


Прытков С. В.



Основы светотехники
и колориметрии
Лабораторный практикум



Саранск
2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н. П. ОГАРЁВА»

С. В. ПРЫТКОВ

ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ И КОЛОРИМЕТРИИ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

САРАНСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2018

УДК 628.(94:9.041.4)
ББК 31.294-5
П 855

Рецензенты:

Профессор кафедры физики и методики обучения физике ФГБОУ ВО «Мордовский государственный педагогический институт им. М.Е. Евсевьева», доктор технических наук, профессор **В.К. Свешников**;

Доцент кафедры электроники и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», кандидат технических наук **С.С. Капитонов**

Прытков С. В.

П 855 Основы светотехники и колориметрии : лабор. практикум /
С. В. Прытков. – Саранск : Изд-во Мордов. Ун-та, 2018. – 0.7 Мбайт.
ISBN 978-5-7103-3483-6

Лабораторный практикум содержит краткий теоретический и справочный материал по разделам курса «Основы светотехники и колориметрии», описание экспериментальных установок, задания, указания и рекомендации по выполнению лабораторных работ, а также контрольные вопросы.

Предназначен для студентов-бакалавров направлений подготовки 12.03.02 «Оптотехника» и 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника».

УДК 628.(94:9.041.4)
ББК 31.294-5

Учебное издание

ПРЫТКОВ Сергей Владимирович

ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ И КОЛОРИМЕТРИИ

Лабораторный практикум

Издательство Мордовского университета
430005, Саранск, ул. Советская, 24

ISBN 978-5-7103-3483-6

© Прытков С. В., 2018
© ФГБОУ ВО «МГУ
им. Н. П. Огарёва», 2018
© Оформление. Издательство
Мордовского университета, 2018

Содержание

Введение	4
1 Аддитивное воспроизведение цвета	5
2 Изучение метамеризма и цветопередающих свойств самосветящихся цветовых стимулов	19
3 Определение цветового охвата системы самосветящихся стимулов	24
4 Определение коррелированной цветовой температуры источников света	30
5 Определение координат цвета методом фотоэлектрической колориметрии	36
6 Определение светового потока источника света по угловому распределению силы света	45
7 Вспомогательный материал	54
Словарь терминов	57
Литература	61

Введение

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Лабораторная работа выполняется группой студентов, состоящей из 2-3 человек. Каждый студент заранее знает, какую работу он будет делать на следующем занятии, поэтому должен подготовиться к работе (ознакомиться с описанием, рекомендуемой литературой и т.п.).

В начале занятия преподавателем проводится предварительный опрос студентов для получения так называемого «допуска» к выполнению работы.

После выполнения работы студент должен показать преподавателю результаты эксперимента. Если нет серьёзных ошибок, то студент в лаборатории (если осталось время) или дома составляет отчёт о лабораторной работе по установленной форме, куда входит предварительная проработка, протокол, обработка и анализ результатов, полученных в ходе эксперимента.

Преподаватель просматривает отчёт и задает несколько вопросов по лабораторной работе. Правильно ответив на них, студент получает зачёт по выполненной работе.

1 Аддитивное воспроизведение цвета

1.1 Краткие прикладные и теоретические сведения по изучаемым вопросам

Современные колориметрические системы берут своё начало из опытов по уравниванию цветов, которые стали проводиться в XIX веке. Цветовое уравнивание — это процесс смешения цветовых стимулов в пропорциях, при которых цвет смеси визуально уже не отличается от измеряемого цвета. Под цветовым стимулом понимается излучение определённого спектрального состава и с определённой энергетической яркостью, вызывающее ощущение либо хроматического цвета, либо ахроматического цвета. Цветовой стимул принято обозначать заглавной буквой английского алфавита в прямоугольных скобках.

На рисунке 1.1 схематично изображён типичный эксперимент по цветовому уравниванию. Как видно, одно поле сравнения заливается цветом, который нужно уравнивать, а другое — смесью цветовых стимулов.

Факт того, что цвет стимула F равен цвету смеси стимулов $[R]$, $[G]$, $[B]$, записывается следующим образом:

$$F = R[R] + G[G] + B[B] \quad (1.1)$$

Здесь R , G , B — коэффициенты, определяющие соотношение между стимулами $[R]$, $[G]$, $[B]$, которое обеспечивает цвет такой же как и у стимула F . В колориметрии коэффициенты R , G , B называются координатами цвета.

Результаты многочисленных экспериментов по уравниванию цветов Грассман в 1861 г. облёк в форму нескольких простых законов и следствий из них [1]:

1. Глаз может регистрировать лишь три вида различий цвета (выражаемых, например, различием цветового тона, яркости и насыщенности)
2. Если в смеси трёх цветовых стимулов один из них непрерывно изменяется, цвет смеси также изменяется непрерывно.

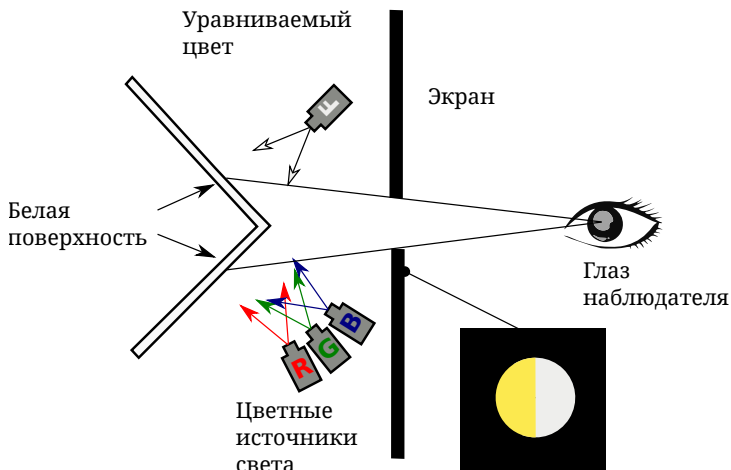


Рисунок 1.1: Эксперимент по уравниванию цветов

3. Смещение стимулов одного и того же цвета (т.е. одинакового цветового тона, одинаковой яркости и одинаковой насыщенности) даёт идентичные по цвету результаты *независимо от спектрального состава* излучений, порождающих эти стимулы.

Третий закон Грассмана влечёт за собой следующие важные выводы:

1. Два стимула одного и того же цвета $[F_1] = [F_2]$, порознь смешанные с двумя другими стимулами $[F_3] = [F_4]$, цвета которых также совпадают, дают смеси одинакового цвета.

$$[F_1] + [F_3] = [F_2] + [F_4] \quad (1.2)$$

2. Если стимулы одного и того же цвета вычитаются из смесей одинакового цвета, то оставшиеся после вычитания цвета одинаковы.
3. Если одна единица какого-либо стимула имеет тот же цвет, что и одна единица другого стимула, то цвет любого числа единиц первого стимула одинаков с цветом такого же числа единиц второго.

$$\alpha[F_1] = \alpha[F_2] \quad (1.3)$$

Большинство окружающих нас видимых излучений сложные, т.е. состоят из отдельных монохроматических составляющих, причём каждая такая составляющая имеет свой цвет. Законы Грассмана естественным образом приводят к мысли о том, что *для того чтобы описать цвет сложного излучения необходимо найти координаты цвета его монохроматических составляющих¹, а затем найти суммы соответствующих координат.* Максвелл был одним из первых, кто высказал данную мысль. В результате им были определены координаты цвета спектральных цветов, по современной терминологии — функции сложения цветов. Впоследствии подобные функции были получены и другими исследователями. Однако из-за того, что каждый учёный использовал в качестве основных цветовых стимулов те стимулы, которые казались ему удобнее, функций получалось много. Таким образом, для того чтобы была возможность одинаковым способом описать цвет, требовались общепризнанные функции сложения цветов. В итоге в 1931 г. Международная комиссия по освещению (МОК) по результатам работ Гилда и Райта опубликовала документ, в котором были предложены две колориметрические системы: RGB, и основанная на ней XYZ. Данные системы уже на протяжении восьми десятилетий остаются основными для описания цвета.

1.1.1 Векторное представление цвета

Опыты по уравниванию цветов и законы Грассмана позволили геометрически толковать цвет как вектор в трёхмерном пространстве, в котором каждой точке соответствует определённый цвет: реальный или нереальный². Прежде чем говорить об особенностях конкретных колориметрических систем рассмотрим абстрактное цветовое координатное пространство MNP (рис. 1.2) .

Пусть линейно-независимые векторы $[\vec{M}]$, $[\vec{N}]$, $[\vec{P}]$, соответствующие основным цветам, образуют базис пространства MNP. Тогда, по определению, любой вектор цвета можно представить в виде линейной комбинации этих

¹Монохроматические составляющие должны быть одинаковой мощности

²Нереальные цвета в природе не существуют, но их можно использовать и, более того, используют в качестве основных цветов для удобства вычислений в системе XYZ. Это математический трюк.

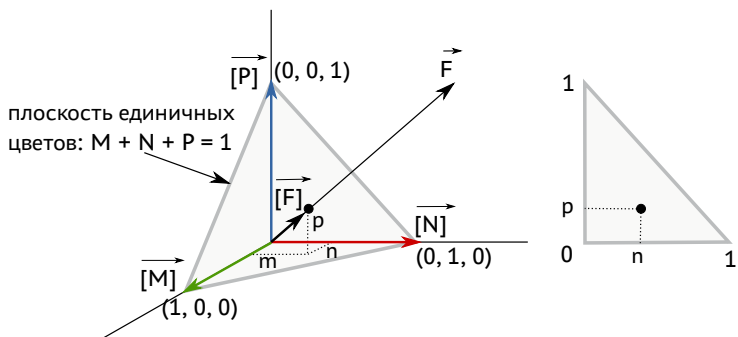


Рисунок 1.2: Цветовое пространство MNP

векторов:

$$\vec{F} = M[\vec{M}] + N[\vec{N}] + P[\vec{P}] \quad (1.4)$$

или в матричном виде:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} [M] & 0 & 0 \\ 0 & [N] & 0 \\ 0 & 0 & [P] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M \\ N \\ P \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

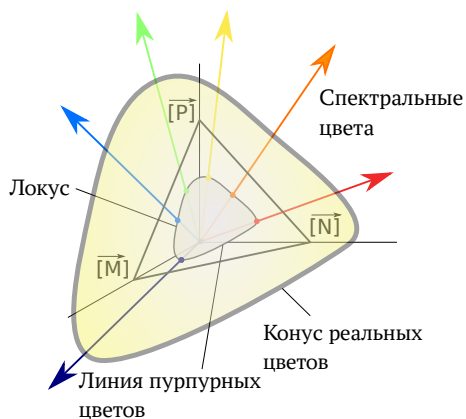


Рисунок 1.3: Цветовое пространство MNP

В отличие от многих физических величин, цвет — величина не только количественная, но и качественная. Количественной характеристикой цвета является его яркость. Длина вектора в колориметрическом пространстве пропорциональна яркости, однако нужно помнить, что масштаб зависит от направления и задаётся плоскостью единичных цветов. Уравнение яркости в матричном виде записывается следующим образом:

$$L = (L_M \quad L_N \quad L_P) \begin{pmatrix} M \\ N \\ P \end{pmatrix}, \quad (1.6)$$

где L_M, L_N, L_P — яркости основных цветов или *яркостные коэффициенты*; M, N, P — координаты цвета.

Качественной характеристикой цвета является цветность. Она определяется пропорцией между основными цветами в их смеси и задаётся в виде координат цветности:

$$m = \frac{M}{M + N + P}, n = \frac{N}{M + N + P}, p = \frac{P}{M + N + P} \quad (1.7)$$

Сумма координат цветности равна 1, поэтому обычно указывают только две, поскольку третья линейно зависит от первых двух. Координаты цветности определяют направление в колориметрическом пространстве. Для удобства использования цветовой треугольник проецируют на ту или иную координатную плоскость (см рис. 1.2). Пока мы определили цветность лишь искусственно. Интуитивное понимание этого понятия должно прийти в ходе выполнения лабораторной работы.

Геометрическим образом всех реальных цветов является конус, вершина которого находится в точке чёрного цвета, образующими конуса при этом являются вектора, соответствующие спектральным цветам и пурпурным цветам³ (см. рис. 1.3). Геометрическое место пересечений спектральных цветов с цветовым треугольником называется локусом или линией спектральных чистых цветов. Геометрическое место пересечений пурпурных цветов с цветовым треугольником называется линией пурпурных цветов.

³Пурпурные цвета соответствуют смеси спектральных синего и красного цветов, находящихся на границе видимого диапазона

1.2 Описание лабораторной установки

Установка «Сатурн» для аддитивного воспроизведения цвета состоит из:

1. Персонального компьютера с программным обеспечением (ПО) для колориметрических расчетов и управления установкой;
2. Блока смешения цветов (БСЦ) для изменения координат цвета;
3. Блока усиления (БУ) для сопряжения платы Arduino с линейкой светодиодов;
4. Диффузного излучателя для формирования однородного излучения;
5. Спектрорадиометра Specbos 1211 для контроля выходных параметров (координаты цвета, координаты цветности, коррелированная цветовая температура).

На рис. 1.4 приведена структурная схема установки «Сатурн».

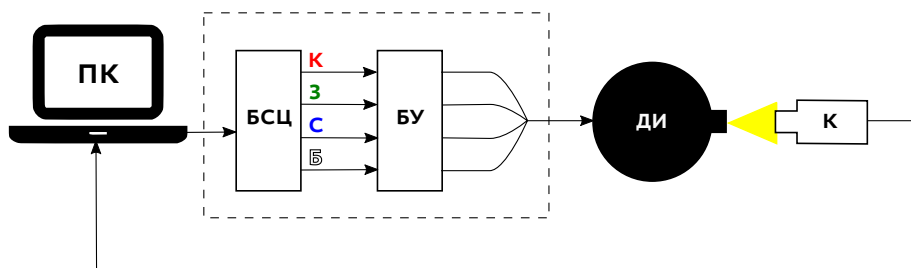


Рисунок 1.4: Структурная схема установки аддитивного воспроизведения цвета: **ПК** – персональный компьютер, **БСЦ** – блок смешения цветов, **БУ** – блок усиления, **ДИ** – диффузный излучатель, **К** – колориметр

Изменение компонент цвета установки осуществляется через независимое регулирование яркости красных, зелёных и синих светодиодов (СД). В установке предусмотрен один дополнительный канал для регулирования яркости белых светодиодов. Регулировка осуществляется с помощью БСЦ, путём изменения среднего значения тока через канал с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

БСЦ реализован на базе платы Arduino Nano. Разрядность ШИМ у данной платы — 8 бит, поэтому БСЦ обеспечивает 256 ($2^8 = 256$) кратных уровней яркости. Яркость выходного отверстия ДИ при максимальном уровне 255 для красного, зелёного, синего света различна и составляет 56.06 кд/м², 137.9 кд/м², 25.52 кд/м² соответственно. Таким образом, изменение уровня яркости на одну единицу для красного, зелёного и синего света приводит к изменению яркости ДИ на 0.22 кд/м², 0.54 кд/м², 0.10 кд/м² соответственно (см. рис. 1.5).

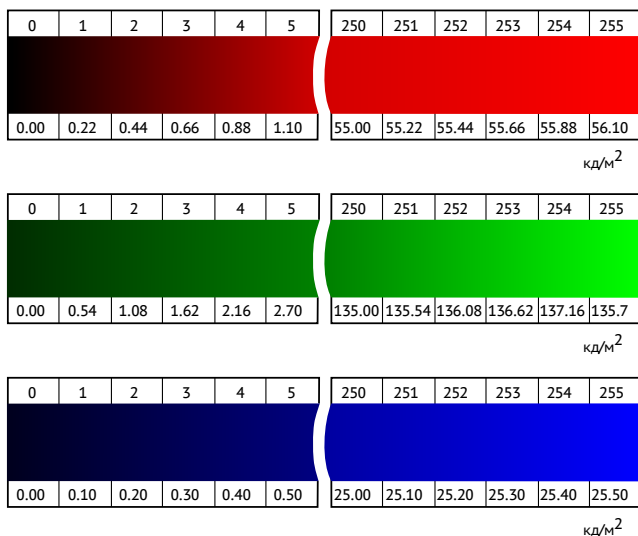


Рисунок 1.5: Уровни яркости и соответствующие им яркости ДИ для красного, зелёного и синего света

Управляющая команда в виде строки с указанием уровня яркости (0 – минимальный уровень, 255 – максимальный) каждого канала поступает в БСЦ с компьютера через USB-порт. Формат передаваемой в БСЦ строки следующий: 'К З С Б', где $K \in \{0, 1, \dots, 255\}$, $Z \in \{0, 1, \dots, 255\}$, $C \in \{0, 1, \dots, 255\}$ и $B \in \{0, 1, \dots, 255\}$. Максимальное выходное напряжение платы 5 В. БУ усиливает сигнал, поступающий с ШИМ выходов (9, 6, 10, 11) Arduino Nano для питания светодиодных линеек, напряжение питания которых 12 В. На рис. 1.6 представлена схема усиления. Схема имеет четыре входа К, З, С, Б.

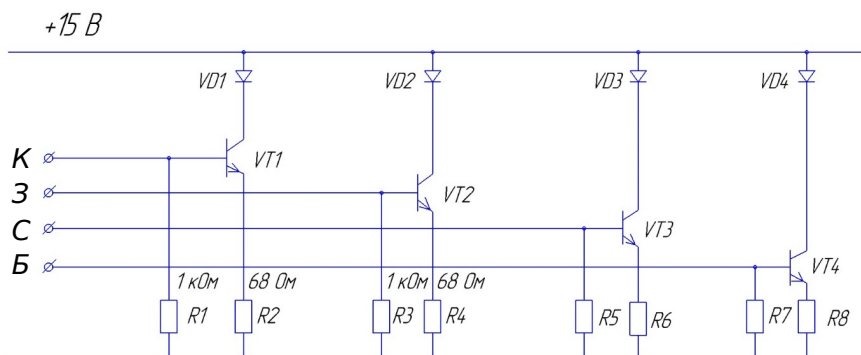


Рисунок 1.6: Схема усиления

Каждый каскад представляет собой ненасыщенный ключ, в коллекторе которого находится светодиоды определенного цвета. В эмиттерах диода усилителя находятся резисторы R2, R4, R6, R8, которые обеспечивают отрицательную обратную связь по току и не дают транзисторам VT1, VT2, VT3, VT4 входить в глубокое насыщение, тем самым повышая частотные свойства каскадов усиления. Резисторы R1, R3, R5, R7 служат для компенсации тока коллектора I_{k0} . Диффузный излучатель предназначен для формирования однородного по спектру излучения. Он представляет собой интегрирующую сферу с диффузно-отражающим покрытием. Внутри интегрирующей сферы находятся две RGB линейки и две линейки с белыми светодиодами. Причем, источники излучения смонтированы таким образом, чтобы прямое излучение от них не попадало на выходное отверстие. Взаимодействие оператора с установкой осуществляется через интерфейс командной строки в операционной системе Linux Mint.

1.3 Задания к работе

1. Подготовить установку к работе.
2. Осуществить калибровку установки.
3. Воспроизвести цвета контрольных образцов, используемых в расчёте цветопередачи по шкале качества цвета CQS (см. рис. 1.7 и табл. 1.1).

4. Воспроизвести цвет излучения чёрного тела при температурах 3000 К, 4000 К, 5000 К, 6000 К, 10000 К, 50000 К, 100000 К (см. координаты цветности для абсолютно чёрного тела при разных температурах в табл. 1.2). Фотоснимки выходного отверстия установки отразить в отчёте.

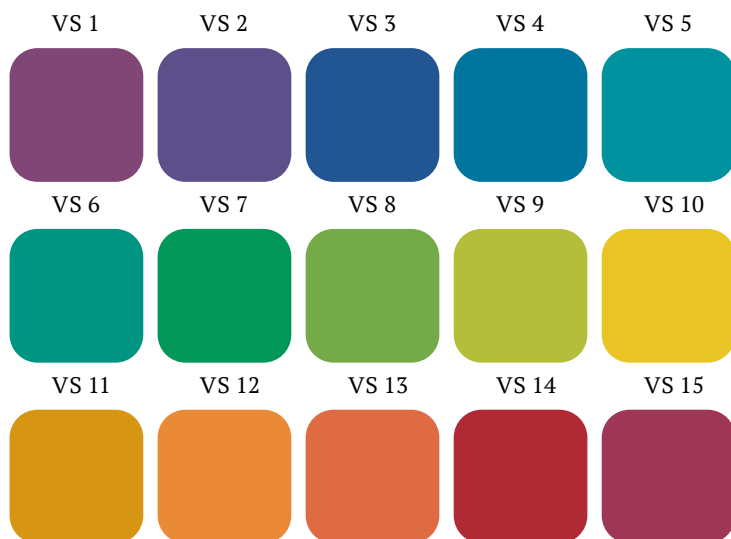


Рисунок 1.7: Образцы цвета CQS

1.4 Указания к выполнению работы

1.4.1 Подготовка установки к работе

1. Включите источник питания «Б5 - 71» и выставите напряжение 15В.
2. Включите БСЦ и БУ.
3. Включите персональный компьютер и загрузите операционную систему Linux Mint.
4. Сочетанием клавиш `Ctrl-Alt-T` запустите эмулятор командной строки «Терминал».

Таблица 1.1: Координаты цветности контрольных образцов цвета CQS

Образец	x	y	Образец	x	y
VS1	0,3621	0,2585	VS9	0,4139	0,4947
VS2	0,2742	0,2294	VS10	0,4614	0,4755
VS3	0,2074	0,2138	VS11	0,4988	0,4497
VS4	0,2048	0,2735	VS12	0,5145	0,4153
VS5	0,2313	0,3348	VS13	0,5304	0,3798
VS6	0,2404	0,3960	VS14	0,5782	0,3218
VS7	0,2783	0,4916	VS15	0,4856	0,2938
VS8	0,3593	0,5053			

Таблица 1.2: Координаты цветности абсолютно чёрного тела при различных температурах

Температура чёрного тела, К	x	y
3000	0,4369	0,4041
4000	0,3805	0,3768
5000	0,3451	0,3516
6000	0,3221	0,3318
10000	0,2807	0,2884
50000	0,2456	0,2425
100000	0,2426	0,2382

5. Инициализируйте USB-порт, к которому подключен БСЦ, и запустите монитор порта:

```
$ ttylog -d /dev/ttyUSB0
```

6. Сочетанием клавиш Ctrl-Alt-T запустите новый экземпляр программы «Терминал».

7. Убедитесь в правильной работе каждого канала БСЦ.

- a) Установите красный свет ДИ на максимальную яркость:

```
$ echo -n '255 0 0 0' > /dev/ttyUSB0
```

- b) Выключите красный свет ДИ:

```
$ echo -n '0 0 0 0' > /dev/ttyUSB0
```

- c) повторите пункты a, b для зелёного и синего света.

1.4.2 Калибровка установки

Для того, чтобы установка могла воспроизводить цвета, выраженные в международной системе XYZ, необходимо найти матрицу перехода в её собственную систему КЗС:

$$\begin{pmatrix} X_K & X_3 & X_C \\ Y_K & Y_3 & Y_C \\ Z_K & Z_3 & Z_C \end{pmatrix}^{-1}$$

Столбцы матрицы (1.4.2) — это координаты основных цветов [K], [3], [C] установки в системе XYZ. Обычно в колориметрических системах яркости основных цветов выбираются таким образом, чтобы при одинаковом количестве единиц каждого смесь была белой. Однако условие это не обязательное. Для упрощения работы с установкой можно в качестве основных цветов использовать стимулы, соответствующие одинаковому уровню яркости, например 255. В этом случае базис системы координат установки примет вид

$$\begin{pmatrix} 255 & 0 & 0 \\ 0 & 255 & 0 \\ 0 & 0 & 255 \end{pmatrix}$$

Далее описываются этапы калибровки исходя именно из этого условия, но вы можете установить свои требования по яркости для основных цветов⁴.

Калибровка установки:

1. Установите для основного цвета [K] уровень яркости 255:

```
$ echo -n '255 0 0' > /dev/ttyUSB0
```

2. Измерьте с помощью спектрорадиометра Specbos 1211 координаты цвета X_K , Y_K , Z_K стимула [K]
 - a) В программе JETI LiMeS установите значение настройки Average на отметке 5. В этом случае будет произведена серия из 5 измерений, а результат усреднён.
 - b) В окне программы JETI LiMeS нажмите на кнопку Measurement.
 - c) Чтобы получить значения координат цвета X, Y, Z надо в главном меню выбрать пункт Calculate - > Colour Values.

3. Выключите основной цвет [K]:

```
$ echo -n '0 0 0' > /dev/ttyUSB0
```

4. Для получения координат цвета стимулов [3] и [C] в системе XYZ повторите пункты 1, 2, 3 заменяя строку '255 0 0' на '0 255 0' и '0 0 255' соответственно.
5. Найдите матрицу (1.7). Обратите внимание, данная матрица обратная.

После калибровки нужно проверить её корректность по следующему плану.

Проверка калибровки:

1. Найдите координаты X, Y, Z для цвета $x = 0.3333$, $y = 0.3333$, $Y = 100$:

$$X = \frac{Yx}{y}; Z = \frac{Y(1 - x - y)}{y} \quad (1.8)$$

⁴Важно для калибровки использовать приборы, измеряющие координату Y в абсолютных единицах: в кд/м² или лк.

2. Найдите компоненты вектора цвета в системе координат установки:

$$\begin{pmatrix} \vec{K} \\ \vec{3} \\ \vec{C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 255 & 0 & 0 \\ 0 & 255 & 0 \\ 0 & 0 & 255 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_K & X_3 & X_C \\ Y_K & Y_3 & Y_C \\ Z_K & Z_3 & Z_C \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

3. Округлите до ближайшего целого компоненты вектора $(\vec{K} \ \vec{3} \ \vec{C})$ и воспроизведите цвет на установке.

4. Измерьте координаты цветности и яркость выходного отверстия ДИ на Specbos 1211. Если измеренные координаты цветности совпадают до 2 знаков после запятой с заданными ($x = 0.3333$, $y = 0.3333$), а яркость отличается не более 5%, то калибровка была произведена правильно, если нет, то провести калибровку повторно.

Найденную матрицу перехода из системы XYZ в систему K3C установки, яркостные коэффициенты и спектры основных цветов [K], [3], [C] привести в отчёте.

1.4.3 Воспроизведение цвета контрольных образцов CQS

Порядок действий при выполнении данного задания аналогичен процедуре проверки калибровки, только теперь вам надо использовать координаты цветности из табл. 1.1. Заметим, однако, что в табл. 1.1 приведены координаты цветности контрольных образцов цвета, без указания коэффициента яркости. Это сделано умышленно. Вы должны подобрать яркость самостоятельно таким образом, чтобы цвета, воспроизводимые установкой, имели минимальное отличие с цветами, изображёнными на рис. 1.7. Отобразить найденные компоненты цвета $(\vec{K} \ \vec{3} \ \vec{C})$, воспроизводящие соответствующие цвета в отчёте. Сделать фотоснимки выходного отверстия установки для различных цветов. Фотоснимки также прикрепить к отчёту.

1.4.4 Воспроизведение цвета излучения чёрного тела при различных температурах

Порядок действий при выполнении данного задания аналогичен процедуре проверки калибровки, только теперь вам надо использовать координаты цветности из табл. 1.2.

1.5 Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение цветового стимула. Что такое функции сложения цветов?
2. Расскажите о векторном представлении цвета. Количественные и качественные характеристики цвета. Что такое линия спектральных чистых цветов? Что такое линия пурпурных цветов?
3. Длина вектора в колориметрическом пространстве пропорциональна яркости. Чем задаётся масштаб и одинаков ли он по различным направлениям колориметрического пространства?
4. Расскажите о законах смешения цветов Грассмана.
5. Как найти матрицу перехода из одной колориметрической системы в другую?
6. Расскажите об устройстве и принципе действия установки аддитивного воспроизведения цвета «Сатурн».
7. Как осуществляется калибровка и воспроизведение цвета на установке «Сатурн»?
8. Какой фотометрической величине соответствует координата Y , если калибровка осуществляется в режиме измерения а) освещённости; б) яркости?
9. Если известны координаты цвета цветового стимула, как найти его яркость?

2 Изучение метамеризма и цветопередающих свойств самосветящихся цветовых стимулов

2.1 Краткие прикладные и теоретические сведения по изучаемым вопросам

Каждому спектру излучения соответствует один определённый цвет, но обратное утверждение неверно. Один и тот же цвет может быть воспроизведён множеством стимулов с различным спектральным составом. Это происходит из-за того, что при определённых условиях стимулы с разным спектральным составом приводят к одному и тому же соотношению уровней возбуждения кзс-рецепторов сетчатки. Данное явление, получившее название *метамеризма*, носит фундаментальный для колориметрии характер, хотя бы потому что функции сложения цветов $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ были получены на основе экспериментальных данных по уравниванию спектральных стимулов смесью трёх основных. Это не единственный пример проявления метамеризма. Белый цвет с определённой цветовой температурой можно воспроизвести с помощью ксеноновой лампы, белого светодиода, люминесцентной лампы, смеси красного, зелёного и синего стимулов, создаваемых цветными светодиодами. Метамеризм не уникален только для источников света, но также широко распространён среди объектов отражающих свет, когда их спектральные апертурные коэффициенты отражения различны, а цвета у них всё равно одинаковые.

Условием метамерности цветовых стимулов является равенство их координат цвета:

$$\begin{aligned} \int_{380}^{780} S^{(1)}(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda &= \int_{380}^{780} S^{(2)}(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ \int_{380}^{780} S^{(1)}(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda &= \int_{380}^{780} S^{(2)}(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ \int_{380}^{780} S^{(1)}(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda &= \int_{380}^{780} S^{(2)}(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $S^{(1)}(\lambda)$ и $S^{(2)}(\lambda)$ – спектральное распределение первого и второго стимулов.

Для самосветящихся объектов $S(\lambda) = X_e(\lambda)$. Для несамосветящихся $S(\lambda) = \beta(\lambda)X_e(\lambda)$. Здесь $X_e(\lambda)$ – спектральное распределение источника излучения, $\beta(\lambda)$ – спектральный апертурный коэффициент отражения.

2.2 Описание лабораторной установки

См. описание установки в лабораторной работе №2

2.3 Задания к работе

1. Подготовить установку к работе.
2. Осуществить калибровку установки.
3. Воспроизвести белый цвет установив для канала Б уровень яркости 100.
4. Измерить спектральное распределение энергетической яркости диффузного излучателя (ДИ), коррелированную цветовую температуру, координаты цвета X, Y, Z и общий индекс цветопередачи R_a ДИ.
5. Воспроизвести белый цвет, используя каналы К, З, С. В каналы нужно записать компоненты цвета, соответствующие координатам X, Y, Z, полученным в пункте 4.
6. Измерить спектральное распределение ДИ, коррелированную цветовую температуру, координаты цвета и общий индекс цветопередачи R_a ДИ. Сравнить значения со значениями, полученными в пункте 4.
7. Оценить степень метамеризма белых стимулов, излучаемых установкой.

2.4 Указания к выполнению работы

1. Подготовить установку «Сатурн» к работе согласно пункту 1.4.1 лабораторной работы №1;

2. Произвести калибровку установки согласно пункту 1.4.2 лабораторной работы №1;
3. Воспроизвести стимул канала Б. Для этого установите для канала Б уровень яркости 100:

```
$ echo -n '0 0 0 100' > /dev/ttyUSB0
```

4. Измерить параметры стимула, генерируемого каналом Б.
 - a) В программе JETI LiMeS установите значение настройки Average на отметке 5. В этом случае будет произведена серия из 5 измерений, а результат усреднён.
 - b) В окне программы JETI LiMeS нажмите на кнопку Measurement.
 - c) Запишите значения координат цвета X,Y,Z; координат цветности x, y; коррелированной цветовой температуры T; индекса цветопередачи Ra; яркости L в таблицу 2.1. Значения данных параметров, за исключением координат цвета и индекса цветопередачи, отображаются в главном окне программы JETI LiMeS. Чтобы получить значения координат цвета, надо в главном меню выбрать пункт Calculate - > Colour Values. Аналогично, чтобы получить значение индекса цветопередачи в главном меню нужно выбрать пункт Calculate -> CRI.
 - d) Сделать снимки экрана с изображением спектра стимула и диаграммой цветности xy. Для чего нажмите функциональную клавишу F3, а затем F11 и сохраните изображение спектра. Затем нажмите функциональную клавишу F4, а затем F11 и сохраните изображение диаграммы цветности с цветностью соответствующей измеренному стимулу.
 - e) Сохраните в буфер программы спектральное распределение энергетической яркости. Для чего в главном окне программы нажмите на кнопку Transfer.
5. Воспроизвести белый стимул с помощью каналов К, З, С. Для этого для каналов К, З и С рассчитайте уровни яркости исходя из измеренных координат X, Y, Z стимула канала Б (см. пункт 3)

6. Измерить параметры стимула, генерируемого К, З, С каналами. Последовательность действий аналогична приведённой в пункте 4.
7. Экспортируйте результаты измерений двух белых стимулов, включая спектральное распределение энергетической яркости, в csv-файл, с целью последующей обработки результатов в табличном процессоре MS Office Excel. Для этого в главном меню выберите Export -> Save Table.
8. По указанной ниже формуле оцените степень метамеризма двух белых стимулов:

$$D = \sqrt{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} [S^{(1)}(\lambda) - S^{(2)}(\lambda)]^2} \quad (2.2)$$

9. Проанализируйте результаты измерений двух белых стимулов. Обратите внимание на индекс цветопередачи, на значения яркости и энергетической яркости обоих стимулов.

Таблица 2.1: Цветовые параметры стимулов

Цветовой стимул	Стимул канала Б	Стимул смеси каналов К, З, С
X		
Y		
Z		
x		
y		
T, K		
Ra		
L, кд · м ⁻²		
Le, Вт · ср ⁻¹ · м ⁻²		

2.5 Контрольные вопросы и задания

1. Что такое метамеризм?

2. Как определить являются ли два стимула метамерными? Назовите условие метамерности.
3. Равнозначны ли с точки зрения цветопередачи источники света с одинаковой коррелированной цветовой температурой?
4. Если яркости двух стимулов одного цвета совпадают, совпадают ли их энергетические яркости? Ответ аргументировать.

3 Определение цветового охвата системы самосветящихся стимулов

3.1 Краткие прикладные и теоретические сведения по изучаемым вопросам

Система трёх линейно независимых реальных цветов может воспроизвести только определённое подмножество пространства реальных цветов. Это подмножество называется цветовым охватом системы. При этом возможность описать цвета не входящие в цветовой охват сохраняется. На рис. (3.1) приведено цветовое пространство RGB. Цвета, которые можно воспроизвести в данной системе, пересекают цветовой треугольник $[R][G][B]$. Причём все три координаты цвета этих векторов имеют положительные значения. Цвет, который оказывается за пределами цветового охвата системы, будет иметь как минимум одну отрицательную координату (например, цвет \vec{F}_2 на рис. 3.1).

Итак, цветовой треугольник $[R][G][B]$ определяет пространство цветностей, которые можно воспроизвести в системе. Однако цвет — это не только качество, но ещё и количество. На любом цветовоспроизводящем устройстве максимальная яркость получаемых цветов имеет определённый предел и для каждого цвета он свой. Чем дальше от белого находится цвет на диаграмме цветности, тем у него меньше яркость.

3.1.1 Определение вхождения цветности в цветовой охват

Чтобы определить, может ли данное устройство воспроизвести излучение с заданной цветностью, необходимо узнать, попадает ли заданная цветность в его цветовой охват. Для этого необходимо решить задачу о принадлежности точки треугольнику. Воспользуемся с этой целью понятием «ориентированной площади треугольника». Расположив в определённом порядке вершины треугольника $\Delta A_1 A_2 A_3$, мы тем самым задаём направление обхода на его контуре. Причём направление обхода может осуществляться как

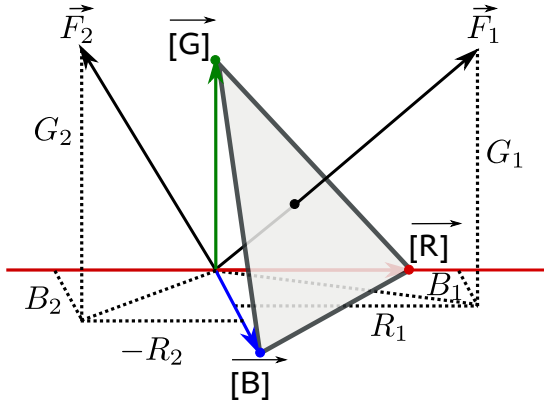


Рисунок 3.1: Цветовой охват системы, образуемой основными цветами $[R]$, $[G]$, $[B]$

«по часовой стрелке», так и «против». Условимся считать в первом случае треугольник ориентированным отрицательно, а во втором положительно, тогда $S_{A_3A_2A_1} = -S_{A_1A_2A_3}$. Рассмотрим теперь точку A_0 , которая лежит внутри треугольника $A_1A_2A_3$ (см. рис. 3.2 а). Соединим эту точку с вершинами треугольника $A_1A_2A_3$. При этом образуются треугольники $A_1A_2A_0$, $A_2A_3A_0$, $A_3A_1A_0$. Заметим, что порядок вершин в обозначении каждого из этих треугольников выбран так, чтобы общая сторона этого треугольника и базисного треугольника $A_1A_2A_3$ была в обоих треугольниках ориентирована одинаково. При этом оказывается, что если точка лежит внутри базисного треугольника, то обход контура во всех треугольниках включая базисный сохраняется одинаковым, а если точка находится за пределами базисного треугольника, то в одном из треугольников обход контура меняется на противоположный (см. рис. 3.2 б). Тогда в первом случае площади всех треугольников будут одного знака, а во втором одна из площадей будет иметь противоположный знак. Если точка A_0 лежит на одной из сторон базисного треугольника, то одна из ориентированных площадей будет равна нулю. Если точка A_0 совпадает с одной из его вершин, то площади двух треугольников будут равны нулю.

Площади треугольников $A_1A_2A_0$, $A_2A_3A_0$, $A_3A_1A_0$, заданные координатами их вершин, находят с помощью определителей второго порядка:

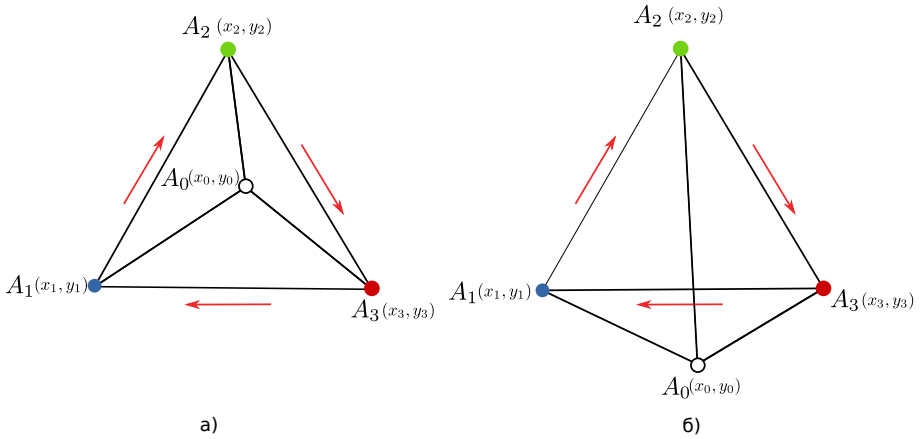


Рисунок 3.2: К задаче о принадлежности точки треугольнику

$$\begin{aligned}
 S_{A_1A_2A_0} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 \end{bmatrix} \\
 S_{A_2A_3A_0} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_2 - x_0 & y_2 - y_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 \end{bmatrix} \\
 S_{A_3A_1A_0} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_3 - x_0 & y_3 - y_0 \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Исходя из выше сказанного, условие принадлежности точки треугольнику примет следующий вид:

$$A_0 \in A_1A_2A_3 \Leftrightarrow (S_{A_1A_2A_0} \leq 0 \wedge S_{A_2A_3A_0} \leq 0 \wedge S_{A_3A_1A_0} \leq 0) \tag{3.2}$$

Поскольку нас интересуют только знаки площадей, то множитель $1/2$ в выражении 3.1 можно опустить и просто находить значения определителей.

3.2 Описание лабораторной установки

См. описание установки в лабораторной работе №2

3.3 Задания к работе

1. Подготовить установку к работе.
2. Осуществить калибровку установки и определить её цветовой охват.
3. Определить, какие цветности из табл. 3.1 входят в цветовой охват установки.
4. Для цветностей из табл. 3.1 рассчитать координаты цвета в колориметрическом пространстве установки. Полученные координаты необходимо нормализовать так, чтобы получить максимальную яркость для заданной цветности.
5. Воспроизвести стимулы с цветностями, входящими в цветовой охват установки.

3.4 Указания к выполнению работы

1. Подготовить установку «Сатурн» к работе согласно 1.4.1 лабораторной работы №1.
2. Произвести калибровку установки согласно пункту 1.4.2 лабораторной работы №1.
3. По найденным в пункте 2 координатам цвета X , Y , Z рассчитайте координаты цветности и яркость основных цветов установки. Запишите рассчитанные значения в таблицу 3.1. На диаграмму цветности xu нанесите цветовой охват установки.
4. Рассчитайте по формуле (3.1) ориентированные площади треугольников $A_1A_2A_0$, $A_2A_3A_0$, $A_3A_1A_0$ для всех стимулов указанных в первом столбце табл. 3.1. Занесите найденные значения в 8, 9 и 10 столбцы соответственно. Исходя из найденных значений площадей, определите, входит или нет тот или иной стимул в цветовой охват установки. Нанесите цветность соответствующую данным стимулам на диаграмму цветности xu .

5. Рассчитайте компоненты цвета $R[R]$, $G[G]$, $B[B]$ для стимулов, входящих в цветовой охват установки. Полученные компоненты необходимо нормализовать так, чтобы получить максимальную яркость для заданной цветности:

$$k \cdot R[R], k \cdot G[G], k \cdot B[B] \quad (3.3)$$

где $k = 255 / \max(R[R], G[G], B[B])$

6. Воспроизведите стимулы, входящие в цветовой охват установки. Измерьте яркость стимулов и запишите её значения в табл. 3.1

Таблица 3.1: Цветовые параметры стимулов

№	x	y	R[R]	G[G]	B[B]	L	S1	S2	S3	Вердикт
[R]			255	0	0					Входит
[G]			0	255	0					Входит
[B]			0	0	255					Входит
1	0.33	0.33								
2	0.44	0.44								
3	0.32	0.73								
4	0.51	0.18								
5	0.31	0.15								
6	0.15	0.53								
7	0.16	0.74								
8	0.20	0.20								
9	0.52	0.33								
10	0.25	0.31								

3.5 Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение цветового охвата.
2. Могут ли векторы цвета, входящие в цветовой охват системы, иметь отрицательные координаты?

3. Как меняется максимальное значение яркости в пределах цветового треугольника?
4. Как аналитически определить входит ли стимул с заданной цветностью в цветовой охват системы? Сформулируйте условие принадлежности цветности цветовому охвату.

4 Определение коррелированной цветовой температуры источников света

4.1 Краткие прикладные и теоретические сведения по изучаемым вопросам

4.1.1 Понятие коррелированной цветовой температуры

При нагреве чёрного тела его спектр меняется (рис. 4.1) и его цветность очерчивает определённую траекторию (рис. 4.2) на равноконтрастной диаграмме МКО 1960 г. Данная траектория называется линией чёрного тела (ЛЧТ). Среди всех точек этой линии будет одна, расстояние между которой и данной цветностью (соответствующей, например, излучению светодиодной лампы) будет наименьшим. В этом случае мы условно припишем данной цветности значение цветовой температуры соответствующее ближайшей к ней точке ЛЧТ, это и будет коррелированная цветовая температура. Как мы видим, понятие КЦТ вводится на равноконтрастном графике МКО 1960 г. Это было сделано не случайно, поскольку одинаковым расстояниям на таком графике соответствует одинаковое количество порогов цветоразличения¹.

Следствием данного определения является тот факт, что точки лежащие на перпендикуляре² к линии чёрного тела, будут иметь одни и те же значения КЦТ. В колориметрии данные перпендикуляры получили название **линий постоянной коррелированной температуры** или **изотерм**. Здесь нужно сделать следующее замечание. Понятие КЦТ не может применяться, если расстояние между цветностью испытуемого источника и линией чёрного тела больше 0.05 масштабных единиц на равноконтрастной диаграмме МКО 1960 г.³.

¹ Существует несколько равноконтрастных шкал, которые в большей и меньшей степени удовлетворяют этому условию.

² На равноконтрастном графике МКО 1960.

³ Цветности реальных источников света не могут выходить за пределы локуса, значит, и там понятие КЦТ не имеет смысла.

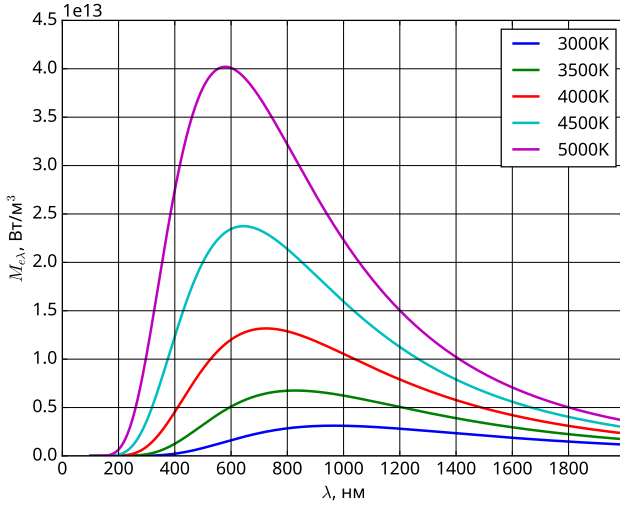


Рисунок 4.1: Спектральное распределение излучения чёрного тела при различных температурах

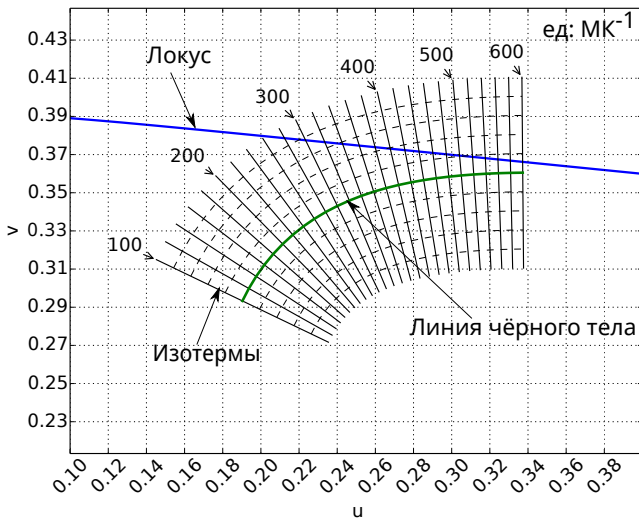


Рисунок 4.2: К понятию коррелированной цветовой температуры

4.1.2 Методы расчёта коррелированной цветовой температуры

Первые методы расчёта КЦТ появились в конце 60-хх гг. XX века. За следующие 50 лет их было предложено около десяти: есть и численные решения и аналитические, но все они так или иначе основаны на свойствах ЛЧТ и изотерм.

Метод Мак Ками

Метод Мак Ками [2] был предложен в 1992 году. Для расчёта КЦТ предлагается полином третьего порядка. Полином был получен исходя из предположения, что все изотермы пересекаются в определённой точке на диаграмме цветности xu . Он имеет следующий вид:

$$T = -449n^3 + 3525n^2 - 6823.3n + 5530.33 \quad (4.1)$$

$$\text{где } n = (x - 0.3320) / (y - 0.1858)$$

Метод Хавьера Эрнандеса

Метод Хавьера Эрнандеса [2] как и предыдущий рассмотренный метод представляет собой аналитическое решение вида

$$\begin{aligned} n &= (x - 0.3366) / (y - 0.1735) \\ T_{\text{КЦТ}} &= -949.86315 + 6253.80338 \cdot e^{-n/0.92159} + \\ &+ 28.70599 \cdot e^{-n/0.20039} + 0.00004 \cdot e^{-n/0.07125} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Если $T_{\text{КЦТ}} > 50000$, то

$$\begin{aligned} n &= (x - 0.3356) / (y - 0.1691) \\ T_{\text{КЦТ}} &= +36284.48953 + 0.00228 \cdot e^{-n/0.07861} + \\ &+ 5.4535 \cdot 10^{-36} \cdot e^{-n/0.01543} \end{aligned} \quad (4.3)$$

В заключение теоретической части надо сказать, что в 2013 г. Йоши Оно предложил три метода расчёта: метод треугольника, параболы и комбинированный метод. Результаты сравнительного тестирования перечисленных, а также рассмотренных выше методов приводятся в [3]

4.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из (в скобках указан шифр руководства):

1. Однофазного источника питания ОИП6 (ОИП.218.5 РЭ);
2. Регулируемого автотрансформатора РАТ Т5 (РАТ.318.2 РЭ);
3. Электророзетки с заземляющими контактами ЭРСЗК1 (ЭРСЗК.2308 РЭ);
4. Вольтметра 512;
5. Спектроколориметра «ТКА–ВД» (Руководство по эксплуатации);
6. Лампы накаливания ЛН Б230-40-1;
7. Компактной люминесцентной лампы КЛЛ G4U 20 E27 2700;
8. Светодиодной лампы СД BL-7SMD12E27-W.

На установку имеется комплект документации, которую необходимо изучить перед выполнением лабораторной работы.

4.3 Задания к работе

1. Измерить координаты цветности (x, y) излучения лампы накаливания Б230-40-1 для напряжений сети в диапазоне 100 В – 220 В с шагом в 20 В. По полученным экспериментальным путём данным определить коррелированную цветовую температуру лампы накаливания Б230-40-1. Построить на графике МКО 1931 линию цветностей Б230-40-1 при различных напряжениях сети. Сравнить данную линию с линией чёрного тела.

2. Измерить координаты цветности (x , y) излучения КЛЛ G4U 20 E27 2700 при сетевом напряжении 220 В. По полученным экспериментальным путём данным определить коррелированную цветовую температуру КЛЛ G4U 20 E27 2700. Построить на графике МКО 1931 цветность и указать соответствующую ей КЦТ.
3. Измерить координаты цветности (x , y) излучения СД BL-7SMD12E27-W при сетевом напряжении 220 В. По полученным экспериментальным путём данным определить коррелированную цветовую температуру СД BL-7SMD12E27-W. Построить на графике МКО 1931 цветность и указать соответствующую ей КЦТ.

4.4 Указания к выполнению работы

Ознакомиться с руководствами на устройства, входящие в состав лабораторной установки. Собрать схему 1.1.1, указанную в документе «Электрические источники света и светильники. Руководство по выполнению базовых экспериментов». При выполнении заданий 1, 2, 3 значения координат цветности (x , y) получают в результате многократных измерений (5-10) и их последующей статистической обработкой, т.е. результат должен быть записан в виде: $x = \bar{x} \pm \Delta\bar{x}$ с доверительной вероятностью P , где x – обозначение величины, \bar{x} – среднее арифметическое значение величины, $\Delta\bar{x}$ – полная погрешность. В отчёте следует указать этапы обработки результатов измерений.

При выполнении задания 1 напряжение регулировать автотрансформатором РАТ Т5, значение напряжения фиксировать по показаниям вольтметра 512. Расчёт КЦТ следует осуществить двумя способами: с помощью методов Мак Ками и Хавьера Эрнандеса. В расчётах использовать средние арифметические значения (x , y). При расчёте КЦТ по методу Робертсона перейти к координатам цветности (u , v) по формуле

$$\begin{aligned}u &= 4 \cdot x / (-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3) \\v &= 6 \cdot y / (-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3)\end{aligned}\quad (4.4)$$

Вычисления рекомендуется⁴ проводить в табличном процессоре MS Office Excel или Libre Office Calc. При построении линии цветности излучения ЛОН 40 над каждой цветностью указать соответствующую ей температуру.

Для выполнения задания 2 и 3 установить посредством автотрансформатора напряжение 220 В, значение напряжения фиксировать по показаниям вольтметра 512. КЦТ также рассчитать тремя указанными выше методами.

4.5 Контрольные вопросы и задания

1. Что такое абсолютно чёрное тело? Каким уравнением описывается спектральная плотность излучения абсолютно чёрного тела? Кто автор этого уравнения?
2. Что такое цветовая температура? Какие ещё эквивалентные температуры вы знаете?
3. Что такое коррелированная цветовая температура? В чём разница между цветовой температурой и коррелированной цветовой температурой?
4. Почему понятие коррелированной цветовой температуры вводится на равноконтрастном графике МКО 1964 г.
5. Какие методы расчёта КЦТ вы знаете? Расскажите, как они работают.
6. В чём удобство использования в качестве единицы температуры обратного мекельвина MK^{-1} ?
7. Расскажите об устройстве и принципе работы колориметра «ТКА – ВД».
8. Дайте определение спектральной плотности энергетической величины. В чём отличие энергетической величины от её спектральной плотности?

⁴Если Вам удобно работать с другими инструментами, то вы можете использовать их.

5 Определение координат цвета методом фотоэлектрической колориметрии

5.1 Краткие прикладные и теоретические сведения по изучаемым вопросам

Фотоэлектрические колориметры действуют по принципу непосредственного измерения координат цвета. Для решения этой задачи необходимо иметь три приёмника со спектральными чувствительностями, соответствующими функциям $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. В качестве таких приёмников в фотоэлектрической колориметрии применяют фотоэлементы с исправляющими фильтрами. При этом может быть использован один фотоприёмник, перед которым последовательно вводятся три комбинации светофильтров или три одновременно работающих приёмника со светофильтрами.

Приёмники излучения, используемые в фотоэлектрических колориметрах, должны быть достаточно чувствительны во всей области видимого спектра, иметь прямую пропорциональную зависимость фототока от освещённости, малое утомление и низкий температурный коэффициент. При этих условиях величины фототоков приёмников, снабжённых корректирующими светофильтрами, будут следующими:

$$\begin{aligned} I_x &= C_x \int p(\lambda) \cdot \tau_x(\lambda) \cdot g(\lambda) d\lambda; \\ I_y &= C_y \int p(\lambda) \cdot \tau_y(\lambda) \cdot g(\lambda) d\lambda; \\ I_z &= C_z \int p(\lambda) \cdot \tau_z(\lambda) \cdot g(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Здесь I_x, I_y, I_z — значения фототоков; $\tau_x(\lambda), \tau_y(\lambda), \tau_z(\lambda)$ — коэффициенты спектрального пропускания корректирующих светофильтров; $g(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность приёмников излучения; C_x, C_y, C_z — коэффициенты пропорциональности.

Значения фототоков будут пропорциональны координатам цвета при выполнении следующего условия :

$$\begin{aligned}
 \bar{x}(\lambda) &= \tau_x(\lambda)g(\lambda); \\
 \bar{y}(\lambda) &= \tau_y(\lambda)g(\lambda); \\
 \bar{z}(\lambda) &= \tau_z(\lambda)g(\lambda).
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

В качестве приёмников излучения в ФЭК используется селеновый фотоэлемент, перед которым могут быть поочерёдно установлены тщательно подобранные специальные исправляющие фильтры, которые при каждом поочерёдном измерении воспроизводят спектральную чувствительность системы (фотоэлемент + светофильтр), функционально связанную с международными функциями сложения цветов $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. При воспроизведении кривой $\bar{x}(\lambda)$, имеющей в пределах видимого спектра два максимума, возникают трудности. Кривая спектральной чувствительности с двумя максимумами может быть получена параллельным соединением двух приёмников излучения или разделением площади фотокатода на два участка, каждый из которых снабжён различной комбинацией светофильтров, воспроизводящих отдельно коротковолновую и длинноволновую части кривой $\bar{x}(\lambda)$. Однако это приводит к снижению чувствительности колориметра и увеличению погрешности. Поэтому вместо международной кривой $\bar{x}(\lambda)$ воспроизводится трансформированная кривая $\bar{x}(\lambda)_n$, связанная с функциями сложения цветов следующим соотношением:

$$\bar{x}_n(\lambda) = 0.833\bar{x}(\lambda) + 0.333\bar{y} - 0.167\bar{z}(\lambda)
 \tag{5.3}$$

Постоянные коэффициенты в выражении 5.3 выбраны таким образом, чтобы кривая $\bar{x}(\lambda)_n$ практически не имела второго максимума и могла быть легко воспроизведена (рис. 5.1)

5.2 Описание лабораторной установки

В данной работе использовался фотоэлектрический колориметр марки «КГ». Его схема представлена на рис. 5.2 В приёмной головке колориметра расположен селеновый фотоэлемент С-10, перед которым поочерёдно могут быть установлены тщательно подобранные исправляющие светофильтры.

Светофильтры колориметра расположены на диске, вращаемом с помощью рукоятки. В колориметрической головке имеются два диска.

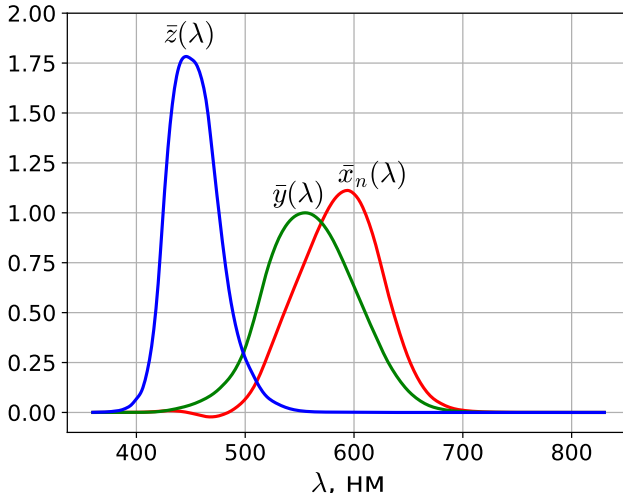


Рисунок 5.1: Функции сложения цветов в трансформированной системе

В первом расположены светофильтры для измерения координат цвета X, Y, Z , во втором — для измерения цветовой температуры излучения по сине-красному отношению.

5.3 Задания к работе

1. Найти градуировочные коэффициенты C_x, C_y, C_z . В качестве эталонной лампы используйте лампу накаливания Б230-40-1.
2. Определить координаты цвета X, Y, Z и цветности x, y излучения прожекторной лампы накаливания, КЛЛ G4U 20 E27 2700, СД BL-7SMD12E27-W при сетевом напряжении 220 В.
3. Построить градуировочный график зависимости цветовой температуры от сине-красного отношения.

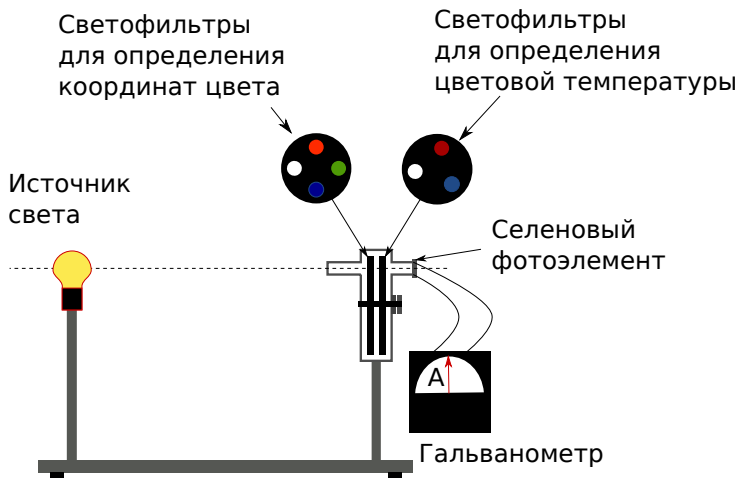


Рисунок 5.2: Фотоколориметр

- Используя градуировочный график, по методу сине-красного отношения определить цветовую температуру прожекторной лампы накаливания для напряжений сети в диапазоне 100 В – 220 В с шагом в 20 В.

Построить график зависимости цветовой температуры от напряжения на лампе.

5.4 Указания к выполнению работы

5.4.1 Градуировка фотоэлектрического колориметра для определения координат цвета

- Установите перед фотоколориметром лампу накаливания Б230-40-1.
- С помощью лабораторного автотрансформатора подайте на неё напряжение 220 В.
- Установите первый и второй диски фотоколориметра в полностью открытое положение, когда селеновый фотоэлемент не перекрывается ни одним из светофильтров.

4. Установите первый диск фотокориметра в положение, когда селеновый фотоэлемент перекрывается фильтром X. По гальванометру определите значения фототока i_x приемного устройства.
5. Установите первый диск фотокориметра в положение, когда селеновый фотоэлемент перекрывается фильтром Y. По гальванометру определите значения фототока i_y приемного устройства.
6. Установите первый диск фотокориметра в положение, когда селеновый фотоэлемент перекрывается фильтром Z. По гальванометру определите значения фототока i_z приемного устройства.
7. Найдите градуировочные коэффициенты C_x, C_y, C_z :

$$\begin{aligned}
 C_x &= \frac{x + 0.5y - 0.167}{y} \cdot \frac{i_y}{i_x}; \\
 C_y &= 1; \\
 C_z &= \frac{1 - x - y}{y} \cdot \frac{i_y}{i_z}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

где x, y — координаты цветности излучения лампы накаливания Б230-40-1 (были определены в лабораторной работе № 4); i_x, i_y, i_z — фототоки приёмного устройства колориметра от излучения лампы накаливания Б230-40-1.

5.4.2 Измерение координат цвета и цветности

1. Определите значения фототоков i_x, i_y, i_z прожекторной лампы накаливания, КЛЛ G4U 20 E27 2700, СД BL-7SMD12E27-W. Найденные значения занесите в табл. 5.1 Процедура измерения фототоков соответствует пунктам 1–6 градуировки.
2. По значениям фототоков рассчитайте координаты цвета X, Y, Z по соотношениям

$$\begin{aligned}
 X &= 1.2C_x i_x - 0.4C_y i_y + 0.2C_z i_z; \\
 Y &= C_y i_y; \\
 Z &= C_z i_z,
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

C_x, C_y, C_z — градуировочные коэффициенты.

Найденные значения координат цвета занесите в табл. 5.1

3. По найденным значениям координат цвета рассчитайте значения координат цветности:

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{X + Y + Z}; \\y &= \frac{Y}{X + Y + Z}\end{aligned}\tag{5.6}$$

Найденные значения координат цветности занесите в табл. 5.1

Таблица 5.1: Координаты цвета и цветности ламп

Лампа	i_x	i_y	i_z	X	Y	Z	x	y
Прожекторная ЛН								
КЛЛ G4U 20 E27 2700								
СД BL-7SMD12E27-W								

5.4.3 Построение градуировочного графика зависимости цветовой температуры от сине-красного отношения

1. Занесите в табл. 5.2 значения цветových температур лампы Б230-40-1, полученные в лабораторной работе 4, для напряжений 100В, 120В, 140В, 160В, 180В, 200В, 220В.
2. Установите перед фотоколориметром лампу накаливания Б230-40-1.
3. С помощью лабораторного автотрансформатора подайте на неё напряжение 100 В.
4. Установите первый и второй диски фотоколориметра в полностью открытое положение, когда селеновый фотоэлемент не перекрывается ни одним из светофильтров.

5. Установите второй диск фотоколориметра в положение, когда селеновый фотоэлемент перекрывается фильтром С. По гальванометру определите значения фототока i_c приемного устройства.
6. Установите второй диск фотоколориметра в положение, когда селеновый фотоэлемент перекрывается фильтром К. По гальванометру определите значения фототока i_k приемного устройства.
7. Найдите отношение i_c/i_k . Найденное отношение занесите в табл. 5.2.
8. Повторите пункты 2–6 для напряжений 120В, 140В, 160В, 180В, 200В, 220В.
9. Постройте градуировочный график. По оси абсцисс отложите отношения i_c/i_k , по оси ординат соответствующие им значения цветовой температур.

Таблица 5.2: Данные для построения градуировочного графика

U, В	i_c/i_k	T, цв.
100		
120		
140		
160		
180		
200		
220		

5.4.4 Определение цветовой температуры лампы накаливания методом сине-красного отношения

1. Определите фототоки i_c , i_k для прожекторной ЛН и найдите отношение i_c/i_k . Найденное отношение занесите в таблицу 5.3. Порядок действий аналогичен пунктам 1–8 процедуры построения градуировочного графика.

2. По построенному градуировочному графику найдите цветовую температуру прожекторной ЛН для соответствующих напряжений. Найденную цветовую температуру занесите в таблицу 5.3
3. По данным таблицы 5.3 постройте график зависимости цветовой температуры прожекторной ЛН от напряжения сети.

Таблица 5.3: Цветовая температура прожекторной ЛН при различном напряжении

U, В	i_c/i_k	T, цв.
100		
120		
140		
160		
180		
200		
220		

5.5 Контрольные вопросы

1. Расскажите про принцип действия фотоэлектрических колориметров.
2. Какие есть особенности при воспроизведении функции сложения цветов $\bar{x}(\lambda)$?
3. Расскажите про метод определения цветовой температуры по сине-красному отношению. Какие ограничения накладывает данный метод на источники излучения?
4. Как строится градуировочный график для определения цветовой температуры по методу сине-красного отношения?
5. Какие требования предъявляются к фотоэлементам используемым в фотоэлектрических колориметрах?

6. Напишите уравнения связывающие фототоки колориметра при разных светофильтрах с координатами цвета.

6 Определение светового потока источника света по угловому распределению силы света

6.1 Краткие прикладные и теоретические сведения по изучаемым вопросам

Для характеристики плотности светового потока по тому или иному направлению всё пространство вокруг источника разбивают на элементарные телесные углы¹ и определяют световой поток в каждом из них. Величина, характеризующая пространственную плотность светового потока, называется силой света (см. рис. 6.2). Таким образом, световой поток в пределах всего пространства, т.е. в полном телесном угле, является интегралом следующего вида:

$$\Phi = \int_{\omega=4\pi} I \cdot d\omega \quad (6.1)$$

Приводимые далее интегралы (6.3), (6.5) для расчёта светового потока ИС с круглосимметричным и несимметричным светораспределением выводятся из формулы (6.1).

Геометрический образ силы света есть направленный отрезок или радиус-вектор. Причём длина отрезка пропорциональна значению силы света. Геометрическое место концов радиус-векторов силы света называется фотометрическим телом (см. рис. 6.1).

Часто вместо фотометрического тела приводятся его сечения для одной или нескольких меридиональных плоскостей. Эти сечения получили названия кривых сил света (КСС). Если светильник обладает осевой симметрией, т.е. КСС во всех меридиональных плоскостях одинаковые, то дают КСС для одной плоскости (см. рис. 6.3), если у светильника несколько плоскостей симметрии или он асимметричен, то приводят КСС в плоскостях, наиболее полно характеризующих светораспределение (см. рис. 6.4).

¹Вершины телесных углов совмещаются с источником света, а их оси — с интересующими направлениями

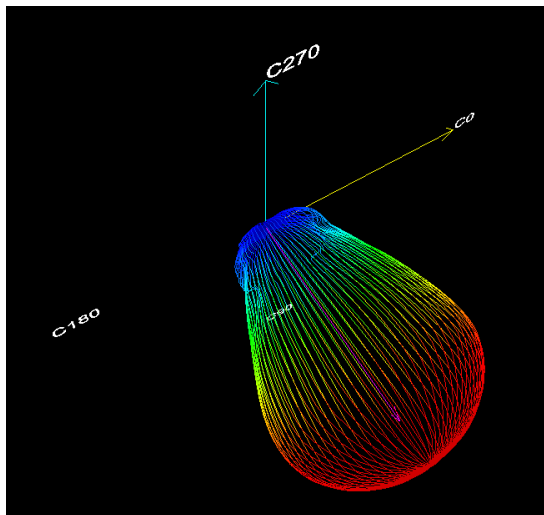


Рисунок 6.1: Фотометрическое тело осесимметричного ОП, полученное на гониофотометре Everfine GO 2000 A

Если известны освещённость приёмника, а также расстояние между ним и источником света, то сила света находится по формуле

$$I = E \cdot l^2 \quad (6.2)$$

6.1.1 Расчёт светового потока ОП (ИС) с круглосимметричным светораспределением

По результатам измерения распределения силы света исходные данные для расчёта представляют в виде двух массивов значений: сил света (I_0, I_1, \dots, I_m) и соответствующих меридиональных углов ($\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_m$), где $m+1$ — число измеренных значений силы света.

Для определения светового потока ОП с круглосимметричным распределением силы света в интервале меридиональных углов от γ_0 до γ_m используют формулу

$$\Phi = 2\pi \int_{\gamma=0}^{\pi} I(\gamma) \sin \gamma d\gamma \quad (6.3)$$

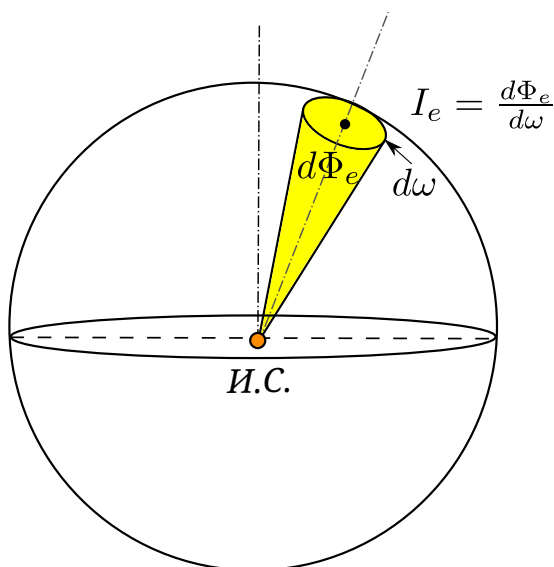


Рисунок 6.2: Сила света

Расчёт приближённого значения величины Φ для массива углов с равномерным шагом $\Delta\gamma$ выполняют по формуле

$$\Phi = 2\pi\Delta\gamma \left(\frac{I_0 \sin \gamma_0 + I_m \sin \gamma_m}{2} + \sum_{j=1}^{m-1} I_j \sin \gamma_j \right), \quad (6.4)$$

где I_j — измеренные значения силы света, кд; γ_j — соответствующие значения меридиональных углов, рад; $\Delta\gamma = \frac{\gamma_m - \gamma_0}{m}$, рад.

6.1.2 Расчёт светового потока ОП (ИС) с произвольным светораспределением

По результатам измерения распределения силы света на гониофотометре световой поток ОП (или ИС), излучающий по всему пространству, определяют в системе фотометрирования C, γ по формуле

$$\Phi = \int_{C=0}^{2\pi} \int_{\gamma=0}^{\pi} I(C, \gamma) \sin \gamma d\gamma dC \quad (6.5)$$

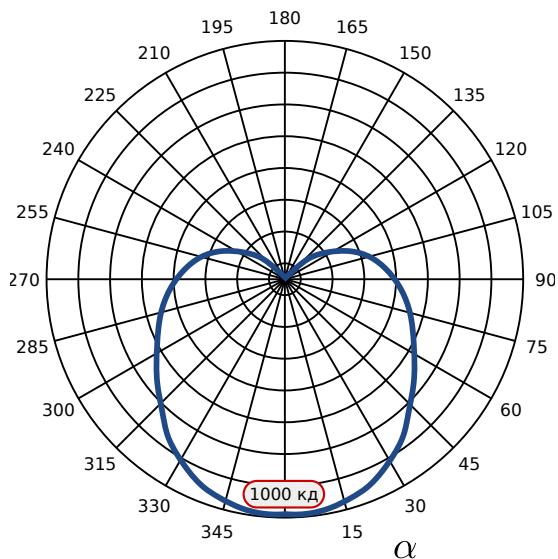


Рисунок 6.3: КСС источника с круглосимметричным светораспределением

где $I(C, \gamma)$ — сила света ОП (или ИС) в направлении, определяемом углами C и γ .

6.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из:

1. Люксметра Ю-116 ;
2. Лимба для отсчёта углов;
3. Светильника «Колокол»;
4. Люминесцентной лампы КЛЛ G4U 20 E27 270;
5. Измерительной рулетки.

На люксметр имеется техническое описание и инструкция по эксплуатации, которые необходимо изучить перед выполнением лабораторной работы. Схема установки представлена на рис. 6.5.

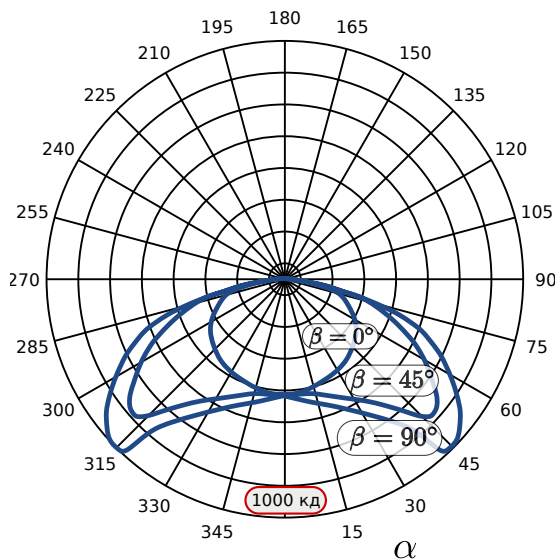


Рисунок 6.4: КСС источника с двумя плоскостями симметрии

Люксметр состоит из измерителя люксметра и отдельного фотоэлемента с насадками. На передней панели измерителя имеются кнопки переключателя и табличка со схемой, связывающей действие кнопок и используемых насадок с диапазонами измерений. Прибор магнитоэлектрической системы имеет две шкалы: «0-100» и «0-30». На каждой шкале точками отмечено начало диапазона измерений: на шкале «0-100» точка находится над отметкой 20, на шкале «0-30» точка находится над отметкой 5. Прибор имеет корректор для установки стрелки в нулевое положение. На боковой стенке корпуса измерителя расположена вилка для присоединения селенового фотоэлемента. Селеновый фотоэлемент находится в пластмассовом корпусе и присоединяется к измерителю шнуром с розеткой, обеспечивающей правильную полярность соединения. Длина шнура – 1.5 м. Светочувствительная поверхность фотоэлемента составляет около 30 см². Для уменьшения косинусной погрешности применяется насадка на фотоэлемент, состоящая из полусферы, выполненной из белой светорассеивающей пластмассы, и непрозрачного пластмассового кольца, имеющего сложный профиль. Насадка обозначена буквой К, нанесённой на внутреннюю сторону.

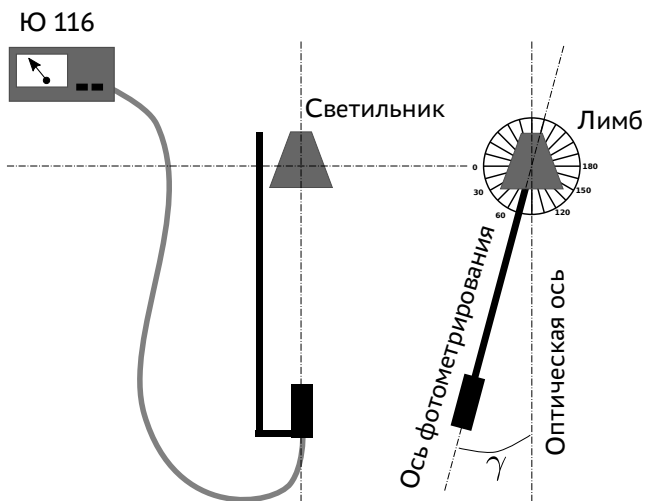


Рисунок 6.5: Гониофотометр

Эта насадка применяется не самостоятельно, а совместно с одной из трёх других насадок, имеющих обозначение М, Р, Т. Каждая из этих трёх насадок совместно с насадкой К образует три поглотителя с общим номинальным коэффициентом ослабления 10, 100, 1000 и применяется для расширения диапазонов измерений.

6.3 Задание

1. Измерить КСС люминесцентной лампы G4U 20 E27 270 в диапазоне углов $\gamma \in [0^\circ, 180^\circ]$. Построить КСС в полярной системе координат. Рассчитать световой поток люминесцентной лампы.
2. Измерить КСС ОП «Колокол» с люминесцентной лампой G4U 20 E27 270 в диапазоне углов $\gamma \in [0^\circ, 180^\circ]$. Построить КСС в полярной системе координат. Рассчитать световой поток ОП.
3. Определить к.п.д. ОП.

6.4 Указания к выполнению работы

1. Закрепите компактную люминесцентную лампу G4U 20 E27 270 в вертикальном положении. Оптический центр лампы должен совпадать с центром вращения лимба.
2. Включите лампу.
3. Перед измерением установите измеритель люксметра в горизонтальное положение. Проверьте, находится ли стрелка прибора на нулевом делении шкалы, для чего фотоэлемент отсоедините от измерителя люксметра. В случае необходимости с помощью корректора установите стрелку прибора на нулевое деление шкалы.
4. Определите требуемый диапазон измерений люксметра. Для чего последовательно установите насадки КТ, КР, КМ и при каждой насадке сначала нажимайте правую кнопку, а затем левую. Определите комбинацию «кнопка–насадка», для которой показания прибора были максимальны, но не выходили за предел шкалы. Если для насадки КМ и нажатой левой кнопке стрелка не доходит до 5 делений по шкале «0–30», измерения производите без насадок, т.е. открытым фотоэлементом.

При нажатой правой кнопке, против которой нанесены наибольшие значения диапазонов измерений кратные 10, следует пользоваться для отсчёта показаний шкалой «0–100». При нажатой левой кнопке, против которой нанесены наибольшие значения диапазонов кратные 30, следует пользоваться шкалой «0–30». Показания прибора в делениях по соответствующей шкале умножают на коэффициент ослабления, зависящий от применяемых насадок (указан на насадках).

Для получения правильных показаний люксметра оберегайте селеновый фотоэлемент от излишней освещённости, не соответствующей выбранным насадкам. Поэтому, если величина измеряемой освещённости неизвестна, начинайте измерения с установки на фотоэлемент К, Т.

5. Поворачивая лимб, последовательно измерьте освещённость, создаваемую люминесцентной лампой в диапазоне углов $\gamma \in [0^\circ, 180^\circ]$ с шагом $\Delta\gamma = 5^\circ$. Занесите показания в табл. 6.1.
6. Измерьте расстояние между оптическим центром лампы и селеновым фотоэлементом с помощью рулетки измерительной. Занесите показания в табл. 6.1.
7. Рассчитайте силу света по формуле $I_\gamma = E_\gamma \cdot l^2$ для каждого угла. Занесите показания в табл. 6.1. Постройте КСС.
8. Рассчитайте световой поток люминесцентной лампы по формуле (6.4).
9. Закрепите светильник «Колокол» с люминесцентной лампой G4U 20 E27 в вертикальном положении. Включите светильник.
10. Повторите пункты 5–8 для светильника.
11. Рассчитайте к.п.д. светильника по формуле $\eta = \frac{\Phi_{\text{КЛЛ}}}{\Phi_{\text{ОП}}} \cdot 100\%$.

После окончания измерений:

- 1) отсоедините фотоэлемент от измерителя люксметра;
- 2) наденьте на фотоэлемент насадку Т;
- 3) уложите фотоэлемент в крышку футляра.

6.5 Контрольные вопросы и задания

1. Что такое сила света? Единица измерения силы света.
2. Сформулируйте закон квадратов расстояния для точечного ИС.
3. Напишите формулу для нахождения светового потока с круглосимметричным светораспределением.
4. Напишите формулу для нахождения светового потока с произвольным светораспределением.
5. Как найти к.п.д. ОП?

Таблица 6.1: Экспериментальные и расчётные данные

КЛЛ				Светильник			
γ	Е, лк	I, кд	I, м	γ	Е, лк	I, кд	I, м
0							
5							
15							
25							
30							
35							
40							
45							
50							
55							
60							
65							
70							
75							
80							
85							
90							
95							
100							
105							
110							
115							
120							
125							
130							
135							
140							
150							
155							
160							
175							
180							

7 Вспомогательный материал

7.1 Матричные вычисления в Python

Расчёты и линейные преобразования необходимые для выполнения лабораторных работ удобно производить в интерактивной оболочке языка python с импортированной библиотекой NumPy. Для запуска интерпретатора языка python в командной строке¹ наберите: python. В качестве примера далее приведён сеанс работы в интерактивной оболочке.

```
>>> # Импортируем библиотеку numpy
>>> import numpy as np
>>> # Создадим диагональную матрицу A
>>> A = np.matrix([[255, 0, 0], [0, 255, 0], [0, 0, 255]])
>>> # Выведем матрицу A на экран
>>> A
matrix([[255,  0,  0],
        [ 0, 255,  0],
        [ 0,  0, 255]])
>>> # Создадим матрицу B
>>> B = np.matrix([[126.7, 31.6, 108.2],
...               [56.2, 139.7, 24.9],
...               [0.1, 28.3, 577.6]])
>>> # Создадим 3 переменных и присвоим им значения
>>> X = 100; Y = 100; Z = 100
>>> # Создадим вектор-столбец
>>> C = np.matrix([[X], [Y], [Z]])
>>> # Умножим диагональную матрицу A на матрицу обратную к B
>>> # и на вектор C
>>> D = A*B.I*C
>>> # Выведем вектор столец на экран
```

¹Интерпретатор языка python установлен на персональном компьютере установки «Сатурн»

```
>>> D
matrix([[ 138.68938256],
        [ 119.92319469],
        [ 38.24844988]])
```

now exiting Console...

7.2 Обработка результатов многократных измерений

1. Оценить среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

2. Вычислить среднеквадратичное отклонение

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}$$

3. Выбрать доверительную вероятность $P = 95\%$ (для большинства лабораторных работ по курсу «Основы светотехники и колориметрии»).
4. По таблице определить коэффициент Стьюдента $t_{P,N}$.

Таблица 7.1: Значения коэффициентов Стьюдента $t_{P,N}$ в зависимости от числа наблюдений N при доверительной вероятности $P = 95\%$:

N ^o	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
$t_{95,n}$	12.7	4.3	3.2	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.0

5. Найти случайную погрешность: $\Delta x = t_{P,N} \tilde{\sigma}$
6. Найти полную погрешность:

$$\Delta \tilde{x} = \sqrt{\Delta x^2 + \Theta^2},$$

где Θ — абсолютная погрешность прибора.

7. Записать окончательный вариант: $x = \tilde{x} \pm \Delta\tilde{x}$ с доверительной вероятностью P

Словарь терминов

диаграмма цветности (график цветности) графическое изображение на плоскости, где точки, определяемые координатами цветности, однозначно соответствуют цветностям цветовых стимулов

ПРИМ. В стандартной колориметрической системе МКО для получения графика цветностей «х» и «у» обычно за «у» принимается ось ординат, а за «х» ось абсцисс. 47

коррелированная цветовая температура температура чёрного тела с цветностью ближайшей на равноконтрастной диаграмме МКО 1960 к цветности данного данного спектрального распределения.

ПРИМ. 1. При расчёте координат цветности чёрного тела по формуле Планка согласно МТШ-90 следует использовать следующее значение второй радиометрической постоянной $c_2 = 1.4388$

ПРИМ. 2. Координаты цветности $u', 2/3v'$ равноконтрастной системы МКО 1974 эквивалентны координатам u, v системы МКО 1960.

ПРИМ. 3. Понятие коррелированной цветовой температуры не может применяться если цветность испытуемого источника удалена от линии чёрного тела более чем на

$$\Delta C = [(u'_t - u'_p)^2 + \frac{4}{9}(u'_t - v'_p)^2]^{1/2} = 5 \cdot 10^{-2},$$

где u'_t, v'_t соответствуют испытуемому источнику, u'_p, v'_p – чёрному телу (МКО 15: Технический отчёт: Колориметрия, 3-е издание) 42

насыщенность ощущение цветности объекта, оценённое пропорционально светлоте аналогичным образом освещённой поверхности, которая воспринимается белой или хорошо пропускающей свет

ПРИМ. При заданных условиях наблюдения и соответствующих условиям дневного зрения уровнях яркости цветовой стимул, воспринимаемый как неизолированный цвет, имеющий заданную цветность и соответствующий имеющей заданный коэффициент яркости поверхности, сохраняет примерно неизменную насыщенность цвета при всех уровнях освещённости, за исключением случаев очень высокой светлоты. Если при тех же условиях наблюдения и заданном уровне освещённости имеет место увеличение коэффициента яркости, то насыщенность света обычно тоже возрастает. 10

основные цветовые стимулы три цветовых стимула, на которых основана трёхцветная колориметрическая система.

ПРИМ 1. Данные цветовые стимулы являются либо реальными цветовыми стимулами, либо теоретическими, которые определяются линейными комбинациями действительных цветовых стимулов, величина каждого из этих трёх основных цветовых стимулов выражается либо в фотометрических, или энергетических единицах, либо, в более общем виде, с помощью определения отношений этих величин, или константацией того факта, что данное аддитивное смешение этих трёх цветовых стимулов уравнивает по цвету определённый ахроматический стимул.

ПРИМ 2. В стандартных колориметрических системах МКО основные цветовые стимулы обозначаются символами $[R]$, $[G]$, $[B]$; $[X]$, $[Y]$, $[Z]$; $[R_{10}]$, $[G_{10}]$, $[B_{10}]$ и $[X_{10}]$, $[Y_{10}]$, $[Z_{10}]$. 11, 15

равноэнергетический спектр Спектр излучения, при котором спектральная плотность энергетической величины, являющейся функцией длины волны излучения, постоянна в видимой области спектра ($\varphi_{\lambda}(\lambda) = const$)

ПРИМ. Излучение равноэнергетического спектра иногда рассматривается как излучение с определённым спектральным составом, в этом случае данная величина обозначается символом «E». 16

спектральная плотность фотометрической величины Физическая величина, определяемая отношением фотометрической величины dP , приходящейся на малый спектральный интервал $d\lambda$, содержащий данную длину волны λ , к ширине этого интервала

$$P_\lambda = dP/d\lambda$$

Буквенное обозначение: P_λ 77

спектральное распределение фотометрической величины Зависимость спектральной плотности фотометрической величины P_λ от λ .

Буквенное обозначение: $P_\lambda(\lambda)$ 16

функции сложения цветов координаты цвета монохроматических стимулов одинакового потока излучения в трёхцветной колориметрической системе

ПРИМ.1: Три величины функций сложения на данной длине волны называются «коэффициенты функции сложения» (color-matching coefficients) (раньше назывались «координатами функций сложения» или «удельными координатами цвета» [spectral tristimulus values]).

ПРИМ.2 Функции сложения можно использовать для расчета координат цвета цветового стимула по относительному спектральному распределению данного цветового стимула. См. публикацию МКО 15 и ISO 11664-:2007(E)/CIE S 014-1/E:2006 Colorimetry - Part 1: CIE Standard Colorimetric Observers.

ПРИМ.3 В стандартных колориметрических системах МКО функции сложения обозначаются символами $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ для системы XYZ и $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ для системы RGB. 8, 16, 18

цветность характеристика цветового стимула, определяемая его координатами цветности или его доминирующей, или дополнительной длиной волны и чистотой цвета 42

цветовой стимул видимое излучение, попадающее в глаз и вызывающее ощущение либо хроматического цвета, либо ахроматического цвета 8, 9

цветовой тон свойство зрительного восприятия, в соответствии с которым объект представляется имеющим цвет, аналогичный одному из следующих цветов: красный, жёлтый, зелёный, синий, или сочетание смежных пар этих цветов, рассматриваемых как замкнутое кольцо 10

чёрное тело идеальный тепловой излучатель, который полностью поглощает всё попадающее на него излучение независимо от длины волны, направления падения и состояния поляризации этого излучения.

ПРИМ. Этот излучатель имеет спектральную плотность энергетической яркости, максимальную по сравнению с прочими тепловыми излучателями, находящимися в состоянии соответствующего заданной температуре термического равновесия, независимо от длины волны и направленности излучения. 41, 75

Литература

1. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. — М. : Издательство «Мир», 1978.
2. Hernández-Andrés J., Lee Raymond L., Romero Javier. Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities. // [Applied optics](#). — 1999. — Vol. 38, no. 27. — P. 5703–5709.
3. Прытков С.В. Оценка погрешности методов расчёта коррелированной цветовой температуры // Сборник научных трудов SWORLD. — 2015. — Т. 40, № 3. — С. 80–91.
4. Ohta Noboru, Robertson Alan R. Colorimetry. Fundamentals and Applications. — John Wiley & Sons, Ltd, 2005. — ISBN: [100470094729](#).
5. Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчёты и измерения. — СПб. : Питер, 2009. — ISBN: [9785388003416](#).
6. Мешков В.В., Матвеев А.В. Основы светотехники ч. I. — М. : Энергия, 1979.
7. Мешков В.В., Матвеев А.В. Основы светотехники ч. II. — М. : Энергия, 1989.
8. Schanda János. Colorimetria : understanding the CIE system. — Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2007. — ISBN: [100470094729](#).
9. Гуревич М.М. Цвет и его измерение. — М. : Изд-во Академии наук СССР, 1950.
10. Луизов А.В. Глаз и свет. — Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983.
11. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. — М. : Энергоатомиздат, 1990.

12. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение: Пер. с англ. — М. : Мир, 1990.
13. Шаронов В.В. Свет и цвет. — М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1961.
14. ГОСТ Р 55703–2013 Источники света электрические. Методы измерений спектральных и цветовых характеристик. — М. : Стандартинформ, 2015.
15. ГОСТ Р 55702–2013 Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров. — М. : Стандартинформ, 2015.
16. Рыков В.И., Хритина С.В. Фотометрия. — Саранск : Изд. Мордов. ун-та, 1985.