

УДК 535.241.42

А.Д. Купко<sup>1</sup>, В.В. Терещенко<sup>2</sup><sup>1</sup> ННЦ «Институт метрологии»<sup>2</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ СВЕТА ДЛЯ НЕТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

*На основании экспериментальных исследований изменения значения силы света в зависимости от расстояния разработан упрощенный метод коррекции силы света. Получена аналитическая формула для определения поправки к расстоянию. Установлены границы применимости метода. Представлены результаты расчетов, полученные при проведении измерений на оборудовании.*

**Ключевые слова:** метод, сила света, оптическая скамья, погрешность, поправка

### Введение

При измерении силы света источник оптического излучения принято считать точечным [1]. Освещенность, создаваемая точечным источником света, обратно пропорциональна расстоянию от источника до поверхности, т.е. сила света не должна изменяться с увеличением расстояния. Однако, при реальных измерениях, где источники света далеки от идеальных, возникают существенные погрешности. Для неточечных источников с увеличением расстояния значения силы света будут существенно меняться. Известен метод введения поправки к расстоянию [2], которая позволяет минимизировать значение погрешности. Недостатком метода является необходимость проведения многократных измерений в большом диапазоне расстояний, что, зачастую, в реальных условиях невозможно.

Целью работы является разработка метода коррекции результатов измерения силы света на малых расстояниях от источника и исследование условий ее применимости.

### Нормативное обоснование исследования

Необходимость проведения точных измерений силы света на больших расстояниях приобретает особое значение при поверке и калибровке измерителей силы света фар транспортных средств и измерении светотехнических характеристик транспортных световых приборов [3]. Такая необходимость возникла из-за постоянного ужесточения требований и стандартов к современной технике и желания повысить безопасность жизнедеятельности граждан. С января 2016 г. в законе Украины «О метрологии и метрологической деятельности» будут внесены изменения. В последствие пересмотра в ст. 3 закона Украины «О метрологии и метрологической дея-

тельности» будет добавлен пункт «Контроль безопасности дорожного движения и технического состояния транспортных средств». В Украине существуют стандарты [4-8], в которых приведены требования к поверке фар дальнего и ближнего света. В [4-8] описаны стандарты поверки автомобильных фар, однако, важным также является исследование и поверка измерителей силы света фар транспортных средств. Среди таких приборов выступают фотометры и люксометры, входящие в состав измерительных экранов, измерители силы света автомобильных фар типа ТЕНЗОР-26М, а также приборы типа ИПФ-01.

В соответствие с действующим стандартом Украины [7], описывающим общие требования к состоянию транспортного средства и его систем, измерения характеристик автомобильных фар необходимо проводить на расстоянии 5 м с регистрацией светотеневого пятна на измерительном экране с приемником. Вследствие того, что в реальных условиях расстояния, освещаемые транспортным средством, значительно превосходят 5 м, то логично обеспечить возможность проведения измерений на удаленной дистанции [8-9]. Это позволило бы оценить характер изменения силы света и сформировать метод коррекции. В соответствии с требованиями к асимметричным автомобильным фарам, изложенным в [8], измерения необходимо проводить на расстоянии 25 м. При измерениях на таких расстояниях модель точечного источника работает достаточно хорошо, но зачастую размеры помещения не позволяют этого сделать. Необходимо провести экспериментальные исследования и на основе анализа распределения силы света на различных дистанциях предложить простую модель, по которой возможно проводить коррекцию результатов измерений на малых расстояниях (например 3 и 5 м) с тем, что бы

получить результаты, которые соответствовали бы результатам, полученным на стенде 25 м или более.

### Измерительное оборудование

В качестве базы для проведения измерений использовались стенд [10] ННЦ «Институт метрологии» и эталонный телецентрический осветитель ЭТО-2 [11-12] фирмы «Мета». В [10,12] описаны работы по исследованию и анализу погрешности измерений силы света при использовании соответствующих установок, а также предложены способы их нейтрализации или коррекции.

В ННЦ «Институт метрологии» был разработан и сконструирован метрологический стенд [10], предназначенный для поверки и калибровки измерителей силы света транспортных средств, а также измерения светотехнических характеристик фар дальнего и ближнего света. Разработанный стенд, структурная схема которого приведена на рис.1 [10], обеспечивает измерения силы света при помощи эталонного приемника оптического излучения и его системы позиционирования. Стенд основан на принципе имитации фары транспортного средства с источником излучения, применяемым на транспорте. Воспроизводимость результатов измерения обеспечивалась при помощи стабилизированного блока питания. Для получения пространственного распределения оптического излучения был разработан специальный экран, позволяющий проводить измерения в двух пространственных координатах.



Рис. 1 – Схема стенда ННЦ «Институт метрологии»

Стенд позволяет проводить измерения на расстояниях более 20 м (L). Измерялась зависимость регистрируемой силы света источника от расстояния. Было установлено и оценено влияние рассеянного излучения, а также разработана система диафрагм и кожухов для их устранения.

Дополнительные исследования проводились при использовании эталонного телецентрического осветителя ЭТО-2 (рис. 2). В отличие от стенда ЭТО-2 состоит только из источника оптического излучения с вспомогательными элементами и стабилизированным блоком питания. Осветитель состоит из отражателя с источником излучения схожим по спектральным свойствам с источником типа А. На выходе осветителя располагается линза. Эталонные значения силы света получались при ис-

пользовании диафрагм и ослабляющих светофильтров. Приборы данного типа предназначены для поверки измерителей силы света фар транспортных средств и в данном исследовании использовались в сочетании со стендом.

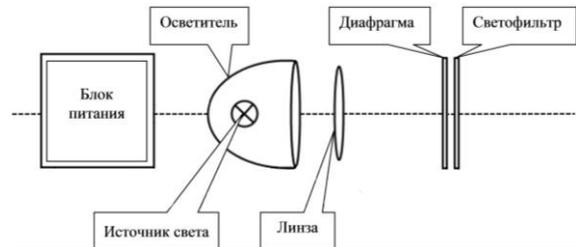


Рис. 2 – Блок-схема эталонного телецентрического осветителя «ЭТО-2»

### Метод коррекции

Экспериментальные исследования проводились с использованием трех автомобильных фар и осветителя с тремя различными диаметрами выходного отверстия на расстоянии 3...23,6 м. На графике (рис. 3) представлены типичные результаты измерений для одного из источников (кривая 1). При проведении исследования экспериментально установлено, что с увеличением расстояния значение силы света изменяется.

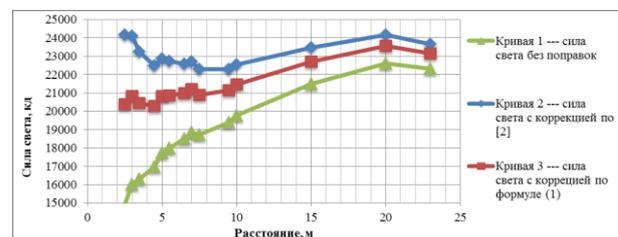


Рис. 3 – Распределение силы света на различных расстояниях

Изменение силы света (крива 1) на отметках 3 м и 23,6 м отличаются более чем на 50%. Такие значения погрешности неприемлемы ни для каких видов измерения. Существенное изменение силы света послужило основанием для разработки метода коррекции результатов измерения силы света. В [2] описан метод коррекции результатов по минимизации среднеквадратичного отклонения силы света при помощи добавки к измеренному расстоянию между источником и приемником. Результат коррекции, проведенной данным методом, представлен на рис. 3 (кривая 2). Для исследованных источников излучения величина этой добавки не превышала 0,6 м. В силу того, что проводить измерения на большом расстоянии не всегда возможно, применение метода изложенного в [2] может быть нецелесообразно. Вследствие этого, было предложено вводить

поправку по измерениям на двух расстояниях (3 и 5 метров) и при ее помощи оценивать результаты, которые получились бы при измерениях на очень большой дистанции. Проводить измерения на стендах такой длины значительно удобнее и проще, чем оборудовать оптические скамьи, длина которых превосходит 20 м.

Для определения поправки к расстоянию, необходимой для коррекции результатов следует получить аналитическую формулу. Приравняв силы света на расстояниях 3 и 5 м нетрудно рассчитать добавку к измеренному расстоянию, которая минимизирует различия в силе света на этих расстояниях:

$$\Delta = \frac{L_5 - L_3 \sqrt{\frac{E_3}{E_5}}}{\sqrt{\frac{E_3}{E_5}} - 1} \quad (1)$$

где  $E_3$  - освещенность на расстоянии 3 м;

$E_5$  - освещенность на расстоянии 5 м;

$L_3$  и  $L_5$  - расстояние 3 м и 5 м соответственно.

Данная формула устанавливает зависимость между двумя расстояниями и освещенностям соответствующим данным расстояниям. Результаты, полученные с применением данной формулы представлены на рис. 3 (кривая 3). На графике видно, что результат, полученный с применением формулы (1) хуже, чем при использовании метода [2] (кривая 2), но лучше, чем без коррекции (кривая 1). Представленная кривая (кривая 3) получена в предположении, что погрешности измерения силы света отсутствуют. Реальные измерения происходят с некоторой погрешностью.

Необходимо было провести исследования влияния погрешности измерений на применимость метода. Модель, используемая в предложенном методе, предполагает, что сила света становится постоянной, если при вычислении силы света к экспериментально измеренному расстоянию добавить величину, определяемую либо по методу, предложенному в [2], либо по формуле (1). Предварительные экспериментальные исследования показали, что для исследованных фар величина  $\Delta$  не превосходила 0,6 м.

В настоящей работе исследовалась применимость метода, т.е. результаты (освещенности на различных расстояниях), используемые для обработки, получались не экспериментально, а по формуле (2).

$$E = I \times (L + \Delta)^2 \quad (2)$$

В соответствии с формулой (2) для каждой поправки ( $\Delta$  от 0 до 0,6 м) были рассчитаны силы света, полученные при соответствующих искажениях.

Расчётные относительные значения освещенности, представлены на рис. 4.

Очевидно, что для больших расстояний относительные силы света будут равны единице, но даже для расстояния 100 метров относительные силы света составляют 0,988 ( $\Delta=0,6$ ) и 0,998 ( $\Delta=0,1$ ). Видно, что согласно исследуемой модели, даже на относительно большом расстоянии 10 м ошибки в определении силы света составляют около 5%.

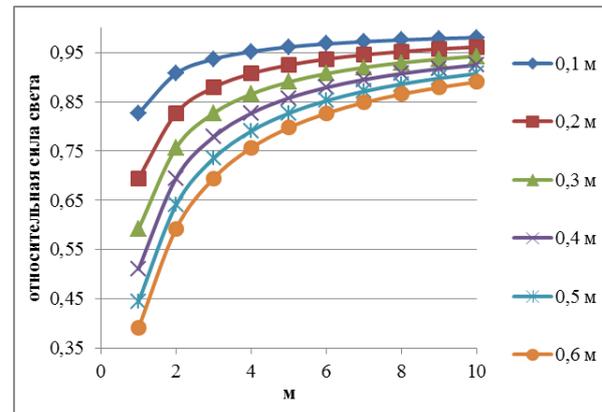


Рис. 4 – Расчетные значения освещенности для исследуемой модели на расстояниях от 1 до 10 м

Для измерений с пренебрежимо малой погрешностью введение поправки к расстоянию в соответствии с (1) приводит к правильным результатам, т.е. сила света становится равной единице на всех расстояниях. Однако реальные измерения проводятся с некоторой погрешностью. Следует исследовать границы применимости метода, т.е. определить такую погрешность измерений, при которой оправдано применение описанного подхода.

Для этого производилось искажение результатов измерения, а именно, вносился коэффициент, имитирующий погрешность. Величина искажения указана в таблице (1) в строке: «Коэффициент искажения результатов, %». Очевидно, что максимальное искажение результатов произойдет, в случае если результаты измерения на 3м увеличатся (уменьшатся), а результат измерения на 5м уменьшится (увеличится). Величина искажения менялась с шагом 0,5%, т.е. результат измерения умножался на 1,005 0,995; 1,010, 0,990 и т.д. Таблица состоит из 6 групп по 4 строки в каждой. Две верхние строки (Коэффициент искажения результатов, %) определяют условия математического моделирования, т.е. указано расстояние, на котором рассчитывалась освещенность (3 и 5м) и величина искажений в процентах. Две нижние строки содержат результаты расчетов, а именно относительные силы света, полученные без поправок, и с учетом поправок для каждого искажения.

Сила света рассчитывалась в соответствии с формулой (1) и освещенности, определенной по формуле (2) с учетом дополнительного искажения. Критическим значением считался результат, выходящий за рамки неоткорректированного значения силы света, т.е. определялась погрешность измере-

ния, при которой введение коррекции предложенным способом становится бессмысленным. В этом случае значения силы света после коррекции становилось хуже, чем в исходных результатах. В таблице 1 критические значения относительной силы света выделены полужирным шрифтом.

Таблица 1

Диапазон применения поправки к расстоянию по формуле (1)

Коэффициент искажения и поправка к расстоянию	Расстояние измерения	Относительная сила света						
		без поправок	с учетом поправок				критические значения	
Коэффициент искажения результатов, %	3	100	100,5	99,5	101	99	101,5	98,5
	5	100	99,5	100,5	99	101	98,5	101,5
Поправка к расстоянию - 0,1	3	0,936	0,974	1,025	0,95	1,052	<b>0,927</b>	<b>1,082</b>
	5	0,961	0,984	1,015	0,969	1,031	<b>0,955</b>	<b>1,048</b>
Коэффициент искажения результатов, %	3	100	101,5	98,5	102	98	102,5	97,5
	5	100	98,5	101,5	98	102	97,5	102,5
Поправка к расстоянию - 0,2	3	0,878	0,925	1,082	0,902	1,111	<b>0,88</b>	<b>1,141</b>
	5	0,924	0,954	1,05	0,939	1,067	<b>0,925</b>	<b>1,086</b>
Коэффициент искажения результатов, %	3	100	103	97	103,5	96,5	104	96
	5	100	97	103	96,5	103,5	96	104
Поправка к расстоянию - 0,3	3	0,824	0,856	1,177	0,834	1,21	<b>0,814</b>	<b>1,245</b>
	5	0,889	0,909	1,108	0,895	1,128	<b>0,882</b>	<b>1,149</b>
Коэффициент искажения результатов, %	3	100	103,5	96,5	104	96	104,5	95,5
	5	100	96,5	103,5	96	104	95,5	104,5
Поправка к расстоянию - 0,4	3	0,778	0,832	1,215	0,811	1,25	<b>0,791</b>	<b>1,288</b>
	5	0,857	0,892	1,133	0,878	1,154	<b>0,865</b>	<b>1,177</b>
Коэффициент искажения результатов, %	3	100	105	95	105,5	94,5	106	94
	5	100	95	105	94,5	105,5	94	106
Поправка к расстоянию - 0,5	3	0,734	0,767	1,334	0,748	1,375	<b>0,73</b>	<b>1,149</b>
	5	0,826	0,848	1,207	0,835	1,231	<b>0,823</b>	<b>1,257</b>
Коэффициент искажения результатов, %	3	100	106	94	106,5	93,5	107	93
	5	100	94	106	93,5	106,5	93	107
Поправка к расстоянию - 0,6	3	0,694	0,726	1,428	0,708	1,474	<b>0,69</b>	<b>1,522</b>
	5	0,797	0,819	1,266	0,806	1,294	<b>0,794</b>	<b>1,323</b>

Проанализировав данные таблицы 1 можно обнаружить линейную связь допустимой погрешности

и величины  $\Delta$ . Соответствующий график представлен на рис. 5.

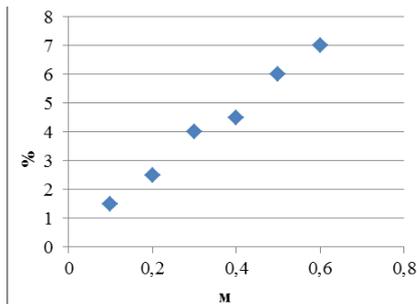


Рис. 5 – Зависимость допустимых погрешностей в зависимости от величины коррекции расстояния от фары до приемника

### Выводы

В результате проведенной работы предложен метод измерения силы света неточечных источников оптического излучения. В работе получена простая аналитическая формула, позволяющая вносить поправку к расстоянию между источником оптического излучения (фарой) и приемником (люксметром), которая существенно, на десятки процентов, увеличивает точность измерения силы света. Экспериментальные измерения автомобильных фар позволили определить диапазон значений этих поправок, характерный для исследованных источников. Проведенный анализ метода позволил определить точность измерений, при которых оправдано применение описанного подхода. Обработка результатов измерения при помощи описанного метода не требует наличия стендов большого размера, позволяет повысить точность измерений, а также позволяет связать требования документов [4-8], т.е. по результатам измерения силы света на 3 и 5 метрах получить силы света, которые получились бы при измерениях на 10 и 25 м. Описанный подход можно распространить на другие расстояния. После аттестации конкретного измерительного стенда, а именно выяснения результирующей погрешности при измерениях, предложенный метод позволяет вводить поправки, существенно повышающие точность измерения силы света.

### Література

1. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике / Ю.Б. Айзенберг. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
2. Купко А. Д. Совершенствование методики передачи световых единиц / А. Д. Купко // Український метрологічний журнал. – 2001. - №1. - С. 45-47.
3. Купко А.Д. О необходимости оптимизации методик измерения световых величин при большом числе объектов / А. Д. Купко // Світлолюкс, - №4. – 2012. - С. 27-29.
4. ДСТУ UN/ECE R 48-02:2002 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх транспортних засобів стосовно установлення пристроїв освітлення та світлової сигналізації (Правила ЕЭК ООН № 48-02:2001, IDT).

5. ДСТУ 3687-97 Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізні дорожні переїзди. Вимоги з експлуатаційного стану / керівник розробки З. Дерех. – Офіційне видання Київ: Держстандарт України, 1997. – 22 с.
6. ГОСТ 3544-75 Фары дальнего и ближнего света автомобилей. Технические условия / редактор В. П. Огурцов. – Официальное издание. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 20с.
7. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання / керівник розробки В. Б. Агеев. – Проект, остаточна редакція. – Київ: Держспоживстандарт України, 2011. – 56 с.
8. ДСТУ UN/ECE R 20-02:2002 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження автомобільних фар з асиметричними вогнями ближнього світла та/або вогнями дальнього світла, призначених для використання з галогенними лампами розжарювання. – Офіц. Вид. Киев: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики. – 2002. - 51 с.
9. Купко А.Д. Особливості вимірювання світлотехнічних параметрів на транспорті / А.Д. Купко // Метрологія та прилади. -2010. - в.5. –С.56-61.
10. Купко О.Д. Аналіз похибок вимірювання сили світла автомобільних фар / О.Д. Купко, В.В. Терещенко // Метрологія та прилади. – 2014. – № 4. – С.32-37
11. Руководство по эксплуатации. Эталонный телецентрический осветитель «ЭТО-2». – 2009 г.
12. Терещенко В.В. Дослідження похибок вимірювання світлотехнічних характеристик імітаторів світлових приладів транспортного засобу // Метрологія та прилади. – 2015. – №1. – С 35-39.

### References

1. Ayzenberg U.B. Reference book on lighting technology / U.B. Ayzenberg. – Moscow: Znak. – 972 p.
2. Kupko A. D. Improving methods of transmission of light units / A. D. Kupko // Ukrainian metrological magazine. – 2001. - №1. - 45-47 pages.
3. Kupko A. D. On the need to optimize the methods for measuring light quantities for a large number of objects / A. D. Kupko // Svitlolux. – 2012. - №4. - 27-29 pages.
4. State standard UN/ECE R 48-02:2002 Uniform technical prescriptions concerning the approval of road vehicles concerning the installation of lighting and light-signaling devices (Rules EЭК UN № 48-02: 2001, IDT).
5. State Standard 3687-97 Road Safety. Highways, streets and rail road crossings. The requirements of the operational status / head of development Z. Dereh. – official edition. – Kiev: National Standard of Ukraine, 1997. – 22 pages.
6. State Standard 3544-75 Headlights and driving lights of cars. Specifications / head of development V. Ogurcov. – Official edition. – M.: Publisher IPC standards, 2000. – 20 pages.
7. State Standard 3649:2010 Wheeled transport vehicles. Requirement in relation to the unconcern of the technical state and methods of controlling / head of development V. B. Ageev. Project, final formulation. Kyiv: National Standard of Ukraine, 2011. – 56 p.
8. State standard UN/ECE R 20-02:2002 Uniform technical prescriptions concerning the approval of automobile headlights with asymmetrical passing beam and / or distant lights svyatla, Assignment for use with halogen incandescent lamps.

- Official. Kind. Kiev: The State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy. - 2002.- 51 p.
9. Kupko A.D. Features measuring lighting parameters on transport / A.D. Kupko // Metrology and devices. - 2010. - №5. - 56-61 pages.
10. Kupko A.D. Analysis of measurement errors strength headlights / A.D. Kupko, V.V. Tereshchenko // Metrology and devices. - 2014. - №4 - P. 32-37.
11. Instruction Manual. Reference telecentric illuminator "RTI-2." - 2009
12. Tereshchenko V.V. Research errors of measurement of light technical characteristics of lighting devices imitators vehicle // Metrology and devices. - 2015. - №1. - 35-39 pages.

**Автор: КУПКО Александр Данилович**  
Доктор технічних наук, старший научний сотрудник  
ННЦ «Институт метрологии»  
E-mail – Kupko@meta.ua

**Автор: ТЕРЕЩЕНКО Валерий Владимирович**  
асперант кафедри ФОЕТ Харківського національного  
університету радіоелектроніки, г. Харків  
E-mail – Tereshchenko.valerii@yandex.ru

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ СВІТЛА ДЛЯ НЕТОЧКОВИХ ДЖЕРЕЛ

О. Д. Купко, В.В. Терещенко

*На основі отриманих експериментальних досліджень зміни значення сили світла в залежності від відстані був розроблений спрощений метод корекції сили світла. Отримана аналітична формула для встановлення поправки до відстані. Встановлені границі застосування методу. Наведені результати розрахунків, які отримані при проведенні вимірювань на обладнанні*

**Ключевые слова:** метод, сила світла, оптична лава, похибка, поправка

## IMPROVING THE METHOD FOR MEASURING THE LUMINOUS INTENSITY OF NON-POINT SOURCES

A. Kupko, V. Tereshchenko

*In this paper we study change the luminous intensity of non-point sources of optical radiation with increasing distance. Experiments showed a difference in the results obtained at a distance of 3 m to 23 m more than 50%. This error value is not acceptable for any measurement. The true value of luminous intensity is considered to be the value obtained at maximum distance. So in [8] is the requirement of providence measurement at a distance of 25 m. Provide measurements at long range using the appropriate equipment is a difficult task. To conduct the study used the installation of more than 20 m in length. We used different optical systems and light sources. The aim is to develop a simple method for correcting the results of measurement of luminous intensity at short distances. The paper analyzes the existing method [2]. Also, a graph comparing the results without amendment, with the correction to [2], and by the proposed method. Based on [7] as the reference values were selected mark 3 m and 5 m. The analytical formula was formed to obtain corrections to the distance between the radiation source and the optical receiver. The calculation results showed the dependence of the amendment, and measurement error. The table of relations corrections and errors. A plot of allowable errors from the compensated distance. The limits of applicability of the method. Processing of measurement results using this method does not require a large stand and to improve the accuracy of measurements. Thus, measurements are taken at a distance of 3 m and 5 m can be calculated to obtain the results of luminous intensity at a distance of 10 m, 25 m and other distance.*

**Key words:** method, luminous intensity, optical bench, error, correction.