

УДК 621.326

МЕТОД РАСЧЕТА ВТОРИЧНОЙ ОПТИКИ НЕСМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Сернов С.П., Балохонов Д.В., Колонтаева Т.В., Журавок А. А.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: ssernov@bntu.by

Предложен метод расчета деталей вторичной оптики несменных источников света на основе единичного мощного светодиода для адаптивных оптических систем транспортных средств. Проведен сопоставительный анализ экспериментальных и расчетных кривых силы света несменных источников света для огней адаптивных систем различного функционального назначения.

Ключевые слова: светодиод, неизображающая оптика, расчет вторичной оптики.

Введение

Создание мощных светодиодов с номинальными световыми потоками 40–100 лм предопределило тенденции развития альтернативных источников света устройств освещения транспортных средств в виде несменных источников света. Однако поскольку светодиод является малоразмерным источником света с широким световым распределением оптической детали, то актуальной задачей становится разработка эффективной вторичной оптики в виде оптической детали, преобразующей световой поток, излучаемый полусферой светодиода с угловым распределением 110–130° в двумерное распределение, соответствующее фотометрическим спецификациям сигнальных огней.

Наиболее перспективными деталями вторичной оптики (ДВО) являются асферические неизображающие (не создающие изображения, а преобразующие световое распределение источника света к требуемому виду) охватывающие (источник света целиком помещается внутри линзы) линзы [1], изготовленные методом литья под давлением и имеющие отражающие и преломляющие поверхности.

Однако выпускаемые серийно для отдельных типов светодиодов ДВО либо имеют малую площадь светоиспускающей поверхности (поверхность, через которую свет источника покидает ДВО), что не обеспечивает требуемую визуализацию огней [2, 3], либо имеют малую эффек-

тивность вследствие многочисленных переотражений света [4, 5].

Таким образом, актуальной является разработка метода расчета асферических неизображающих охватывающих линз для несменных источников света (НИС) на основе мощных светодиодов, обладающих большой площадью излучающей поверхности и обеспечивающих как требуемое комфортное зрительное восприятие огней, так и возможность их изготовления методом литья под давлением.

Основная часть

Сечение асферической неизображающей охватывающей линзы приведено на рисунке 1. Оно состоит из передней пропускающей, передней и задней отражающих поверхностей. Установочная поверхность линзы имеет профилированную выемку для светодиода, обеспечивающую наилучшее сопряжение излучающей поверхности светодиода с линзой, что позволяет минимизировать потери светового потока на границе раздела «линза светодиода – материал ДВО». Выбранная форма обеспечивает технологичность изготовления линзы методом литья под давлением и позволяет разместить под ней на плате необходимые элементы схемы управления, включая дополнительную металлизацию для охлаждения светодиода.

В качестве исходных данных для расчета используются следующие параметры: кривая

силы света (КСС – функция, описывающая зависимость силы света светодиода от направления наблюдения в выбранной плоскости, например, в горизонтальной; является сечением светового распределения этой плоскостью) светодиода, стандартная (требуемая) КСС сигнального огня, показатель преломления материала ДВО, причем соответствие расчетного значения реальному значению показателя преломления сильно влияет на работу рассчитываемой детали. Также используются габаритные размеры асферической неизображающей охватывающей линзы, желаемое рассеяние лучей светодиода ввиду его неточности и распределение яркости по светоиспускающей поверхности ДВО, причем последний параметр используется при расчете светимости светоиспускающей поверхности изделия.

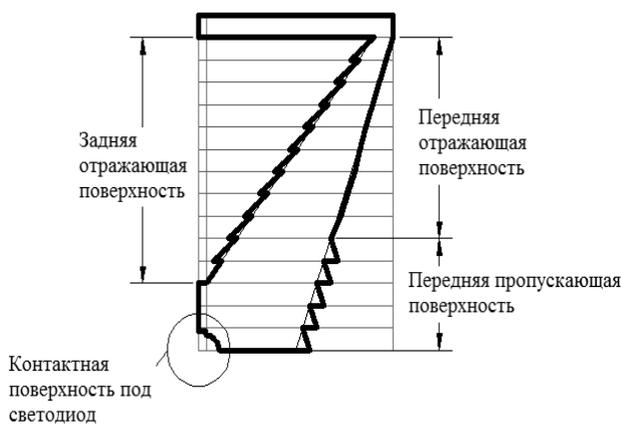


Рисунок 1 – Профиль детали вторичной оптики

Первоначально определяют минимальную толщину ДВО в центральной части h . Для этого рассчитывают минимально допустимый угол рассеяния лучей ν , определяемый линейными размерами кристалла светодиода. Далее по формулам (1) и (2) рассчитывают минимальную толщину ДВО по характеристическому размеру кристалла d (у квадратного кристалла – половина стороны, у шестиугольного – радиус описанной окружности), тангенсу угла преломления ν и относительному показателю преломления материала ДВО n (рисунок 2).

$$h = \frac{d}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (1)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\sin \beta}{n}\right). \quad (2)$$

После этого КСС светодиода и требуемую КСС приводят к осесимметричному виду. Принцип построения КСС «наихудшего случая» рассмотрим на примере стандартного светового распределения в соответствии с требованиями Правил ЕЭК ООН №№ 6.01, 7.02 для основных сигнальных огней транспортных средств. Стандартное световое распределение, симметричное относительно плоскостей H (горизонтальная плоскость) и V (вертикальная плоскость), представлено на рисунке 3 [6]. При этом цифры на пересечении линий обозначают долю (в процентах) от осевой силы света фонаря (сила света в направлении оптической оси системы).

Очевидно, что для сведения этого светового распределения к осесимметричной КСС «наихудшего случая» необходимо выбрать такое сечение, вращение которого вокруг оптической оси, проходящей через точку с координатами $(0, 0)$, создавало бы осесимметричное световое распределение, которое было бы равно или превышало стандартное распределение огня. На рисунке 3 это плоскость H , проходящая через начало координат HV , т.е. точку с координатами $(0, 0)$. При вращении выбранного сечения вокруг оптической оси (направление $0, 0$) его сила света в точке с координатами $(5, 0)$, равная 90 % от осевой, перекроет значение 70 % осевой силы света в точке с координатами $(0, 5)$ сила света в точке с координатами $(10, 0)$, равная 35 % от осевой – значение 20 % в точке с координатами $(5, 10)$. Аналогично просчитываются остальные точки светового распределения.

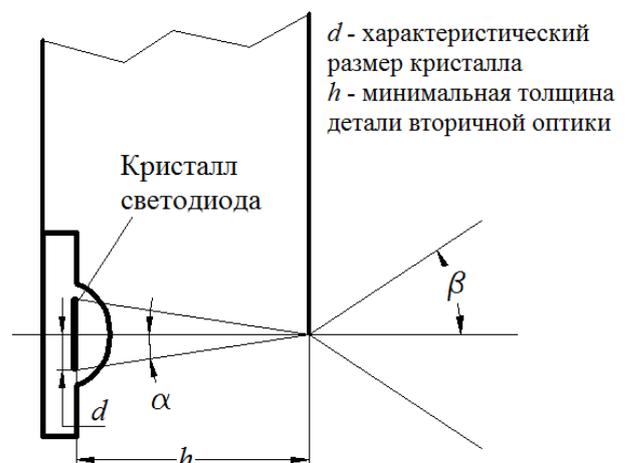


Рисунок 2 – Определение минимальной толщины детали вторичной оптики: d – угловой размер кристалла; β – допустимый угол рассеяния света ввиду «неточности» кристалла

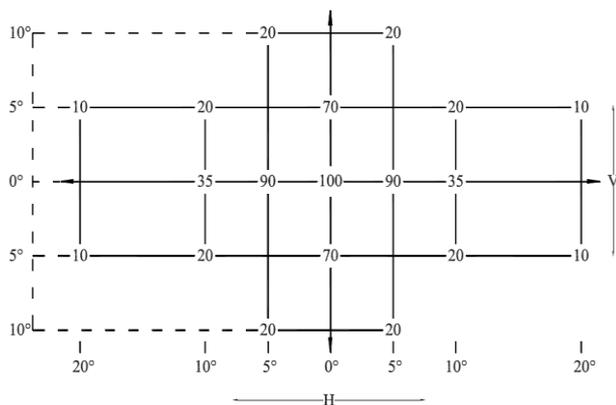


Рисунок 3 – Стандартное световое распределение сигнальных огней

Таким образом, может быть получена КСС «наихудшего случая» для решения осесимметричной задачи по расчету ДВО. Если требуемая КСС полностью несимметрична, то в качестве осевой силы света в этом случае принимается направление, в котором значение силы света наибольшее. Однако в таком случае существенная часть светового потока будет потеряна ввиду засветки «ненужных направлений».

Далее выполняется расчет условных световых потоков интегрированием по углу КСС «наихудшего случая» и КСС светодиода, приведенных к осесимметричному виду. Условный световой поток является величиной, рассчитываемой по формуле (3):

$$\Phi = 2\pi \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} I(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi, \quad (3)$$

где $I(\varphi)$ – КСС светодиода или КСС наилучшего случая; α_1, α_2 – углы, ограничивающие участок светового потока.

КСС светодиода интегрируется по углу, отсчитываемому от оптической оси, КСС «наихудшего случая» интегрируется по углу, отсчитываемому от оси симметрии. Для успешного расчета условный световой поток светодиода должен быть больше или равен условному световому потоку КСС «наихудшего случая».

Следующая стадия расчета – разбиение КСС светодиода на части в соответствии с КСС «наихудшего случая». Для разбиения светового потока светодиода и КСС «наихудшего случая» на участки для расчета можно воспользоваться двумя подходами. Если известна приблизитель-

ная форма ДВО и технологические ограничения, то можно выполнить разбиение светового потока светодиода совместно с разбиением поверхности ДВО (рисунок 4). Если форма поверхности ДВО неизвестна или отсутствуют технологические ограничения, можно выполнить разбиение произвольно (рисунок 5). Разбиение может проводиться с разным шагом для различных участков кривой силы света.

Далее необходимо из полученных условных световых потоков КСС составить каждый условный световой поток КСС «наихудшего случая», фиксируя углы лучей, ограничивающие участки разбиения. Суммирование проводится по формуле (4):

$$\Phi_{ijST} = \sum \Phi_{ijL}, \quad (4)$$

где Φ_{ijL}, Φ_{ijST} – условные световые потоки кривой силы света светодиода и КСС «наихудшего случая» соответственно; i, j – индексы суммирования

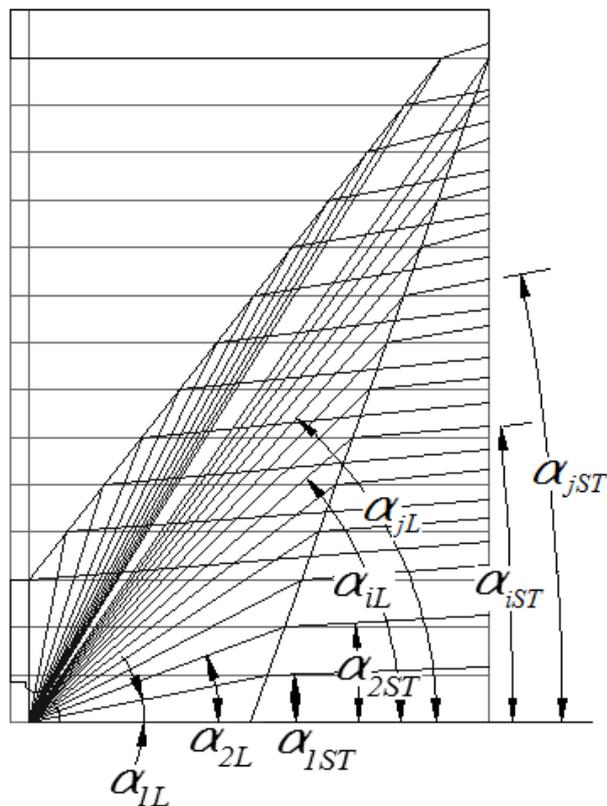


Рисунок 4 – Разбиение светового потока при известной приблизительной форме детали:

$\alpha_{1L}, \alpha_{2L}, \alpha_{iL}, \alpha_{jL}$ – углы разбиения КСС светодиода; $\alpha_{1ST}, \alpha_{2ST}, \alpha_{iST}, \alpha_{jST}$ – углы разбиения светового потока КСС «наихудшего случая»

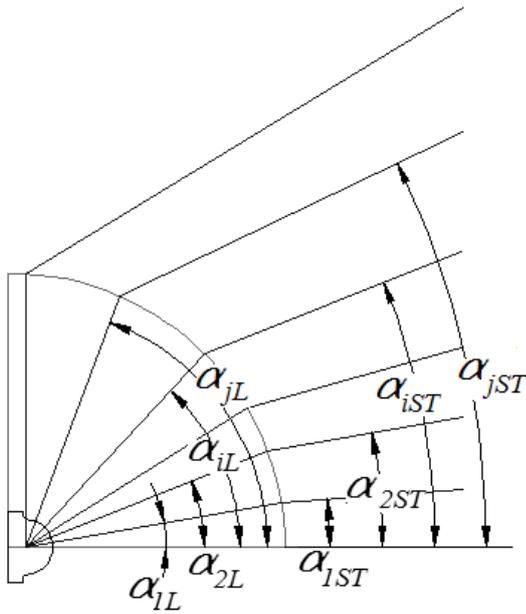


Рисунок 5 – Разбиение светового потока, если форма детали неизвестна: $\alpha_{iL}, \alpha_{2L}, \alpha_{iL}, \alpha_{jL}$ – углы разбиения КСС светодиода, $\alpha_{iST}, \alpha_{2ST}, \alpha_{iST}, \alpha_{jST}$ – углы разбиения светового потока КСС «наихудшего случая»

Суммирование проводится последовательно, по возрастанию угла, отсчитываемого от оптической оси, до того момента, пока сумма условных потоков кривой силы света светодиода не станет равна обрабатываемому условному световому потоку «кривой силы света наилучшего случая». Алгоритм расчета следующий:

1. Выбрать условный поток Φ_{ijST} «кривой силы света наилучшего случая».
2. Определить углы $\alpha_{iST}, \alpha_{jST}$, ограничивающие выбранный частичный условный световой поток.
3. Суммировать последовательно частичные условные световые потоки кривой силы света светодиода, пока их сумма не станет больше или равной Φ_{ijST} .
4. Запомнить углы α_{iL}, α_{jL} , ограничивающие начало самого первого частичного условного светового потока кривой силы света светодиода и конец самого последнего частичного условного светового потока кривой силы света светодиода соответственно.
5. Привести в соответствие углу α_{iST} угол α_{iL} .
6. Привести в соответствие углу α_{jST} угол α_{jL} .
7. Повторять алгоритм, начиная с п. 1, пока не будут обработаны все частичные услов-

ные световые потоки КСС «наихудшего случая».

В результате работы по этому алгоритму получается массив углов, определяющий каким должен быть ход лучей светодиода, чтобы из КСС светодиода получилась КСС «наихудшего случая».

После этого выполняется расчет начала передней отражающей поверхности: определяется место, где наступает полное внутреннее отражение, для чего необходимо рассчитать угол от оптической оси светодиода α_{Γ} , где будет наблюдаться полное внутреннее отражение, приняв переднюю поверхность перпендикулярной оптической оси светодиода (рисунок 6). Расстояние от передней пропускающей поверхности до кристалла светодиода принимают равным h . $\alpha_{ПВО}$ – угол полного внутреннего отражения, который можно рассчитать из закона преломления света по формуле:

$$\alpha_{ПВО} = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right). \quad (5)$$

Далее выполняется разбиение передней поверхности ДВО в соответствии с результатами предыдущих пунктов. Пример разбиения показан на рисунке 7.

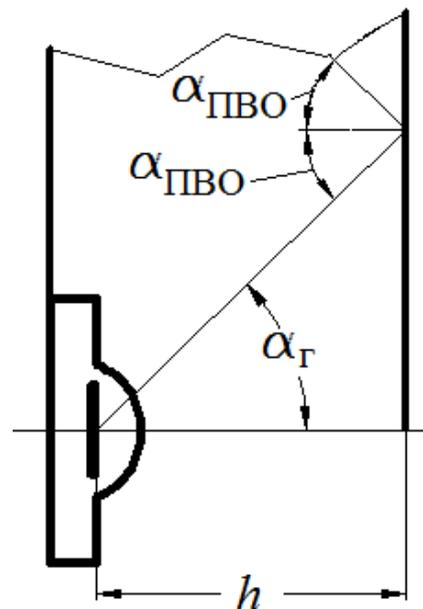


Рисунок 6 – Расчет начала передней пропускающей поверхности детали: $\alpha_{ПВО}$ – угол полного внутреннего отражения, α_{Γ} – граничный угол

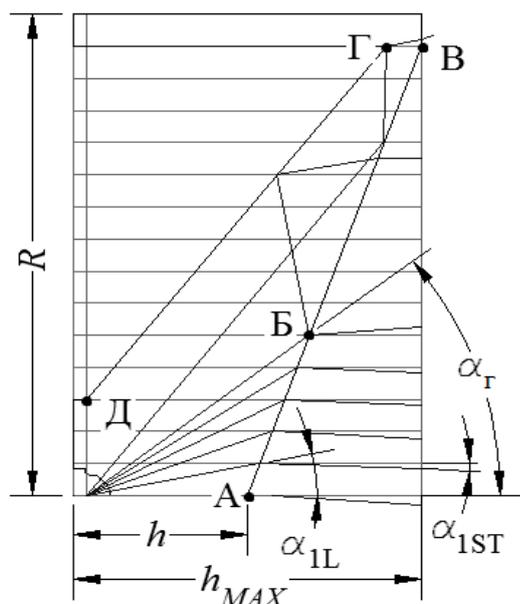


Рисунок 7 – Разбиение передней поверхности детали: АБ – передняя пропускающая поверхность; БВ – передняя отражающая поверхность; ГД – задняя отражающая поверхность; h_{MAX} – максимальная толщина детали вторичной оптики; R – максимальный радиус детали вторичной оптики; α_{1L} – верхняя граница первого частичного условного светового потока со стороны единичного мощного светодиода; α_{1ST} – верхняя граница первого частичного условного светового потока со стороны кривой силы света «наихудшего случая»

Горизонтальными линиями обозначено разбиение поверхностей детали вторичной оптики. Оно выполняется с учетом технологических ограничений и с учетом требований по накопительному суммированию частичных условных световых потоков. Границы передних поверхностей определяются минимальной толщиной h (точка А), углом α_{Γ} (точка Б), максимальной толщиной детали вторичной оптики h_{MAX} (точка В). Границы задней отражающей поверхности определяются по технологическим ограничениям (минимальная толщина слоя материала для сохранения прочности при изготовлении в точке Г), требованиями к визуализации (точка Д) при расчете задней отражающей поверхности.

Потом выполняется расчет наклона каждой части поверхности в соответствии с полученным разбиением. Расчет ведется по полученному ранее ходу граничных лучей, направления которых были определены при накопительном суммировании условных световых потоков. Наиболее простой случай расчета участка пе-

редней пропускающей поверхности показан на рисунке 8. Используя закон преломления света, каждому лучу восстанавливают нормаль поверхности в точке, определенной по разбиению поверхности ДВО и углу, полученному при накопительном суммировании частичных условных световых потоков. По восстановленной нормали получают поверхность, определяемую углом β_i .

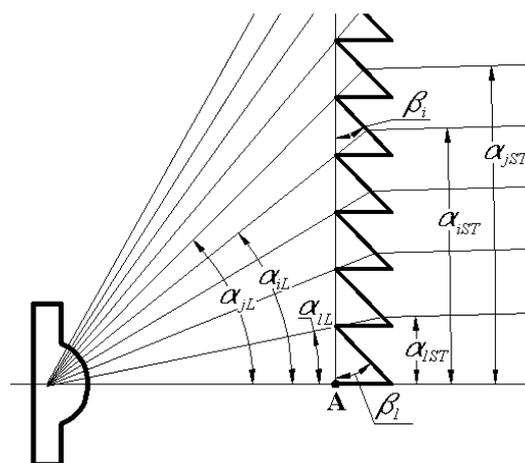


Рисунок 8 – Расчет наклона частей передней пропускающей поверхности: β_1, \dots, β_i – углы наклона участков передней пропускающей поверхности

Далее проводится расчет передней отражающей поверхности. Главный принцип расчета – привести весь пучок лучей, попадающий на переднюю отражающую поверхность, к параллельному виду с заданной расходимостью. Пример расчета показан на рисунке 9а. По заданному ходу лучей определяются нормали к участкам поверхности, границы которых показаны на рисунке непоименованными жирными точками. После этого по закону отражения рассчитываются углы β_1, \dots, β_i . Для получения точки Г (начало задней отражающей поверхности) используют последний луч передней отражающей поверхности и заданную технологией минимальную толщину ДВО. Угол β_e определяется ходом лучей задней отражающей поверхности. Точка В определяется углом β_e . Ход лучей, отраженных от передней отражающей поверхности, рассчитывается аналогично ходу лучей передней пропускающей поверхности.

Далее выполняется расчет задней отражающей поверхности ДВО. Принцип расчета подобен расчету передней преломляющей поверхности: используя данные о требуемом ходе луча и уже рассчитанной передней пропуска-

ющей и отражающей поверхностях, восстанавливают ход луча до границы очередного участка, после чего по ходу луча определяют угол отражения и форму отражающей поверхности (рисунок 9б). Углы участков $\delta_1, \dots, \delta_i$ рассчитываются исходя из разбиения частичных условных световых потоков по известному ходу лучей.

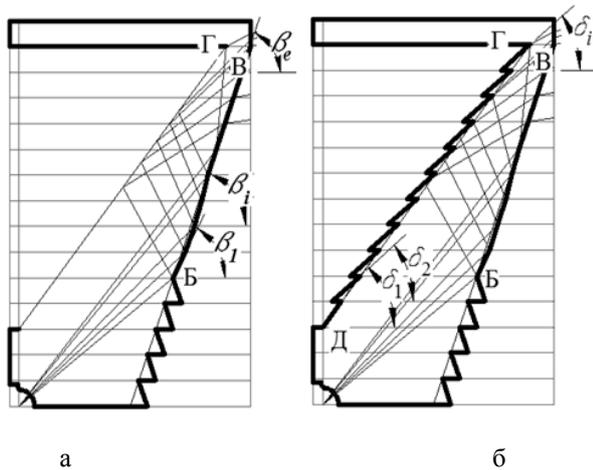


Рисунок 9 – Расчет передней (а) и задней (б) отражающих поверхностей детали: β_1, \dots, β_i – углы наклона участков передней отражающей поверхности; $\delta_1, \dots, \delta_i$ – углы наклона участков задней отражающей поверхности

Последняя стадия – верификация результатов и определение потерь светового потока путем изготовления опытного образца ДВО с последующей экспериментальной проверкой соответствия ее характеристик расчетным или путем компьютерного моделирования с помощью специализированного программного обеспечения, причем в таком случае результат может зависеть от вычислительной мощности системы, на которой проводится расчет.

Результаты измерения светового распределения силы света НИС на основе мощного красного светодиода *Luxeon Rebel* с асферической неизображающей охватывающей линзой диаметром 80 мм, рассчитанной приведенным методом, представлены на рисунке 10. На графике по оси абсцисс нанесены контрольные точки стандартного светового распределения для стоп сигналов категории S2. По оси ординат отложена сила света в направлении, заданном контрольными точками. Как видно из рисунка, наблюдается значимая (устойчивая) корреляция экспериментального и стандартного световых распределений, при этом требуемые значения силы света достигаются в диапазоне токов 280–320 мА, т.е. в области максимальной эффективности светодиодов, что положительно влияет на ресурсные характеристики НИС.

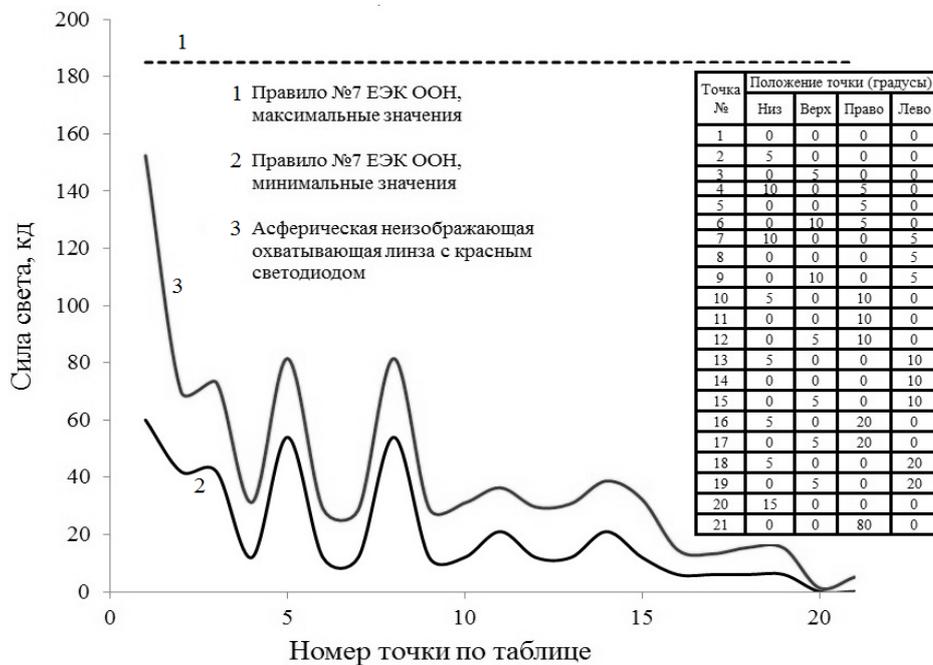


Рисунок 10 – Распределение силы света несменного источника света на основе мощного красного светодиода *Luxeon Rebel* с асферической неизображающей охватывающей линзой

Критерием эффективности преобразования света ДВО является отношение светового потока на выходе детали Φ_o к световому потоку, излучаемому источником $\Phi_{и}$, – интегральный коэффициент эффективности ДВО $A_{икэ}$:

$$A_{икэ} = \frac{\Phi_o}{\Phi_{и}}. \quad (6)$$

Интегральный коэффициент эффективности является характеристикой качества расчета асферической неизображающей охватывающей линзы: чем ближе его значение к значению коэффициента пропускания материала ДВО, тем лучше качество линзы. Можно отметить, что эффективность вторичной оптики зависит от числа пересечений луча света с границами поверхности линзы и отношения преломляющих и отражающих поверхностей линзы и при наименьшем числе пересечений и максимальной доле отражающих поверхностей эффективность оптики максимальна. Для рассчитанной асферической неизображающей охватывающей линзы интегральный коэффициент составил 0,85, что всего на 0,07 меньше, чем коэффициент пропускания света материала.

Заключение

Разработан новый метод расчета деталей вторичной оптики мощных светодиодов, позволяющий по известному световому распределению светодиода и требуемому световому распределению источника света рассчитать геометрию асферической неизображающей охватывающей линзы с развитой излучающей поверхностью, обеспечивающей комфортное зрительное восприятие огней сигнальных систем транспортных средств и легко воспроизводимой современными методами литья под давлением из прозрачных полимеров.

Значение интегрального коэффициента эффективности для опытных образцов деталей вторичной оптики, рассчитанных предлагаемым методом, составило 0,85, что свидетельствует о результативности метода и перспек-

тивности его применения для расчета деталей вторичной оптики мощных светодиодов, особенно деталей вторичной оптики светодиодных несменных источников света адаптивных оптических систем транспортных средств.

Список использованных источников

1. Ding, Y. Freeform LED lens for uniform illumination / Y. Ding, X. Liu, Z. Zheng, P. Gu // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, № 17. – P. 12958–12966.
2. Kuntze, T. Plastic Optics Enable LED Lighting Revolution. When Highest Precision Meets Low Prices / T. Kuntze // Optik & Photonik. – 2007. – № 4. – P. 42–45.
3. LED Collimator // Carclo Technical Plastics [Electronic resource]. – 2008. – Mode of access: <http://carmaclo-optics.co.uk/catalog/documents/10025-iss1-110505.pdf?osCsid=d98d1fb9d07c48c83e25daa4ac0104a8>. – Date of access: 22.04.2009.
4. Indication Lamp Comprising Optical Piece for Performing Indicating Function: пат. 2004134357 Япония, МПК F 21 S 8/10 / A. J. Pierre, F. Benoist, B. Norbert; заявитель Valeo Vision. – № JP20030146441 20030523; заявл. 23.05.2003; опублик. 30.04.2004 // Espacenet [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=ru_ru&FT=D&date=20040430&CC=JP&NR=2004134357A&KC=A. – Дата доступа: 18.04.2013.
5. Vehicle lamp: Пат. 20040004118, Корея, МПК F 21 S 8/10; F 21 V 7/00 / Y. Amano; H. Koizumi; заявитель: Koito Manufacturing Co., Ltd. – № KR20030044266; заявл. 01.07.2003; опублик. 13.01.2004 // Espacenet [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20040113&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=KR&NR=20040004118A&KC=A&ND=4. – Дата доступа: 19.04.2013.
6. UNECE Regulation No.7. Uniform Provisions Concerning the Approval of Front and Rear Position (Side) Lamps, Stop Lamps and End-outline Marker Lamps for Motor Vehicles (Except Motor Cycles) and Their Trailers/ UNECE [Electronic resource]. – 2006. – Mode of access: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29reg/s1/r007r4e.pdf>. – Date of access: 22.04.2009.

**VEHICULAR ADAPTIVE OPTICAL SYSTEMS NON-REPLACEABLE LIGHT SOURCES
SECONDARY OPTICS CALCULATION METHOD**

Sernov S.P., Balokhonov D.V., Kolontaeva T.V., Zhuravok A.A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus
e-mail: ssernov@bntu.by

Abstract. A new method to calculate a single LED-based non-interchangeable light source secondary optics for vehicle adaptive optical systems is proposed, said method being based on partial luminous flux cumulative addition. A comparative analysis of calculated and experimental luminous intensity distributions for optics calculated by said method is conducted.

Keywords: light-emitting diode, non-imaging optics, secondary optics calculation.

References

1. Ding, Y., Liu, X., Zheng, Z., Gu, P. Freeform LED lens for uniform illumination. *Optics Express*, 2008, Vol. 16, № 17, pp.12958–12966.
2. Kuntze, T. Plastic Optics Enable LED Lighting Revolution. When Highest Precision Meets Low Prices. *Optik & Photonik*, 2007, № 4, pp.42–45.
3. *LED Collimator*. Available at: <http://carclo-optics.co.uk/catalog/documents/10025-iss1-110505.pdf?osCsid=d98d1fb9d07c48c83e25daa4ac0104a8>. (accessed 22.04.2009).
4. Pierre A.J., F. Benoist, B. Norbert. *Indication Lamp Comprising Optical Piece for Performing Indicating Function*. Patent JP, no. 2004134357, 2004.
5. Amano Y., Koizumi H. *Vehicle lamp*. Patent KR, no. 20040004118, 2004.
6. *UNECE Regulation No.7. Uniform Provisions Concerning the Approval of Front and Rear Position (Side) Lamps, Stop Lamps and End-outline Marker Lamps for Motor Vehicles (Except Motor Cycles) and Their Trailers*. Available at: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs1/r007r4e.pdf>. (accessed 22.04.2009).

Поступила в редакцию 27.01.2014.