

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

УДК 624.94

БАЛОХОНОВ  
Дмитрий Валентинович

**АДАПТИВНЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С НЕСМЕННЫМИ  
ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы

Минск, 2014

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Сернов Сергей Павлович**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Козлов Владимир Леонидович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Квантовая радиофизика и оптоэлектроника» Белорусского государственного университета;

**Зеневич Андрей Олегович**, доктор технических наук, доцент, ректор учреждения образования «Высший государственный колледж связи»

Оппонирующая организация Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии»

Защита диссертации состоится 26 сентября 2014 г. в 14<sup>15</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, ауд. 202. Телефон ученого секретаря (017) 2939618, e-mail: D.02.05.17@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
канд. техн. наук



Ризноокая Н.Н.

© Балохонов Д.В., 2014

© Белорусский национальный  
технический университет, 2014

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В пределах данной работы под оптическими системами транспортных средств понимают светотехническое оборудование транспортных средств, имеющее источник света и детали для формирования заданного светового распределения. Оптико-электронными считаются оптические системы транспортных средств, имеющие в своем составе электронные схемы управления или питания. Существующие оптические системы транспортных средств неэкономичны, имеют малую надежность и большие габариты в основном в силу несовершенства применяемых источников света – ламп накаливания. Из-за постоянного увеличения скорости транспортных средств сила света оптических систем транспортных средств также возрастает, чтобы обеспечить видимость транспортного средства. Во избежание ослепления в ночное время сила света оптических и оптико-электронных систем транспортных средств должна изменяться в зависимости от времени суток, а также в зависимости от условий окружающей среды и от степени загрязненности изделий, то есть они должны быть адаптивными. Таким образом, разработка адаптивных оптико-электронных систем транспортных средств на основе светодиодов актуальна, так как позволит добиться существенной экономии средств и ресурсов при изготовлении и обслуживании транспортных средств и улучшить безопасность движения. При использовании светодиодов в качестве источника света для адаптивных оптико-электронных систем транспортных средств возникают следующие проблемы:

- зависимость силы света и координат цветности светодиода от его тока инжекции и температуры вызывает параметрический отказ изделия при перегреве.
- широкое распределение силы света мощных светодиодов (угол половинной интенсивности  $60^{\circ}$  или больше) не позволяет экономно использовать их световой поток с помощью традиционных оптических деталей.
- ввиду сравнительной новизны мощных светодиодов как источника света, практически отсутствуют стандартные методы для измерения их оптических характеристик.

Решению указанных проблем посвящается данная работа.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Тема диссертации соответствует подразделам 1.6 (энергосбережение, энергоэффективные технологии) и 6.2 (новые оптические, волоконно-оптические и нелинейно-оптические компоненты, материалы и покрытия, новые материалы для приборов функциональной микро-, опто-, нано- и СВЧ-электроники) перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011-2015 годы, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585.

Диссертационная работа выполнялась в БНТУ на кафедре «Микро- и нанотехника» и в НИЛ ОЭП.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии со следующими темами:

- тема «Разработать теоретические основы создания первичных преобразователей информационно-измерительной техники», шифр ГБ -06-297;
- тема «Разработать теоретические и технологические основы создания материалов и компонентов микро- и наносистемной техники», шифр ГБ 41 11-2.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка адаптивных оптических систем транспортных средств на основе модулей несменных источников света со светодиодами и метрологического обеспечения для их производства.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- провести анализ существующих конструкторских и технологических решений в сфере адаптивных оптических систем транспортных средств, а также анализ существующих методов измерения их оптических характеристик;
- разработать методику расчета деталей вторичной оптики для единичных мощных светодиодов;
- разработать конструкцию деталей вторичной оптики для единичных мощных светодиодов и конструкцию адаптивной оптической системы транспортного средства на основе этих деталей

вторичной оптики, которая бы удовлетворяла международным стандартам в данной области;

- экспериментально подтвердить соответствие разработанных конструкций деталей вторичной оптики и адаптивной оптической системы транспортного средства на их основе международным стандартам;

- разработать метрологическое обеспечение для производства адаптивных оптических систем с несменными источниками света на основе светодиодов: метод измерения оптических характеристик адаптивных оптических систем с несменными источниками света на основе светодиодов и критерии выбора средств измерений.

Объектом исследования являются адаптивные оптические системы транспортных средств.

Предметом исследования являются конструкция и характеристики адаптивных оптических систем транспортных средств, в которых в качестве источника света применяются светодиоды.

Выбор объекта и предмета исследования обусловлен потребностью автомобильной промышленности Республики Беларусь в адаптивных оптических системах транспортных средств и метрологическом обеспечении для измерения их оптических характеристик.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

- адаптивная оптическая система транспортного средства с несменными источниками света на светодиодах в виде совокупности отдельных унифицированных оптических модулей, содержит микроконтроллер и датчики для адаптации силы света системы к внешним воздействиям, обладает уменьшенной в два раза толщиной и позволяет уменьшить потребление энергии как минимум в десять раз по сравнению с существующими аналогами, обладает повышенной надежностью за счет использования единичных светодиодов;

- конструкция асферической неизображающей охватывающей линзы для отдельного (единичного) светодиода с линейными размерами, соизмеримыми с линейными размерами оптического модуля несменного источника света, поверхность которой образована совокупностью поверхностей второго порядка без металлизации, преобразует распределение силы света источника света к заданному световому распределению, имеет размеры светоизлучающей по-

верхности как минимум в два раза больше существующих аналогов при той же толщине, обеспечивает сравнимую с металлизированными деталями вторичной оптики эффективность;

- методика расчета асферических неизображающих охватывающих линз для отдельных (единичных) светодиодов на основе накопительного суммирования условных световых потоков светодиода для преобразования светового распределения светодиода к заданному световому распределению, позволяет рассчитать форму асферической неизображающей охватывающей линзы с диаметром излучающей поверхности как минимум в два раза больше существующих аналогов при той же толщине детали;

- отношение площади области допустимых значений измеряемой световой величины, скорректированной по погрешности средства измерения, к площади первоначальной области допустимых значений, применяется в качестве критерия выбора средств измерений световых характеристик светодиодов и адаптивных оптических систем на их основе, позволяет выбрать средство измерения, обеспечивающее заданную доверительную вероятность.

**Личный вклад соискателя.** Личный вклад соискателя в работу состоит в следующем:

- создание методики расчета неизображающих оптических деталей с помощью накопительного суммирования условных световых потоков;

- расчет неизображающих оптических деталей;

- разработка критерия выбора средств измерения оптических характеристик адаптивных оптических систем с несменными источниками света на светодиодах.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук С.П. Сернов координировал работу и оказывал консультативную помощь в проведении исследований, кандидат технических наук Т.В. Колонтаева участвовала в обсуждении результатов и оказывала консультативную помощь при написании статей и подготовке диссертации. Аспирант А.А. Журавок осуществил компьютерную реализацию разработанной методики расчета деталей вторичной оптики. Ведущий инженер БелГИМ О.Б. Тарасова оказывала консультативную помощь при проведении измерений и

практической проверке разработанного критерия выбора средств измерения.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, прошли апробацию на следующих научных собраниях: международная научно-практическая конференция “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности”, Санкт-Петербург, Россия (2007, 2009, 2010 г.), международная научно-техническая конференция «Приборостроение», Минск, БНТУ (2009, 2010, 2012), международная научно-практическая конференция «Метрология – 2009», Минск, БелГИМ, 2009 г., международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике», Минск, БНТУ (2006, 2010, 2011, 2012), международная студенческая научно-техническая конференция «Новые направления развития приборостроения», Минск, БНТУ, 2010 г.

**Опубликованность результатов диссертации.**

Основные результаты работы опубликованы в 23 печатных работах (9,2 а. л.), включая: 6 статей в научных журналах согласно перечню научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по научному направлению «Приборостроение» (4,6 а. л.), 9 докладов в трудах конференций (1,2 а. л.), 4 тезисов докладов (0,7 а. л.), 3 патента на полезную модель Республики Беларусь и 1 патент РФ на изобретение (2,7 а. л.).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем диссертации – 134 страницы, включая 34 рис. и 4 табл. на 36 страницах, список использованных источников из 104 наименований на 12 страницах, список опубликованных работ автора из 23 наименований на 4 страницах, 4 приложения на 17 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении и общей характеристике диссертации** отражена актуальность темы диссертации, обоснована необходимость и определены основные направления диссертационного исследования.

**В первой главе «Современное состояние и перспективы развития адаптивных оптических систем транспортных средств»** проведен анализ принципов адаптации оптико-электронных систем транспортных средств и требований к источникам света этих систем, который показал, что наиболее целесообразным является использовать светодиоды в качестве источника света адаптивных оптико-электронных систем, причем разрабатываемая адаптивная оптико-электронная система должна изменять свою силу света в зависимости от внешней освещенности, состояния светопропускающей поверхности, и свой режим работы (непрерывный–импульсный) в зависимости от ускорения транспортного средства [2,3,9].

Проведенный анализ требований к адаптивным оптико-электронным системам транспортных средств и существующих конструкций оптических систем транспортных средств показал, что наиболее целесообразным решением является адаптивная оптико-электронная система модульной конструкции, причем каждый из оптических модулей несменных источников света построен на едином мощном светодиоде, выполняет одну из функций адаптивной оптико-электронной системы и снабжен деталями вторичной оптики (ДВО) [23].

Как показывает анализ существующих конструкций ДВО, проведенный в главе 1, наилучшей ДВО для разрабатываемой адаптивной оптико-электронной системы является асферическая неизображающая охватывающая линза [17]. Однако существующие ДВО этого типа не удовлетворяют требованиям по площади излучающей поверхности, габаритным размерам и оптической эффективности и не позволяют получить соответствующее Правилам ЕЭК ООН распределение силы света, поэтому необходимо создать асферическую неизображающую охватывающую линзу, имеющую большую площадь испускающей поверхности, сравнительно малую толщину и оптическую эффективность не менее 80%, удовлетворяющую требованиям Правил ЕЭК ООН по распределению силы света.

Анализ фотометрических и колориметрических характеристик оптических систем с несменными источниками света на светодиодах показывает, что они сильно отличаются от характеристик оптических систем с традиционными источниками света, например, у светодиодов имеется цветовой растр, который можно ликвидиро-



вать путем применения ДВО с «перемешиванием лучей» [14,16,18]. Во избежание значительных неопределенностей при измерении этих характеристик необходимо разработать метрологическое обеспечение для измерения фотометрических и колориметрических характеристик оптических систем с несменными источниками света: метод измерения этих характеристик и критерий выбора средств измерений [4,6,15].

На основании выявленных проблем определены объект и предмет диссертационного исследования, а также сформулированы его цель и задачи.

**Во второй главе «Методы исследования оптических характеристик адаптивных оптических систем с несменными источниками света на светодиодах»** описываются методы измерения фотометрических и колориметрических характеристик адаптивных оптических систем со светодиодами. Метод измерения светового распределения оптических систем основан на косвенном измерении силы света, определяемой в дальнем поле по освещенности, создаваемой объектом измерения на чувствительном элементе фотометра, расположенного на заданном расстоянии от объекта измерения. Преобразование освещенности в силу света осуществляется по закону обратных квадратов. Особенность метода заключается в том, что он учитывает полупроводниковую природу излучения светодиодов: вводится обязательная выдержка во включенном состоянии, проводится измерение силы света как при стандартных условиях, так и при повышенных температурах из диапазона рабочих температур адаптивной оптико-электронной системы, ток инжекции светодиодов поддерживается постоянным, измерения проводятся в дальнем поле.

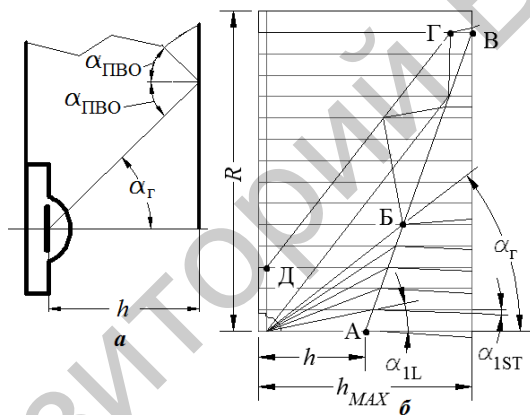
Координаты цветности измеряются колориметром напрямую, при этом измерительная установка построена так, что измерительная головка колориметра может заменять головку фотометра без нарушения соосности системы, в результате чего уменьшаются затраты времени на выполнение измерений.

Для увеличения достоверности указанных измерений был разработан критерий выбора средств измерений. Критерий выбора основан на анализе области допустимых значений измеряемой характеристики и известной погрешности средства измерений [13]. Зная погрешность средства измерения, проводится коррекция формы об-

ласти допустимых значений, и критерий выбора вычисляется в виде отношения площадей скорректированной области допустимых значений и первоначальной области допустимых значений.

В третьей главе «Разработка адаптивной оптической системы с несменными источниками света» на основе анализа требований к адаптивным оптико-электронным системам, выдвинутым в гл. 1, выбран материал для ДВО адаптивной оптико-электронной системы транспортного средства, в качестве которого выступает Makrolon LED2245 фирмы Bayer.

Приведенная далее методика позволяет рассчитать параметры асферической неизображающей охватывающей линзы, схематический профиль которой представлен на рисунке 1, б.



*a* – расчет начала отражающей поверхности ДВО, *б* – профиль поверхности ДВО и его основные элементы;

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,  $\alpha_{IL}$  – верхняя граница первого частичного условного светового потока со стороны светодиода,  $\alpha_{IST}$  – верхняя граница первого частичного условного светового потока со стороны «кривой силы света наихудшего случая»

**Рисунок 1 – Схема расчета асферической неизображающей охватывающей линзы**

Асферическая неизображающая охватывающая линза имеет следующие подлежащие расчету элементы:

- передняя пропускающая поверхность;

- передняя отражающая поверхность;
- задняя отражающая поверхность;
- минимальная толщина ДВО в центральной части.

Входными данными являются кривая силы света светодиода, кривая силы света будущего изделия, габаритные и технологические ограничения, показатель преломления материала будущей детали [8]. Также может использоваться распределение яркости по поверхности ДВО [7].

По заданному углу рассеяния и размеру кристалла светодиода определяется минимальная толщина асферической неизображающей охватывающей линзы в центре. После этого кривая силы света светодиода и стандартная кривая силы света приводятся к осесимметричному виду (формирование «кривой силы света наихудшего случая»), так как стандартное распределение силы света практически всех видов светотехнического оборудования транспортных средств является симметричным относительно вертикали и горизонтали. Далее рассчитывают условные световые потоки интегрированием по углу «кривой силы света наихудшего случая» и кривой силы света светодиода. Условный световой поток рассчитывается по формуле (1):

$$\Phi = 2\pi \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} I(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi, \quad (1)$$

где  $I(\varphi)$  – кривая силы света светодиода или «кривая силы света наихудшего случая»;

$\alpha_1, \alpha_2$  – углы, ограничивающие условный световой поток.

Полученные числа сравниваются: условный световой поток светодиода должен быть больше или равен условному световому потоку «кривой силы света наихудшего случая», причем обе величины рассчитываются в пределах  $0 - 90^\circ$  от оптической оси.

Далее выполняют разбиение кривой силы света светодиода на части в соответствии с «кривой силы света наихудшего случая». Если известна приблизительная форма ДВО и технологические ограничения, то можно выполнить разбиение кривой силы света светодиода совместно с разбиением поверхности детали вторичной оптики. В результате получают массив углов  $\alpha_{1L}, \alpha_{2L}, \alpha_{iL}$ , ограничи-

вающих участки кривой силы света светодиода, и массив углов  $\alpha_{1ST}$ ,  $\alpha_{2ST}$ ,  $\alpha_{iST}$ , ограничивающих части «кривой силы света наихудшего случая». При этом число углов в массиве светодиода должно быть больше или равно числу углов в массиве «кривой силы света наихудшего случая».

Далее нужно из полученных условных световых потоков кривой силы света светодиода «собрать» каждый условный световой поток «кривой силы света наихудшего случая», запоминая углы лучей, ограничивающие участки. «Сборка» проводится по формуле (2):

$$\Phi_{iST} = \sum \Phi_{jL}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{jL}$ ,  $\Phi_{iST}$  – условные световые потоки кривой силы света светодиода и «кривой силы света наихудшего случая»;

$i, j$  – индексы суммирования.

Суммирование проводится подряд, по возрастанию угла от оптической оси, пока сумма условных потоков кривой силы света светодиода не станет равна обрабатываемому условному световому потоку «кривой силы света наихудшего случая». Алгоритм расчета имеет следующий вид:

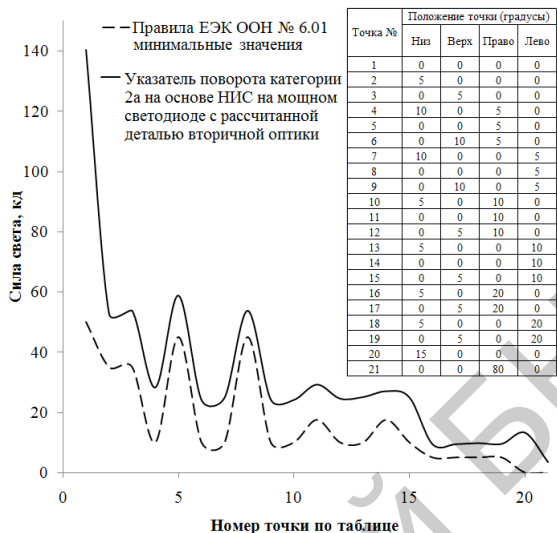
1. Выбрать условный поток  $\Phi_{iST}$  «кривой силы света наихудшего случая»
2. Запомнить углы  $\alpha_{iST}$ ,  $\alpha_{(i+1)ST}$  ограничивающие данный условный световой поток снизу и сверху соответственно.
3. Суммировать подряд условные световые потоки кривой силы света светодиода, пока их сумма не станет больше или равной  $\Phi_{iST}$ .
4. Запомнить углы  $\alpha_{jL}$ ,  $\alpha_{(j+1)L}$  ограничивающие низ самого первого условного светового потока кривой силы света светодиода и верх самого последнего условного светового потока кривой силы света светодиода соответственно.
5. Поставить в соответствие углу  $\alpha_{iST}$  угол  $\alpha_{jL}$ .
6. Поставить в соответствие углу  $\alpha_{(i+1)ST}$  угол  $\alpha_{(j+1)L}$ .
7. Повторять, начиная с п.1, пока не будут обработаны все частичные условные световые потоки «кривой силы света наихудшего случая».

В результате получается массив углов, показывающий ход лучей света светодиода, необходимый, чтобы из кривой силы света светодиода получилась «кривая силы света наилучшего случая».

После этого по показателю преломления рассчитывают начало передней отражающей поверхности (рисунок 1, а). Далее проводят разбиение передней поверхности детали на участки, после чего рассчитывают наклон каждого участка, зная ход граничных лучей, углы наклона которых известны из суммирования частичных световых потоков. После этого проводят расчет передней отражающей поверхности. Соблюдая условие полного внутреннего отражения и зная ход лучей, находят наклон каждого участка этой поверхности к оптической оси. Задняя отражающая поверхность рассчитывается аналогично с учетом преломления отраженных лучей на рассчитанной ранее передней отражающей поверхности.

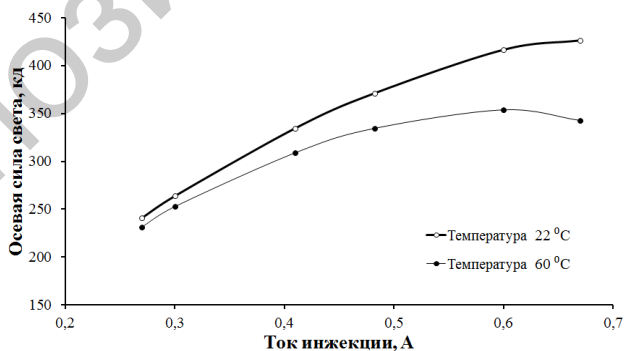
Основными критериями для оценки качества являются оптическая эффективность и критерий толщины ДВО [10]. Оптическая эффективность является отношением светового потока светодиода с деталью, излученного в область стандартного светового распределения, к световому потоку светодиода без детали и показывает эффективность использования светового потока светодиода. Критерий толщины ДВО равен отношению характеристического размера (диаметр у круга, половина стороны квадрата и т.п.) к толщине детали. Он позволяет оценить эстетические качества детали и экономии материала: чем данный критерий больше, тем более качественно выполнено конструирование, тем большую излучающую поверхность имеет деталь и тем меньшее количество материала будет необходимо для ее получения.

**В четвертой главе «Исследование характеристик адаптивных оптических систем с несменными источниками света»** содержатся результаты измерений характеристик опытного образца адаптивной оптико-электронной системы с рассчитанной по описанной методике асферической неизображающей охватывающей линзой. На рисунке 2 представлено световое распределение указателя поворота с разработанной ДВО и светодиодом марки LХК2-РD12-ROO. ДВО преобразует распределение силы света светодиода практически к требуемому Правилами ЕЭК ООН виду, и, таким образом, описанная методика пригодна к использованию.



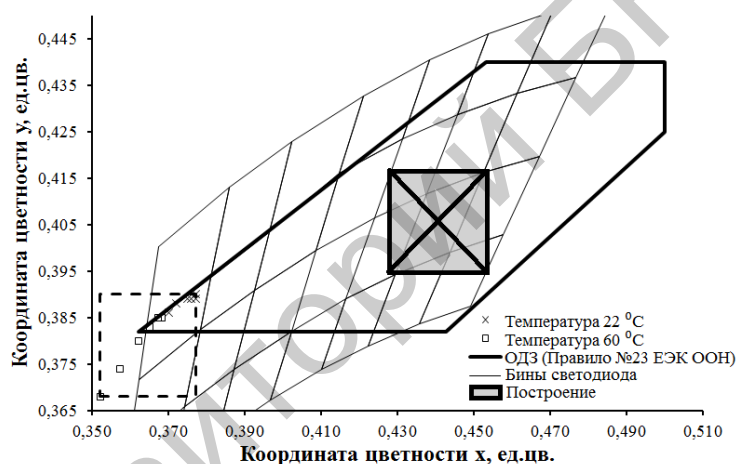
**Рисунок 2 – Распределение силы света оптического модуля несменного источника света (НИС) с рассчитанной ДВО**

Как видно из рисунка 3, зависимость силы света оптического модуля несменного источника света на основе светодиода марки Rebel от тока инжекции практически линейна, что позволяет компенсировать температурное гашение люминисценции при высокой температуре увеличением тока инжекции [12,19].



**Рисунок 3 – Зависимость силы света оптического модуля несменного источника света с белым светодиодом Rebel**

Как видно из рисунка 4, зависимость координат цветности оптического модуля с белым светодиодом от температуры при высоких температурах она покидает область допустимых значений, что свидетельствует о неправильном выборе бина (категории) светодиода. Чтобы выбрать бин правильно, надо построить прямоугольник на основе максимального и минимального значения координат цветности (показано пунктиром), после чего перенести этот прямоугольник внутрь области допустимых значений (показано в виде серого прямоугольника). Тогда центр прямоугольника укажет необходимый бин.



**Рисунок 4 – Зависимость координат цветности оптического модуля несменного источника света с белым светодиодом Rebel от температуры**

Данные о температурных и токовых зависимостях силы света и координат цветности светодиодов, полученные при исследовании их оптических характеристик, позволяют выбрать такой ток инжекции, который удержит все характеристики адаптивной оптической системы в требуемых пределах при любых температурах из рабочего диапазона.

**В пятой главе «Устройство адаптивной оптической системы с несменными источниками света»** описываются конструкция и режимы работы адаптивного заднего комбинированного фонаря с

несменными источниками света. Адаптивный задний комбинированный фонарь включает в себя четыре секции, выполняющие функции стоп-сигнала, совмещенного с габаритным огнем, указателя поворота, противотуманного огня, фары заднего хода. Адаптивный задний комбинированный фонарь герметичен, что достигается сваркой корпуса и рассеивателя. Адаптивный задний комбинированный фонарь относится к несменным источникам света, так как замена светодиодов изделия не предусмотрена ввиду большого времени наработки на отказ. Функциональная схема адаптивного заднего комбинированного фонаря представлена на рисунке 5.

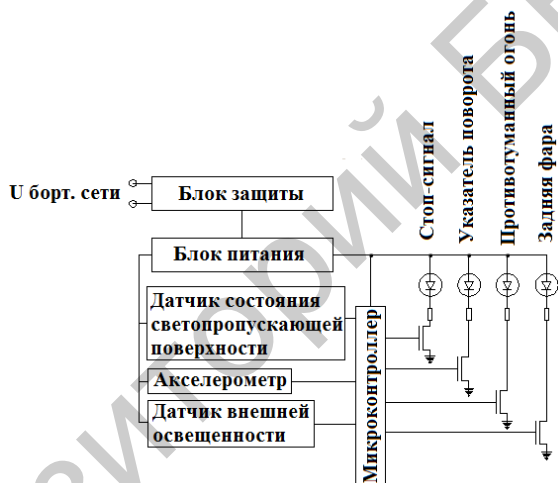


Рисунок 5.1 – Функциональная схема адаптивной оптической системы

Корпус фонаря из сополимера акрилонитрилбутадиенстирена содержит печатную плату со схемой питания адаптивного заднего комбинированного фонаря, микроконтроллером, датчиком дождя, датчиком состояния светопропускающей поверхности и светодиодами, причем каждый светодиод отвечает за одну секцию фонаря. Боковой габаритный огонь категории SM1 расположен на торце изделия. Каждый светодиод оснащен асферической неизображающей охватывающей линзой для формирования светового распределения. Асферические неизображающие охватывающие линзы и печатная плата закреплены в корпусе так, что оптические оси светодиодов и



оптических деталей совпадают. Плоский рассеиватель обеспечивает герметичность изделия. Датчик дождя и датчик состояния светопропускающей поверхности находятся в непосредственной близости от рассеивателя, чтобы обеспечить наиболее точный контроль состояния его поверхности. На рассеивателе есть световозвращающий участок, предназначенный для обозначения транспортного средства при выключенном фонаре. Устройство работает следующим образом: при отсутствии торможения ток всех светодиодов поддерживается микроконтроллером на уровне, зависящем от яркости окружения и загрязненности корпуса изделия. При торможении микроконтроллер по данным с акселерометра определяет, критическое ли оно, и, если оно критическое, подает на светодиод секции стоп-сигнала, увеличенный ток инжекции и заставляет его работать в импульсном режиме. Если торможение проходит в обычном режиме, стоп-сигнал работает в непрерывном режиме. Блок питания обеспечивает все изделие стабильным напряжением, блок защиты защищает изделие от скачков напряжения [11].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Предложена новая конструкция адаптивной оптической системы транспортного средства с НИС на основе единичных мощных светодиодов и вторичной оптики с функциями заднего комбинированного фонаря транспортного средства с изменяемой силой света, предложен алгоритм ее работы в зависимости от условий внешней освещенности и динамических характеристик транспортного средства [20], [21].

2. Предложена новая методика расчета геометрии деталей вторичной оптики на основе разбиения светового потока светодиода и последующего накопительного суммирования получившихся условных световых потоков, позволяющая эффективно преобразовать распределение силы света светодиодов в пространственное распределение силы света в соответствии с Правилами ЕЭК ООН №№ 6,7,23,38 и Директивами ЕС [1].

3. Разработана новая конструкция детали вторичной оптики НИС на основе единичных мощных светодиодов в виде тонкой асферической неизображающей охватывающей линзы большого

диаметра, обладающая устойчивостью к вибрационным и ударным воздействиям. Проведена оптимизация выбора материала и способа изготовления полимерной линзы, обеспечивающих высокую технологичность и экономическую эффективность. Изготовлены и испытаны опытные образцы деталей вторичной оптики НИС в виде тонкой асферической неизображающей охватывающей линзы из РММА толщиной 16 мм и диаметром от 60 до 80 мм. Оптическая эффективность изготовленных опытных образцов составляет не менее 85% [3].

4. Разработано метрологическое обеспечение производства адаптивных оптических систем с НИС на основе единичных мощных светодиодов и вторичной оптики с функциями заднего комбинированного фонаря транспортного средства в виде критерия выбора средств измерений. Показано, что для обеспечения сертификации с доверительной вероятностью не менее 0,9 требуется применение СИ с составляющими погрешности не хуже  $\pm 0,002$  единиц координат цветности. Проведена оценка неопределенности измерения фотометрических характеристик адаптивных оптических систем [5] [19].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов.**

Предлагаемая модульная конструкция адаптивной системы будет использована в качестве технологической платформы при разработке светосигнальных устройств для транспортных средств производства ОАО «МАЗ» (см. акт внедрения в Приложении Г): грузовиков, троллейбусов, автобусов, тракторов и т.д. [20], [21], [22]. Разработанная методика расчета оптических деталей будет применяться при конструировании различных источников света. Разработанные конструкции оптических деталей будут применяться в различных оптических системах транспортных средств. Разработанное метрологическое обеспечение (критерий выбора средств измерений) будет применяться для производства и сертификации оптических систем транспортных средств.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в научных журналах

1. Сернов, С.П. Метод расчета вторичной оптики несменных источников света адаптивных оптических систем транспортных средств / С.П. Сернов, Д.В. Балохонов, Т.В. Колонтаева, А.А. Журавок // Приборы и методы измерений. – 2014. – №1(8). – С.86 – 93.

2. Сернов, С.П. Современное состояние автомобильной светотехники с несменными источниками света на основе светодиодных технологий / С.П. Сернов, Д.В. Балохонов, Т.В. Колонтаева // Наука и техника. – 2012. – №3. – С.36 – 41.

3. Сернов, С.П. Адаптивные оптические системы светотехнического оборудования транспортных средств / С.П. Сернов, Д.В. Балохонов, Т.В. Колонтаева, А.А. Журавок // Приборы и методы измерений. – 2011. – №2(3). – С.13 – 20.

4. Сернов, С.П. Проблемы измерения фотометрических и колориметрических характеристик светодиодов и светотехнических изделий на их основе / С.П. Сернов, Д.В. Балохонов, Т.В. Колонтаева // Материалы, технологии, инструменты. – 2011. – Т.16, №3. – С.107 – 113.

5. Балохонов, Д.В. Оценка влияния метрологических характеристик средств измерений на достоверность результатов сертификационных испытаний светотехнического оборудования / Д.В. Балохонов, С.П. Сернов, О.Б. Тарасова // Метрология и приборостроение. – 2011. – №2(53). – С.40 – 48.

6. Балохонов, Д.В. Колориметрические системы, применяемые при измерении цветовых характеристик светодиодов и светодиодных светотехнических изделий / Д.В. Балохонов, С.П. Сернов, О.Б. Тарасова // Метрология и приборостроение. – 2009. – №3(46). – С.3–10.

### Материалы научных конференций

7. Журавок, А.А. Расчет светимости светоиспускающей поверхности сигнального фонаря транспортного средства / А.А. Журавок, С.П. Сернов, Д.В. Балохонов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2012 г. : в 4 т./ Белорус. нац. техн. университет ; редкол.: Б. М. Хру-

сталев, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко.- Минск, 2012. – Т.4. – С. 425.

8. Журавок, А.А. Определение устойчивости элементов неизображающей вторичной оптики к изменению показателя преломления материала / А.А. Журавок, Д.В. Балохонов, Т.В. Колонтаева, С.П. Сернов // Приборостроение – 2012: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21-23 ноября 2012 г. / БНТУ ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 279–281.

9. Балохонов Д.В. Принципы конструирования адаптивных оптических систем транспортных средств / Д.В. Балохонов, А.А. Журавок, Т.В. Колонтаева, С.П. Сернов // Приборостроение – 2012: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21-23 ноября 2012 г./ БНТУ ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 247–248

10. Сернов, С.П. Эффективность применения вторичной оптики в автомобильной светодиодной светотехнике / С.П. Сернов, Д.В. Балохонов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы девятой Международной науч.-техн. конф., Минск, 2011г. : в 4 т./ Белорус. нац. техн. университет ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2011. – Т.4. – С. 402

11. Балохонов, Д.В. Применение интегральных импульсных источников тока и напряжения для питания мощных светодиодов / Д.В. Балохонов, Т.В. Колонтаева, С.П. Сернов // Приборостроение – 2010: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10-12 ноября 2010 г./ БНТУ ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2010. – С. 30–31

12. Балохонов, Д.В. Оптимизация фотометрических характеристик оптических модулей с несменными источниками света / Д.В. Балохонов, С.П. Сернов, Т.В. Колонтаева // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2010 г. : в 4 т./ Белорус. нац. техн. университет ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2010. – Т.4. – С. 354

13. Балохонов, Д.В. Критерий выбора средств измерения при выполнении сертификации / Д.В. Балохонов, С.П. Сернов, Т.В. Колонтаева // Новые направления развития приборостроения : материалы 3-й Междунар. студент. науч.-технич. конф., Минск, 21-23 ап-

реля 2010 г. / БНТУ ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2010. – С. 155

14. Балохонов, Д.В. Влияние вторичной оптики на цветовой растр автомобильной светотехники на светодиодах / Д.В. Балохонов, С.П. Сернов, Т.В. Колонтаева // Приборостроение – 2009: материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11-13 ноября 2009 г. / БНТУ ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2009. – С. 153–154.

15. Балохонов, Д.В.. Эталонные несменные источники света / Д.В. Балохонов, Т.В. Колонтаева, О.А. Кузьмина, С.П. Сернов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2006 г. : в 2 т./ Белорус. нац. техн. университет ; редкол.: Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко.- Минск, 2006. – Т.1. – С. 242–244.

#### **Тезисы докладов конференций**

16. Балохонов, Д.В. Влияние вторичной оптики на колориметрические характеристики светодиодных источников света / Д.В. Балохонов, С.П. Сернов, А.А. Журавок // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: сборник трудов 9-й Междунар. науч.-практ. конф., С.-Петербург, Россия, 22-23 апреля 2010 г. : в 3 т. / С.-Петербург, Изд-во Политехн. университета ; редкол.: А.П. Кудинов [и др.]. – С.-Петербург, 2010. – Т.3. – С. 211–212.

17. Сернов, С.П. Вторичная неизображающая оптика модуля несменного источника света / С.П. Сернов, Д.В. Балохонов, А.С. Журавок // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: сборник трудов 7-й Междунар. науч.-практ. конф., С.-Петербург, Россия, 28–30 апреля 2009 г. : в 3 т. / С.-Петербург, Изд-во Политехн. университета ; редкол.: А.П. Кудинов, Г.Г. Матвиенко. – С.-Петербург, 2009. – Т.2. – С. 143-144

18. Балохонов, Д.В. Проблемы измерения автомобильной светотехники с несменными источниками света / Д.В. Балохонов, С.П. Сернов // Метрология-2009 : доклады Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 14-15 апреля 2009 г. / БелГИМ ; редкол.: Н. А. Жагора [и др.]. – Минск, 2009. – С. 53–57

19. Балохонов, Д.В. Алгоритм выбора рабочего режима для светодиодных светотехнических изделий / Д.В. Балохонов, Т.В.

Колонтаева, С.П. Сернов // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: сборник трудов 4-й Международной науч.-практ. конф., С.-Петербург, Россия, 02-05 октября 2007 г. : в 10 т. / С.-Петербург, Изд-во Политехн. университета ; редкол.: А.П. Кудинов, Г.Г. Матвиенко. – С.-Петербург, 2007. – Т.10. – С. 90–91

### **Патенты и заявки на изобретения**

20. Устройство световой сигнализации транспортного средства с несменными источниками света : пат. 2481206 С2 РФ, МПК В60Q 1/30, F21S 8/10 / Д.В. Балохонов, А.А. Журавок, И.Е. Зуйков, Т.В. Колонтаева, А.Г. Савчиц, С.П. Сернов ; заявитель И.Е. Зуйков, С.П. Сернов. – № 2010147641/11 ; заявл. 22.11.2010 ; опубл. 10.05.2013 // FreePatent [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : <http://www.freepatent.ru/images/patents/477/2481206/patent-2481206.pdf>. – Дата доступа : 08.06.2014.

21. Устройство световой сигнализации транспортного средства модульное с несменными источниками света : пат. на полезную модель 7210 Респ. Беларусь, МПК В 60Q 1/30, F 21 S 8/10, F 21 V 5/00 / Д.В. Балохонов, А.А. Журавок, И.Е. Зуйков, Т.В. Колонтаева, А.Г. Савчиц, С.П. Сернов ; заявитель И.Е. Зуйков, С.П. Сернов. – № u20100729 ; заявл. 18.08.2010 ; опубл. 30.04.2011 // Национальный центр интеллектуальной собственности [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://www.belgospatent.org.by/database/search.php?pref=mod&page=3&target=MjAxMDA3Mjk=>. – Дата доступа : 19.04.2013.

22. Габаритный фонарь транспортного средства с несменным источником света : пат. на полезную модель 3963 Респ. Беларусь, МПК F 21 S 8/10 / Д.В. Балохонов, И.Е. Зуйков, Т.В. Колонтаева, А.Г. Савчиц, С.П. Сернов ; заявитель И.Е. Зуйков, С.П. Сернов. – № u20070076 ; заявл. 01.02.2007 ; опубл. 30.10.2007 // Национальный центр интеллектуальной собственности [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://www.belgospatent.org.by/database/search.php?pref=mod&page=3&target=MjAwNzAwNzY=>. – Дата доступа : 19.04.2013.

23. Оптический модуль с несменным источником света : пат. на полезную модель 2795 Респ. Беларусь, МПК 7 В 60 Q 1/00, F 21 S 13/00 / Д.В. Балохонов, И.Е. Зуйков, Т.В. Колонтаева, О.А. Кузьми-

на, А.Г. Савчиц, С.П. Сернов, И.С. Ширейко ; заявитель И.Е. Зуйков, С.П. Сернов. – № u20050646 ; заявл. 25.10.2005 ; опубл. 30.06.2006 // Национальный центр интеллектуальной собственности [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://www.belgopatent.org.by/database/search.php?pref=mod&page=3&target=MjAwNTA2NDY=>. – Дата доступа : 19.04.2013.

## РЭЗІЮМЭ

Балахонаў Дзмітрый Валянцінавіч

# АДАПТЫЎНЫЯ ОПТЫКА-ЭЛЕКТРОННЫЯ СІСТЭМЫ ТРАНСПАРТНЫХ СРОДКАЎ З НЯСМЕННЫМІ КРЫНІЦАМІ СВЯТЛА

**Ключавыя словы:** адаптыўная аптычная сістэма, светладыеднае светлатэхнічнае абсталяванне транспартных сродкаў, аптымізацыя рэжымаў работы, асферычная лінзы.

**Мэта працы:** распрацоўка адаптыўных аптычных сістэм транспартных сродкаў на аснове модуляў нязменных крыніц святла з магутнымі светладыедамі і метралагічнага забеспячэння для іх вытворчасці.

**Метады даследавання і апаратура:** падчас працы праводзіліся эксперыментальныя даследаванні з выкарыстаннем фотаметрычнай і каларыметрычнай тэхнікі. Ужываліся камп'ютарная статыстычная апрацоўка і лікавыя метады нелінейнай апраксімацыі вопытных дадзеных.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацавана новая метадыка разліку формы аптычных дэталей для светладыедаў, якая з'яўляецца больш простаай, чым існуючыя метадыкі разліку. Эфектыўнасць метадыкі правярана эксперыментальна.

Распрацаваны і выраблены вопытны ўзор адаптыўнай оптыка-электроннай сістэмы транспартных сродкаў.

Распрацавана метралагічнае забеспячэнне для вымярэння характарыстык светладыедных адаптыўных оптыка-электронных сістэм, у якое ўваходзіць крытэрыі выбару сродкаў вымярэння на базе вобласці дапушчальных значэнняў вялічыні, якая вымяраецца. Гэтае забеспячэнне ўлічвае пауправадніковую натуру светладыедаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання:** вынікі дадзенай працы могуць быць скарыстаны пры практаванні і вырабе светладыедных адаптыўных оптыка-электронных сістэм транспартных сродкаў (напрыклад, задніх камбінаваных ліхтароў), а таксама для разлікаў аптычных дэталей для светладыедаў.



## РЕЗЮМЕ

Балохонов Дмитрий Валентинович

### Адаптивные оптико-электронные системы транспортных средств с несменными источниками света

**Ключевые слова:** адаптивная оптическая система, светодиодное светотехническое оборудование транспортных средств, оптимизация режимов работы, асферические линзы.

**Цель работы:** разработка адаптивных оптических систем транспортных средств на основе модулей несменных источников света с мощными светодиодами и метрологического обеспечения для их производства

**Методы исследования и аппаратура:** в ходе работы проводились экспериментальные исследования с использованием фотометрической и колориметрической техники. Применялись компьютерная статистическая обработка и численные методы нелинейной аппроксимации опытных данных.

**Полученные результаты и их новизна:** разработана новая методика расчета формы оптических деталей для светодиодов, более простая, чем существующие методики расчета. Эффективность методики проверена экспериментально.

Разработан и изготовлен опытный образец адаптивной оптико-электронной системы транспортных средств.

Разработано метрологическое обеспечение для измерения характеристик светодиодных адаптивных оптико-электронных систем, в которое входит критерий выбора средств измерения на базе области допустимых значений измеряемой величины. Это обеспечение учитывает полупроводниковую природу светодиодов.

**Рекомендации по использованию и область применения:** результаты данной работы могут быть использованы при проектировании и изготовлении светодиодных адаптивных оптико-электронных систем транспортных средств (например, задних комбинированных фонарей), а также для расчета оптических деталей для светодиодов.

## SUMMARY

Balakhonau Dzmitry Valiantsinovich

### ADAPTIVE OPTOELECTRONIC SYSTEMS FOR VEHICLES WITH NON-REPLACEABLE LIGHT SOURCES

**Key words:** adaptive optical system, light-emitting diode-based vehicle lighting, work mode optimization, aspheric lenses.

**Aim of the study:** to develop vehicular adaptive optical systems based on non-replaceable light sources using power light-emitting diodes and measurement assurance to manufacture them.

**Research techniques and equipment:** experimental research was conducted using photometric and colorimetric devices. Computer data machining and numerical methods of nonlinear approximation of experimental data were applied.

**Results and novelty:** a new method of light-emitting diode optics shape calculation was developed, said method being simpler than present methods. Method efficiency was proved experimentally.

A vehicle adaptive optoelectronic system production prototype was designed and manufactured.

A new metrological provision to measure light-emitting diode-based adaptive optoelectronic systems is developed, said provision containing a criterion to choose a measurement device basing on the shape of measurement and tolerance range. This provision takes light-emitting diode semiconductor nature into account.

**Recommendations for usage and an area of application.** This thesis results can be used to design and produce light-emitting diode-based vehicle adaptive optoelectronic systems (e.g., rear combination lights), also to develop light emitting diode optics.

Научное издание

**БАЛОХОНОВ** Дмитрий Валентинович

**АДАПТИВНЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С НЕСМЕННЫМИ  
ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы

Подписано в печать 16.07.2014. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,45. Уч.-изд. л. 1,14. Тираж 60. Заказ 613.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.