

Владимир Абрамов, к. т. н. | abramov-vladimir@bk.ru
 Сергей Никифоров, к. т. н. | sergnik71@mail.ru
 Алексей Иванов | lexa_21@inbox.ru
 Петр Пензев | penzew72@gmail.com
 Хельмут Мухов | helmut.muchow@yahoo.de

Светодиодная лампа для железнодорожных светофоров

В статье представлена последняя разработка группы российских авторов: лампа для ж/д-светофоров на основе светодиодов белого цвета свечения. Вместе с существующими линзами и фильтрами, которыми укомплектованы сотни тысяч светофоров в нашей стране и СНГ, эта лампа обеспечивает все фотометрические, колориметрические и электрические параметры, регламентированные стандартом. Она имеет срок службы, который до 10 раз больше, чем у штатной лампы накаливания, и 5–7-кратный запас по силе света. Изобретение защищено заявкой на патент РФ № 2009141052.

Два рельса прогресса на шпалах науки

Как ни парадоксально, но технический прогресс не всегда носит радикально революционный характер, сначала сметая старое до основания, а потом строя совершенно новое. Зачастую имеет место его разновидность, когда «обломки» прежнего этапа развития того или иного технического решения неплохо уживаются с принципиально новой «надстройкой» над ними. Так, например, современные системы телефонии, использующие многоканальный цифровой принцип передачи информации, адаптированы к имеющимся проводным линиям, и потребитель не ощущает разницы в способе «позвонить по телефону» уже в течение нескольких десятков лет. То же самое можно сказать и про автомобиль: неважно, какой тип двигателя упрятан под его капотом (паровой, дизельный, бензиновый, электрический...) и насколько он современен, принципы управления его движением остаются прежними. Никто не отменял рулевое колесо, педаль тормоза и газа. Такие нововведения максимально эффективны, их можно быстро внедрить, они существенно дешевле и не требуют изменения в привычном ритме действий и мышлении человека.

Однако совершенно понятно, что изменение концепции всей инфраструктуры применения нового предмета куда значительно продвигает этот предмет с точки зрения перспектив его дальнейшего развития и фундаментальности. Но не стоит забывать, что применение всякого усовершенствования должно быть целесообразно и оправдано как с технической точки зрения, так и с экономической. Если имеется распространенный, используемый повсеместно, да еще жестко регламентированный стандартом к применению продукт, технические усовершенствования в котором «назрели», но кардинальная замена, предлагаемая неким современным прогрессивным решением, оказывается труднореализуемой и дорогой, то удобнее «переместить Магомеда к горе» и попытаться решить поставленную задачу более остроумно.

Таким примером может служить предлагаемая лампа для ж/д-светофоров на основе полупроводниковых излучающих кристаллов, полностью заменяющая существующую, но при этом сохраняющая все преимущества светодиода перед лампой накаливания (срок службы, высокая светоотдача, минимальное потребление, стабильность параметров и др.) и не требующая абсолютно никаких изменений в конструкции светофора и интерфейса управ-

ления в системе СЦБ. То есть условие ее применения — простая установка вместо прежней лампы, как замена лампочки в люстре: одну выкрутил, другую вкрутил. И все.

Переезд оснащен барьерами-автоматами. Можно объехать, но лучше подождать, когда опустятся

Большинство фотометрических характеристик ж/д-светофоров на основе ламп и линзовых комплектов (ЛК) зависят и определяются только параметрами исходных источников — ламп накаливания. Наиболее распространены лампы мощностью 15 Вт (типа ЖС12-15+15) [1] (рис. 1), которые при штатном напряжении питания (12 В), обладая известной эффективностью преобразования в 6–10 лм/Вт, излучают порядка 110 лм светового потока с цветовой температурой около 2400 К [1]. Некоторые фотометрические параметры сигналов ЛК относительно лампы приведены в таблице 1. Все цвета сигналов светофоров формируются оптической системой — линзовым комплектом [2]: светофильтром — линзой, «вырезающей» нужный участок спектра излучения лампы и определяющей цвет сигнала, и второй линзой — линзой Френеля, имеющей большую оптическую силу (рис. 2). Хотя подробно работа линзовых комплектов рассмотрена в [3, 4], для удобства сравнения уместно здесь повторить некоторые положения.

Таблица 1. Фотометрические параметры сигналов ЛК

Цвет	Световой поток			
	ЛК на лампе накаливания, лм	Доля излучения относительно лампы без фильтра, %	Доля излучения от лампы накаливания в составе ЛК, %	ЛК на светодиодной лампе с CCT = 4500 К, лм
Красный	2,7	22,9	1,9	11,7
Желтый	9,85	83,5	6,8	104,8
Зеленый	4,8	40,7	3,3	88,1
Синий	0,58	4,9	0,4	7,2
Лунно-белый	10,4	88,1	7,2	148,8



Рис. 1. Лампа ЖС12-15+15



Рис. 2. Работа оптических систем линзовых комплектов

Пояснением к сказанному о «механизме» работы линзового комплекта может стать полная иллюстрация спектрального распределения некоторых светоблоков на основе ламп, представленная на рис. 3. На графиках видно, как работает светофильтр линзового комплекта и как с его помощью из исходного спектра лампы (кривая source base и кривая base как результат свертки с кривой видности $V(\lambda)$) формируется необходимый спектр соответствующего цвета сигнала

(кривая source test и test как результат его свертки с кривой видности $V(\lambda)$). Такой вид семейств спектрального распределения показывает, что лишь малая его доля от исходного используется в формировании светового сигнала светоблока.

Однако, помимо штатного режима работы светофора при напряжении ~ 12 В, на железной дороге существуют такие режимы, как ночной (питание светофора снижается на 25%) и маскировочный (1% значения силы света в дневном режиме). Эти режимы светофоров на ЛК являются хорошим примером, демонстрирующим преимущество динамических характеристик светодиодов, внедряемых в систему СЦБ в настоящее время. Ночной режим выполняется при напряжении питания 9–10,5 В переменного тока (номинальное напряжение — 12 В, 50 Гц). При понижении питания у лампы накаливания не только изменяется интенсивность излучения, но и на 300–400 К снижается температура нити

накала. Спектр излучения сдвигается в сторону длинных волн по закону Вина (1):

$$\lambda_{\max} = 0,002898/T, \quad (1)$$

где T — температура в кельвинах, а λ_{\max} — длина волны с максимальной интенсивностью в метрах.

Происходит не только пропорциональное изменение амплитуды составляющих по всему спектру, но и нелинейное (из-за сдвига спектра) — особенно в области коротковолновых составляющих. Это приводит к существенному уменьшению исходных длин волн для формирования синего и зеленого цвета (рис. 3) в ночное время, и, несмотря на увеличение чувствительности в этом диапазоне благодаря темновой адаптации и включению доминирования палочкового зрения, существенно ухудшает чистоту цвета: он становится «разбавленным»,

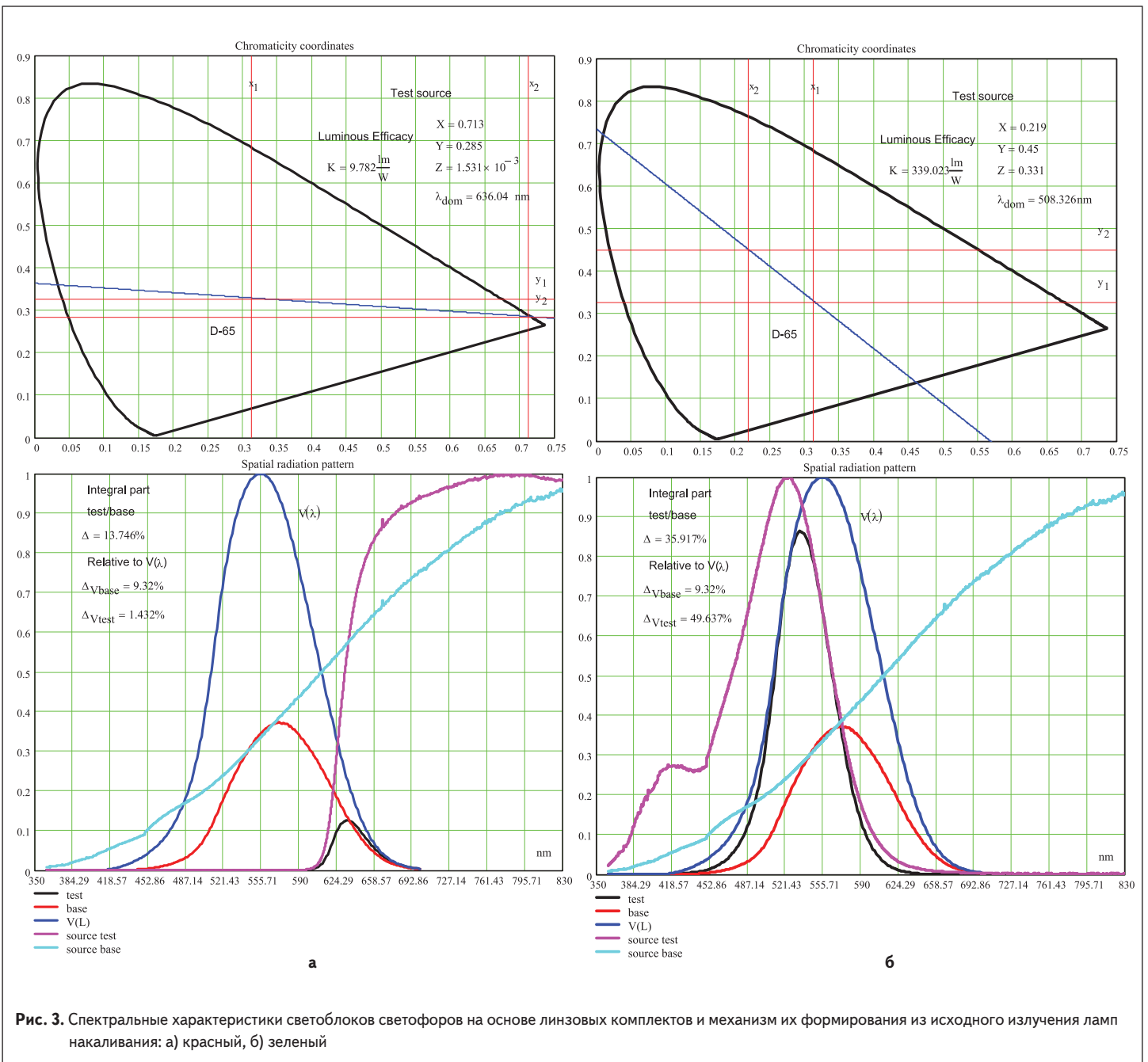
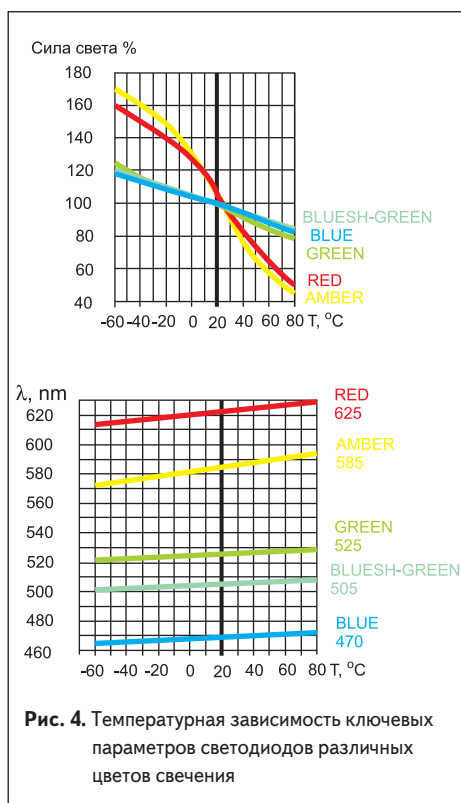


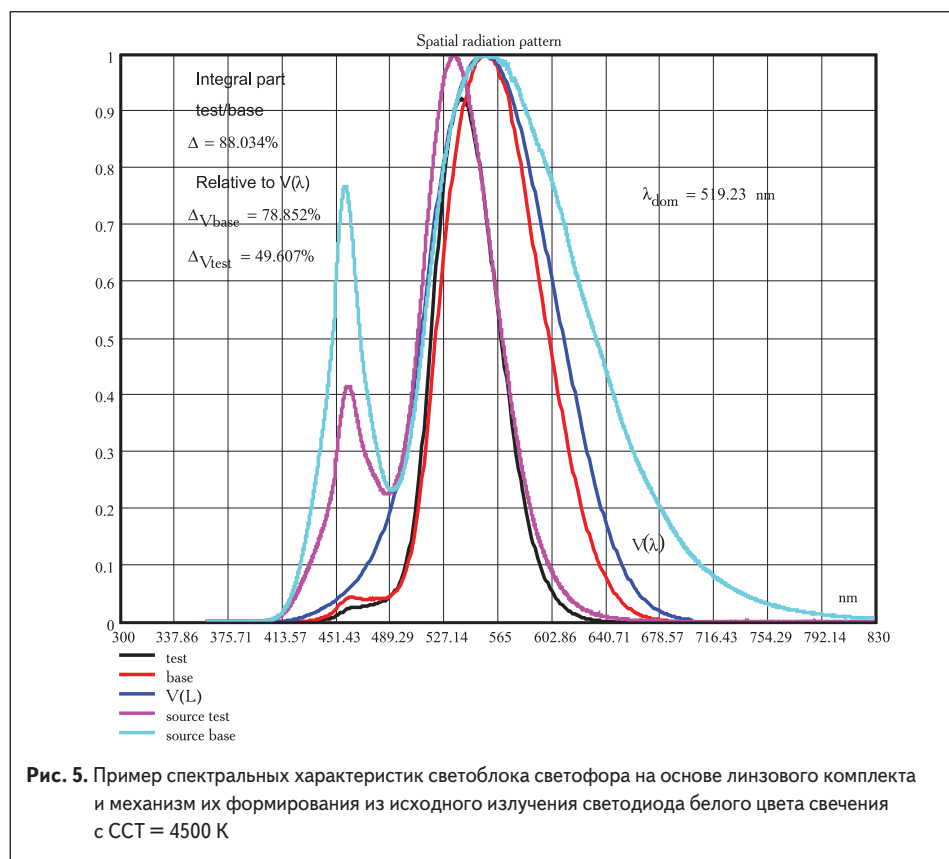
Рис. 3. Спектральные характеристики светоблоков светофоров на основе линзовых комплектов и механизм их формирования из исходного излучения ламп накаливания: а) красный, б) зеленый



особенно зеленый. А в условиях применения различных источников света для освещения станций (натриевые, ртутные лампы) сигналы светофоров можно спутать со светом таких ламп. Очевидно, что говорить о качестве цвета в маскировочном режиме вообще нет смысла, в то время как зависимость спектральных характеристик монохромных светодиодов от прямого тока выражается в нескольких нанометрах при изменении тока на 90% [7]. А если система управления позволяет модулировать интенсивность излучения не питанием, а, например, ШИМ, как это с успехом используется в системах отображения информации, то изменение колориметрических характеристик будет полностью отсутствовать.

Из сказанного следует очевидный вывод о том, что светодиодный светофор будет существенно выигрывать по верности восприятия цвета у ЛК с точки зрения спектрального состава излучения при прочих равных условиях [3, 4, 8]. Однако полупроводниковые источники излучения значительно проигрывают в этой части характеристик при изменении температурных условий работы [5, 6] (рис. 4).

Изменение доминирующей длины волны более чем на 10 нм в требуемом диапазоне температур (-60... +60 °С) может оказаться для желтого и красного сигнала неприемлемым для применения. Эта проблема в данное время решается как технически, так и законодательно: в первом случае разрабатываются средства обеспечения минимальных изменений параметров светодиодов, совершенствуются сами излучающие полупроводниковые структуры, а во втором — проводятся эксперименты по изменению существующих стандартов в части расширения границ цветности с учетом вышеупомянутых важных преимуществ в восприятии цвета [8].



Еще 10 лет назад так близко расположенное от цели техническое решение с применением монохромных светодиодов в светофорах, устраняющее все проблемы восприятия цвета, долговечности и надежности, оказалось не таким простым в его воплощении и до сих пор не нашло массового применения на железной дороге. Однако в это же время ученые размышляли о применении в качестве опорных источников света светодиодов белого цвета свечения, построенных по системе кристалл-люминофор с использованием штатного линзового комплекта с соответствующим светофильтром. Успехи в технологии производства мощных белых светодиодов позволили обеспечить не только заданную силу света светофоров, но и цветовые характеристики, которые в первую очередь подвергались сомнению.

Современные белые светодиоды имеют широкий выбор различного спектрального состава излучения, как оказалось, в больших пределах подходящего для использования в светофорах и штатной линзовой системе. На рис. 5 приведен пример работы линзового комплекта зеленого сигнала, показанного на рис. 3б, но с применением белого светодиода в качестве источника

света. Светофильтр линзового комплекта (кривая source test), исходный спектр светодиода (кривые base и source base), спектр зеленого цвета сигнала (кривая test) показаны также на основе лампы накаливания на рис. 3б.

Можно заметить, что в этом случае световой поток источника используется почти в 2,5 раза эффективнее (сноска test/base в левом верхнем углу графиков рис. 3б и 5, показывающая процентное отношение светового потока полученного сигнала и исходного). Это говорит о том, что при условии равенства потоков лампы и светодиода, из-за особенности спектрального распределения излучения последнего, сила света сигнала будет приблизительно во столько же раз больше при полной идентичности «весовой» доли спектра относительно $V(\lambda)$ (сноски ΔV_{test} на рис. 3б и 5).

«...Поезд мчится в чистом поле, и ликует весь народ»

Во время появления квазимонохромных светодиодных источников излучения с достаточной силой света группой авторов был

Таблица 2. Значения силы света (С.С.) различных светоблоков и нормируемых стандартом

Цвет	С.С. по ГОСТ, кд	С.С. ЛК на лампе накаливания ЖС 12-15+15 реальная, кд	С.С. ЛК на светодиодной лампе, кд
Красный	2100	1330	2100
Желтый	4350	3890	20 500
Зеленый	2600	2510	14 500
Синий	150	252	1025
Лунно-белый	2500	4100	25 800

получен патент № 2134000 от 31.12.1997 на конструкцию уникального светодиода с углом излучения 3° (рис. 6). На основе таких светодиодов появились монохромные источники излучения кластерного типа, более-менее соответствующие техническим требованиям МПС. Поэтому системы светооптические светодиодные (ССС) производства фирмы «Корвет-Лайтс» (рис. 7) состояли из светодиодной матрицы без вторичной оптики, что выгодно отличало их от изделия ближайшего конкурента — ССС компании «ИРСЭТ-Центр».

Вместе с тем фундаментальные физические свойства большинства полупроводниковых светодиодных источников излучения снижают эффективность применения монохромных кластерных источников света. Это можно заметить на графиках (рис. 4), где представлена зависимость ключевых, нормируемых стандартом, параметров светодиодов от температуры. Видно, что для того, чтобы удовлетворить требованиям нормативных документов, полупроводниковым монохромным источникам света необходима стабилизация температуры $p-n$ -перехода в некоторой области температур, вне зависимости от температуры окружающей среды. С этой целью в 2004–2006 гг. была предпринята попытка разработать лампу на основе светодиодных источников света — полный аналог лампы накаливания ЖС12-15+15. В конструкции лампы был применен электрический способ переноса тепла от $p-n$ -перехода к радиатору посредством использования эффекта Пельтье (патент № 2008129653).

Однако наличие большого количества электронных компонентов и связанные с этим технологические проблемы не позволили довести данный проект до логического завершения. Одновременно появились светодиодные источники света достаточной мощности излучения в диапазоне длин волн 450–470 нм, представляющие собой основу для построения излучателей по системе кристалл–люминофор. Применение подобных полупроводниковых излучателей, очень слабо зависящих по физическим параметрам от изменения внешней температуры (рис. 4), позволяет решить проблему изменения координат цветности и значения силы света светосигнальных устройств на их основе в заданном интервале температур. Поэтому единственным в настоящее время рациональным решением проблемы применения полупроводниковых источников света для ж/д-светофоров является применение полупроводниковых излучателей диапазона 450–460 нм. Именно таким устройством является лампа для ж/д-светофоров на основе светодиодных источников света (рис. 8).

Помимо стабильности координат цветности и интенсивности излучения во всем диапазоне рабочих температур, она обладает следующими особенностями:

- Полностью взаимозаменяема с используемой в настоящее время в линзовых комплектах лампой накаливания ЖС12-15+15 по геометрическим и электрическим параметрам.

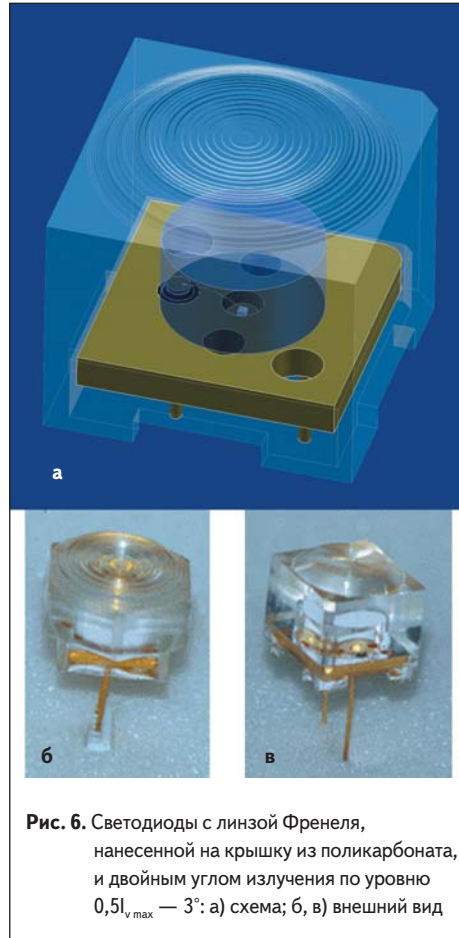


Рис. 6. Светодиоды с линзой Френеля, нанесенной на крышку из поликарбоната, и двойным углом излучения по уровню $0,5I_{v \max}$ — 3° : а) схема; б, в) внешний вид

- Позволяет использовать весь комплект применяемого в настоящее время с линзовым комплектом оборудования (например, отклоняющие вставки и т. п.).
- Позволяет получить более высокую (в 2–3 раза) силу света линзового комплекта (табл. 2).
- Полностью совместима с существующими интерфейсами управления (не требует дополнительных адаптеров или модернизации и замены существующих устройств СЦБ).
- Менее, чем традиционная лампа накаливания, чувствительна к наводкам, обусловленным



Рис. 7. Системы светодиодные светооптические ССС производства «Корвет-Лайтс» на основе светодиодов, показанных на рис. 6

междужильной емкостной связью в цепях управления.

- Выполнена в «двухнитевом» варианте: имеет резервную «нить», по всем параметрам полностью равноценную основной.
- Т-образная форма излучателя позволяет получить более широкую по сравнению с лампой накаливания диаграмму распределения силы света в вертикальном направлении для визуализации на близком расстоянии — порядка 20 м, что является преимуществом данной конструкции перед лампой накаливания (рис. 9).

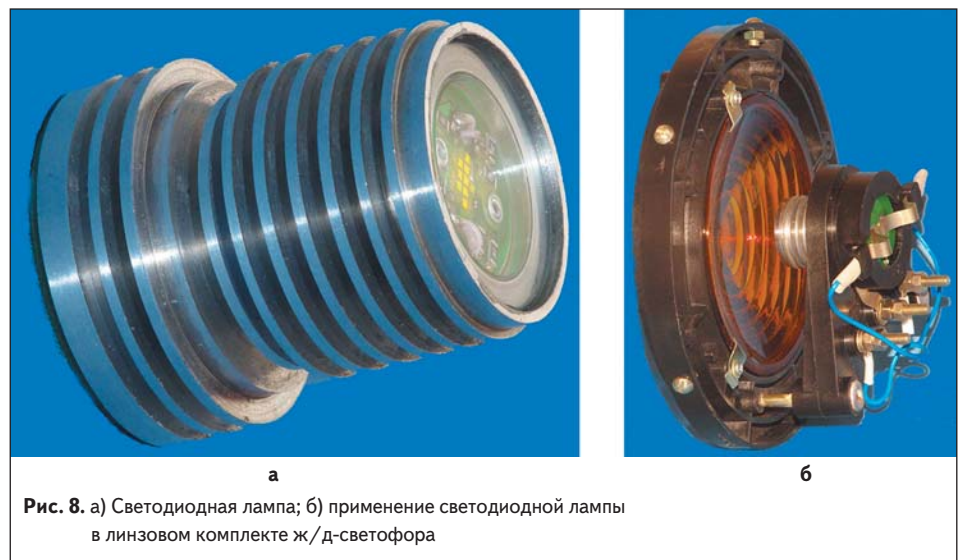


Рис. 8. а) Светодиодная лампа; б) применение светодиодной лампы в линзовом комплекте ж/д-светофора

- В конструкцию лампы может быть интегрирован элемент, который позволит производить юстировку светофорных головок в эксплуатации, с применением доступного (дешевого) высокоэффективного оборудования.
- Конструкция лампы обеспечивает точное геометрическое позиционирование «нити» накала в линзовом комплекте, что исключает необходимость дополнительной юстировки линзового комплекта при смене лампы (сейчас это обязательная операция).
- Контакт с электродами держателя лампы является плоскостным, а не точечным, как у ламп накаливания, что значительно снижает вероятность отказа светофора по причине плохого контакта.
- Стоимость лампы существенно меньше стоимости применяемой лампы накаливания за эквивалентный период эксплуатации.
- Огромная экономия ресурсов (трудовых и финансовых) при эксплуатации: количество выездов на обслуживание светофоров может быть снижено в 5 раз.
- Возможность в перспективе не менее чем в 3 раза снизить энергопотребление светофоров.
- Дополнительный экономический эффект может быть получен в случае использования ламп с вышедшей из строя основной «нитью» на участках дорог, где применяются однонитевые лампы ЖС12-15, за счет равноценного срока эксплуатации резервной «нити» (то есть лампа служит два срока).
- Возможно изготовление ламп для прожекторных светофоров (в настоящее время такие лампы не выпускаются).
- Является экологически чистым продуктом, подлежащим практически 100%-ной утилизации (корпус лампы выполнен из алюминиевого сплава).

Экономика и экономия

Несколько слов о плавности и простоте перехода на предлагаемые светодиодные лампы. Регламент обслуживания светофоров на лампах ЖС12-15+15 предполагает их замену через каждые 1,5 месяца, вне зависимости от того, перегорела она или нет. Получается 9 замен в год, еще 1 выезд бригады приходится на штатную замену из-за перегорания нити. Еще 2 выезда в год предусмотрены на очистку оптики от загрязнения. В сумме, при несовпадении причин выезда бригад, получается 12 выездов к одному светоблоку одного светофора в год.

К светофору со светодиодной лампой необходимы только 2 выезда в год — для очистки оптики, и так может продолжаться до 6 лет. Таким образом, применение представляемой лампы экономит до 60 выездов бригады обслуживания минимальной стоимостью 600 руб./выезд (36 000 руб.), не считая стоимости 54 замененных ламп ЖС12-15+15 за эти 6 лет (около 2000 руб.). При соответствующем развитии системы СЦБ может еще и экономить электроэнергию (не менее чем в 2 раза по сравнению с лампой накаливания). Однако по-

тенциал экономии не заканчивается и на этом.

Говоря о замене ламп в светофоре, никто не упоминает, что по ТУ [1, 2] положена юстировка всего ЛК относительно нити накала лампы, которая в свою очередь должна быть отсортирована на производстве по принципу соответствия геометрического положения тела накала. Очень большое сомнение вызывает реальность этого действия при обозначенной стоимости лампы ЖС12-15+15 в 30–35 руб.

В результате реальный светофор с замененной лампой и не откорректированным в связи с этим ЛК не обеспечивает требуемой силы света и заданного направления луча. Отсюда — существенная потеря верности восприятия сигнала машинистом и высокая угроза безопасности движения поездов. В то время как светодиодная лампа, установленная в ЛК, не требует его юстировки из-за большого запаса по силе света и существенно более жесткого геометрического положения «тела накала»

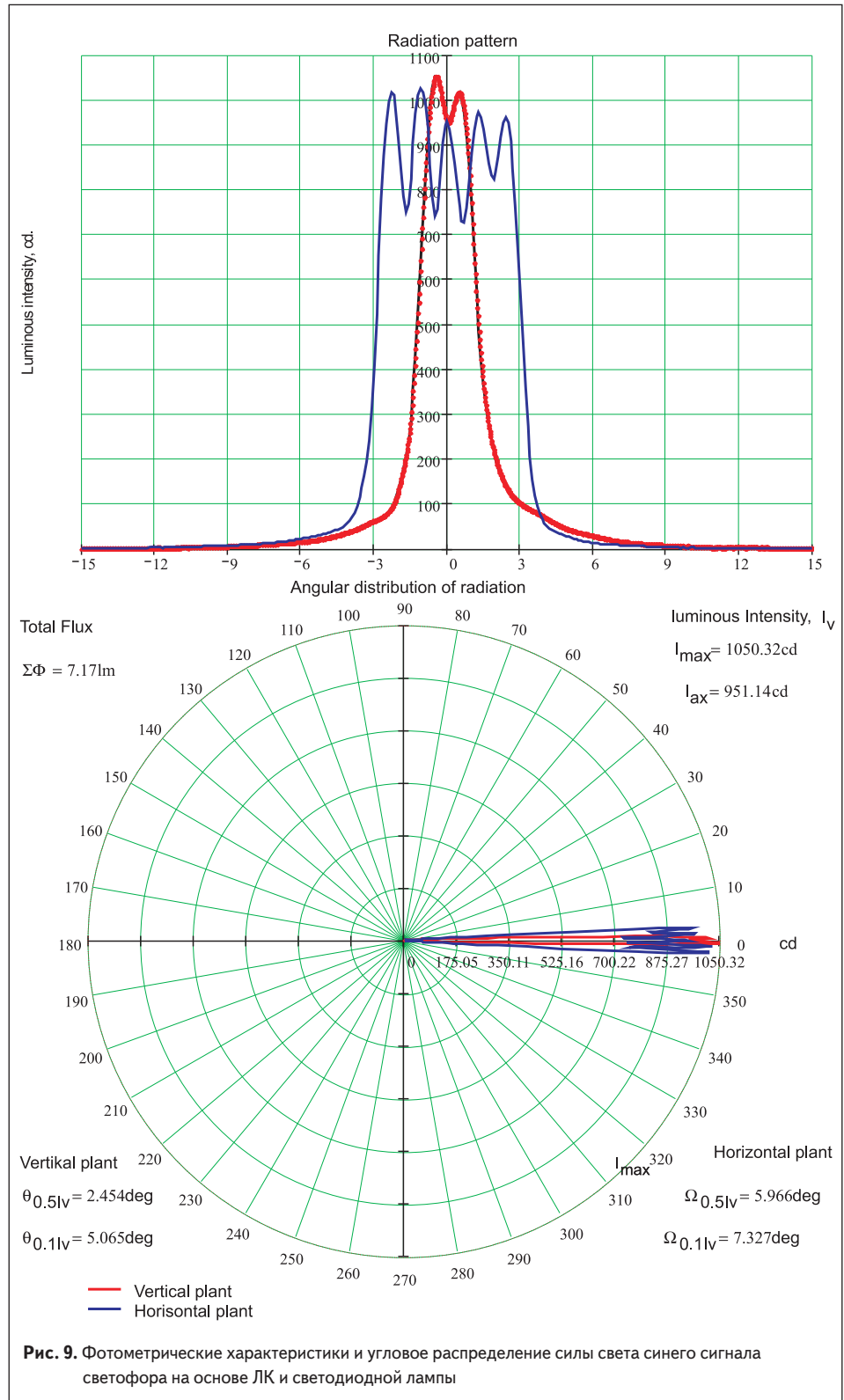


Рис. 9. Фотометрические характеристики и угловое распределение силы света синего сигнала светофора на основе ЛК и светодиодной лампы

от образца к образцу в заданном местоположении в отличие от лампы накаливания.

Основные преимущества представленной разработки:

- Быстрый старт: запуск серийного производства изделий реально осуществить в течение 6–12 месяцев.
- Быстрое внедрение: замену существующих ламп накаливания на предлагаемые нами аналоги можно осуществить мгновенно после получения первых серийных образцов.
- Огромная экономия: замена ламп накаливания на светодиодные аналоги не потребует модернизации существующего оборудования и интерфейсов СЦБ ввиду их полной совместимости, что позволит ОАО «РЖД» избежать неоправданных огромных капитальных вложений.
- Большой экономический эффект: замена существующих ламп накаливания на светодиодные аналоги позволит получить

существенную экономию денежных, людских и временных ресурсов (эксплуатационных расходов) за счет их долговечности.

- Полное соответствие всем нормативным документам. ●

Литература

1. Лампы накаливания малогабаритные и среднегабаритные для светофоров железнодорожного транспорта. Технические условия. ТУ16-675. 217-87. Взамен ГОСТ 11085-79.
2. ГОСТ 11947-90 Комплекты светофильтров-линз и линз для линзовых светофоров железнодорожного транспорта.
3. Никифоров С. Г. Умом Россию не понять: в России можно только мерить, или Физические аспекты восприятия полупроводникового света человеческим глазом // Компоненты и технологии. 2008. № 12.

4. Никифоров С. Г. Физические аспекты восприятия приборов световой ж/д-сигнализации на основе светодиодов и оправданность их применения // Доклад на конференции «ТрансЖат», 22–24 октября 2008 г.

5. Никифоров С. Г. Температура в жизни и работе светодиодов. 1 часть // Компоненты и технологии. 2005. № 9.

6. Никифоров С. Г. Температура в жизни и работе светодиодов. 2 часть // Компоненты и технологии. 2006. № 1.

7. Никифоров С. Г. Теперь электроны можно увидеть: светодиоды делают электрический ток очень заметным // Компоненты и технологии. 2006. № 3.

8. 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.