

# Особенности цветового зрения при восприятии модулированного светового потока

В статье описываются результаты неразрушающих экспериментов *in vivo*, изучающих реакцию человеческого зрения на модулированное по амплитуде излучение. В основе экспериментов лежит субъективное уравнивание наблюдателем постоянного и переменного световых полей по яркости. Снимаются и анализируются зависимости реакции глаза на частоту и скважность световых импульсов для трех цветов излучения.

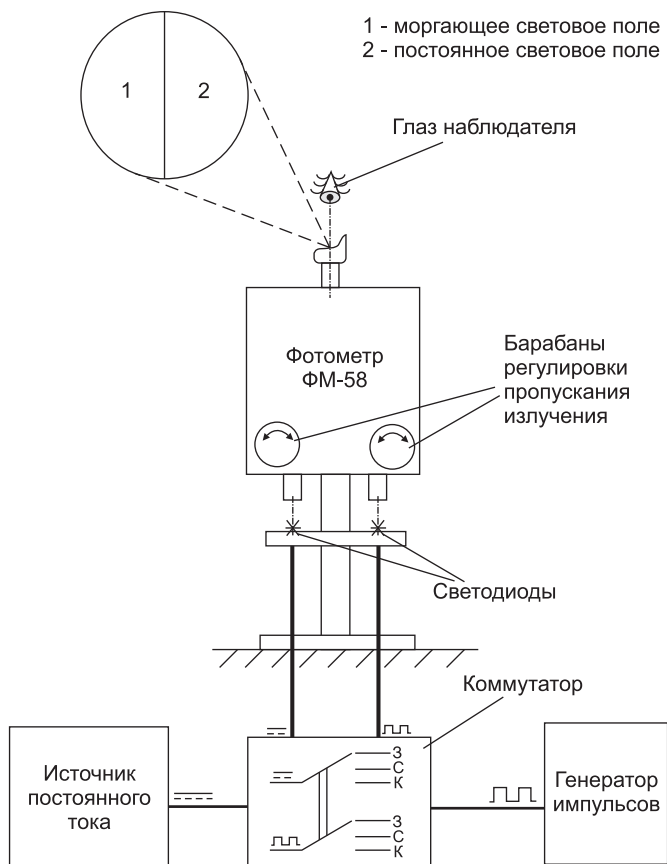


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

В связи с интенсивным развитием твердотельной светотехники с модулированным по интенсивности оптическим излучением большое значение приобретает светобиологическая безопасность последнего для человеческого зрения. В настоящее время предметом острых дискуссий является вопрос вреда пульсаций оптического излучения светодиодных светильников, применяемых в быту и на производстве. Также немаловажным будет и более общий вопрос чувствительности зрительной системы человека к оптическим пульсациям тех или иных частот.

В статье приводятся данные, полученные в результате экспериментального изучения зависимости восприятия яркости от частоты пульсаций светодиода. Смежные вопросы различимости коротких миганий светодиодного источника излучения рассматриваются в [1]. Подробно инерционные свойства человеческого зрения описаны в [2]. В указанном источнике рассматриваются линейная (зависимость Блонделя-Реза) и экспоненциальная математические модели функции затухания световосприятия, приводятся актуальные на тот момент (середина XX в.) методы экспериментальных исследований *in vivo*, использующих маятники, диски-обтюраторы и их комбинации, а также практические задачи, в частности различимость коротких и слабых вспышек в маячном деле.

За основу нашего эксперимента взято сравнение яркостей половин двусоставного светового поля, описанное в [5], где применяется фотометрический куб. В нашей работе ключевым узлом экспериментальной установки является фотометр ФМ-58 конструкции Пульриха [4].

На рис. 1 приведена структурная схема собранной экспериментальной установки. В нашем случае прибор работает в проходящем свете, создаваемом светодиодами. Освещение каждого из полей создается отдельным светодиодом, излучение которого попадает на соответствующий объектив фотометра. Диоды применяются одного типоминиала для достижения одинаковых оптических и электрических характеристик. Мы используем RGB-светодиоды типа 599R2GBC-CA.

Один из светодиодов работает в постоянном, а второй — в импульсном режиме, поэтому световые поля также имеют постоянный и импульсный характер соответ-

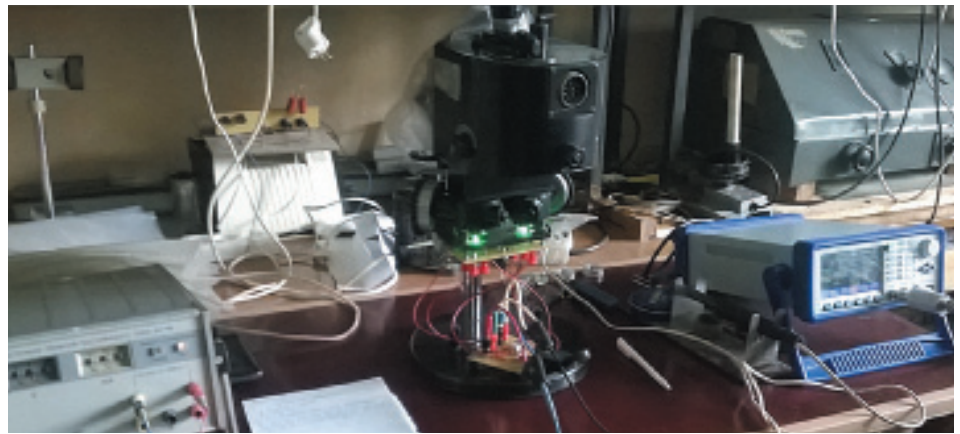
ственно. Задача наблюдателя — уравнять по яркости постоянное и пульсирующее световые поля с помощью барабанов, снабженных шкалами. Результат определяется путем сличения шкал. Можно принять пропускание соответствующего оптического канала эквивалентным яркости светодиода. Для простоты пропускание переменного излучения сразу выставлялось равным 100%, и показания снимались со шкалы пропускания постоянного излучения. Фактически яркость постоянного поля в момент уравнивания и есть эффективная яркость пульсирующего поля, при нормальных условиях всегда меньшая 100%. В ходе экспериментов рассматривалось воздействие на зрительную систему человека поочередно трех цветовых составляющих оптического излучения: зеленой, синей и красной. Это отвечает стандартной цветовой модели зрения, согласно которой рецепторы цветного зрения человеческого глаза (колбочки) бывают трех типов и реагируют, соответственно, на зеленую, синюю и красную области спектра. Спектры излучения светодиодов, применяемых непосредственно в ходе эксперимента, и их совместимость с соответствующими кривыми чувствительности глаз стандартного наблюдателя МКО рассмотрены в [3].

На рис. 2 показан внешний вид экспериментальной установки. В центре представлен фотометр ФМ-58 со светодиодами и устройством коммутации, справа — генератор импульсов, слева — источник постоянного тока.

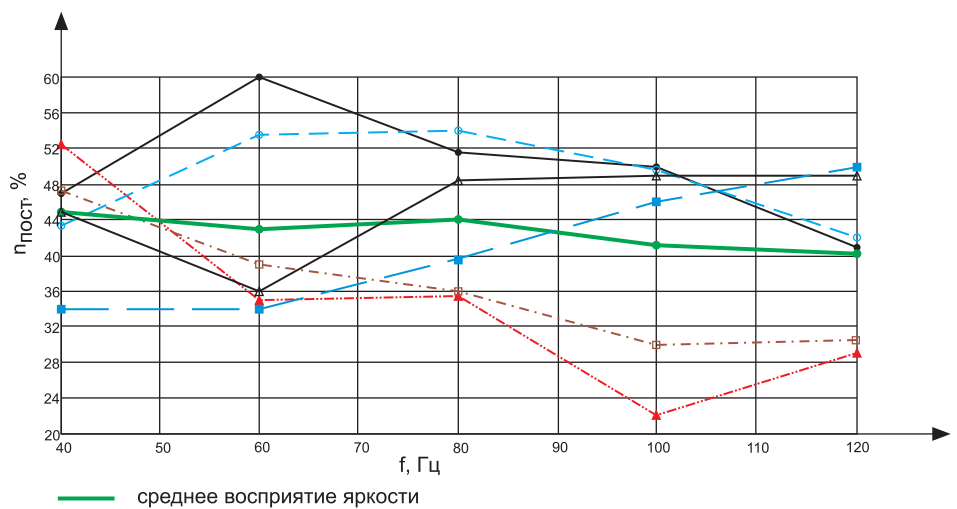
В ходе проведения серии экспериментов был снят ряд зависимостей эффективной яркости излучения от частоты. Для простоты и наглядности эксперимента скважность импульсов принимается равной двум, т. е. мы работаем с меандром. В таблице 1 представлены усредненные данные экспериментальных показаний шести испытуемых. На рис. 3–5 показаны результаты измерений и усредненные кривые для соответствующих цветов излучения.

**Таблица 1.** Усредненные зависимости восприятия яркости излучения различных цветов от частоты меандра

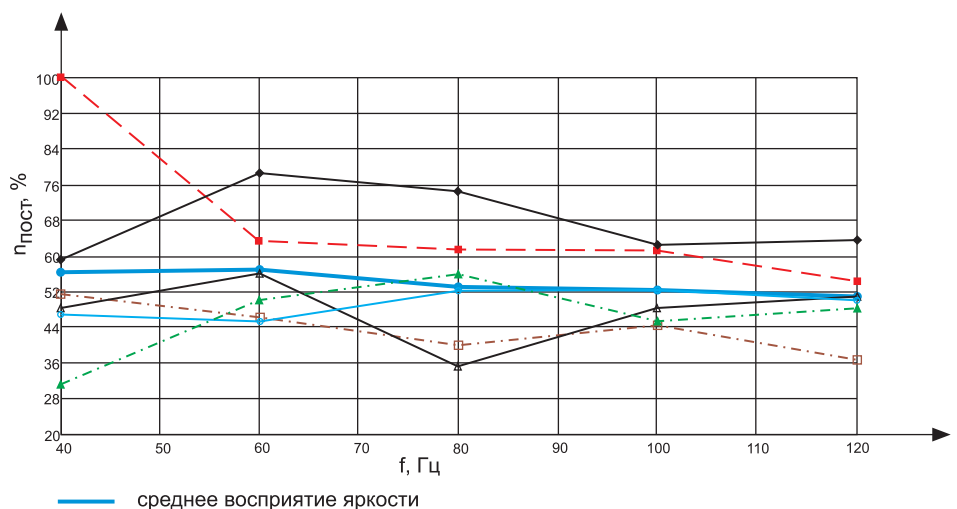
f, Гц	П <sub>постр</sub> %		
	Зеленый	Синий	Красный
40	44,833	65,765	42,083
60	42,917	56,471	40
80	44,167	54,765	43,917
100	41,083	53,206	43,25
120	40,25	50,441	45,333



**Рис. 2.** Внешний вид экспериментальной установки



**Рис. 3.** Зависимость восприятия яркости от частоты меандра (глазами наблюдателей зеленого излучения)



**Рис. 4.** Зависимость восприятия яркости от частоты меандра (глазами наблюдателей синего излучения)

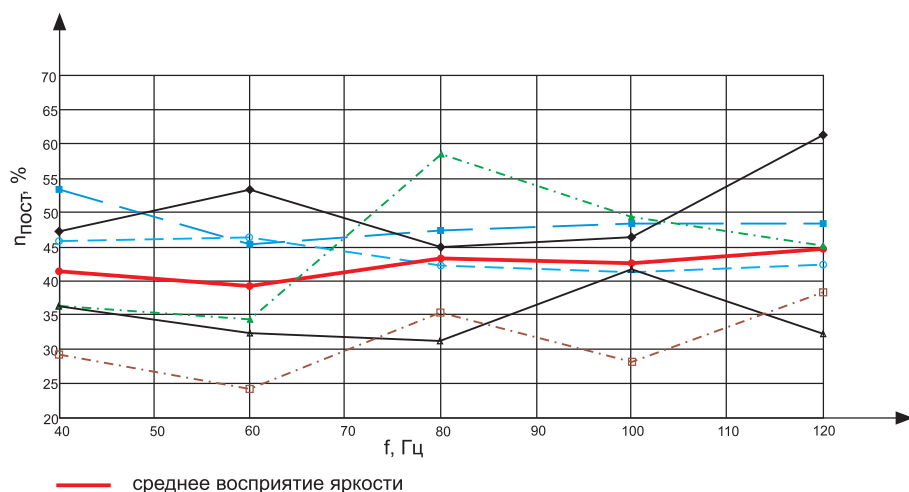


Рис. 5. Зависимость восприятия яркости от частоты меандра (глазами наблюдателей красного излучения)

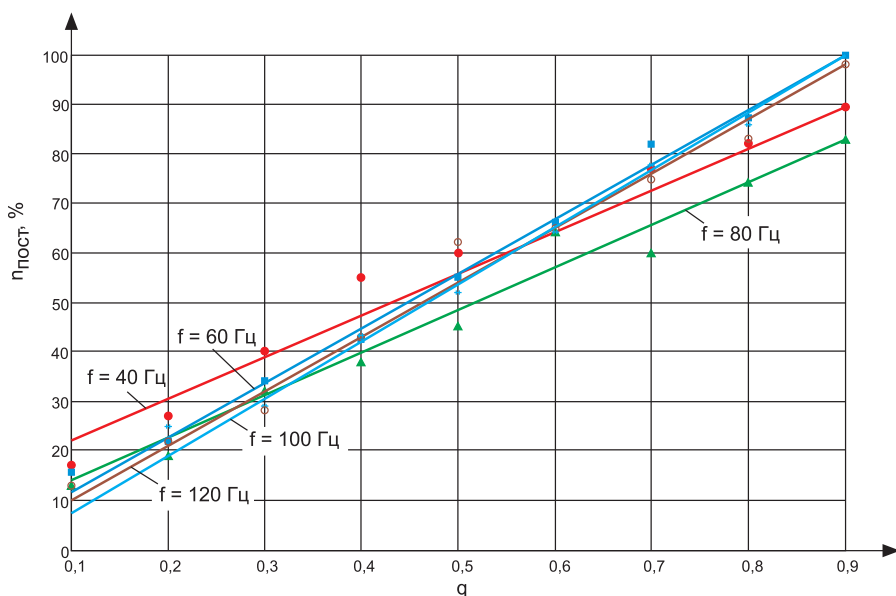


Рис. 6. Семейство зависимостей восприятия яркости зеленого излучения от величины, обратной скважности, при фиксированных частотах

Таблица 2а. Зависимость восприятия яркости от скважности при различных фиксированных частотах модуляции светового потока для зеленого цвета излучения

q	F = 40 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 60 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 80 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 100 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 120 Гц, П <sub>воспр</sub> %
0,1	17	15,5	13	12,6	13
0,2	27	22	19	25	22
0,3	40	34	32	29	28
0,4	55	43	38	43	43
0,5	60	55	45	52	62
0,6	66	66	64	64	65
0,7	77	82	60	77,5	75
0,8	82	87	74	86	83
0,9	89	100	83	100	98

Таблица 2б. Зависимость восприятия яркости от скважности при различных фиксированных частотах модуляции светового потока для синего цвета излучения

q	F = 40 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 60 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 80 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 100 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 120 Гц, П <sub>воспр</sub> %
0,1	17	14,5	16,5	15,5	18
0,2	29	28	30	31	32,5
0,3	37	40,5	38	35	38
0,4	52	53	49	53	44
0,5	59	59	60	68	60
0,6	72	74	75	86	71
0,7	79	81	91	100	80
0,8	88	93	100	>100	88,5
0,9	98	100	100	>100	100

Как следует из представленных выше графиков, в случае каждого из цветов излучения для отдельных наблюдателей характерен сильный разброс показаний. Однако усредненные зависимости мало отличаются от прямых. Пределы колебаний среднего в процентах для различных цветов излучения составляют: 40,25–44,833 для зеленого; 50,441–65,765 для синего; 40–45,333 для красного.

Также для одного наблюдателя для всех трех цветов излучения было снято семейство зависимостей восприятия яркости от скважности импульсов при фиксированных частотах следования импульсов. Результаты измерений представлены в таблицах 2а, 2б, 2в и на рис. 6–8 в координатах «величина, обратная скважности, — заполнение».

Как показывают представленные на рис. 6–8 графики, глаз является идеальным оптическим прибором: экспериментальные зависимости хорошо аппроксимируются прямыми. Это говорит о линейной или квазилинейной энергетической зависимости: чем больше величина, обратная скважности, т. е. чем больше временное заполнение периода импульса собственно сигналом, тем выше принимаемая глазом световая энергия.

Можно предположить, что эффективная яркость есть произведение амплитуды переменной яркости на величину, обратную скважности:

$$n_{\text{пост}} = n_{\text{перем}} \times q. \quad (1)$$

С другой стороны, обобщая результаты экспериментов обоих типов, можно сказать, что, вопреки ожидаемому соотношению 0,5 между постоянным и переменным запол-

Таблица 2в. Зависимость восприятия яркости от скважности при различных фиксированных частотах модуляции светового потока для красного цвета излучения

q	F = 40 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 60 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 80 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 100 Гц, П <sub>воспр</sub> %	F = 120 Гц, П <sub>воспр</sub> %
0,1	11	10,5	12	11	10,3
0,2	22	22	17	20	17,5
0,3	28	31	23	28	26
0,4	33,5	36	31,5	36	37
0,5	35	48	44	42	50
0,6	45,5	52	55	58	59
0,7	58	64	65	68	71
0,8	61	71	71	83,5	80
0,9	78,5	80	91	95	100

нением в первой серии опытов (поскольку скважность равна двум), мы получаем для разных цветов излучения значения, близкие, но не равные 0,5. Средние для усредненных уже значений соотношений для разных цветов составляют соответственно 0,4265 для зеленого, 0,5613 для синего и 0,4292 для красного. Таким образом, имеет смысл предположить о наличии в формуле (1) дополнительного множителя, зависящего от цвета излучения:

$$n_{\text{пост}} = r(\lambda_{\text{из}}) \times n_{\text{перем}} \times q. \quad (2)$$

В заключение можно сказать, что с чисто практической точки зрения может быть интересен тот факт, что эффективная яркость зеленого и красного излучения ниже, чем эффективная яркость синего. Проще говоря, энергетически более эффективно применять зеленое и красное излучение, нежели синее. ●

### Литература

1. Баранов В. Визуальная различимость миллисекундного выключения светодиодного источника света // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 11.
2. Луизов А. В. Инерция зрения. М.: Оборонгиз, 1961.
3. Сыромьясов Д. О. Исследование спектров излучения RGB-светодиода для построения модели цветового зрения // Научное обозрение. 2017. № 2.
4. Сыромьясов Д. О. Особенности цветового зрения при восприятии модулированного светового потока: автореф. диссертации магистра: 03.04.02 / Д. О. Сыромьясов; науч. рук. Б. Н. Денисов. Саранск, 2014.
5. Hita E., Romero J., Jimenez del Barco L., Martinez R. Study of Weber's law. Two experiments in physiological optics // Eur. J. Phys. 1984. Vol. 5. № 3.

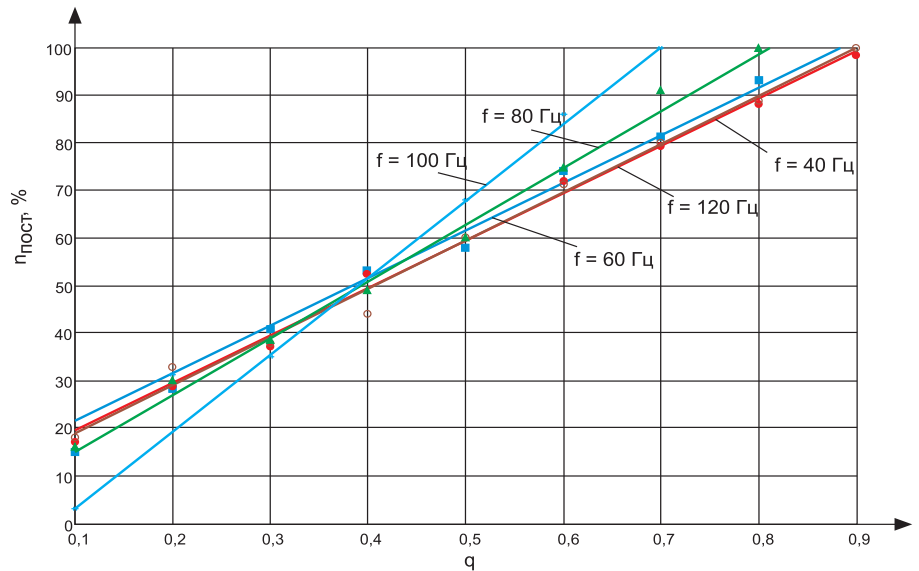


Рис. 7. Семейство зависимостей восприятия яркости синего излучения от величины, обратной скважности, при фиксированных частотах

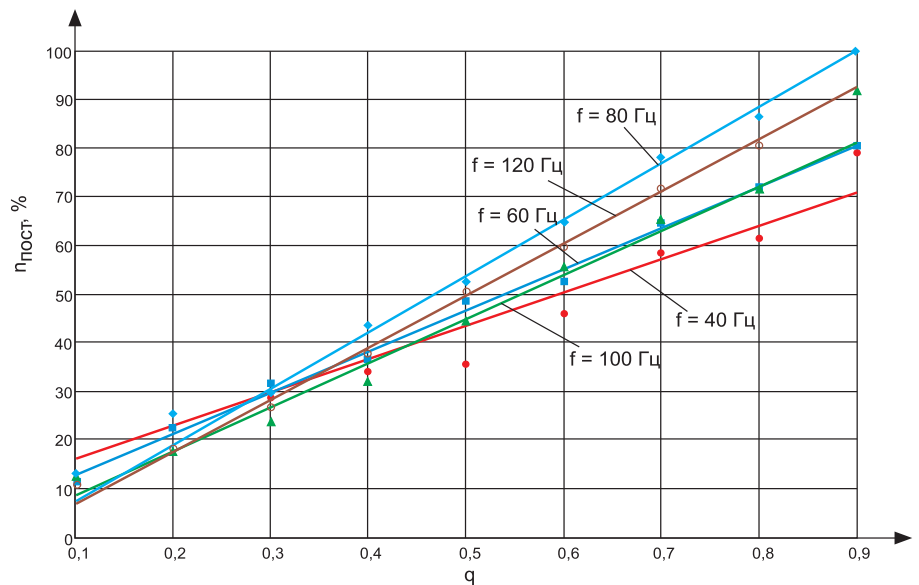


Рис. 8. Семейство зависимостей восприятия яркости красного излучения от величины, обратной скважности, при фиксированных частотах