

Владимир Абрамов, к. т. н. | abramov.vl2018@yandex.ru
 Алексей Иванов | aleksey.ivanov@ledsbridge.com
 Сергей Никифоров, д. т. н. | sergnik71@mail.ru

Не все светодиодные светофоры «ослепительно прекрасны»

Внедрение светодиодов в системы управления движением на РЖД идет полным ходом. Однако не всегда и не везде это происходит максимально рационально и с той же традиционно требуемой на ж/д надежностью, что и прежде. Кроме того, обозначенное внедрение разделилось на различные пути его реализации с точки зрения принципиально разных конструкций устройств на основе светодиодов, что, в свою очередь, породило существенно отличающиеся друг от друга сопутствующие этому внедрению проблемы и последствия.

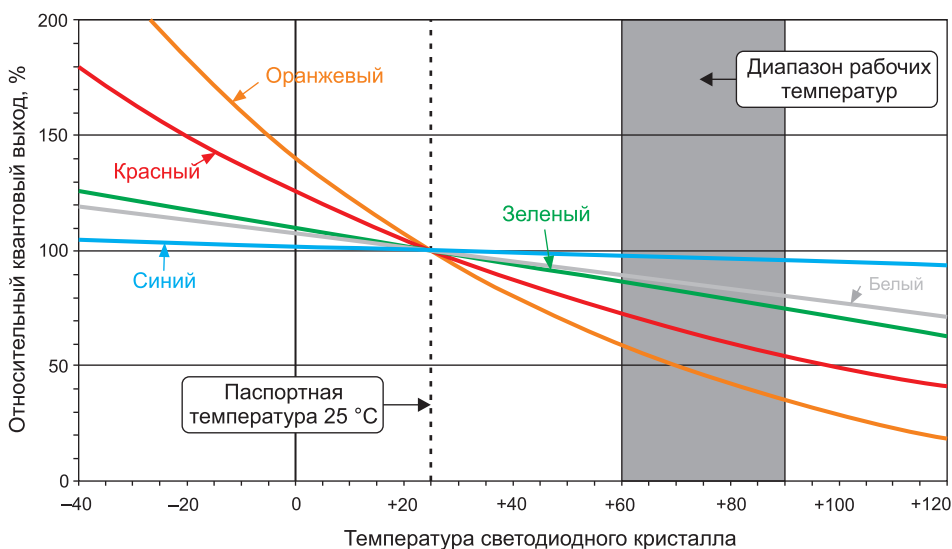


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения светодиодов различных цветов свечения от температуры p - n -перехода кристалла

Введение

В результате технологического прорыва в эпитаксии гетероструктур появились светодиоды (СД) с высокой световой эффективностью. Что, в свою очередь, позволило инженерам проработать вопрос их применения в сигнальных устройствах, регулирующих движение транспорта. На автомобильных и железных дорогах появились светофоры, источниками света в которых являются СД. Бесспорным преимуществом СД-источников света является значительно более высокая, чем у ламп накаливания, световая отдача. Это позволяет не только уверенно распознавать сигнал участниками движения, но и значительно сократить финансовые издержки на сами сигналы за весь срок их службы и, что особенно важно, на их обслуживание.

Светотехнические характеристики монохромных СД на момент разработки первых сигнальных СД-устройств продиктовали единственное возможное решение — матричную структуру источника света сигнала светофора. Это позволило получить требуемые стандартами того времени параметры — суммарный световой поток и необходимую силу света сигнала, как правило, сотней-двумя СД с соответствующими оптическими системами. Но СД-матрицы, наряду с перечисленными выше преимуществами, обладают рядом недостатков [1, 4]: дороговизна, высокая стоимость ремонта матрицы, приводящая к нецелесообразности его проведения в случае отказа части СД, существенный катафотный эффект. Стоит отметить, что фундаментальные физические свойства полупроводниковых СД-источников излучения снижают эффективность применения монохромных кластерных источников света в устройствах светосигнальной аппаратуры. На рис. 1 показана зависимость интенсивности излучения СД различных цветов свечения от температуры p - n -перехода, которая при самых благоприятных условиях по утилизации тепла на 20–30 °C выше температуры окружающей среды. В то же время имеет место значительное увеличение силы света СД (в несколько раз) при отрицательных температурах при условии стабилизации соответствующих электрических характеристик. Последнее обстоятельство является существенной проблемой применения монохромных светодиодов в ж/д светофорах, поскольку

их рабочий диапазон температур (по требованиям ГОСТ Р 56057-2014) составляет $-60 \dots +55$ °С, а диапазон допустимой силы света для создания корректного восприятия цвета сигнала ограничен. То же самое касается и колориметрических характеристик, имеющих сходные значительные изменения при указанных температурах. Для некоторых цветов сигналов на основе монохромных СД это обстоятельство является противоречивым и либо выполнимым условно, либо недостижимым. Поэтому их применение на РЖД (с учетом других вопросов надежности и функционирования) в настоящее время вызывает большие споры. Решить все обозначенные проблемы при условии сохранения применения СД в качестве источников света для сигналов ж/д светофоров может предложенная в [1] лампа на основе СД белого цвета, построенных по системе синий кристалл–люминофор, которая лишена отмеченных недостатков.

В сигналах светофоров на основе матричных источников к перечисленным недостаткам можно добавить значительное ограничение функциональных возможностей и ослепляющий эффект. Функциональные недостатки таких систем существенны: отсутствие резервного источника света в сигнале (что имеется в случае с лампой накаливания (ЛН) или СД-лампой), невозможность применения дополнительных оптических устройств (рассеиватели и отклоняющие вставки) и отсутствие контроля целостности интерфейсных связей в выключенном («холодном») состоянии, гарантирующего подачу сигнала при наличии напряжения на источнике света светофора. В данной статье более подробно рассмотрены причины и последствия эффекта ослепления, имеющие место при использовании в ж/д сигналах матричных СД-систем.

История развития тематики

В 2010 г. в журнале «Полупроводниковая светотехника» №3 группой авторов-разработчиков была опубликована статья о прямом замещении ЛН, применяемой в ж/д светофорах, СД-лампой. Тщательное исследование ЛН выявило как положительные, так и отрицательные ее стороны. Основным недостатком ЛН является малый срок службы и низкие светотехнические параметры: световая отдача, низкая цветовая температура излучения. В остальном ЛН органично вписывается

во все функционалы релейных и микропроцессорных (МПЦ) интерфейсов системы централизации и блокировки (СЦБ). Применение СД в качестве источников излучения в сигнальных световых приборах имеет давнюю историю: от светодиодных светооптических систем (ССС), в которых используется матричный принцип построения излучателя с линзой в каждом СД, до ламп RSL (Rail Signal Lamp), имеющих СД-излучатель, полностью аналогичный по геометрическим размерам и светотехническим характеристикам нити накала лампы, только лишь на порядок величины превосходящий ее по световой отдаче. Полученный огромный опыт использования и изучения различных СД-излучателей в ряде типов ж/д светофоров позволил учесть все недостатки матричных сигналов и преимущества центрального источника света (лампы) в комплекте с линзовой системой (ЛК), проявляющиеся при непосредственном наблюдении узконаправленных ($1,5-5^\circ$) световых сигналов, коими и являются ж/д светофоры. Ключевым фактором, влияющим на необходимое корректное восприятие таких сигналов, является ряд их основных характеристик — распределение силы света и контраст яркостей с одной стороны, и физиология зрения — с другой. В первом случае это сила света сигнала, ее распределение в пределах угла излучения, заданное минимальное расстояние наблюдения, тип источника излучения (матричный или центральный). Во втором — это яркость источника излучения, спектральное распределение излучения, материал линз и защитных колпаков. На примере разработанных СД-излучателей с центральным источником для ж/д светофоров с прежней штатной линзовой системой, используемой также в составе с ЛН, рассмотрим правомерность и соответствующие преимущества применимости первых на практике в контексте сказанного о связи основных характеристик и особенностей зрительного восприятия световых сигналов.

Описание проблем, причин возникновения и результатов их присутствия

Небольшие углы пространственного распределения силы света сигналов в ж/д светофорах обусловлены рядом условий корректного восприятия их цвета машинистом. Прежде всего, это дальность видности. Небольшой световой поток лампы

собирается линзой большой оптической силы в очень узкий пучок, чтобы обеспечить на расстоянии 1 км (требования ПТЭ РЖД) необходимую освещенность сетчатки глаза машиниста для верного распознавания цвета сигнала. Узконаправленность сигнала необходима также и для отсутствия паразитной засветки соседних путей, проходящих в непосредственной близости друг от друга. В противном случае, а также при несоответствующей юстировке светофорных головок, машинист может спутать сигнал светофора своего пути с сигналом соседнего, что недопустимо ни при каких обстоятельствах. Однако, несмотря на указанные условия, с увеличением силы света сигналов, что в настоящее время легко достижимо с помощью СД-систем, возникает серьезный паразитный эффект — ослепление машиниста светом сигнала светофора (как правило, зеленого цвета) при приближении к светофорному объекту даже в светлое время суток, не говоря уже о ночном. Причем на практике отмечено, что такой эффект встречается, в основном у ССС матричного типа, в которых источником света является фасеточная матрица СД различного количества с индивидуальной для каждого излучателя линзой. Несмотря на то, что такие системы могут быть корректно направлены на наблюдателя (настроены), а их угол излучения соответствует требуемым нормам, обозначенная проблема продолжает проявляться и создавать не только дискомфорт для машинистов, но и угрожать безопасности движения на РЖД.

Причины возникновения нежелательных эффектов

Как уже было сказано выше, источники света для светофоров и прочих непосредственно наблюдаемых источников, имеющих вторичную оптическую систему, характеризуются энергетическими параметрами излучения и их пространственным распределением. Эффективность таких систем, в том числе линзовых светофорных СД-систем, определяется отношением светового потока на выходе из оптической системы к входящему (от источника). В случае применения ЛН (например, типа ЖС12-15+15) линзовым комплектом (ЛК) светофора утилизируется лишь незначительная доля потока лампы (не более 30%), поскольку ее фотометрическое тело практически идентично сфере (с углом излучения 4π ср).

При таких условиях лампа на основе СД-излучателя (например, RSL [1]), имеющая пространственный угол излучения 2π ср, оказывается существенно эффективнее, поскольку линзовый комплект в этом случае использует практически 80–90% ее светового потока. Учитывая то обстоятельство, что СД-излучатель имеет как минимум на порядок большую световую отдачу, чем у ЛН, можно сделать вывод о том, насколько центральный источник в виде СД-лампы эффективнее и может иметь значительно меньшую потребляемую мощность при обеспечении идентичных фотометрических характеристик. Однако если осуществить пропорциональный переход от светового потока к силе света сигналов, которая как раз и нормируется в соответствующих НД (ГОСТ Р 56057-2014), в случае с угловым распределением всего в несколько градусов, когда весь световой поток сосредоточен в пределах этого угла, с учетом большого расстояния фотометрирования (наблюдения), можно считать этот угол элементарным, а содержащийся в его пределах световой

поток — вырожденным в векторную величину (силу света). На расстоянии 700–1000 м размер пятна освещенности от такого источника составит десятки квадратных метров, и при условии корректной юстировки сигнала светофора, когда область наблюдения сигнала существенно меньше этого пятна, неравномерностью в пределах области наблюдения можно пренебречь. Поэтому освещенность сетчатки глаз наблюдателя (машиниста) будет определяться формулой (1) в зависимости от расстояния от светофора и силы света его сигнала:

$$E = I_v / r^2 \text{ [лк]}, \quad (1)$$

где I_v — сила света, r — расстояние от светофора.

Однако самым важным обстоятельством при оценке фактора ослепления является яркость сигнала, которую, собственно, и воспринимает машинист и которая при определенных значениях может вызвать «перегрузку» его зрительного аппарата. Это и будет расценено как ослепление. Яркость

самого сигнала светофора не зависит от расстояния от него, однако можно считать, что яркость поля зрения, в которое попадает сигнал, будет пропорциональна площади этого поля, к которой отнесена и сила света сигнала в направлении наблюдения. Площадь поля зрения (для оценки эффекта) может быть определена через угол зрения «стандартного наблюдателя МКО для дневного зрения», равный 1° , и расстояние до объекта. При таком условии следует считать, что яркость фона отсутствует, что вполне реально при ночных условиях, либо она может быть учтена в светлое время суток [2]. Таким образом, рассчитать ее значение удобно по формуле (2).

За направление отсчета принято расстояние наблюдения 1000 м.

$$L = I_v / (\text{tg}(0,5^\circ) \times r)^2 \times \pi \text{ [кд/м}^2\text{]}, \quad (2)$$

где I_v — сила света, r — расстояние от светофора.

Однако диаграмма распределения силы света сигнала, кроме зоны максимума в центре (с любым типом источника, форма показана на рис. 2а), имеет способность создавать существенную освещенность участков, в которых значение силы света хотя и значительно меньше (углы излучения по уровням $0,5I_{vmax}$ — нормируются ГОСТ Р 56057-2014, или $0,1I_{vmax}$ — углы, которыми ограничено не менее 90% светового потока всего сигнала), но при условии меньшего расстояния.

На рис. 2б отмечены углы наблюдения светофора машинистами на различном расстоянии от него, при условии, что юстировка (нулевое направление) была выполнена для расстояния 1000 м (что, в основном, требуется при установке мачтового светофора на магистральном направлении). Эти же углы отмечены на диаграммах рис. 2а, и показаны относительные значения силы света, соответствующие этим углам на диаграммах. Можно заметить, что эти значения существенно отличаются, соответственно, отличаться будут и значения освещенности в плоскости глаз машиниста при прочих равных условиях. Однако в вертикальной плоскости (плоскости изменения угла наблюдения сигнала машинистом при движении локомотива) диаграмма сигнала с центральным источником света на основе ЛК имеет вид зеленой кривой на рис. 2а, а в горизонтальной плоскости — синей на том же рисунке. Визуально форма пятна освещенности источника с таким набором

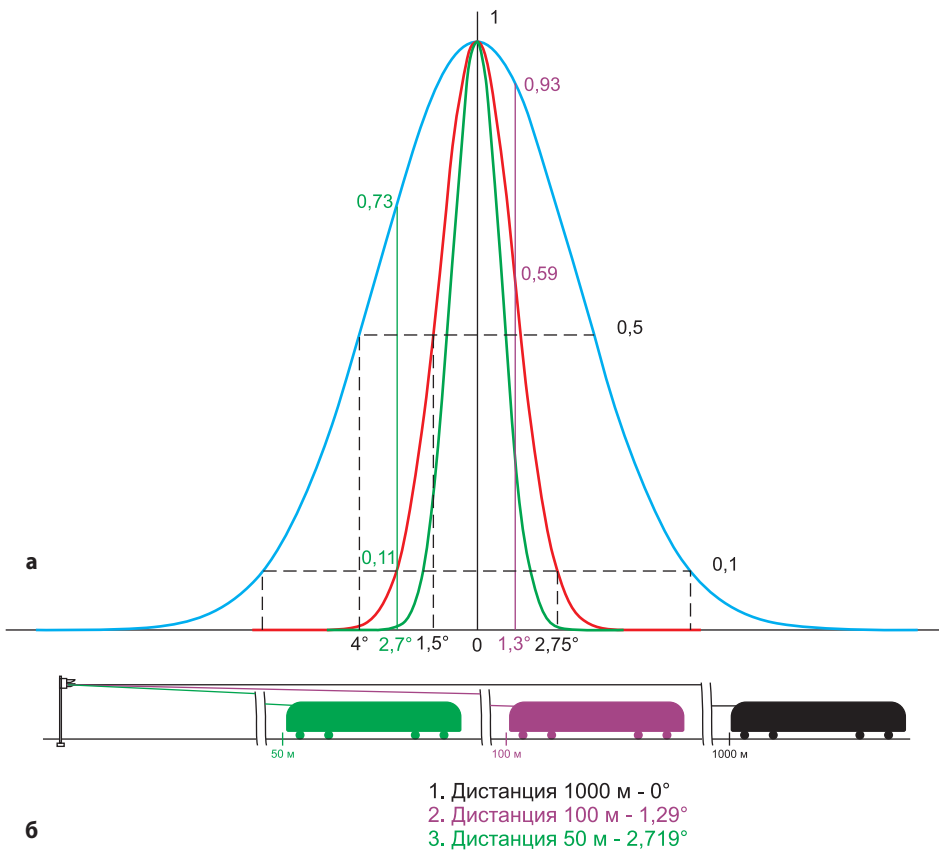


Рис. 2. Относительные диаграммы распределения силы света основных плоскостей излучения сигнала светофора с угловым распределением по ГОСТ Р 56057-2014: а) требуемый диапазон диаграмм лежит между синей и красной кривой (табл. 1); б) его схематическое расположение на ж/д путях при условии наблюдения машинистом с различного расстояния

диаграмм, формирующих фотометрическое тело овального вида (представляющего собой проекцию нити накала ЛН или линейки СД), показана на рис. 3. Следует отметить, что сигнал светофора на основе СД-матрицы (например, ССС), чтобы обеспечить требования ГОСТ Р 56057-2014 по углу излучения, будет иметь в основе фотометрического тела практически ровный конус с образующей в виде диаграммы синего цвета (рис. 2а) либо в диапазоне между синей и красной кривой. Именно это обстоятельство является причиной значительной разницы в сформированной освещенности в плоскости глаз машиниста при приближении к светофору и создании эффекта ослепления сигналом с большей силой света, имеющейся у матричного сигнала.

Принимая во внимание вышесказанное, сравним параметры излучателей с центральным и матричным источником излучения в контексте создания возможных условий для ослепления. Следуя ГОСТ Р 56057-2014 (и измерениям реальных образцов), угол рассеяния ССС мачтового и карликового светофоров в горизонтальной и вертикальной плоскости, в зависимости от типа светофора, должен быть в пределах значений, указанных в таблице 1.

В нашем примере будут участвовать мачтовые светофоры как наиболее типичные для описания эффекта ослепления, прототипы их диаграмм указаны на рис. 1а. У сигнала с центральным

источником этот угол по уровню $0,5I_{vmax}$ равен $\pm 2^\circ \dots \pm 4^\circ$ в горизонтальной и до $\pm 1,5^\circ$ в вертикальной плоскости соответственно [3] (синяя (горизонтальная плоскость) и зеленая (вертикальная плоскость, для расчетов принято распределение с углом $\sim \pm 1,2^\circ$) кривые на рисунке 2а, визуализация — рис. 3). Учитывая требование ГОСТ Р 56057-2014 по значению максимальной силы света сигналов различных цветов на основе матричных СД-источников (табл. 2), например, для желтого мачтового сигнала в дневном режиме $I_{vmax} = 20\ 000$ кд, и пользуясь диаграммами, приведенными на рис. 1а, по формуле (1) можно рассчитать значение максимальной освещенности на различном расстоянии локомотива от светофора.

На расстоянии 50 м (для других расстояний вся экспозиция сигналов приведена в таблице 3) площади облучаемой поверхности при условии диаграммы синего и красного цветов (рис. 2а) равны 38,24 и 6,68 м² соответственно, а максимальная освещенность от сигнала в этих полях с учетом угла наблюдения машиниста локомотива ($2,72^\circ$, рис. 2б, формула 1) составит:

$$E_{50} = (0,02 \times 20\ 000 \text{ кд}) / 50^2,$$

$$E_{50} = 0,16 \text{ лк},$$

для диаграммы зеленого цвета (рис. 2а);

$$E_{50} = (0,11 \times 20\ 000 \text{ кд}) / 50^2,$$

$$E_{50} = 0,88 \text{ лк},$$

для диаграммы красного цвета (рис. 2а);

$$E_{50} = (0,73 \times 20\ 000 \text{ кд}) / 50^2,$$

$$E_{50} = 5,84 \text{ лк},$$

для диаграммы синего цвета (рис. 2а).

В то же время площадь поля зрения, в которое попадает сигнал светофора с соответствующей силой света в направлении машиниста (рис. 2б), при расстоянии 50 м составит 0,636 м². Тогда яркость, рассчитанная по формуле (2), составит:

- 670 кд/м² для диаграммы зеленого цвета (рис. 2а);
- 3700 кд/м² для диаграммы красного цвета (рис. 2а);
- 24500 кд/м² для диаграммы синего цвета (рис. 2а);

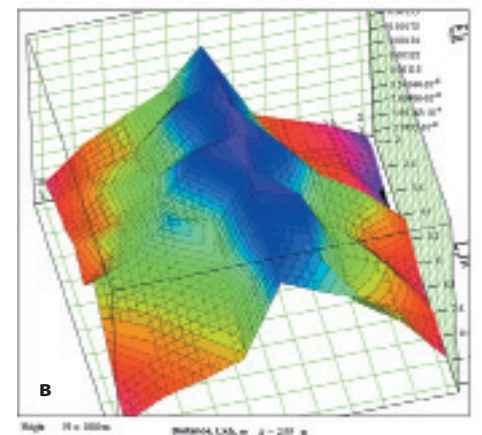
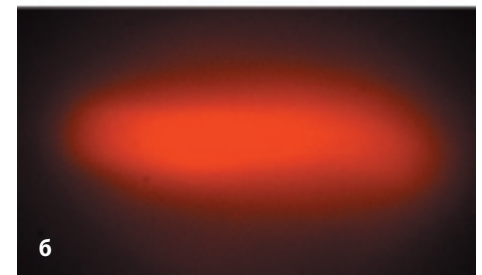
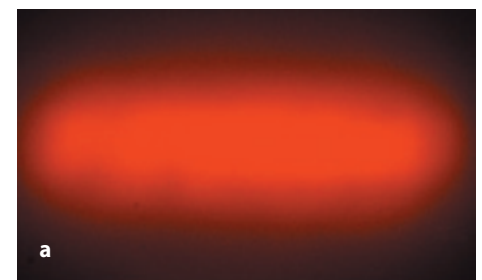


Рис. 3. Визуализация формы пятна освещенности от сигнала светофора с центральным источником: а) лампой RSL (проекция светодиодной линейки); б) лампой накаливания ЖС12-15+15 (проекция нити накала); в) 3D-график освещенности поверхности от него на расстоянии 1000 м

Таблица 1. Угол излучения (по уровню $0,5 I_{vmax}$) ССС мачтового светофора по ГОСТ Р 56057-2014

Тип ССС (независимо от цвета)	Угол излучения (по уровню $0,5 I_{vmax}$)
ССС мачтового светофора	Не менее $\pm 1,5^\circ$ и не более $\pm 4^\circ$
ССС карликового светофора	Не менее $\pm 2^\circ$ и не более $\pm 5^\circ$

Таблица 2. Осевая сила света ССС мачтовых светофоров по ГОСТ Р 56057-2014

Цвет излучения	Диапазон значений осевой силы света ССС мачтового светофора для различных температур по ГОСТ Р 56057-2014, кд	
	+25(± 10) °С	-45...+55 °С
Красный	2100-6000	2100-9000
Желтый	3500-9000	3500-20000
Зеленый	2100-4500	2100-5500
Лунно-белый	2500-5000	2500-7000
Синий	200-800	200-1000

Таблица 3. Рассчитанная фотометрическая экспозиция сигналов с диаграммами по рис. 2а на различных расстояниях от светофора

Расстояние, м	Освещенность, лк			Яркость, кд/м ²		
	Зеленая	Красная	Синяя	Зеленая	Красная	Синяя
50	0,160	0,880	5,840	671	3689	24481
90	0,494	1,457	2,296	2070	6107	9626
100	0,600	1,180	1,860	2515	4946	7797
150	0,311	0,524	0,827	1304	2198	3465
1000	0,020	0,020	0,020	84	84	84

По приведенным в таблице 3 расчетам можно заметить, что нормируемое ГОСТ Р 56057-2014 угловое распределение сигналов светофоров на основе светодиодных матриц (табл. 1) позволяет формировать яркость сигналов, воспринимаемую глазом машиниста на близких расстояниях от светофора в пределах 3700–24 500 кд/м². Причем очевидно, что яркость фона при таких значениях играет несущественную роль даже в ясный солнечный день или при положении солнца на горизонте в направлении зрения машиниста. В то время как яркость сигнала от традиционного линзового комплекта с центральным источником света (на основе ЛН или лампы RSL) на этих же расстояниях отличается от номинальной (на расстоянии 1000 м) всего в три раза, при этом сохраняя достаточную равномерность на всем протяжении дистанции, яркость сигнала на матричных СД-источниках возрастает с той же точки отсчета на 2,5 порядка величины. Разница очевидна без комментариев.

По общим понятиям, ослепление происходит, когда в поле зрения находится яркий источник света; результатом этого является существенное подавление способности различать предметы. Максимальная переносимая (болевого порог) яркость при прямом наблюдении составляет 7500 кд/м². Данные, приведенные в таблице 3, показывают, что этот порог при большинстве

реальных условий расчетов многократно превышен у светофоров на основе матричных источников света (типа ССС). При скорости прохождения участка, заканчивающегося светофором, около 80–100 км/ч время воздействия ослепления машиниста составит 3–5 с. Однако если речь идет о желтом сигнале (как в нашем примере), то машинист вряд ли проедет его с такой скоростью, поскольку желтый означает, что второй, следующий за этим светофором, участок дороги занят. А это однозначно требует снижения скорости перед ним, что влечет за собой соответствующее увеличение времени его прохождения и воздействия указанного ослепления. В ночное время резкая периодическая смена запредельных яркостных стимулов, повторяющаяся в течение длительного времени стажа работы машиниста, по мнению офтальмологов, может привести к отслоению сетчатки. Подобная ситуация имеет место на метрополитене, где описанная ситуация с расчетами яркости наиболее корректна с точки зрения отсутствия яркости фона сигналов (темнота тоннеля). Однако в этом случае значительную долю вклада в указанный риск повреждения органа зрения вносит также периодическая яркая и контрастная засветка при быстром въезде на освещенные станции метрополитена.

Таким образом, можно сделать вывод, что в упомянутом ГОСТ Р 56057-2014, на основе требований которого были

приведены обозначенные выше расчеты, уже заложено полученное ослепление от светофоров при приближении к ним. Стоит заметить, что неточность в юстировке сигналов на месте расположения светофора может привести к значительному увеличению полученных в расчетах значений яркости и, соответственно, более существенному воздействию эффекта ослепления на машиниста. ●

Литература

1. В. С. Абрамов, С. Г. Никифоров, А. А. Иванов, П. Пензев, Х. Мухов. Светодиодная лампа для ж/д светофоров // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3.
2. Агафонов Д. Р., Мурашова М. А., Никифоров С. Г., Пинчук О. П., Столяревская Р. И. Исследования визуального восприятия красных железнодорожных светофоров на основе светоизлучающих диодов // Светотехника. 2003. № 6.
3. С. Г. Никифоров. Некоторые аспекты восприятия светодиодного излучения глазным аппаратом на примере приборов световой ж/д сигнализации на основе светодиодов // Полупроводниковая светотехника. 2009. № 2.
4. В. С. Абрамов, С. Г. Никифоров, А. А. Иванов. Светодиодные матричные ж/д светофоры: все «за» и «против» // Полупроводниковая светотехника. 2012. № 6.