-05	732	6,38E-06	762	6,25E-06

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

55

1	2	3	4	5	6	7	8
763	3,29E-06						
764	3,92E-06						
765	8,26E-06						
766	9,43E-06						
767	4,58E-06						
768	3,80E-06						
769	6,70E-06						
770	5,90E-06						
771	3,98E-06						
772	3,46E-06						
773	3,10E-06						
774	2,12E-06						
775	9,69E-07						
776	2,21E-06						
777	4,56E-06						
778	3,85E-06						
779	4,00E-06						
780	7,42E-06						

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

56

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

### Спектральное распределение энергетической яркости В — канала стробоскопа

$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм	$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм	$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм	$\lambda$ , нм	$L_e$ , Вт/ср*м <sup>2</sup> *нм
1	2	3	4	5	6	7	8
380	3,12E-05	406	9,82E-05	432	2,50E-03	458	1,62E-02
381	3,30E-05	407	9,88E-05	433	2,92E-03	459	1,49E-02
382	3,55E-05	408	1,03E-04	434	3,40E-03	460	1,38E-02
383	4,06E-05	409	1,13E-04	435	3,95E-03	461	1,27E-02
384	4,51E-05	410	1,21E-04	436	4,58E-03	462	1,17E-02
385	4,34E-05	411	1,29E-04	437	5,34E-03	463	1,08E-02
386	3,98E-05	412	1,41E-04	438	6,19E-03	464	1,00E-02
387	4,08E-05	413	1,54E-04	439	7,07E-03	465	9,25E-03
388	4,59E-05	414	1,69E-04	440	8,06E-03	466	8,52E-03
389	5,05E-05	415	1,86E-04	441	9,15E-03	467	7,91E-03
390	5,01E-05	416	2,08E-04	442	1,04E-02	468	7,33E-03
391	4,80E-05	417	2,40E-04	443	1,17E-02	469	6,73E-03
392	4,98E-05	418	2,78E-04	444	1,31E-02	470	6,18E-03
393	5,38E-05	419	3,22E-04	445	1,45E-02	471	5,67E-03
394	5,71E-05	420	3,71E-04	446	1,58E-02	472	5,16E-03
395	5,66E-05	421	4,30E-04	447	1,71E-02	473	4,69E-03
396	5,59E-05	422	5,09E-04	448	1,82E-02	474	4,27E-03
397	5,99E-05	423	6,01E-04	449	1,92E-02	475	3,88E-03
398	6,44E-05	424	7,00E-04	450	1,99E-02	476	3,50E-03
399	6,72E-05	425	8,17E-04	451	2,05E-02	477	3,16E-03
400	6,98E-05	426	9,62E-04	452	2,07E-02	478	2,86E-03
401	7,24E-05	427	1,14E-03	453	2,05E-02	479	2,61E-03
402	7,45E-05	428	1,34E-03	454	2,00E-02	480	2,38E-03
403	7,69E-05	429	1,58E-03	455	1,92E-02	481	2,17E-03
404	8,12E-05	430	1,85E-03	456	1,83E-02	482	2,00E-03
405	9,02E-05	431	2,14E-03	457	1,73E-02	483	1,83E-03

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

БР-02069964-12.03.02-11-19

Лист

57

1	2	3	4	5	6	7	8
484	1,67E-03	437	5,34E-03	467	7,91E-03	497	5,51E-04
485	1,53E-03	438	6,19E-03	468	7,33E-03	498	5,09E-04
486	1,40E-03	439	7,07E-03	469	6,73E-03	499	4,79E-04
487	1,29E-03	440	8,06E-03	470	6,18E-03	500	4,48E-04
488	1,19E-03	441	9,15E-03	471	5,67E-03	501	4,16E-04
489	1,09E-03	442	1,04E-02	472	5,16E-03	502	3,88E-04
490	9,91E-04	443	1,17E-02	473	4,69E-03	503	3,62E-04
491	9,07E-04	444	1,31E-02	474	4,27E-03	504	3,40E-04
492	8,36E-04	445	1,45E-02	475	3,88E-03	505	3,21E-04
493	7,69E-04	446	1,58E-02	476	3,50E-03	506	3,04E-04
494	7,04E-04	447	1,71E-02	477	3,16E-03	507	2,86E-04
495	6,47E-04	448	1,82E-02	478	2,86E-03	508	2,69E-04
496	5,98E-04	449	1,92E-02	479	2,61E-03	509	2,55E-04
497	5,51E-04	450	1,99E-02	480	2,38E-03	510	2,41E-04
498	5,09E-04	451	2,05E-02	481	2,17E-03	511	2,27E-04
499	4,79E-04	452	2,07E-02	482	2,00E-03	512	2,17E-04
500	4,48E-04	453	2,05E-02	483	1,83E-03	513	2,09E-04
501	4,16E-04	454	2,00E-02	484	1,67E-03	514	2,04E-04
502	3,88E-04	455	1,92E-02	485	1,53E-03	515	1,96E-04
503	3,62E-04	456	1,83E-02	486	1,40E-03	516	1,86E-04
504	3,40E-04	457	1,73E-02	487	1,29E-03	517	1,80E-04
505	3,21E-04	458	1,62E-02	488	1,19E-03	518	1,76E-04
506	3,04E-04	459	1,49E-02	489	1,09E-03	519	1,72E-04
507	2,86E-04	460	1,38E-02	490	9,91E-04	520	1,63E-04
508	2,69E-04	461	1,27E-02	491	9,07E-04	521	1,54E-04
509	2,55E-04	462	1,17E-02	492	8,36E-04	522	1,49E-04
510	2,41E-04	463	1,08E-02	493	7,69E-04	523	1,47E-04
434	3,40E-03	464	1,00E-02	494	7,04E-04	524	1,45E-04
435	3,95E-03	465	9,25E-03	495	6,47E-04	525	1,42E-04
436	4,58E-03	466	8,52E-03	496	5,98E-04	526	1,39E-04

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-12.03.02-11-19

Лист

58

1	2	3	4	5	6	7	8
527	1,37E-04	556	9,51E-05	585	7,28E-05	614	5,34E-05
528	1,34E-04	557	9,41E-05	586	7,28E-05	615	4,97E-05
529	1,29E-04	558	9,34E-05	587	7,18E-05	616	4,82E-05
530	1,26E-04	559	9,31E-05	588	6,96E-05	617	4,83E-05
531	1,24E-04	560	9,20E-05	589	6,76E-05	618	4,71E-05
532	1,21E-04	561	9,01E-05	590	6,76E-05	619	4,64E-05
533	1,20E-04	562	8,85E-05	591	6,63E-05	620	4,77E-05
534	1,21E-04	563	8,86E-05	592	6,42E-05	621	4,89E-05
535	1,19E-04	564	8,90E-05	593	6,65E-05	622	4,81E-05
536	1,16E-04	565	8,61E-05	594	6,84E-05	623	4,50E-05
537	1,16E-04	566	8,37E-05	595	6,37E-05	624	4,42E-05
538	1,15E-04	567	8,50E-05	596	6,14E-05	625	4,61E-05
539	1,13E-04	568	8,50E-05	597	6,35E-05	626	4,46E-05
540	1,10E-04	569	8,27E-05	598	6,10E-05	627	4,26E-05
541	1,10E-04	570	8,20E-05	599	5,74E-05	628	4,41E-05
542	1,10E-04	571	8,13E-05	600	5,81E-05	629	4,47E-05
543	1,10E-04	572	7,92E-05	601	5,76E-05	630	4,32E-05
544	1,09E-04	573	7,89E-05	602	5,57E-05	631	4,25E-05
545	1,09E-04	574	8,01E-05	603	5,85E-05	632	4,33E-05
546	1,08E-04	575	7,97E-05	604	5,99E-05	633	4,40E-05
547	1,05E-04	576	7,85E-05	605	5,46E-05	634	4,11E-05
548	1,03E-04	577	7,78E-05	606	5,11E-05	635	3,75E-05
549	1,02E-04	578	7,63E-05	607	5,21E-05	636	3,93E-05
550	1,01E-04	579	7,39E-05	608	5,34E-05	637	4,12E-05
551	1,00E-04	580	7,23E-05	609	5,37E-05	638	3,88E-05
552	9,99E-05	581	7,19E-05	610	5,33E-05	639	3,71E-05
553	9,88E-05	582	7,24E-05	611	5,34E-05	640	3,70E-05
554	9,65E-05	583	7,27E-05	612	5,44E-05	641	3,61E-05
555	9,55E-05	584	7,26E-05	613	5,51E-05	642	3,58E-05

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

59

1	2	3	4	5	6	7	8
643	3,65E-05	673	2,13E-05	703	1,54E-05	733	7,33E-06
644	3,57E-05	674	2,35E-05	704	1,37E-05	734	8,34E-06
645	3,42E-05	675	2,47E-05	705	1,32E-05	735	8,73E-06
646	3,47E-05	676	2,33E-05	706	1,28E-05	736	8,90E-06
647	3,53E-05	677	2,16E-05	707	1,22E-05	737	8,46E-06
648	3,47E-05	678	2,04E-05	708	1,23E-05	738	8,58E-06
649	3,34E-05	679	1,95E-05	709	1,22E-05	739	1,13E-05
650	3,23E-05	680	1,86E-05	710	1,14E-05	740	1,27E-05
651	3,22E-05	681	1,85E-05	711	1,23E-05	741	9,64E-06
652	3,27E-05	682	1,97E-05	712	1,41E-05	742	5,85E-06
653	3,22E-05	683	2,00E-05	713	1,36E-05	743	4,97E-06
654	2,87E-05	684	1,88E-05	714	1,21E-05	744	8,25E-06
655	2,65E-05	685	1,91E-05	715	1,15E-05	745	1,02E-05
656	2,84E-05	686	2,04E-05	716	1,25E-05	746	7,97E-06
657	2,80E-05	687	2,06E-05	717	1,36E-05	747	5,21E-06
658	2,52E-05	688	2,01E-05	718	1,28E-05	748	4,08E-06
659	2,54E-05	689	1,92E-05	719	1,14E-05	749	5,12E-06
660	2,71E-05	690	1,74E-05	720	1,04E-05	750	7,21E-06
661	2,74E-05	691	1,65E-05	721	9,16E-06	751	8,39E-06
662	2,55E-05	692	1,76E-05	722	8,25E-06	752	6,84E-06
663	2,39E-05	693	1,83E-05	723	8,22E-06	753	5,04E-06
664	2,57E-05	694	1,83E-05	724	8,58E-06	754	5,16E-06
665	2,73E-05	695	1,92E-05	725	9,25E-06	755	5,08E-06
666	2,67E-05	696	1,89E-05	726	1,04E-05	756	4,28E-06
667	2,66E-05	697	1,62E-05	727	9,95E-06	757	3,90E-06
668	2,57E-05	698	1,40E-05	728	7,77E-06	758	4,72E-06
669	2,22E-05	699	1,36E-05	729	8,59E-06	759	6,82E-06
670	2,17E-05	700	1,45E-05	730	1,05E-05	760	9,27E-06
671	2,42E-05	701	1,58E-05	731	8,33E-06	761	9,57E-06
672	2,31E-05	702	1,64E-05	732	6,38E-06	762	6,25E-06

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

60



1	2	3	4	5	6	7	8
763	3,29E-06						
764	3,92E-06						
765	8,26E-06						
766	9,43E-06						
767	4,58E-06						
768	3,80E-06						
769	6,70E-06						
770	5,90E-06						
771	3,98E-06						
772	3,46E-06						
773	3,10E-06						
774	2,12E-06						
775	9,69E-07						
776	2,21E-06						
777	4,56E-06						
778	3,85E-06						
779	4,00E-06						
780	7,42E-06						

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

БР-02069964-12.03.02-11-19

*Лист*

61

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

**Прибор комбинированный «ТКА-ПКМ» Люксметр+Яркомер**

**(паспортные данные)**

### *Измерение освещённости в видимой области спектр:*

– Диапазон измерения, лк **10 ... 200 000**

– Предел допускаемой основной относительной погрешности, % **± 8,0**

– Погрешность нелинейности световой характеристики, %, не более **± 3,0**

– Погрешность градуировки по источнику типа “А”, %, не более **± 3,0**

– Погрешность коррекции спектральной чувствительности, %, не более **± 5,0**

### *Измерение яркости:*

– Диапазон измерения, кд/м<sup>2</sup> **10 ... 200 000**

– Предел допускаемой основной относительной погрешности, % **± 10,0**

– Погрешность нелинейности световой характеристики, %, не более **± 3,0**

– Погрешность градуировки, %, не более **± 3,0**

– Погрешность коррекции спектральной чувствительности, %, не более **± 5,0**

**Пределы измерений (переключение пределов производится вручную), (лк, кд/м<sup>2</sup>):**

**1) 200.0**

**2) 2 000**

**3) 20 000**

**4) 200 000**

**Время непрерывной работы прибора, ч, не менее **8,0****

**Источник питания (батарея, тип “Крона”), В **7...9,6****

**Ток, потребляемый прибором от источника питания, мА, **3,4****

					БР-02069964-12.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		62

*Наработка на отказ прибора при доверительной вероятности  $p = 0.8$ , ч, не менее* *2000*

*Масса прибора, г, не более* *240*

*Габаритные размеры прибора, мм, не более:*

– блок обработки сигналов *130x70x30*

– измерительная головка *150x50x50*

*Эксплуатационные параметры:*

*Температура окружающего воздуха, °С:*

– нормальные рабочие условия *20 ± 5*

– рабочий диапазон температур *0...50*

*Относительная влажность воздуха при температуре окружающего воздуха 25 °С, %, не более* *98*

*Атмосферное давление, кПа* *80...110*