

## ВЛИЯНИЕ НА ОГРАНИЧИТЕЛНИТЕ УСЛОВИЯ ПРИ ОПТИМИЗИРАНЕ НА СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА УЛИЧНИ ОСВЕТИТЕЛИ

Владимир Василев<sup>1</sup>, Красимир Велинов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, w.vasilev@mail.bg; candela@mail.bg

**РЕЗЮМЕ.** Поради специфичните особености на зрителната задача в уличното осветление разпределението на светлината оказва голямо въздействие върху ефективността на осветителя. В работата с помощта на MATLAB се решават проблеми за оптимално разпределение на светлината. Представена е 3D визуализация на решенията.

### INFLUENCE OF LIMITATIVE CONDITIONS IN OPTIMIZING THE LIGHT DISTRIBUTION OF STREET LIGHTING

Vladimir Vasilev<sup>1</sup>, Krasimir Velinov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, candela@mail.bg; http://light-bg.eu/

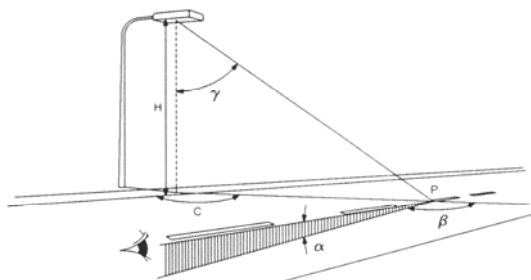
**ABSTRACT.** Due to specific visual task in street lighting, light distribution has a major impact on the efficiency of the luminaire. Using MATLAB to solve problems for optimal light distribution. Presented a 3D visualization solutions.

**Keywords:** Optimization, LED, luminaire, light distribution.

### Въведение

Прието е нормирането на уличните осветителни уредби (УОУ) да се извършва по яркост (БДС EN 13201). За улици от среден клас нормената стойност на яркостта е от 0.5–1.0 cd/m<sup>2</sup>. Поради характерната огледална отражателна характеристика на пътната настилка и малкия наклон на погледа на наблюдателя (0.5 – 1.5°) е възможно постигане на по-висока яркост чрез максимално използване на излъчването на осветителя в областта на излъчване от 60–90° (фиг. 1). Използването на тази зона е ограничено от стандарта с оглед намаляване на заслепяването (БДС EN 13201). Ако светлоразпределението на осветителя е подходящо, то реализирането на нормените показатели може да се осъществи с няколко пъти по-малка мощност.

Цел на настоящата работа е да се получи такова светлоразпределение на осветителя, че с минимален светлинен поток на източника на светлина да се реализират нормативните изисквания към осветителната уредба.



Фиг. 1. Геометрия на наблюдение в УОУ

### Дефиниране на оптимизационната задача

Математически оптимизационната задача може да се дефинира (Велинов К, В. Василев, 2012) по следния начин:

Критерий за оптимизация е минималният светлинен поток, излъчен от осветителя, с който да се реализират нормативните изисквания.

$$\Phi_{\text{лампа}} = \sum \sum I_{\gamma c} \cdot \Delta\Omega_{\gamma c} = \text{MIN} \quad \gamma = 0 - \pi/2, C = 0 - \pi$$

Като ограничителни условия могат да бъдат формулирани няколко критерия:

1. При нормиране по яркост (Велинов К., 2010, Василев Хр., К. Велинов, 2004, Vassilev Hr., Velinov K., 2004)

$$\begin{aligned} L_{\text{средно}} &> L_0 \\ L_{\text{min}} / L_{\text{средно}} &> G_0 \\ E_{\text{min}} / E_{\text{средно}} &> G_{e0} \\ I_{\gamma c \text{ max}} (\text{при } \Phi_{\text{лампа}}=1000\text{lm}) &< I_0 \\ TI &< TI_{\text{зададено}} \end{aligned}$$

където:

$L_{\text{средно}}$  е средната яркост върху пътното платно,  
 $L_0$  е зададената нормена яркост,  
 $L_{\text{min}}$  е минималната яркост върху пътното платно,  
 $\Phi_{\text{лампа}}$  е светлинният поток на осветителя,  
 $\Delta\Omega_{\gamma c}$  са пространствените ъгли за  $\gamma$  и  $c$ ,  
 $TI$  – показател на заслепяване.

2. При нормиране по осветеност

$$\begin{aligned} E_{\text{средно}} &> E_0 \\ E_{\text{min}} / E_{\text{средно}} &> G_{e0} \\ I_{\gamma c \text{ max}} (\text{при } \Phi_{\text{лампа}}=1000\text{lm}) &< I_0 \\ TI &< TI_{\text{зададено}} \end{aligned}$$

където:

$E_{\text{средно}}$  е средната осветеност върху пътното платно,  
 $E_o$  е зададената нормена осветеност,  
 $E_{\text{min}}$  е минималната осветеност върху пътното платно,  
 $\Phi_{\text{лампа}}$  е светлинният поток на осветителя,  
 $\Delta\Omega_{\gamma, \sigma}$  са пространствените ъгли за  $\gamma$  и  $\sigma$ ,  
 $TI$  – показател на заслепяване.

3. При нормиране по видимост (Василев Хр., Велинов Кр., 2006)

$V_{\text{средно}} > V_o$   
 $V_{\text{min}} / V_{\text{средно}} > G_{eo}$   
 $I_{\gamma, \sigma \text{ max}}$  (при  $\Phi_{\text{лампа}} = 1000lm$ )  $< I_o$   
 $TI < TI_{\text{зададено}}$

където:

$V_{\text{средно}}$  е средната видимост върху пътното платно,  
 $V_o$  е зададеното ниво на видимост,  
 $V_{\text{min}}$  е минималната видимост върху пътното платно,  
 $\Phi_{\text{лампа}}$  е светлинният поток на осветителя,  
 $\Delta\Omega_{\gamma, \sigma}$  са пространствените ъгли за  $\gamma$  и  $\sigma$ ,  
 $TI$  – показател на заслепяване.

В този случай основно ограничително условие е видимостта на тестовия обект да бъде по-голяма от предварително определено ниво. За условията на пътното движение се приема, че ниво, 10 пъти по-голямо от граничното, е приемливо. Като тестов обект се използва стандартен зрителен обект, възприет от международната комисия по осветление – куб със страна 0.2 m и коефициент на отражение 0.2.

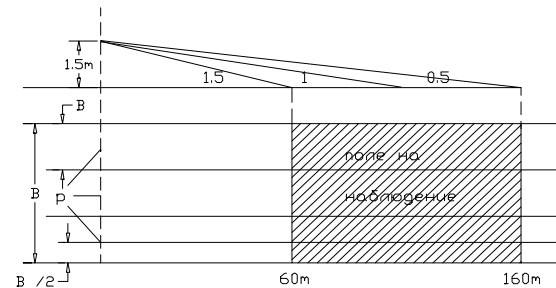
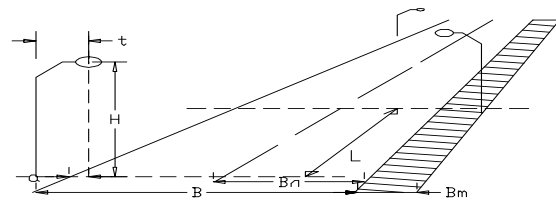
Посочените ограничителни условия са подбрани чрез предварителни изследвания за естеството на оптимизационната задача, като са отпаднали ограничения, които не влияят чувствително на оптималното решение.

В (Велинов К., 2010, Василев Хр., К. Велинов, 2004, Vassilev Hr., Velinov K., 2004) горната оптимизационната задача е формулирана като линейна. Това е направено, за да се получи лесно решението ѝ. В действителност дефинираната оптимизационна задача е нелинейна, тъй като функцията на яркостта, равномерността и заслепяването са нелинейни функции от параметрите на светлоразпределението на осветителя.

### Дефиниране на нелинейна оптимизационната задача

Светлотехническата задача за намиране на оптимално светлоразпределение на осветител за улици се формулира по следния начин: разглежда се УОУ с широчина  $W$ . Осветителите са монтирани на височина  $H$ , на разстояние  $S$  един от друг. Известни са отражателните свойства на пътната настилка при различни ъгли на наблюдение, съответстващи на разрешените скорости на движение. Търси се такова светлоразпределение на осветителите, което ще осигури постигането на регламентиранията количествени и качествени показатели при най-ниска стойност на необходимия светлинен поток на източника ( $\Phi_{\text{от}} = \min$ ).

Взаимното положение на изчислителните точки, осветителите и наблюдателите са описани на фиг.1 и 2.



Фиг. 2.

В работата (Велинов К., Хр. Василев, 2007) оптимизационната задача е формулирана като нелинейна, като са получени ограничен брой решения.

За да се обвържат съседните стойности на интензитета на светлината с технологичните ограничения за производство на осветители, функцията на светлоразпределението трябва да се апроксимира с известна функционална зависимост.

Бяха изпробвани различни апроксимиращи функции и методи с цел да се изберат универсални формули, описващи различни класове светлоразпределения, като при това грешката на апроксимация да се сведе до минимум (Василев Хр., Георгиев Ц., Велинов Кр., 2006).

Полиномни функции и такива по степените на тригонометрични функции не се оказаха подходящи. Най-накрая изборът беше направен с ортогонални полиноми на Лежандър.

Получената функция за апроксимация има вида:

$$(1) f(\gamma, C) = \exp(d_0(\gamma_i) + d_1(\gamma_i)\hat{C}_1^i + d_2(\gamma_i)\hat{C}_2^i + \dots + d_n(\gamma_i)\hat{C}_n^i)$$

където: коефициентите  $d_p(\gamma_i)$  са изразени чрез ортогонални полиноми на Лежандър, а  $\hat{C} = \frac{C}{\text{Max}(C)}$  се изменя,

след нормализиране, в интервала  $[0,1]$ . Индекс  $i$  се използва за означаване на ред, а индекс  $j$  - за означаване на колона. Съответно ъгъл  $\gamma$  е свързан с редовете на осветителната характеристика, а ъгъл  $C$  е свързан с колоните на характеристиката.

Коефициентите  $d_p(\gamma_i)$  ( $p=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ ) имат вида

$$(2) d_p(\gamma_i) = q_{p1}S_1(T_i) + q_{p2}S_2(T_i) + \dots + q_{pm}S_m(T_i),$$

където:  $q_{pk}$  са неизвестни коефициенти оценени по метода на най-малките ( $p = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ),  $S_k$  - ортогонални полиноми на Лежандър от ред  $k$  ( $k = 1 \dots m$ ), аргумент  $T_i$  изчислен както следва

$$(3) T_i = \frac{2\gamma_i - \gamma(1) - \gamma(n)}{\gamma(n) - \gamma(1)}. \text{ Ъглите } \gamma(1) \text{ и } \gamma(n) \text{ пред-}$$

ставят първата и последна стойност на ъгъл  $\gamma$ . Тази трансформация изобразява ъгъл  $\gamma$  в интервала  $[0,1]$ . След преобразуване се преминава в полярни координати  $\gamma c$  ( $\gamma=0 - 180^\circ$ ,  $C=0 - 180^\circ$ )

При апроксимацията бяха изпробвани ортогонални полиноми от степен 7, 9, 11 и 13. При по-високите редове точността на апроксимация се повишаваше, но броят на неизвестните нарастваше в геометрична прогресия. Установи се, че ортогонални полиноми от степен 9 задоволително описват всяко светлоразпределение и при решаване на оптимизационната задача беше използвана тази степен.

### Резултати от изчисленията

Така формулираната задача на нелинейното оптимизиране беше решена при различни геометрични и нормативни условия. За решаването ѝ беше използвана функцията на MATLAB **fmincon**. Решението на задачата протичаше на два етапа: с голяма стъпка за намиране на глобалния максимум и малка стъпка – за получаване на точно решение. Времето за получаване на едно решение беше от порядъка на 20–40 часа на компютър с тактова честота 3 GHz. За да се получат повече решения, беше направено планиране на експеримента, като различни варианти на ограничителните условия се задаваха на различни компютри. При изчисленията бяха използвани 10 броя компютри, монтирани в зала 103. Целият процес на изчисления отне няколко месеца, през което време компютрите работеха непрекъснато.

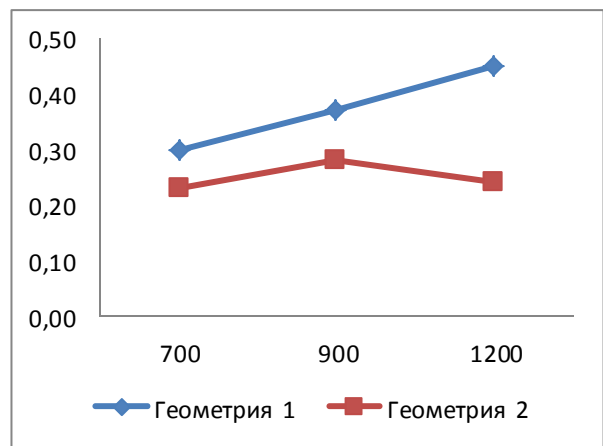
За да се анализират резултатите от изчисленията, допълнително беше направен програмен модул за генериране на светлоразпределението в EULUMDAT формат. С помощта на програмата ILEXA Ray-Viewer (<http://www.ilexa.de/>) получените оптимални светлоразпределения се визуализираха в 3D. С получените оптимални светлоразпределения с помощта на програмата DIALux се извършиха изчисления за реализираните действителни показатели.

Изчисленията са проведени при следните фиксирани параметри:

- ширина на улицата – 7 m,
- разположение на стълбовете – едностранно – ляво,
- височина на стълба – 7 и 9 m, .
- междустълбие – 30 m,
- брой на осветители на стълб – 1,
- тип на рогатката – едностранна,
- наклон на рогатката – 0 - 15°
- отражателна характеристика на пътната настилка – RIII
- зададена нормена яркост -  $L_0 = 1 \text{ cd/m}^2$ ;
- зададена обща неравномерност –  $G_0 = 0.4$
- брой ленти за движение – 2.

След получените множество решения може да се изведат следните зависимости:

- При различна геометрия на пътното платно и при еднакви ограничителни условия за максимален интензитет на светлината за 1000 lm условен светлинен поток.



Фиг. 3. Реализирана средна яркост на пътното платно  $\text{cd/m}^2$  при светлинен поток на осветителя 1000 lm и при различен зададен максимален интензитет

Реализирана средна яркост на пътното платно  $\text{cd/m}^2$  (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса - 1.

Зададен максимален интензитет на светлината за 1000 lm условен светлинен поток (параметърът е показан по абсцисата на графиката).

Ограничителни условия:  $T_l < 0,1$ ;  $U_0 \geq 0,4$ ;  $U_l \geq 0,6$

Междустълбие -  $L = 30 \text{ m}$

Ширина на улицата 7 m,

Височина на стълба 7 m

Геометрия 1:

Дължина на рогатката – 3.5 m

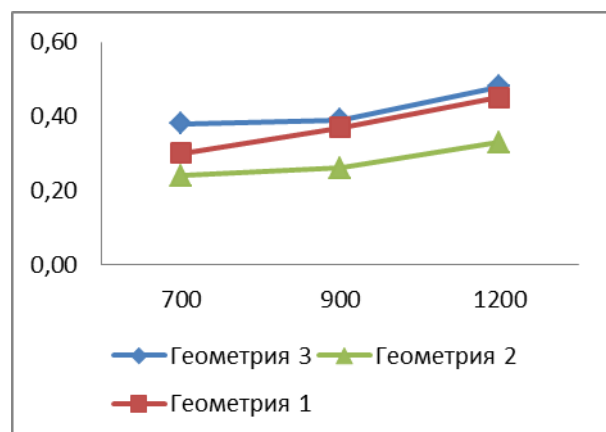
Геометрия 2:

Дължина на рогатката – 0 m

- При различна геометрия на пътното платно и при различни ограничителни условия за зададен максимален интензитет на светлината от 1000 lm условен светлинен поток.

Реализирана средна яркост на пътното платно  $\text{cd/m}^2$  (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса – 1.

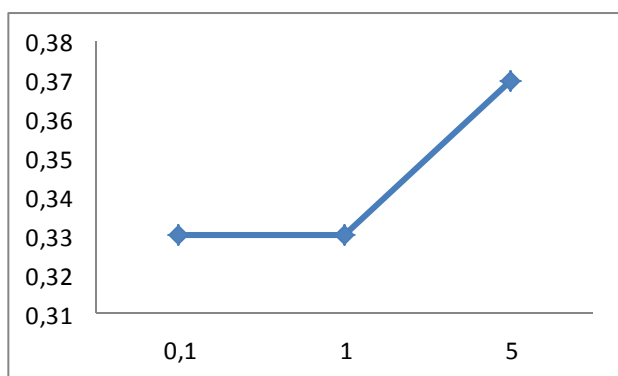


Фиг. 4. Реализирана средна яркост на пътното платно  $\text{cd/m}^2$  при светлинен поток на осветителя 1000 lm и при различен зададен максимален интензитет и различни ограничителни условия

Зададен максимален интензитет на светлината за 1000 lm условен светлинен поток (параметърът е показан по абцисата на графиката)

Междустълбие - L= 30 m  
 Широчина на улицата 7 m  
 Височина на стълба 7 m  
 Геометрия 1:  
 Дължина на рогатката – 3.5 m  
 Ограничителни условия:  $T_l < 5$ ;  $U_0 \geq 0.2$ ;  $U_l \geq 0.4$   
 Геометрия 2:  
 Дължина на рогатката – 0 m  
 Ограничителни условия:  $T_l < 0,1$ ;  $U_0 \geq 0.2$ ;  $U_l \geq 0.4$   
 Геометрия 3:  
 Дължина на рогатката – 3.5 m  
 Ограничителни условия:  $T_l < 0,1$ ;  $U_0 \geq 0.4$ ;  $U_l \geq 0.6$

- При еднаква геометрия на пътното платно и при различни ограничителни условия за зададен максимален коефициент на заслепяване.



Фиг. 5. Реализирана средна яркост на пътното платно  $cd/m^2$  при светлинен поток на осветителя 1000 lm и при различен зададен коефициент на заслепяване

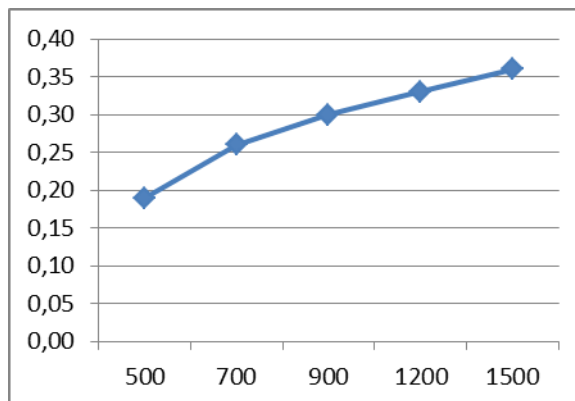
Реализирана средна яркост на пътното платно  $cd/m^2$  (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса – 1.

Зададен максимален коефициент на заслепяване (параметърът е показан по абцисата на графиката)

Междустълбие - L= 30 m  
 Широчина на улицата 7 m,  
 Височина на стълба 7 m  
 Дължина на рогатката – 0 m  
 Ограничителни условия:  $U_0 \geq 0.2$ ;  $U_l \geq 0.4$

- При еднакви геометрия на пътното платно и при различни ограничителни условия за зададен максимален интензитет на светлината 1000 lm условен светлинен поток.



Фиг. 6. Реализирана средна яркост на пътното платно  $cd/m^2$  при светлинен поток на осветителя 1000 lm и при различен зададен максимален интензитет.

Реализирана средна яркост на пътното платно  $cd/m^2$  (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса – 1.

Зададен максимален интензитет на светлината за 1000 lm условен светлинен поток (параметърът е показан по абцисата на графиката)

Междустълбие - L= 30 m  
 Широчина на улицата 7 m  
 Височина на стълба 7 m  
 Дължина на рогатката – 0 m  
 Ограничителни условия:  $U_0 \geq 0.2$ ;  $U_l \geq 0.4$

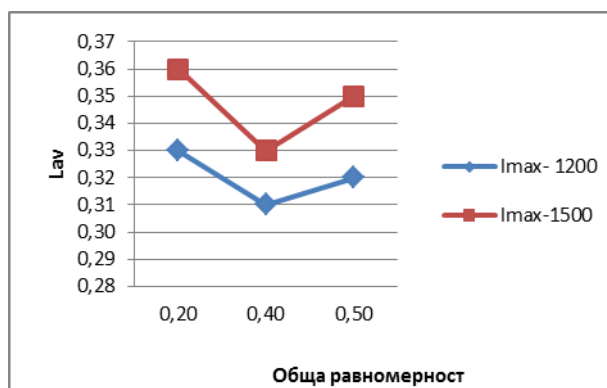
- При еднаква геометрия на пътното платно и при различни ограничителни условия за неравномерност при два различни зададени максимални интензитета на светлината за 1000 lm условен светлинен поток.

Реализирана средна яркост на пътното платно  $cd/m^2$  (стойностите са по ординатата на графиката) в зависимост от светлоразпределението на осветителя при параметри:

Светлинен поток на осветителя – 1000 lm, коефициент на запаса – 1.

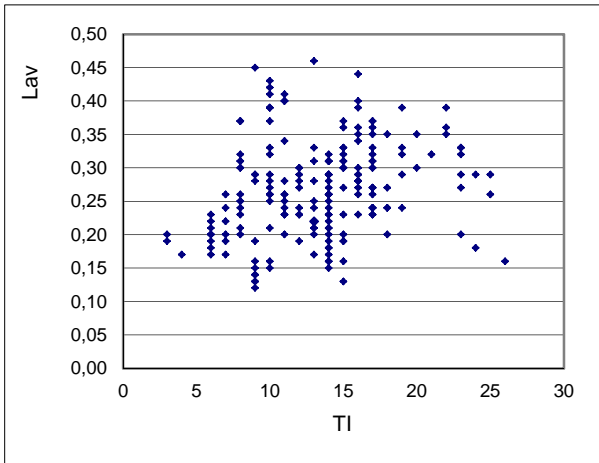
Зададена неравномерност на пътното платно (параметърът е показан по абцисата на графиката).

Междустълбие - L= 30 m  
 Широчина на улицата 7 m,  
 Височина на стълба 7 m  
 Дължина на рогатката – 0 m



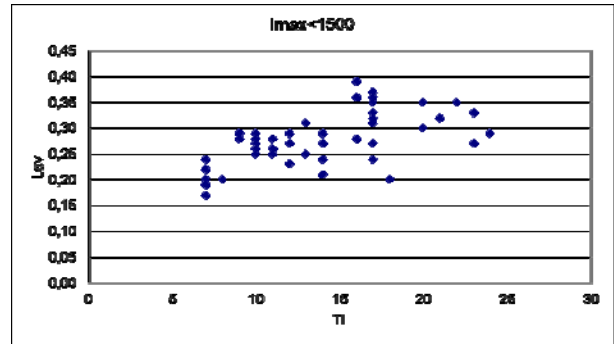
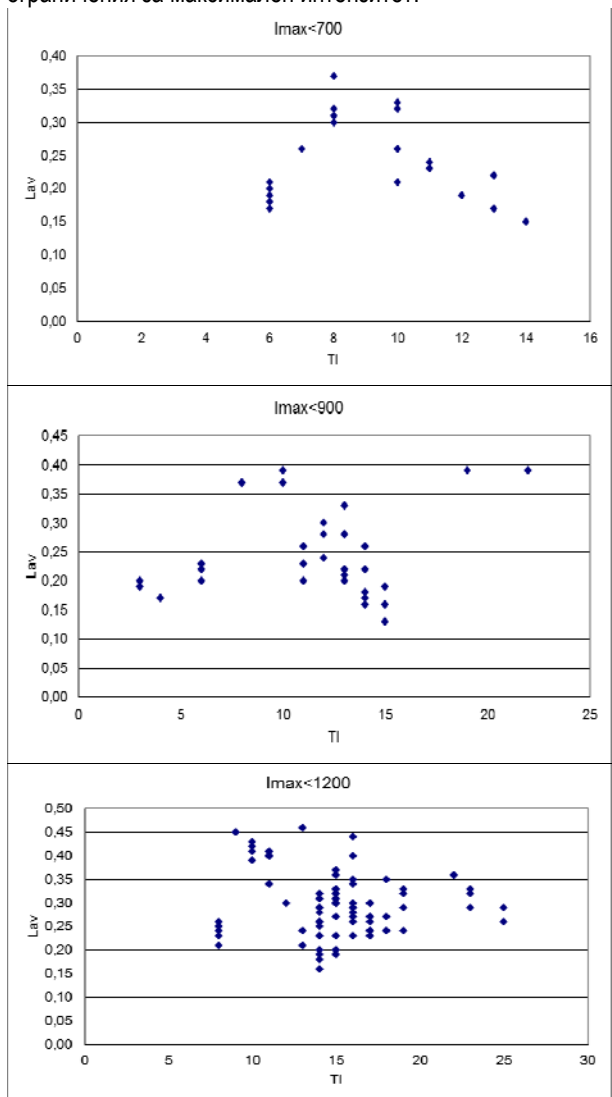
Фиг. 7. Реализирана средна яркост на пътното платно  $cd/m^2$  при светлинен поток на осветителя 1000lm и при различна зададена обща неравномерност за два различни максимални интензитета

- Зависимост на реализираната средна яркост на пътното платно от коефициента на заслепяване за различна геометрия на пътното платно и при различна ограничителни условия.



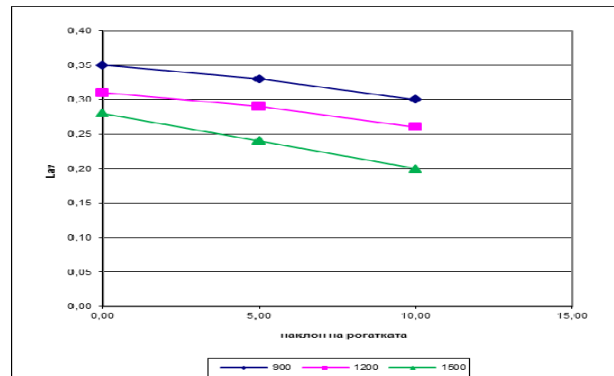
Фиг. 8. Реализирана средна яркост на пътното платно  $cd/m^2$  при светлинен поток на осветителя  $1000lm$  в зависимост от коефициента на заслепяване.

- Зависимост на реализираната средна яркост на пътното платно от коефициента на заслепяване за различна геометрия на пътното платно и при различна ограничения за максимален интензитет:

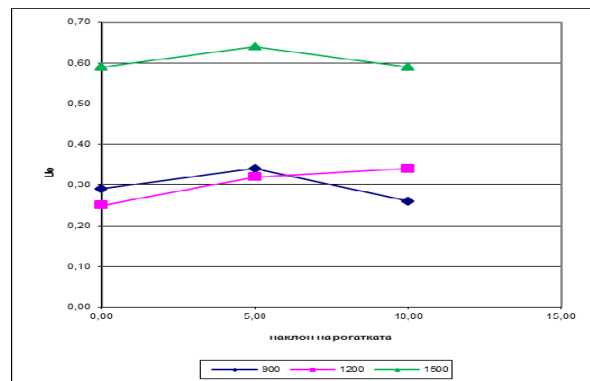


Фиг. 9. Реализирана средна яркост на пътното платно  $cd/m^2$  при светлинен поток на осветителя  $1000lm$  в зависимост от коефициента на заслепяване при различен максимален интензитет.

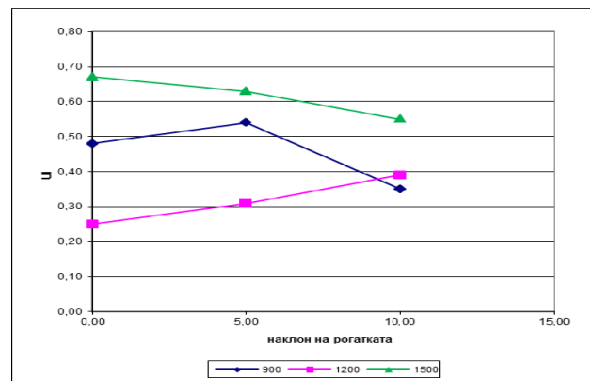
- Зависимост на резултатите при изчисленията от ъгъла на наклона на рогатката:



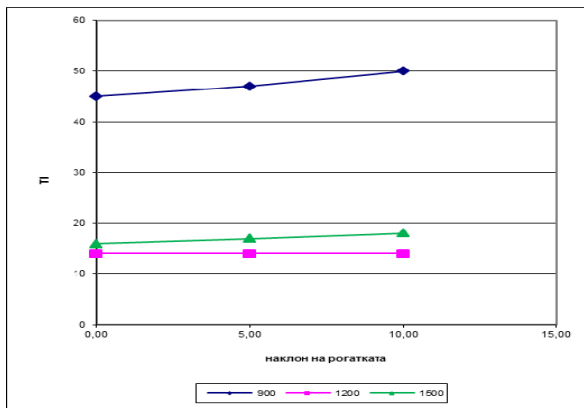
Фиг. 10. Реализирана средна яркост на пътното платно  $cd/m^2$  при светлинен поток на осветителя =  $1000lm$  в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет



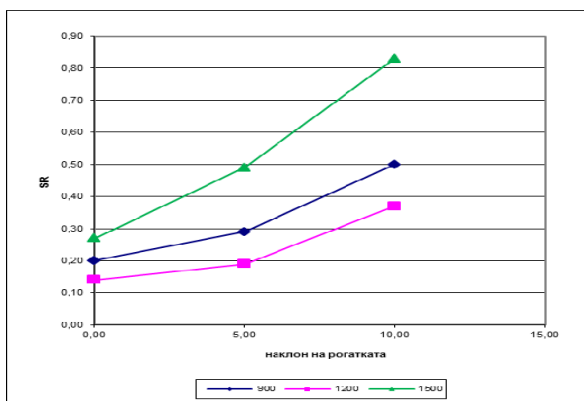
Фиг. 11. Реализирана обща неравномерност в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет



Фиг. 12. Реализирана надлъжна неравномерност в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет



Фиг. 13. Реализиран коефициент на заслепяване в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет



Фиг. 14 Реализиран показател SR в зависимост от наклона на рогатката при различен максимален интензитет

## Изводи

1. С повишаване на наклона на рогатката спада средната яркост на пътното платно, коефициентът на заслепяване се повишава, показателят SR също се повишава, а различните равномерности не се променят с определена зависимост.

2. При получаване на по-високи реализирани стойности на коефициента на заслепяване се получава повишаване на реализираните стойности за средната яркост на пътното платно. Коефициентът на заслепяване оказва най-силно влияние върху максималния ъгъл на излъчване и съответно и на средната яркост на пътното платно.

3. Реализираната средна яркост на пътното платно зависи от ограничението на максималния интензитет. С увеличаване на максималния интензитет се реализират по-високи яркости на пътното платно.

## Литература

- БДС EN 13201-2, 2003. Осветление на улици. Технически изисквания.
- Велинов К., 2010, Новости в системите за експлоатация и управление на уличното осветление, Национален семинар "Новости в осветителната техника", 16 декември, МГУ "Св. Иван Рилски", София;
- Василев Хр., Красимир Велинов, 2004, Оптимизиране на параметрите на улични осветителни уредби, Сборник с доклади на XII Национална конференция по осветление с международно участие Осветление'2004, Международен дом на учените "Ф. Ж. Кюри", Варна, България, стр. 46
- Vassilev Hr., Velinov K., 2004, Optimization of the Light Distribution of Street Luminaires, 5. Ulusal Aydinlatma Kongresi ve Interlight Istanbul Fuarı, 7-8 Okt., Istanbul
- Велинов К., Хр. Василев, 2007, Влияние на геометричните параметри и нормативните ограничения върху оптималното светлоразпределение на уличните осветители, Сборник с доклади на XIII Национална конференция по осветление с международно участие Осветление'2007, 12-13 Юни, Международен дом на учените "Ф. Ж. Кюри", Варна, България, стр. 94-104
- Василев Хр., Георгиев Ц., Велинов Кр., 2006, Апроксимиране на светлоразпределение осветителей чрез ортогоналные полиноми Лежандра, Калининград, Светлогорск, 19-21 септември, стр.109.
- Vassilev Hr., Velinov K., Gancho Ganchev, 2005, HIGH EFFICIENCY STREET LUMINAIRES, Conferinta internationala Iluminat 2005, (BALKANLIGHT 2005), Clush-Napoca, Romania, p.48-1, 48-7
- Василев Хр., Велинов Кр., 2006, Новая концепция освещения улиц, Шестая международная светотехническая конференция, Калининград, Светлогорск, стр.35.
- Велинов Кр., 2006, Осветление на пътища със светодиоди, Годишник на МГУ "Св. Иван Рилски", 2006г. том 49, св. III Механизация, електрификация и автоматизация на мините, стр.159-162.
- EPS 1.4.2, 1996, Program for designing street lighting devices. Technical description, SD "Electroprograma" Sofia;
- Велинов К, В. Василев, 2012г., Повишаване на ефективността на улични осветители., Годишник на МГУ "Св. Иван Рилски", Том 55, св. III, стр. 15-18
- <http://www.ilexa.de/> - ILEXA Ray-Viewer

Статията е препоръчана за публикуване от кат. "Електрификация на мините".