



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

Катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Светлинна техника и източници на светлина

СТОЯН САВОВ ПЕТРОВ

РАЦИОНАЛИЗИРАНЕ НА РАЗХОДИТЕ ЗА
ОСВЕТЛЕНИЕ НА ПЪТНИ ТУНЕЛИ

АВТОРЕФЕРАТ

на

дисертационен труд за придобиване на
образователна и научна степен „Доктор“

Научен ръководител:

Проф. д-р инж. Ангел Саракинов Пачаманов

София, 2016 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” на Електротехнически факултет при Технически университет – София. Изследванията в труда са извършени в катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” и са финансирани със средства от Министерството на образованието и науката, Фонд “Научни изследвания”, договор № МУ-ФС-07 “Оптимизиране по разход на енергия на осветителни уредби за улици и пътни тунели”.

Маг. инж. Стоян Савов Петров е зачислен за свободна докторантура на 01.07.2015 г. и отписан с право на защита на 07.07.2016 г. след отчет пред катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”. На 28.11.2016 г. дисертационният труд окончателно е докладван на разширен катедрен съвет с опоненти проф. д-р Захари Иванов и гл. ас. д-р Ива Петринска.

Дисертационният труд съдържа 152 страници с 102 фигури и 79 таблици. Състои се от увод, пет глави, заключение, списък на публикациите по труда, литература и приложения. Цитирани са 152 литературни източника, от които 75 на латиница, 58 на кирилица и 19 интернет адреса. По темата на дисертацията са направени 13 публикации – 8 на конференции с международно участие в България, 2 в годишника на ТУ-София и 3 на научни сесии и форуми.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 06.04.2017г. от 13:00 часа в Конферентна зала на БИЦ на ТУ-София.

Научно жури (зап.ОЖ-424/14.12.2016, процедура ЕФ83-НС1-030):

1. Проф. д-р инж. Ангел Саракинов Пачаманов, Научен ръководител
2. Проф. д-р инж. Захари Александров Иванов, Председател
3. Проф. д-р инж. Христо Николов Василев, Член
3. Доц. д-р инж. Ганчо Иванов Ганчев, Член
4. Доц. д-р инж. Пламен Ценков Цанков, Член

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет.

Автор: Стоян Савов Петров

Заглавие: **Рационализиране на разходите за осветление на пътни тунели**

Тираж: 50 бр.

Издателство Авангард-Прима, София

АКТУАЛНОСТ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Дисертационният труд разглежда основни методи и средства за рационализиране на разходите за осветление на пътни и градски тунели - чрез съвременни ефективни системи за осветление, базирани на комбинация от класически решения и нови светлодиодни технологии и чрез прилагане на подходящи енергийноэффективни електрозахранващи системи (фотоволтаици). Ефективните системи за осветление включват както подходящо надеждно електрозахранване на светлодиодните модули чрез параметрични преобразуватели за константен ток, така и светлотехнически решения, осигуряващи подходящо насочване на светлинния поток. В процеса на работа по дисертацията е проведен анализ на дела на изброените фактори по отношение на намаляване на разходите за осветление, като се предлага новата технология от тип “плосък лъч” (Flat Beam) да се прилага основно в най-енергоемката част на уредбите - адаптационните и преходните зони, където се прилага насрещно осветление. При тази технология излъчването на потока е съобразено с ъгъла на наблюдение на пътя и отражателните свойства на настилка, при което изискваната яркост се постига с няколкократно по-малък светлинен поток. Разгледани са различни подходи за избор на типа осветителна уредба: 1) класически тип; 2) тип „плосък лъч“; 3) комбинация от класически тип или “плосък лъч” в различни съотношения. Всеки от подходите има място за приложение в зависимост от характеристиките на конкретния тунел – изборът се прави след многовариантно проектиране на осветителната уредба на тунела.

След анализ на условията за прилагане на технологията “плосък лъч” в тунелното осветление е търсено енергоефективно светлоразпределение на осветител, предназначен за входната и преходната зони на тунела. За целта е формулирана и решена оптимизационна задача: “Постигане на зададени количествени и качествени показатели на тунелна осветителна уредба с минимален светлинен поток”. Работата завършва с разработване на опитен образец на осветител за прилагането на технологията “плосък лъч” в пътни тунели с използване на най-перспективните светлинни източници - светлодиодите.

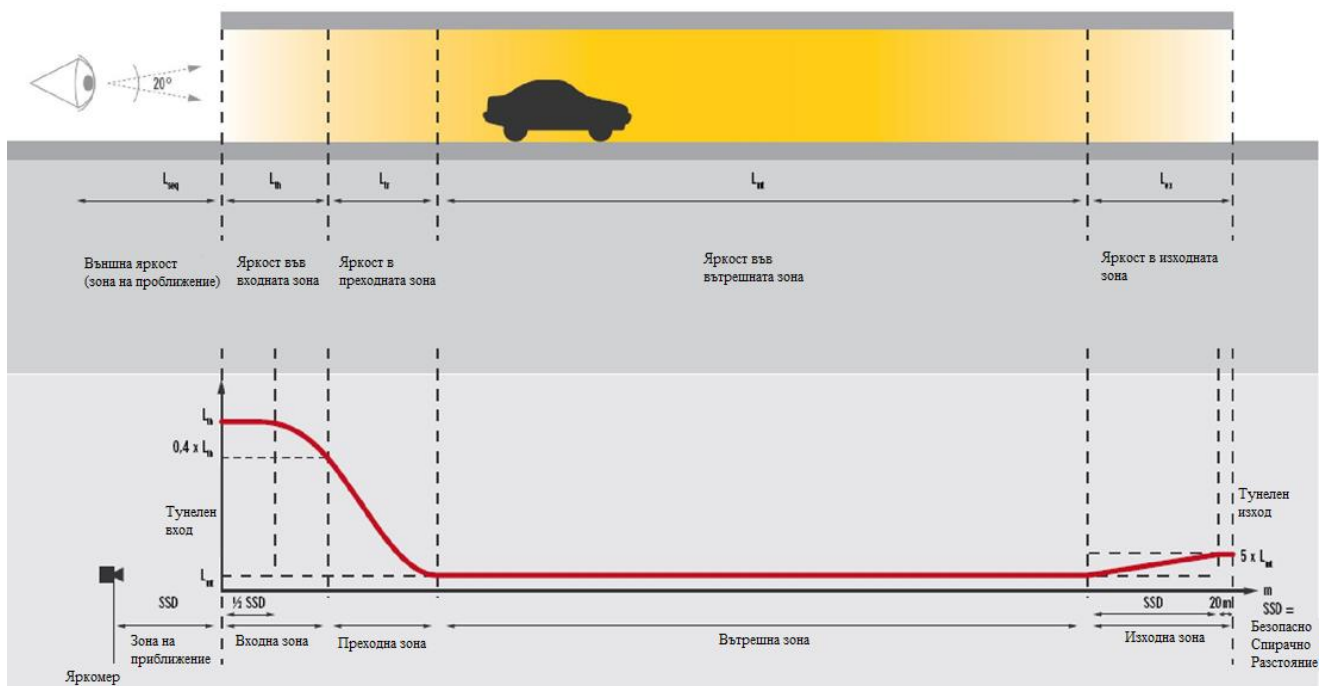
Поевтиняването на фотоволтаичните електрозахранващи системи откри възможности за използването им и в тунелното осветление. В работата е анализирано използването на локални фотоволтаични централи, като централата се оразмерява по необходимия разход на електроенергия за осветление през деня, плюс продаване на излишъка от дневната енергия на енергийната система. Установени са условията, при които използването на ФВС стават изгодни спрямо централизирано електрозахранване.

ГЛАВА ПЪРВА

ЛИТЕРАТУРЕН ПРЕГЛЕД НА НОРМАТИВНАТА БАЗА И СЪСТОЯНИЕТО НА ТУНЕЛНОТО ОСВЕТЛЕНИЕ.

1.1. Общи положения, характерни зони на пътен тунел

Целта на дневното осветление на пътен тунел е да осигури възможност за движение през тунела със степен на сигурност и комфорт равни на тези при движение по открит път. Добре осветените тунели се характеризират с добри условия на зрителната информация за участниците в движението. Колкото нивата на яркост пред и вътре в тунела са по-близки, толкова по-лесно се приспособяват очите на водачите. Тези адаптационни нива са различни при движение през тунела. Поради тази причина тунелите се разделят по дължина на 5 зони (Фиг. 1.1.): зона на приближаване към тунела, входна зона, преходна зона, вътрешна зона и зона на излизане от тунела.



Фиг. 1.1. Изменение на яркостта на платното във входна, преходна, вътрешна и изходна зона на пътен тунел [25]

1.2. Тунелни осветителни системи, осветителни тела и светлинни източници

За осигуряване на високите нива на яркост на платното във входната и преходната зона се изграждат мощни осветителни уредби с възможно най-ефективни светлинни източници – обикновено натриеви лампи с високо налягане.

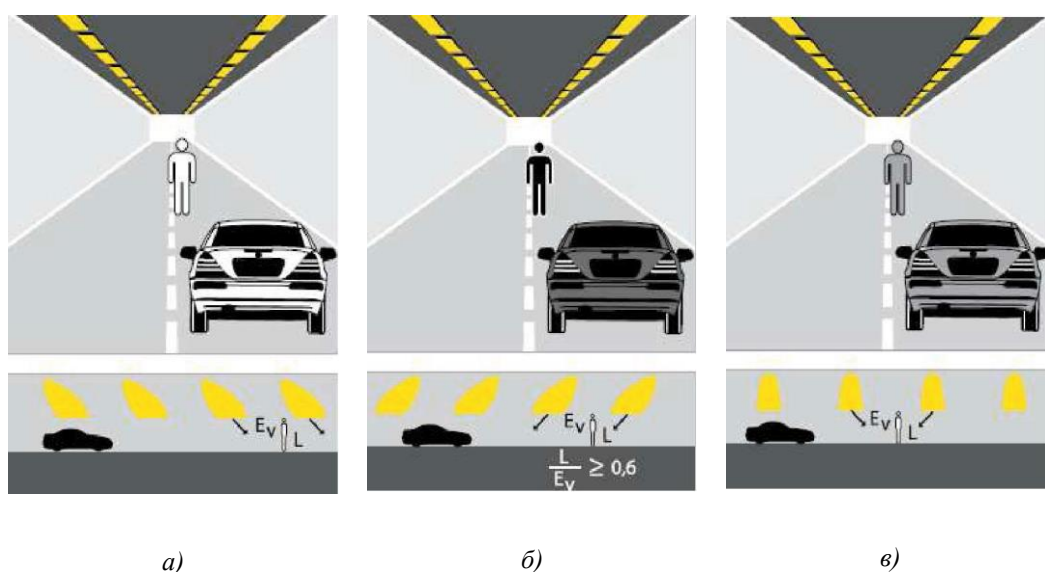
На Фиг.1.5. са показани прилаганите три вида светлоразпределения на осветители за входна и преходна зона. Всяко от тях има свои предимства и изборът на конкретен вид зависи

от изискванията, на които се отдава по-голямо значение – икономически или по-висока безопасност на движението

- **Попътно осветление (Фиг.1.5.а)** – то е с най-ниска ефективност, но при него се наблюдава най-естествената картина – светъл обект с висока яркост на фона на пътно платно със значително по-ниска яркост.

- **Насрещно осветление (Фиг.1.5.б)** – обектът не е осветен откъм наблюдателя, а пътното платно е със значителна яркост (негативен контраст между обект и фон). Тази система на осветяване е най-икономична, тъй като се използват свойствата на насочено-дифузното отражение от пътната настилка. Проблеми се появяват в края на преходната зона, където се преминава от насрещно към симетрично осветление - намалена видимост, заради смяна на знака на контраста между обект и фон (от негативен към позитивен).

- **Симетрично осветление (Фиг.1.5.в)** – то е по-икономично от попътното и по-скъпо от насрещното осветление, но така се решава проблемът с намалената видимост в края на преходната зона. Затова то често се прилага при отговорни тунели с висока интензивност на движението.



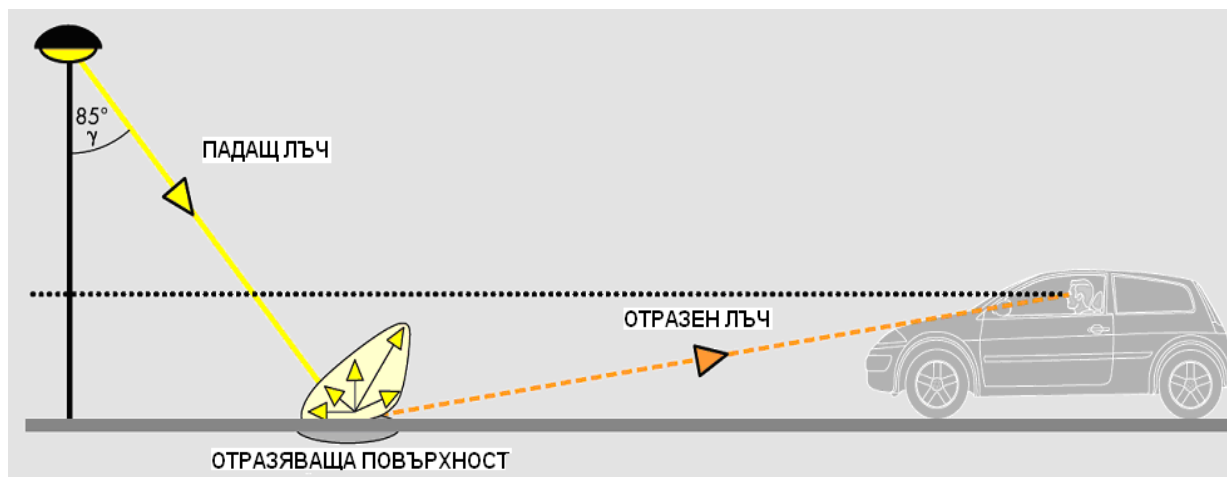
Фиг. 1.5. Попътно (pro-beam), насрещно (counter-beam) и симетрично (symmetrical) осветление [25]

1.4. Възможности за подобряване на ефективността на тунелното осветление

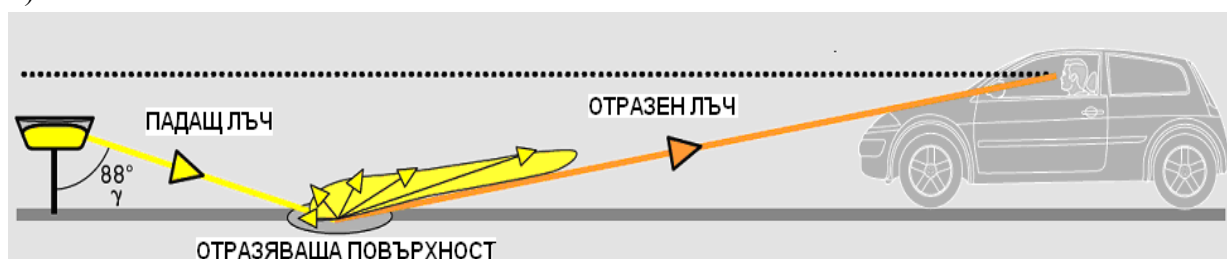
Особености на монтажната височина

От значение за участника в движение е високата яркост на платното, на чийто фон той трябва да разпознае евентуални препятствия. На Фиг.1.11.а е показана “класическа” уредба за улично осветление, а на Фиг.1.11.б индикатрисата на отразения поток от пътното платно. Очевидно е, че максимална яркост настилка ще има, ако се наблюдава от посоката, в която отразеният поток има максимална стойност, т.е. при наблюдаване под ъгъл, равен на ъгъла на падащия лъч (спрямо нормалата). Следователно, откъм водача на МПС яркостта на настилка е с многократно по-ниска стойност от тази в посоката на максималното отражение на потока.

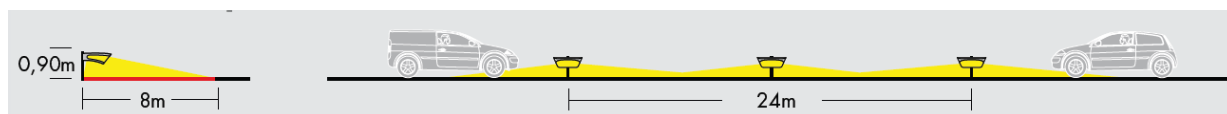
а)



б)



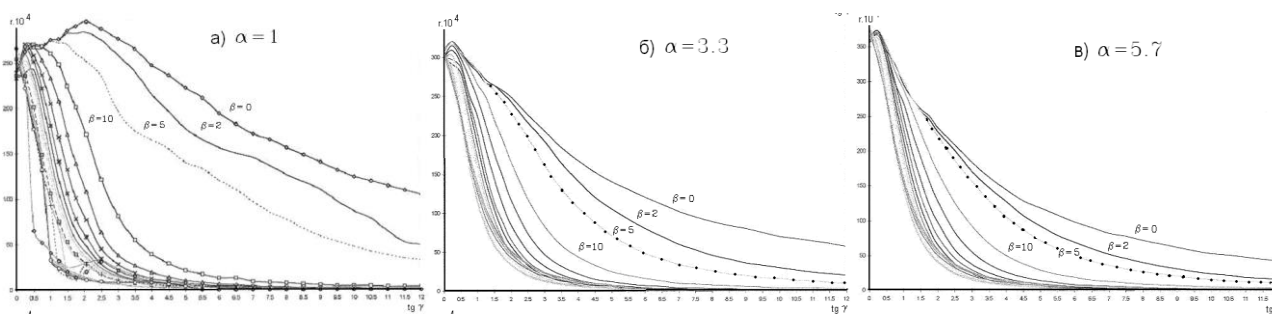
в)



Фиг. 1.11. Индикатриса на отразения поток при класическа уредба за улично или тунелно осветление (а) и при технологията „плосък лъч“ за осветяване на пътното платно (б);
Нова концепция за пътното осветление (в)[19]

Използването на това свойство на насочено-дифузното отражение на пътната настилка е възможно, ако монтажната височина на осветителите се намали дотолкова, че падащият към настилка лъч (Фиг.1.11.) склучи ъгъл, съизмерим с ъгъла, под който водачът на МПС наблюдава пътното платно (Фиг.1.11.). Но намаляването на монтажната височина води до намаляване и на разстоянието между осветителите, което може да стане причина за поява на т.н. „фликер ефект“, изразяващ се в дискомфорт за водача на МПС при наличие на проблясващи светлини с честота между 4 и 11 Hz за повече от 20 sec.

При разработване на оптични системи на осветители от този тип „плосък лъч“ са необходими данни за отражателните свойства на пътната настилка за ъгъл на падане на светлината до $\gamma=88^\circ$ ($\text{tg}\gamma=S/H=28$). Освен това, таблиците с яркостни фактори на стандартизираните пътни настилки (C1, C2; R1, R2, R3, R4) са заснети при ъгъл на наблюдение $\alpha=1^\circ$, отнасящ се за стандартния наблюдаван участък от пътното платно (60-160 m) при скорост на движение над 60 km/h. Този ъгъл е среден между най-близките ($1,43^\circ$) и най-далечните ($0,54^\circ$) полета от платното при наблюдател с височина на зрителната ос 1,5 m.

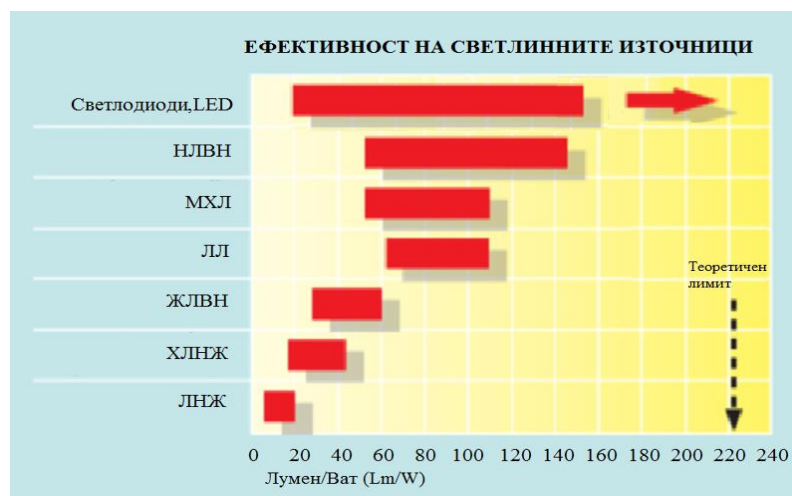


Фиг. 1.14. Пълни индикатриси на отражение на пътна настилка от клас RIII при различен ъгъл на наблюдение (а, б, в) [30]

Очевидно, при търсене на енергийноэффективни светлоразпределения на осветители за тунели и различни пътни настилки, ще трябва да се имат предвид тези особености, т.е. оптичните системи на осветителите трябва да са съобразени с индикатрисата на отражение на настилка за характерната за тях геометрия на наблюдение ($\alpha=3.3^\circ$ или 5.7°).

Възможности за използване на светодиоди при разработване на осветители от тип “плосък лъч” за пътни тунели

Новата енергийноэффективна технология за осветяване на улици с осветители от тип „плосък лъч“ осигурява много добри възможности за прилагане на най-перспективните съвременни светлинни източници – светодиодиите. Предимствата им са известни – изключително дълга пълна продължителност на работа, възможност за управление на потока, облекчена експлоатация, добро насочване на потока, поради възможност за концентрирането



Фиг. 1.17. Светлинен добив на източници и тенденции на подобряване на съция при светодиодиите

му в малък пространствен ъгъл. Последното предимство е от голямо значение за оптималното насочване на потока към отделни части на пътното платно с оглед постигане на нормативните изисквания за равномерност на яркостта.

Ефективността на светодиодиите с бяла светлина е дори по-голяма от ефективността на повечето светлинни източници (100-150 lm/W) и тенденцията е да продължава да се подобрява до достигане теоретичния максимум (Фиг.1.17.).

1.5. Цел и задачи на дисертационния труд

Основният извод от разгледаното състояние на пътното тунелно осветление е, че благодарение на усъвършенстване на новите светодиодни технологии и намаляване цената на алтернативните възобновяеми източници за производство на електрическа енергия са налице много големи резерви за съкращаване на разходите за тунелно осветление. На тази база е формулирана и **целта на дисертационния труд**: Рационализиране на разходите за тунелно осветление на база използване на съвременни светлинни източници, оптимизирани по разход

на енергия светлоразпределения на осветители тип „плосък лъч“ и чрез прилагане на минимизирани по разход на средства за енергия електроснабдителни системи.

За постигане на тази цел ще бъдат решени **следните задачи:**

1. Анализиране на възможностите за подобряване енергийната ефективност на тунелното осветление чрез отчитане многократното отражение на светлинния поток от стените и пътната настилка. Чрез моделиране на взаимното влияние на яркостите на стените и платното върху показателите на осветителната уредба ще се оценят възможностите за повишаване на енергоефективността на уредбите и по-специално на тези, реализирани с осветители по технологията “плосък лъч”;

2. Разработване на математически модел и програмен продукт за получаване на оптимизирани по разход на енергия светлоразпределения за осветители от тип «плосък лъч» за входната и преходната зони на тунела;

3. Осъществяване на физическо моделиране на оптимизирано по разход на енергия светлоразпределение от тип “плосък лъч” и разработване на експериментален образец на осветител. Анализ на точността при реализация на оптималното решение и съответно коригирането му на база фотометриране със специално разработен телецентричен фотометър за светодиодни осветители и прожектори;

4. Проверка на светлотехническите показатели на осветителни уредби с конструираните осветители, типови решения на база технико-икономическа обосновка на решенията.

5. Анализ на възможностите за прилагане на локални фотоволтаични електрозахранващи системи в тунелното осветление и условията, при които те стават изгодни спрямо централизирано електрозахранване.

ГЛАВА ВТОРА

МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ВЗАИМНОТО ВЛИЯНИЕ НА ЯРКОСТТЕ НА СТЕНИТЕ И ПЛАТНОТО ВЪРХУ КОЛИЧЕСТВЕНИТЕ И КАЧЕСТВЕНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ОСВЕТИТЕЛНАТА УРЕДБА.

2.1. Влияние на яркостта на стените върху яркостта на платното на пътен тунел

При проектиране на осветителни уредби на пътни тунели нормативните документи изискват яркостта на стените да бъде не по-малка от яркостта на пътното платно. В повечето случаи при проектиране на тунелно осветление се използват програми за улично осветление, които изчисляват яркостта на пътното платно, създадена само от директната компонента на потока от осветителите. За задоволяване на изискването за яркост на стените, равна на яркостта на платното, осветителите за тунелно осветление се конструират така, че част от потока на светлинните източници да пада директно на стените. При тази постановка, върху пътното платно освен директен, попада и отразен от стените светлинен поток. Отразен поток има и от тавана. Ако се знае каква част от яркостта на пътната настилка се дължи на отразения поток от стените и тавана, е възможно да намали частта на директния поток към пътното платно. Това е предпоставка за намаляване на инсталираната мощност на уредбата и реализиране на икономия на капиталовложение и електроенергия.

В дисертационния труд е разгледан един от възможните пътища за отчитане на влиянието на отразената компонента на светлинния поток от стените и тавана за формиране на яркостта на пътното платно. За целта площите на стените и тавана се заместват с фиктивни

осветители със светлоразпределения, характерни за вертикални и хоризонтални дифузно-отразяващи плоски повърхности.

От законите на Ламберт за дифузно-отразяваща хоризонтална и вертикална повърхност, интензитетите на хоризонталния и вертикалния светещ елемент могат да се определят според изисквания от CIE формат за изчисляване на яркост на пътно платно по формулите:

$$(2.1) \quad I(C, \gamma) = \frac{1000}{\pi} \cos \gamma$$

$$(2.2) \quad I(C_x, \gamma) = \frac{1000}{\pi} \sin C_x \cdot \sin \gamma$$

Изчисляват се стойности на интензитетите на светлината по формули 2.1 и 2.2 за:

$C = 270, 285, 300, 310, 315, 320, 325, 330, 335, 340, 345, 350, 355, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 75, 90, 105, 120, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160, 165, 170, 175, 180$

и

$\gamma = 0, 10, 20, 30, 35, 40, 45, 47.5, 50, 52.5, 55, 57.5, 60, 62.5, 65, 67.5, 70, 72.5, 75, 77.5, 80, 82.5, 85, 87.5, 90, 92.5, 95, 97.5, 100.0, 102.5, 105.0, 120, 135, 150, 165, 180$

и се записват във файл на светлоразпределението: **файл DL61 и файл DL62.**

Таванът и стените могат да се разделят на светещи площи със зададени размери, като всяка площ се представя като осветител със светлинен поток $\Phi_{отр} = I_{max} \cdot \pi = L \cdot S \cdot \pi$, където S е площта на елемента (напр. 1x2 метра за стените и 2,5x2 метра за тавана).

Ако се приеме, че яркостта на стените е равна на яркостта на платното, напр. 100 cd/m², то влиянието на тези “осветители” може да се определи с програма за изчисляване на улични уредби, като всеки осветител е с поток $\Phi_{отр} = L \cdot S \cdot \pi = 100 \cdot 1.2 \cdot 3.14 = 628$ lm. В този случай трябва да се разгледат четири “осветителни уредби” с редове “осветители”, разположени на височини съответно 3,5; 2,5; 1,5 и 0,5 м с входни данни, подходящи за програмата за улично осветление.

Резултатите от 4-те случая за влиянието на отразения поток от стените върху яркостта на платното при различна височината на окачване на “осветителите” са дадени в **Таблица 2.3.**

Таблица 2.3. Получени резултати за влиянието на отразения поток от стените върху яркостта на платното

I. Височина на “окачване на осветителите” 3,5 m

Положение на наблюдателя $R = 5.00$ $S = 0.00$

Разпределение на яркостите в едно “междустълбие”

R/S 60.0 60.2 60.4 60.6 60.8 61.0 61.2 61.4 61.6 61.8

0.50 * 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63

1.50 * 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18

2.50 * 1.19 1.20 1.20 1.20 1.21 1.21 1.21 1.20 1.19 1.19

3.50 * 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11

4.50 * 1.09 1.09 1.10 1.10 1.10 1.09 1.10 1.10 1.10 1.10

5.50 * 1.09 1.09 1.10 1.10 1.10 1.09 1.10 1.10 1.10 1.10

6.50 * 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11

7.50 * 1.19 1.20 1.20 1.20 1.21 1.21 1.21 1.20 1.19 1.19

8.50 * 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18 1.18

9.50 * 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63 0.63

Средна яркост на платното: $L_{av} = 1.04$ cd/m²

III. Височина на “окачване на осветителите” 1,5 m

Положение на наблюдателя $R = 5.00$ $S = 0.00$

Разпределение на яркостите в едно “междустълбие”

R/S 60.0 60.2 60.4 60.6 60.8 61.0 61.2 61.4 61.6 61.8

0.50 * 1.70 1.71 1.70 1.67 1.64 1.65 1.66 1.67 1.69 1.68

1.50 * 1.96 1.99 1.98 1.96 1.94 1.94 1.93 1.93 1.94 1.94

2.50 * 1.32 1.33 1.35 1.35 1.38 1.39 1.37 1.33 1.31 1.30

II. Височина на “окачване на осветителите” 2,5 m

Положение на наблюдателя $R = 5.00$ $S = 0.00$

Разпределение на яркостите в едно “междустълбие”

R/S 60.0 60.2 60.4 60.6 60.8 61.0 61.2 61.4 61.6 61.8

0.50 * 0.81 0.81 0.79 0.79 0.79 0.80 0.80 0.80 0.79 0.81

1.50 * 1.62 1.64 1.65 1.64 1.66 1.66 1.65 1.62 1.62 1.62

2.50 * 1.46 1.46 1.45 1.45 1.45 1.45 1.45 1.44 1.45 1.45

3.50 * 1.33 1.33 1.33 1.33 1.32 1.32 1.32 1.32 1.32 1.32

4.50 * 1.23 1.23 1.23 1.24 1.24 1.24 1.25 1.23 1.23 1.22

5.50 * 1.23 1.23 1.23 1.24 1.24 1.24 1.25 1.23 1.23 1.22

6.50 * 1.33 1.33 1.33 1.33 1.32 1.32 1.32 1.32 1.32 1.32

7.50 * 1.46 1.46 1.45 1.45 1.45 1.45 1.45 1.44 1.45 1.45

8.50 * 1.62 1.64 1.65 1.64 1.66 1.66 1.65 1.62 1.62 1.62

9.50 * 0.81 0.81 0.79 0.79 0.79 0.80 0.80 0.80 0.79 0.81

Средна яркост на платното: $L_{av} = 1.29$ cd/m²

IV. Височина на “окачване на осветителите” 0,5 m

Положение на наблюдателя $R = 5.00$ $S = 0.00$

Разпределение на яркостите в едно “междустълбие”

R/S 60.0 60.2 60.4 60.6 60.8 61.0 61.2 61.4 61.6 61.8

0.50 * 9.23 8.27 6.39 5.21 4.72 4.91 5.45 6.60 7.66 8.82

1.50 * 2.22 2.00 1.97 1.88 1.85 1.84 1.87 2.04 2.14 2.18

2.50 * 0.32 0.32 0.32 0.32 0.00 0.02 0.01 0.27 0.30 0.32

3.50	*	1.04	1.08	1.08	1.08	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07
4.50	*	0.98	0.96	0.98	0.96	1.00	1.00	1.00	0.97	0.98	0.98
5.50	*	0.98	0.96	0.98	0.96	1.00	1.00	1.00	0.97	0.98	0.98
6.50	*	1.04	1.08	1.08	1.08	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07
7.50	*	1.32	1.33	1.35	1.35	1.38	1.39	1.37	1.33	1.31	1.30
8.50	*	1.96	1.99	1.98	1.96	1.94	1.94	1.93	1.93	1.94	1.94
9.50	*	1.70	1.71	1.70	1.67	1.64	1.65	1.66	1.67	1.69	1.68

Средна яркост на платното: Lav = 1.40 cd/m²

3.50	*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.50	*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	*	0.32	0.32	0.32	0.32	0.00	0.02	0.01	0.27	0.30	0.32
8.50	*	2.22	2.00	1.97	1.88	1.85	1.84	1.87	2.04	2.14	2.18
9.50	*	9.23	8.27	6.39	5.21	4.72	4.91	5.45	6.60	7.66	8.82

Средна яркост на платното: Lav = 1.79 cd/m²

Ако се приеме, че яркостта на тавана е 20% от яркостта на платното, т.е. 20 cd/m², делът на фиктивните “осветители” върху яркостта на пътното платно може да се определи с програма за изчисляване на улични уредби, като всеки осветител е с поток $\Phi_{отр}=L.S.\pi=20.2,5.2.3,14=314$ lm. В този случай трябва да се разгледат две “конфигурации улични уредби”, различаващи се само по мястото на “осветителите”. Входните файлове за изчисляване на “уредбите” трябва да бъдат отново подходящи за програмата за улично осветление.

Резултати от 2-та случая за влиянието на отразения поток от тавана върху яркостта на платното при различаващо се място на “осветителите” са дадени в Таблица 2.4.

Таблица 2.4. Получени резултати за влиянието на отразения поток от тавана върху яркостта на платното

I. Надвес на осветителите 1,25, окачване 5,5 m

Положение на наблюдателя R = 5.00 S = 0.00

Разпределение на яркостите в едно “междустълбие”

R/S 60.0 60.2 60.4 60.6 60.8 61.0 61.2 61.4 61.6 61.8

0.50	*	0.79	0.80	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79	0.79	0.79	0.80
1.50	*	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
2.50	*	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98
3.50	*	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81	0.81	0.81
4.50	*	0.71	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71	0.71	0.71
5.50	*	0.71	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71	0.71	0.71
6.50	*	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81	0.81	0.81
7.50	*	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98
8.50	*	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
9.50	*	0.79	0.80	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79	0.79	0.79	0.80

Средна яркост на платното: Lav = 0.85 cd/m²

II. Надвес на осветителите 3,75, окачване 5,5 m

Положение на наблюдателя R = 5.00 S = 0.00

Разпределение на яркостите в едно “междустълбие”

R/S 60.0 60.2 60.4 60.6 60.8 61.0 61.2 61.4 61.6 61.8

0.50	*	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
1.50	*	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
2.50	*	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
3.50	*	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
4.50	*	1.47	1.48	1.48	1.48	1.48	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47
5.50	*	1.47	1.48	1.48	1.48	1.48	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47
6.50	*	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
7.50	*	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
8.50	*	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
9.50	*	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55

Средна яркост на платното: Lav = 1.01 cd/m²

2.1.2. Анализ на получените резултати

Могат да се направят следните заключения:

1. От направените изчисления се вижда, че при яркост на стените, равна на яркостта на пътното платно (100 cd/m²), неговата яркост се увеличава с 1,04+1,29+1,4+1,79=5,52 cd/m², дължащи се на отразения поток от стените (Таблица 2.3.). От отразения поток от таван с яркост 20% от тази на настилка (20 cd/m²) се добавя още 0,85+1,01=1,86 cd/m² (Таблица 2.4.). Общо яркостта на платното ще бъде 107,38 cd/m², вместо 100 cd/m², т.е. уредбата е преоразмерена с около 7%. Инсталирането на 7% повече осветители, освен че завишава началните капиталовложения, води до по-голям разход на електроенергия при експлоатация на уредбата.
2. Вторият важен извод е, че независимо от изразходването на значителен светлинен поток за директно осветяване на стените от таванни осветители (Фиг.2.1. - около 30-40% от потока на светлинните източници попада директно на стените), отразеният от стените поток създава само 5% от яркостта на пътя. Това е логично, тъй като малка част от отразения поток от стените е насочен срещу посоката на движение - основен принцип, заради който насрещното осветление е по-енергийноефективно от симетричното. Нещо повече, при насрещно осветление,

ярките стени влошават показателя на контраста на осветлението $q = L_{AV}/E_V$, тъй като създават висока вертикална осветеност E_V в контролна равнина, обратна на посоката на движение, при средна реализирана яркост на пътя L_{AV} .

3. Осветяването на стените подобрява условията за ориентация при навлизане в тунел, но използването на таванни осветители е скъпо решение - изискването за осветяване на стените се отнася за височина до 2 м от нивото на пътя, при което използването на принципно нови решения, например със странично разположени на малка височина осветители от тип “плосък лъч”, значително ще намали инсталираната мощност за осветление [26].
4. От енергийна гледна точка е по-ефективно светлинният поток на основните осветители да се насочва директно към пътното платно [30], а ориентирането на водача за мястото на стените да се формира от светещи ивици с голяма яркост, например контури от светодиоди. Комбинирането на осветители от тип «плосък лъч» с контури от светодиоди може да намали няколкократно разхода на енергия за тунелно осветление.

2.2. Влияние на отразения от платното светлинен поток върху яркостта на стените на пътен тунел

При конструиране на тунелни осветители е важно да се знае каква част от отразената компонента на светлинния поток от пътното платно попада върху стените, за да може оптичните им системи да се конструират така, че към стените да се изпраща минимално необходимата стойност от потока на светлинните източници. Така ще бъде увеличен коефициентът на използване на светлинния поток, съответно ще се намали и инсталираната мощност на осветителната уредба.

На базата на разработен програмен продукт за оптимизиране на светлоразпределението на тунелни осветители и зададени разпределения на директния поток на светлинните източници към пътното платно е оценена частта на отразената компонента на светлинния поток от пътното платно, попадаща върху стените.

Прилагането на програмния продукт е разгледано за пътното платно на тунел, осветявано по два различни начина – горно таванно насрещно осветление и странично насрещно осветление по технологията “плосък лъч”. И при двата случая, на базата на предварително решаване на оптимизационна задача, е получено разпределението на потока на светлинните източници по пътното платно, така че с минимален светлинен поток да се постигне изискваната яркост на платното.

Резултати от изчисления на вертикалната осветеност и яркостта на стената при различна стойност на h (височина на изчислителната точка M от нивото на пътя) са дадени в *Таблица 2.8.* и *Таблица 2.9.* *Фиг.2.7.* и *Фиг.2.8.* представят резултатите графично.

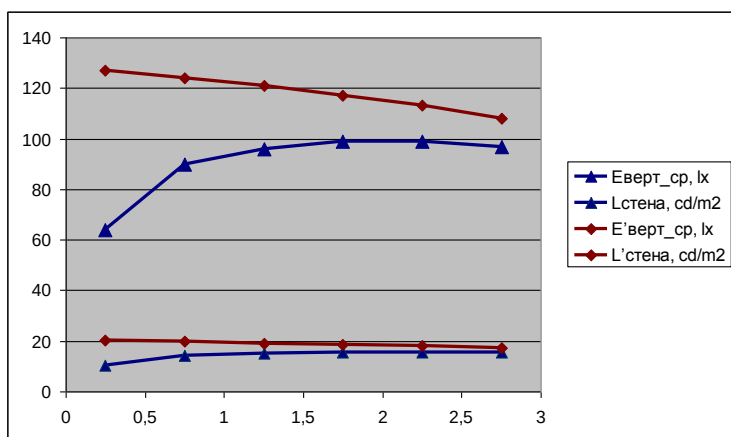
Програмният продукт дава вариант на изчисляване на вертикалната осветеност и яркостта на стената, в случай че настилка е равномерно осветена, т.е. всеки участък има една и съща осветеност, равна на средната осветеност на “междустълбието”. Яркостта на всеки елемент от настилка в този случай се изчислява по формулата:

$$(2.14) \quad L[m, j, i] = \rho_{НАСТ} \frac{E_{СР.ПЛАТНО}}{\pi}.$$

Получените стойности за вертикалната осветеност и яркостта на стената, за този вариант, са показани в *Таблица 2.8.* и *Таблица 2.9.* като стойностите са означени с «'» (прим). Показателят L_{AV}/L'_{AV} в *Таблица 2.8.* и *Таблица 2.9.* носи информация доколко неравномерното осветяване на платното е по-ефективно от равномерното. Именно поради неравномерното осветяване на платното, при задоволяване на качествените показатели на уредбата, осветяване от тип “плосък лъч” е по-ефективно от осветяване от тип “насрещно-таванно”.

Таблица 2.8. Яркост на стената от отразения от платното светлинен поток при уредба от тип “насрежно-таванно”

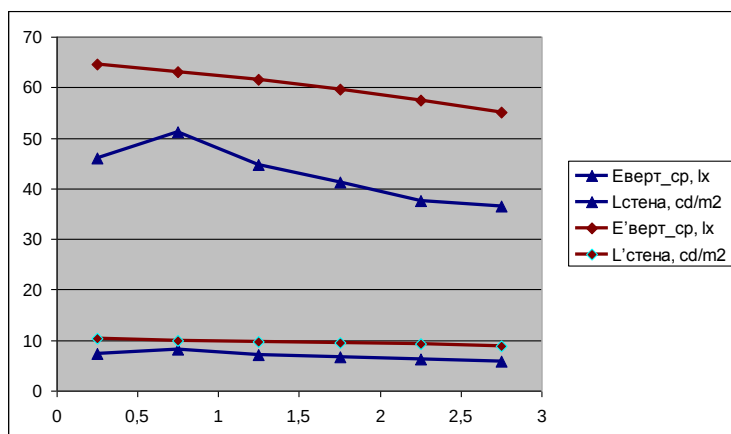
h, m	$E_{\text{верт_ср}}, \text{lx}$	$L_{\text{стена}}, \text{cd/m}^2$	$L_{\text{AV}}/L'_{\text{AV}}, \text{cd/m}^2$	$E'_{\text{верт_ср}}, \text{lx}$	$L'_{\text{стена}}, \text{cd/m}^2$
0,25	64	10,2	100/81,2	127	20,1
0,75	90	14,3	100/81,2	124	19,7
1,25	96	15,3	100/81,2	121	19,2
1,75	99	15,7	100/81,2	117	18,6
2,25	99	15,7	100/81,2	113	18,0
2,75	97	15,4	100/81,2	108	17,2



Фиг. 2.7. Вертикална осветеност и яркост на стената от отразения поток при тип “насрежно-таванно”

Таблица 2.9. Яркост на стената от отразения от платното светлинен поток при уредба от тип “плосък лъч”

h, m	$E_{\text{верт_ср}}, \text{lx}$	$L_{\text{стена}}, \text{cd/m}^2$	$L_{\text{AV}}/L'_{\text{AV}}, \text{cd/m}^2$	$E'_{\text{верт_ср}}, \text{lx}$	$L'_{\text{стена}}, \text{cd/m}^2$
0,25	46,1	7,3	100/41,4	64,5	10,3
0,75	51,2	8,2	100/41,4	63,1	10
1,25	44,7	7,1	100/41,4	61,5	9,8
1,75	41,2	6,6	100/41,4	59,6	9,5
2,25	37,7	6,2	100/41,4	57,5	9,2
2,75	36,5	5,8	100/41,4	55,2	8,8



Фиг. 2.8. Вертикална осветеност и яркост на стената от отразения поток при тип “плосък лъч”

2.2.2. Анализ на резултатите при класическа осветителна уредба и осветителна уредба тип „плосък лъч“

От направените изчисления се вижда, че при яркост на платното 100 cd/m^2 отразеният поток от платното към стените при уредба от тип “насрещно-таванно” създава около 15 cd/m^2 , което е 15% от изискваната стойност. При уредба от тип “плосък лъч” получените стойности са около 2 пъти по-малки, но това се дължи на два пъти по-малкия светлинен поток, с който се реализира зададената средна яркост на пътното платно. Ярките стени подобряват условията за ориентация при навлизане в тунел, но могат да се потърсят и по-енергоефективни методи за осветяването им:

1. Рационално е да се използват особеностите на технологията «плосък лъч» в тунелното осветление - осветителите се закрепват странично по стените на височина до 1,2 m, при което е логично да се осигури осветяване на стените от самите осветители чрез специален отвор от горната страна или рефрактор. Така, освен платното, ще се осветява и частта от стените, която е до 2 m.
2. Ориентацията на водача в тунела при уредба от тип «плосък лъч» се осигурява от самите осветители, закрепени странично по стените и едва ли е необходимо да се осигурява яркост, равна на тази на пътното платно. Може би при технологията «плосък лъч» е достатъчна стойността, дадена в препоръките на МКО: стените да бъдат с яркост 100% от тази на пътното платно за тунели клас 4, с яркост 60% - за тунели клас 3 и 2 и без изискване - за тунели клас 1.
3. От енергийна гледна точка е по-ефективно ориентирането на водача за мястото на стените да се получава от светещи ивици с голяма яркост, например контури от светодиоди. Комбинирането на осветители от тип «плосък лъч» с контури от светодиоди може да се окаже много добър вариант на енергоефективно тунелно осветление.

ГЛАВА ТРЕТА

ФОРМУЛИРАНЕ НА ОПТИМИЗАЦИОННА ЗАДАЧА И ПОЛУЧАВАНЕ НА ОПТИМИЗИРАНИ СВЕТОРАЗПРЕДЕЛЕНИЯ НА ТУНЕЛНИ ОСВЕТИТЕЛИ ОТ ТИП “ПЛОСЪК ЛЪЧ”.

3.1. Постановка на оптимизационната задача

Задачата за получаване на оптимално светлоразпределение за насрещно осветление от тип “плосък лъч” се формулира по следния начин: Разглежда се пътното платно с ширина W . Осветителите са монтирани на височина $H=1,25 \text{ m}$ по стените на тунела, като разстоянието между тях е S . Известни са отражателните свойства на настилка ($C2$ или $R3$). Търси се такова светлоразпределение на осветителите, което ще осигури постигането на регламентираните количествени и качествени показатели при най-малка стойност на необходимия за това поток на светлинния източник в осветителя.

Взаимното положение на изчислителните точки, осветителите и наблюдателя се описват чрез ъглите, означени на *Фиг. 3.2.* Прието е, че центърът на изчислителното поле е “О”. При максимална височина $H=1,25 \text{ m}$, разстояние между осветителите $S=2,5 \text{ m}$ и ширина на платното $W=5-10 \text{ m}$ (наблюдателят е по средата на лентата за движение) са спазени изискванията за отчитане на 5.Н и 28.Н осветители съответно пред и след изчислителното поле. Разстоянието от наблюдателя до началото на изчислителното поле е прието 60 m.

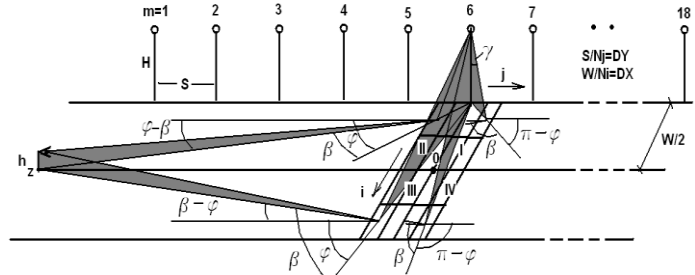
3.2. Изчисляване на необходимия поток и изискваните яркости в изчислителното поле

Потокът, попадащ във всяко елементарно поле от I, II, III и IV квадрант на изчислителното поле (Фиг. 3.2.), се определя по формулата:

$$(3.1) \quad \Phi(j, i) = \sum_{m=1}^M I(m, j, i) \cdot d\Omega(m, j, i),$$

като общият поток е

$$(3.2) \quad \Phi = \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} \Phi(j, i).$$



Фиг. 3.2. Определяне на параметрите за изчисляване на светлинния поток и разпределението на яркостите в изчислителното поле

Интензитетите на светлината $I(m, j, i)$ от всеки осветител m към всяко елементарно поле (j, i) са неизвестни, а пространствените ъгли $d\Omega(m, j, i)$ са параметри, изчислявани по формулата:

$$(3.3) \quad d\Omega(m, j, i) = DX \cdot DY \cdot \cos^3 \gamma(m, j, i) / H^2,$$

където $DX \cdot DY \cdot \cos^3 \gamma(m, j, i)$ е проекция на елементарната площ $DX \cdot DY$ в равнина, перпендикулярна на вектора $I(m, j, i)$, а разстоянието до съответния осветител е $l(m, j, i) = H / \cos \gamma(m, j, i)$.

Изчисляването на яркостта на всяко поле (j, i) се извършва по формулата:

$$(3.4) \quad L(j, i) = \sum_{m=1}^M I(m, j, i) \cdot q(m, j, i) / (H^2 \cdot 10^4),$$

където яркостните фактори на настилка $q(m, j, i)$ са параметри, получени по ъглите $\beta(m, j, i)$ и $\gamma(m, j, i)$ - чрез интерполация от таблични стойности на редуцирания яркостен фактор $qr = 10^4 \cdot q \cdot \cos^3 \gamma$ на използваната пътна настилка. Стойността на тези ъгли се определя от мястото на полето (j, i) спрямо т."О" на изчислителното поле (Фиг. 3.2.).

За клетките от I и II квадрант за $i=1, \dots, N_i/2$; $j=1, \dots, N_j$; $m=1, \dots, 5$, както и за клетките от I квадрант при $i=1, \dots, N_i/2$; $j=N_j/2+1, \dots, N_j$, $m=6$ важат формулите:

$$(3.5) \quad \beta(m, j, i) = \varphi(m, j, i) - \operatorname{arctg} \frac{\frac{W}{2} - DX(i-0,5)}{60 + DY(j-0,5)}$$

$$(3.6) \quad \varphi(m, j, i) = \pi - \operatorname{arctg} \frac{DX(i-0,5)}{(5,5-m) \cdot S + DY(j-0,5)}$$

$$(3.7) \quad \gamma(m, j, i) = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{[DX(i-0,5)]^2 + [(5,5-m) \cdot S + DY(j-0,5)]^2}}{H}$$

По подобни формули се изчисляват ъглите за клетките от III и IV квадрант, както и за осветители от 7 до 18.

3.3. Ограничения за реализиране на оптимално светлоразпределение: по заслепяване; по яркост на стените; по показателя на контраста на осветлението; по реализуемост на светлоразпределението

При търсенето на оптимално светлоразпределение следва да се отчитат следните ограничения:

- Ограничение по заслепяване;
- Ограничение по яркост на стените;
- Ограничение по показателя на контраста на осветлението;
- Ограничение по реализуемост на светлоразпределението.

3.4. Формулиране на оптимизационната задача

Оптимизационната задача е формулирана като линейна. Долната фотометрична повърхност на интензитетите на осветителя се описва с полином от степен $r=3$ за екваториалните ъгли φ и степен $s=5$ по меридианните ъгли γ :

$$(3.37) \quad I(m, j, i) = \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S a(r, s) \cdot \varphi^r(m, j, i) \cdot \gamma^s(m, j, i)$$

При ограниченията за заслепяване, показател на контраста на осветлението, яркост на стената и максимални интензитети в равнините $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=180^\circ$, на мястото на φ и γ в уравнение (3.37) се поставят съответно φ_w и γ_w ; φ_{wall} и γ_{wall} ; φ_{01} и γ_{01} ; φ_{X1} и γ_{X1} ; φ_{X2} и γ_{X2} , тъй като интензитетите към съответните контролни точки са от същата фотометрична повърхност.

Оптимизационната задача има следната формулировка - **“Постигане на зададени количествени и качествени показатели на тунелна осветителна уредба с МИНИМАЛЕН СВЕТЛИНЕН ПОТОК”**

Последователното описание на задачата, съответстващо на изискванията на алгоритмичен език AMPL за решаване на оптимизационни задачи, е:

$$\Phi = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} I(m, j, i) \cdot d\Omega(m, j, i)$$

Minimize:

Subject to:

$$1) \quad I(m, j, i) = \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S a(r, s) \cdot \varphi^r(m, j, i) \cdot \gamma^s(m, j, i) \geq 0$$

$$2) \quad L(j, i) = \frac{\sum_{m=1}^M I(m, j, i) \cdot q(m, j, i)}{H^2 \cdot 10^4}, i = 1, \dots, N_i, j = 1, \dots, N_j$$

$$3) \quad L(j, i) \geq U_{0,N} \cdot L_{av}, i = 1, \dots, N_i, j = 1, \dots, N_j$$

$$4) \quad L_{av} \geq 0,95 \cdot L_{av,N}$$

$$5) \quad L_{av} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} I(m, j, i) \cdot q(m, j, i)}{H^2 \cdot 10^4 \cdot N_j \cdot N_i}, i = 1, \dots, N_i, j = 1, \dots, N_j$$

$$6) \quad \sum_{m=1}^M I(m, j, i) \cdot q(m, j, i) \geq H^2 \cdot 10^4 \cdot L_{\min}(i), i = 1, \dots, N_i$$

$$7) \quad \sum_{m=1}^M I(m, j, i) \cdot q(m, j, i) \leq H^2 \cdot 10^4 \cdot L_{\max}(i), i = 1, \dots, N_i$$

$$8) \quad L_{\min}(i) \geq U_{L, N} \cdot L_{\max}, i = 1, \dots, N_i$$

$$9) \quad L_v(i) \leq T I_N \cdot L_{av} / 95$$

$$10) \quad L_v(i) = 0,003 \cdot \sum_{m=1}^M I_v(m, i) \cdot k_{\theta}(m, i), i = 1, \dots, N_i, m = 1, \dots, M$$

$$11) \quad I_v(m, i) = \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S a(r, s) \cdot \varphi_v^r(m, i) \cdot \gamma_v^s(m, i) \geq 0, i = 1, \dots, N_i, m = 1, \dots, M$$

$$12) \quad L_{wall} \geq 0,85 \cdot L_{av}$$

$$13) \quad L_{wall} = \rho_{wall} \cdot E_{wall, av} / \pi$$

$$14) \quad E_{wall, av} = \frac{\sum_{m=5}^7 \sum_{j=1}^{N_j} E_{wall}(m, j)}{N_i}, j = 1, \dots, N_i, m = 5, 6, 7$$

$$15) \quad E_{wall}(m, j) = I_{wall}(m, j) \cdot k_{wall}(m, j), j = 1, \dots, N_i, m = 5, 6, 7$$

$$16) \quad I_{wall}(m, j) = \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S a(r, s) \cdot \varphi_{wall}^r(m, j) \cdot \gamma_{wall}^s(m, j) \geq 0, j = 1, \dots, N_j, m = 5, 6, 7$$

$$17) \quad L_{av} \geq p_N \cdot E_{v01, av}$$

$$18) \quad E_{v01, av} = \frac{2 \cdot \sum_{j=\frac{N_j}{2}+1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} E_{v01}(j, i)}{N_i \cdot N_j}, i = 1, \dots, N_i, j = \frac{N_j}{2} + 1, \dots, N_j$$

$$19) \quad E_{v01}(j, i) = \sum_{m=1}^6 I_{v01}(m, j, i) \cdot k_{v01}(m, j, i), i = 1, \dots, N_i, j = \frac{N_j}{2} + 1, \dots, N_j$$

$$20) \quad I_{v01}(m, j, i) = \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S a(r, s) \cdot \varphi_{v01}^r(m, j, i) \cdot \gamma_{v01}^s(m, j, i) \geq 0, i = 1, \dots, N_i, j = \frac{N_j}{2} + 1, \dots, N_j, m = 1, \dots, 6$$

$$21) \quad I(m, j, i) \leq \frac{k_a \cdot \Phi}{\eta_u \cdot \pi^2}, i = 1, \dots, N_i, j = 1, \dots, N_i, m = 1, \dots, M$$

$$22) \quad I_{X1^\circ}(m) \leq I_{X1^\circ N} \frac{\Phi}{1000 \cdot \eta_u}, m = 8, \dots, 11$$

$$23) \quad I_{X1^\circ}(m) = \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S a(r,s) \cdot \varphi_{X1}^r(m) \cdot \gamma_{X1}^s(m) \geq 0, m = 8, \dots, 11$$

$$24) \quad I_{X2^\circ}(m) \leq I_{X2^\circ, N} \frac{\Phi}{1000 \cdot \eta_u}, m = 12, \dots, 18$$

$$25) \quad I_{X2^\circ}(m) = \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S a(r,s) \cdot \varphi_{X2}^r(m) \cdot \gamma_{X2}^s(m) \geq 0, m = 12, \dots, 18$$

$$26) \quad I_{X1^\circ}(m) \geq 0, \quad I_{X2^\circ}(m) \geq 0$$

Параметри на осветителната уредба са $S, H, W, h_z, h_{v01}, N_i, N_j, M$, а светлотехническите показатели, които се нормират $L_{AV,N}, U_{0,N}, U_{L,N}, TI_N, p_N$. Ограничения за светлоразпределението на осветителите са $\eta_u, k_a, I_{X1^\circ, N}, I_{X2^\circ, N}$.

Променливите в задачата са: $\Phi, I(m,j,i), a(r,s), L(j,i), L_{av}, L_{min}(i), L_{max}(i), L_v(m,i), I_v(m,i), L_{wall}, E_{wall,av}, E_{wall}(m,j), I_{wall}(m,j), E_{v01,av}, E_{v01}(j,i), I_{v01}(m,j,i), I_{X1^\circ}(m), I_{X2^\circ}(m)$.

Параметри, които се изчисляват с допълнителен програмен продукт или директно се задават, са: $\varphi(m,j,i), \beta(m,j,i), \gamma(m,j,i), d\Omega(m,j,i), q(m,j,i), \varphi_v(m,i), \gamma_v(m,i), k_v(m,i), \varphi_{wall}(m,j), \gamma_{wall}(m,j), k_{wall}(m,j), \varphi_{01}(m,j,i), \gamma_{01}(m,j,i), k_{01}(m,j,i), \varphi_{X1}(m), \gamma_{X1}(m), \varphi_{X2}(m), \gamma_{X2}(m), L_{AV,N}, U_{0,N}, U_{L,N}, TI_N, p_N, \eta_u, k_a, I_{X1^\circ, N}, I_{X2^\circ, N}$.

3.5. Енергийноэффективни светлоразпределения от тип “плосък лъч” за пътни тунели при отчитане на различен брой осветители пред водача на МПС

Теоретичните светлоразпределения на осветителите за пътни тунели са получени в резултат на решаване на оптимизационна задача, осигуряваща постигане на нормените показатели на осветителната уредба с минимален поток на светлинните източници.

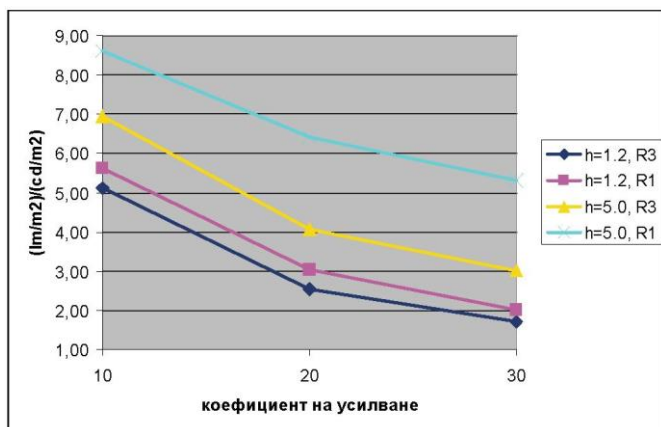
В Таблица 3.1. и Таблица 3.2. са показани обобщени резултати за оптимизирани светлоразпределения при три технологии за производство на осветители: с коефициент на усилване на потока $K_u=10$, съответстващ на класическа технология за производство на оптична система (с отражател); с $K_u=20$ - на технология, включваща отражател и рефрактор; с $K_u=30$ - за осветители, чиито светлоразпределения се реализират със светлодиоди с оптични лещи (излъчването на потока е концентрирано в много малки пространствени ъгли). На Фиг. 3.8. резултатите от Таблица 3.2. са представени графично.

Таблица 3.1. Необходим светлинен поток (lm) за постигане на яркост 100 cd/m^2 при поле $4,5 \times 8 \text{ m}$ за настилки тип R3 и R1, странично разположение на осветителите на височина 1.2 и 5.0 м и коефициенти на усилване $K_u=10, 20, 30$

Монтажна височина $H=1.2 \text{ m}$			Монтажна височина $H=5.0 \text{ m}$	
K_u	настилка R3	настилка R1	Настилка R3	настилка R1
10	18400	20200	25000	31000
20	9200	11000	14700	23100
30	6200	7300	10900	19100

Монтажна височина H=1.2 m			Монтажна височина H=5.0 m	
Ky	настилка R3	настилка R1	Настилка R3	настилка R1
10	5,11	5,61	6,94	8,61
20	2,56	3,06	4,08	6,42
30	1,72	2,03	3,03	5,31

Таблица 3.2. Показател на ефективност $(lm/m^2)/(cd/m^2)$ на светлоразпределения за страничен монтаж на осветителите и коефициенти на усилване $Ky=10, 20, 30$



Фиг. 3.8. Показател на ефективност $(lm/m^2)/(cd/m^2)$ на светлоразпределения при страничен монтаж на осветителите на височина H=1.2 и H=5.0 m, настилки R3 и R1 и коефициенти на усилване на светлинния поток $Ky=10, 20, 30$

Оптимални светлоразпределения от тип «плосък лъч» за пътен тунел, получени при отчитане на 4 поредни осветителя

Получените светлоразпределения са с полиномно представяне на търсените интензитети при настилка клас RIII, съгласно математическия модел.

Таблица 3.5. Интензитети в изчислително поле 4.5x8 м от осветители № 2, 3, 4, 5 за постигане на яркост $15 cd/m^2$ при пътна настилка R3, ъгъл на наблюдение $\alpha=1^\circ$ и максимален коефициент на усилване на потока $Ky=30$ ($\Phi_{sum}=920,25 lm$)

Интензитети от осветител №2				
i/i	1	2	3	4
1	1100	0	0	0
2	1673	0	662	1177
3	2252	533	0	1052
4	2909	1526	277	668
5	3698	2901	1805	0
6	4662	4643	4394	2775

Интензитети от осветител №3				
i/i	1	2	3	4
1	3016	2751	2390	1872
2	3685	3486	3174	2644
3	4137	3985	3718	3218
4	4421	4308	4099	3694
5	4580	4515	4391	4152
6	4662	4662	4662	4662

Продължение на Таблица 3.5.

Интензитети от осветител №4				
i/j	1	2	3	4
1	3603	3499	3371	3215
2	4045	3988	3914	3819
3	4354	4325	4287	4228
4	4548	4537	4516	4481
5	4645	4641	4632	4615
6	4662	4662	4662	4662

Интензитети от осветител №5				
i/j	1	2	3	4
1	3879	3823	3762	3688
2	4190	4163	4129	4092
3	4416	4405	4392	4376
4	4563	4562	4560	4555
5	4643	4644	4645	4646
6	4662	4662	4662	4662

Продължение на Таблица 3.5.

Общ поток от осветители №2+3+4+5 ($\Phi_{\text{сум}}=920,25 \text{ lm}$)				
i/j	1	2	3	4
1	7,86	3,18	4,39	6,08
2	10,88	3,86	35,28	305,04
3	13,27	10,13	6,23	139,51
4	15,23	18,75	13,49	52,13
5	16,88	26,95	38,53	10,32
6	18,29	33,63	61,62	68,73
Общо 920,25 lm	82,40 При 80,00	96,50 lm/W	159,54 11,50 W	581,81 теор. мощност

**Оптимални светлоразпределения от тип «плосък лъч» за пътен тунел,
получени при отчитане на 5 поредни осветителя**

Получените светлоразпределения са с и без полиномно представяне на търсените интензитети при настилка клас RIII

Таблица 3.6. Интензитети в изчислително поле 5x12 м от осветители № 5, 6, 7, 8, 9 за постигане на яркост 30 cd/m^2 при пътна настилка R3, ъгъл на наблюдение $\alpha=1^\circ$ и максимален коефициент на усилване на потока $K_u=30$ (с полиномно представяне на интензитетите: $\Phi_{\text{сум}}=784,93 \text{ lm}$)

Интензитети от осветител №5				
i/j	1	2	3	4
1	3789	3976	2508	786
2	2536	2911	1899	511
3	1668	2024	1338	249
4	1054	1318	851	0

Интензитети от осветител №6				
i/j	1	2	3	4
1	3319	3820	88	0
2	3976	2764	1290	0
3	3976	2004	402	223
4	3626	1542	1118	377

Продължение на Таблица 3.6.

Интензитети от осветител №7				
i/j	1	2	3	4
1	3976	3897	3772	3563
2	3642	3406	3078	2570
3	3320	2961	2487	1825
4	3010	2558	1999	1280

Интензитети от осветител №8				
i/j	1	2	3	4
1	3974	3935	3889	3835
2	3638	3539	3424	3283
3	3321	3171	2996	2788
4	3021	2827	2607	2346

Продължение на Таблица 3.6.

Интензитети от осветител №9				
i/j	1	2	3	4
1	3976	3955	3932	3906
2	3687	3635	3577	3511
3	3412	3332	3243	3143
4	3149	3046	2930	2798

Общ поток от осветители №2+3+4+5				
i/j	1	2	3	4
1	78,35	32,98	54,37	1,92
2	66,57	23,43	309,5	1,38
3	50,32	15,78	41,09	6,80
4	34,86	10,39	49,91	7,25

Общо 230,1 82,57 454,9 17,35
785lm При 80lm/W 9,81W мощност

Таблица 3.7. Интензитети в изчислително поле 5x12 м от осветители № 5, 6, 7, 8, 9 за постигане на яркост 30 cd/m² при пътна настилка R3, ъгъл на наблюдение $\alpha=1$ и максимален коефициент на усилване на потока $K_u=30$ (без полиномно представяне на интензитетите: $\Phi_{\text{сум}}=622,94 \text{ lm}$)

Интензитети от осветител №5				
i/j	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0

Интензитети от осветител №6				
i/j	1	2	3	4
1	2728	3156	61	1488
2	3156	0	0	0
3	0	0	1618	3156
4	0	0	3156	3156

Продължение на Таблица 3.7.

Интензитети от осветител №7				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	149
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	3156

Интензитети от осветител №8				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	3156
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	3156

Продължение на Таблица 3.7.

Интензитети от осветител №9				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	3156
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	3156

Общ поток от осветители №2+3+4+5				
i/j	1	2	3	4
1	31,43	14,24	34,66	67,63
2	33,41	1,78	1,28	0,35
3	2,55	1,76	152,8	84,31
4	2,48	1,72	135,8	56,76

Общо 69,86 19,50 324,5 209,1
623lm При 80lm/W 7,79W мощност

Подходящото насочване на светодиодните модули е въпрос на инженерен усет, но може да се осъществи и чрез формулиране и решаване на оптимизационна задача: «Търсене на прободи на прожектори с различна мощност и светлоразпределение, така че резултатните светлинни потоци по участъци от пътното платно максимално да се доближават до зададените».

След изработване на светодиодните осветители и тяхното фотометриране, реалните светлоразпределения се залагат в програма за светлотехнически изчисления на тунелни осветителни уредби. Получените светлотехнически показатели (средна яркост, надлъжна и обща равномерност на яркостта, показател на заслепяване) за конкретните геометрични параметри на осветителната уредба ще позволи да се оцени степента на удовлетворяване на заложените в математическия модел ограничения.

Заклучение

Получените теоретични светлоразпределения във вид на интензитети на светлината по посока на елементарните участъци от пътното платно, както и съответстващите им светлинни потоци, позволяват светодиодни осветители да се проектират по технология, вариант на класически метод за проектиране на прожекторни осветителни уредби. За целта е необходим набор от «елементарни прожектори» с различни ъгли на разсейване и мощност на излъчване, както и програма за светлотехнически изчисления. Следва определяне на прободите

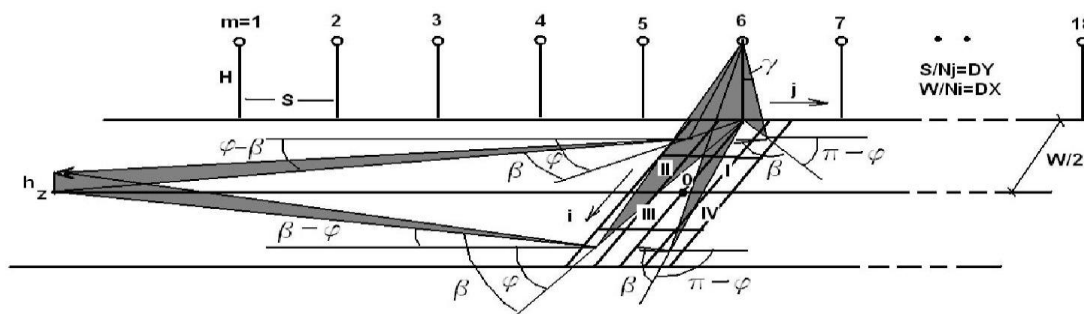
(съответно ъглите за насочване) на “елементарните прожектори” и разработване на задание за изработване на площадки за монтаж на светодиодните модули. Технологиата на изработка на осветителя трябва да осигури точно спазване на получените в процеса на проектиране ъгли на насочване, а конструкцията му - ефективно охлаждане на светодиодните модули.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА

ФИЗИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ОПТИМИЗИРАНИТЕ СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНСТРУИРАНЕ НА ОСВЕТИТЕЛИ ОТ ТИП “ПЛОСЪК ЛЪЧ” ЗА ПЪТНИ ТУНЕЛИ.

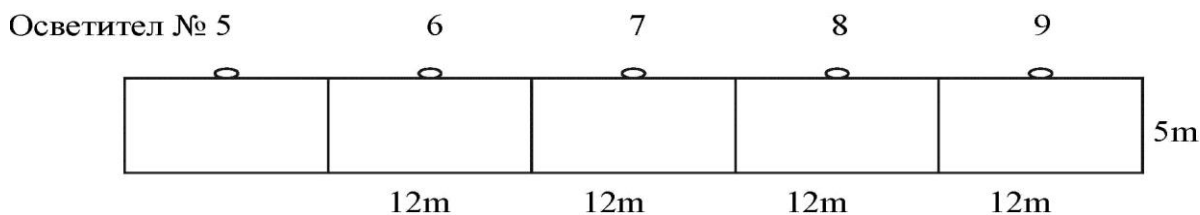
4.1. Описание на методика за физическо моделиране на светлоразпределение на осветители и резултати от използването ѝ при осветител от тип “плосък лъч”

Предлага се метод за проектиране на светодиодни осветители от тип «плосък лъч» за пътни тунели по теоретично светлоразпределение, получено чрез решаване на оптимизационна задача: “Постигане на зададени количествени и качествени показатели на тунелна осветителна уредба с минимален светлинен поток” [66]. Параметрите на математическия модел са изчислени съгласно постановката от Фиг. 4.1.



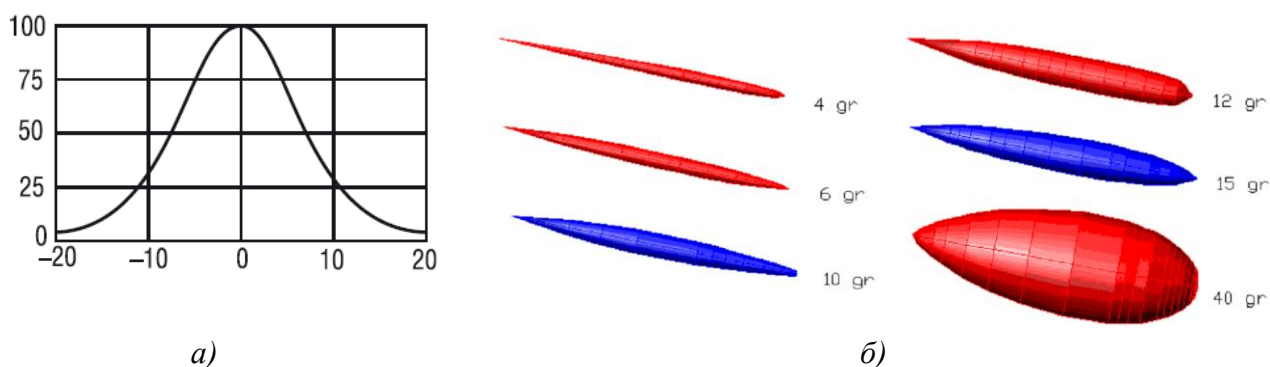
Фиг. 4.1. Постановка за изчисляване параметрите на математическия модел

Оптимизационната задача дава като решение необходимите интензитети за постигане на средна яркост 30 cd/m^2 в изчислително поле от 16 елементарни участъка към осветител №6 (Фиг. 4.1.). В случая са отчетени пет последователни осветителя /от 5 до 9/. Осветител №5 участва с нулеви стойности на интензитетите, затова не е отчетен. Тъй като целта е да се моделира светлоразпределение на един осветител, по обратен път са определени интензитетите, които осветител №9 трябва да осигури в разширено поле, включващо четири изчислителни полета по 12 м пред него (Фиг. 4.2.).



Фиг. 4.2. “Обърната” схема - четири 5x12 м полета, „облъчвани” от осветител №9

Необходимите интензитети за всяка от 4x16-те клетки на разширеното до 48 м поле са дадени в Таблица 4.1. [67]. За „облъчване” на разширеното поле с необходимите светлинни потоци се използват светодиодни модули, всеки от които осигурява необходимите интензитети по подучастъци на полето. Всеки модул се състои от светодиод и фокусираща леща, монтирани на алуминиево-полимерна подложка с форма на „шестостен”. За реализацията на конкретния осветител са използвани лещи с ъгли на разсейване 4°, 6°, 10°, 12°, 25° и 40° (при ъгъл на разсейване 40° 50% от $I_{\max}$ е при $\pm 20^\circ$). Каталогните данни на модулите светодиод-оптична леща са дадени в правоъгълни координати, при това кривата на интензитетите е в относителни единици (Фиг. 4.3. а). Абсолютната стойност на максималния интензитет се получава като се приложи методът на зоналните потоци, при известна номинална стойност на излъчения от светодиода светлинен поток. За модула светодиод-оптична леща обикновено се дава т.н. «ефективност» в относителни единици, която съответства на к.п.д. на класическите прожектори - от 0.5 до 0.7, в зависимост от концентрацията на потока. Фотометричните тела на интензитетите на светлината на използваните модули са показани на Фиг. 4.3. б).



Фиг. 4.3. Светлоразпределения на светодиод-леща 12° в правоъгълни координати (а) и на комплекти 4°, 6°, 10°, 12°, 25°, 40° в полярни координати (б)

Таблица 4.1. Интензитети в 4 полета 5x12 м от осветител №9 с $\Phi_{\text{сум}}=623 \text{ lm}$

Интензитети от осв.№9 за поле №9				
i/j	1	2	3	4
1	2728	3156	61	1488
2	3156	0	0	0
3	0	0	1618	3156
4	0	0	3156	3156

Интензитети от осв.№9 за поле №8				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	149
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	0

Продължение на Таблица 4.1

Интензитети от осв.№9 за поле №7				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	3156
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	3156

Интензитети от осв.№9 за поле №6				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	3156
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	3156

Продължение на Таблица 4.1

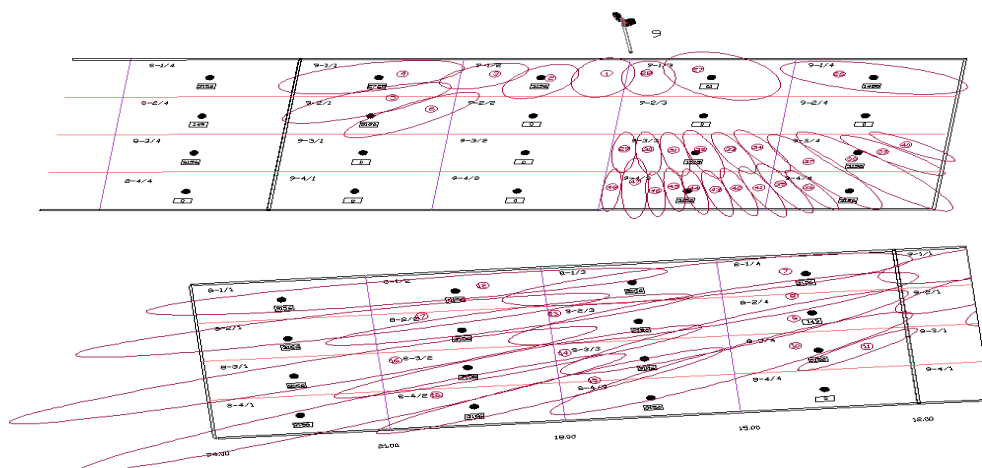
Общ поток от осветители №6+7+8+9 ($\Phi_{\text{сум}}=622,94 \text{ lm}$)				
i/j	1	2	3	4
1	31,43	14,24	34,66	67,63
2	33,41	1,78	1,28	0,35
3	2,55	1,76	152,8	84,31
4	2,48	1,72	135,8	56,76
Общо	69,86	19,50	324,5	209,1
623 lm	При 80,00 lm/W 7,79W мощност			

За конкретния случай представянето на светлоразпределението на използваните «прожектори» е в полярни координати за 1000 lm поток на светлоизточника, тъй като изчисленията се извършват с програма за прожекторно осветление, изискваща този тип входни данни (програмата позволява едновременна работа с 9 типа светлоразпределения на прожектори).

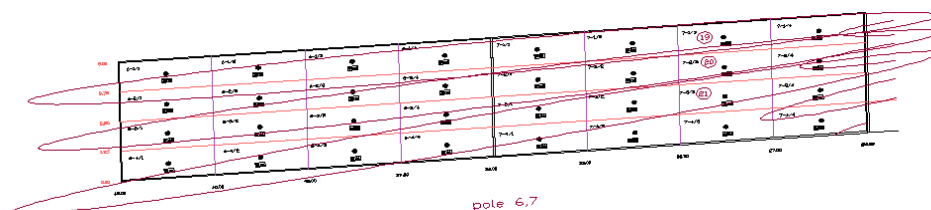
Определянето на броя на «прожекторите», ъгъла на разсейване и мястото на всеки пробод може да се получи с решаване на оптимизационна задача: «Постигане на минимална разлика между зададени и реализирани потоци по елементарни участъци в разширеното поле», като спазването на количествените и качествените показатели на уредбата е «осигурено» от ограничителните условия за получаване на оптималното светлоразпределение.

На този етап методът се илюстрира с решение, при което броят и ъглите на разсейване на „прожекторите” се определя по интуитивен път, така че разширеното поле плътно да се «насити» с «елипси», осигуряващи необходимия поток по подучастъци на разширеното поле. Конкретното насочване се свързва с определяне на мястото на пробода - необходимите интензитети формират «зададена» крива, която трябва да «препокрива» най-близката по форма крива от разполагаемия набор «прожектори». Избира се този «прожектор», с чиято крива и светлинен поток най-близко се получават изискваните интензитети за полетата, попадащи в елипсата на разглеждания «прожектор».

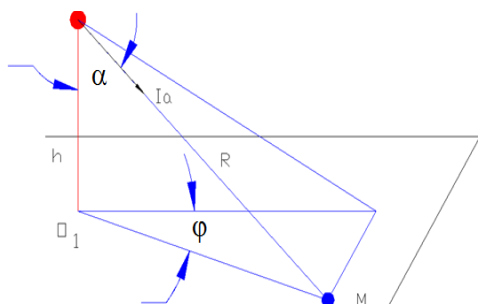
Мястото на пробода се получава от налагането на двете криви - на зададените интензитети и на най-близкия по светлоразпределение «прожектор». Тъй като този «прожектор» има принос и за потоците в по-отдалечените полета, това се отчита чрез използване на програма за прожекторно осветление [27]. Така изчислителното поле се запълва с потока на избраните «прожектори» в посока от мястото на монтажа към отдалечените участъци на полето.



Фиг. 4.5. Светлодиодни модули, насочени в полета № 9 и 8

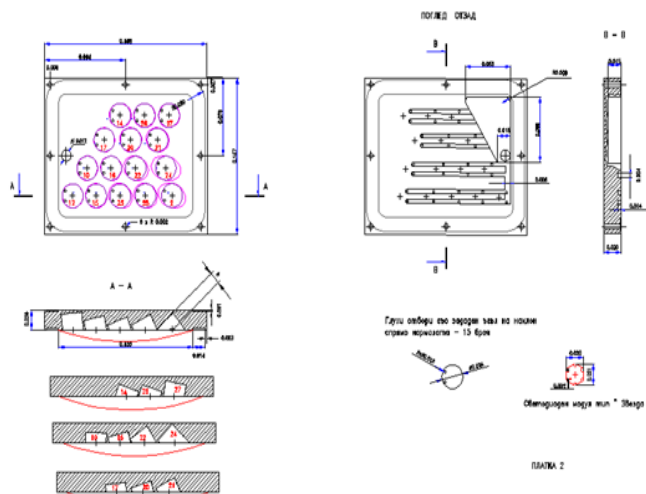


Фиг. 4.6. Светлодиодни модули, насочени в полета № 6 и 7



Фиг. 4.7. Ъгли за насочване на модулите

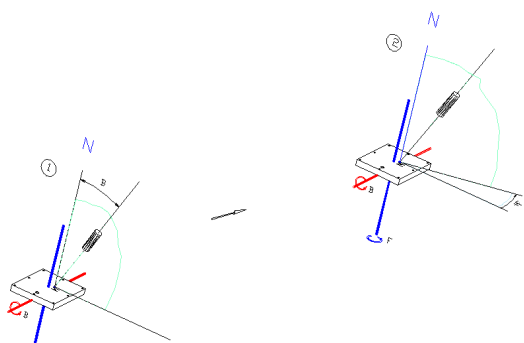
Насочването на всеки “прожектор” спрямо изчислителното поле се изразява чрез ъглите α и ϕ (Фиг. 4.7.), които са необходими за подготовка на подложките, върху които ще се закрепват светодиодните модули. Възможни са поне два варианта за изработка на площадки, върху които ще се монтират светодиодните модули: 1/ призми с достатъчен брой стени, на които се поставят “прожекторите” с близки ъгли ϕ ; 2/ върху правоъгълна плочка с дебелина около 20 мм се фрезват глухи отвори, чиито оси са насочени към предварително определения пробод в изчислителното поле (Фиг. 4.8.). Такава конструкция на оптичната система дава възможност за опростено обслужване и при необходимост безпроблемна смяна на модули, наложена от изтичане на ресурса на материала на оптичните лещи или на самите светодиоди.



Фиг. 4.8. Плочка с дебелина 20 мм с фрезовани глухи отвори за закрепване на светодиодните модули

4.2. Изработване на осветителя. Механична обработка на алуминиева плочка с дебелина 20 мм с фрезовани глухи отвори за закрепване на светодиодните модули. Монтаж и окабеляване на светодиодите

Като място за монтаж на светлинните модули е разработена специална алуминиева плочка с размери 188 x 156 мм (Фиг. 4.8.). 3D-моделът на алуминиевата плочка е прецизиран и усвоен за изработка от завода за металорежещи машини (ЗММ) гр. Смолян. Отворите за светлинните модули е възможно да се направят или с фреза, или със специализиран струг с цифрово-програмно управление. Отворите на платките /Ф24мм/ се разпробиват под ъгли, обезпечаващи насочване на светлинните снопове към зададените прободи в изчислителното поле съгласно Фиг.4.8.



Фиг. 4.15. Позиционна обработка на отворите

Всеки отвор за светлинен източник има свои собствени координати спрямо приетата координатна система на алуминиевата плочка и съответно ъгли на завъртане на режещия инструмент В и F, съгласно Фиг. 4.15. С необходимите координати и ъгли, получени по времето на проектиране на осветителя, се изработва програма, която управлява металорежещата машина до цялостната изработка на алуминиевата плочка.

3D моделът на реално изработената алуминиева плочка може да се види Фиг. 4.17.



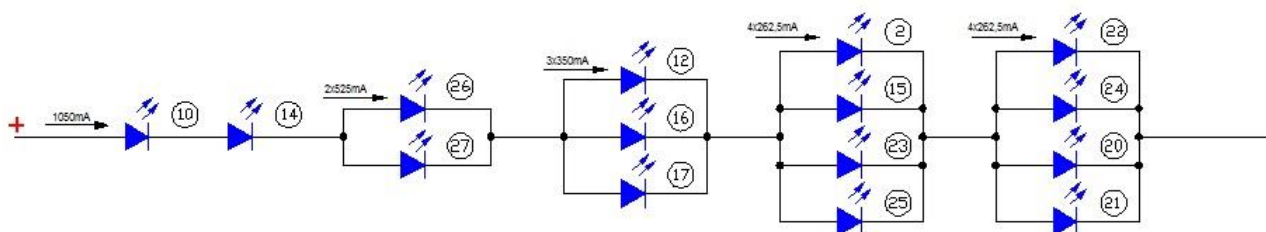
Фиг. 4.17. Реално изработена алуминиева плочка с монтирани светодиоди



Фиг. 4.18. Вторична оптика на светодиодите с 6 и 10 градусови леци

За вторична оптика на светодиодите са използвани леци с ъгли на разсейване 6 и 10 градуса – 11бр. 6 градусови леци и 4бр. 10 градусови леци. От използваните 11бр. 6 градусови леци, 5 бр. са заложили по проект да са 4 градусови, но поради невъзможност за закупуване и доставка на 4 градусови леци, същите са заменени с 6 градусови. Това до известна степен променя първоначалния дизайн на осветителя и допринася за недостатъчно прецизно насочване на светлината, което от своя страна позволява излъчване на светлина над 88 градуса.

Схемата на свързване на захранването на светлинните модули, обезпечаваща и допълнително регулиране на потока, е дадена на Фиг.4.20.



Фиг. 4.20. Електрическа схема на свързване на светодиодите

Използвани са светодиоди CREE с мощност 1W и 3W. Светодиоди с номера 10, 14, 26 и 27 са с мощност 3W, която се получава при ток 1050mA, а светодиоди с номера 12, 16, 17, 2, 15, 23, 25, 22, 24, 20 и 21 са с мощност 1W, която се получава при ток 350mA. Така общата мощност на целия осветител е:

$$P_{\text{осв.}} = 1 * 3W + 1 * 3W + 2 * \frac{3W}{2} + 3 * \frac{1W}{3} + \left(4 * \frac{1W}{4} + 4 * \frac{1W}{4} \right) * \frac{262,5}{350} = 3W + 3W + 3W + 1W + 2W * 0,75 = 11,5W$$

Захранването на разработения осветител е изпълнено с компактен, импулсен захранващ блок от серия APC на Meanwell, който осигурява постоянен изходен ток (Constant Current - С.С.). Номиналните характеристики на токовия драйвер са:

- вход: 90÷264VAC; - изход: 1050mA, 11÷33V; - мощност до 35W.

Токвият драйвер и клемите, използвани за електрическите връзки на светодиодите (съгласно *Фиг. 4.20.*), са поместени в клемна кутия, прилежаща към осветителя. Общ вид на готовия осветител е показан на *Фиг. 4.21.*



Фиг. 4.21. Общ вид на разработения осветител от тип "Flat Beam" за входната и преходната зони на пътен тунел

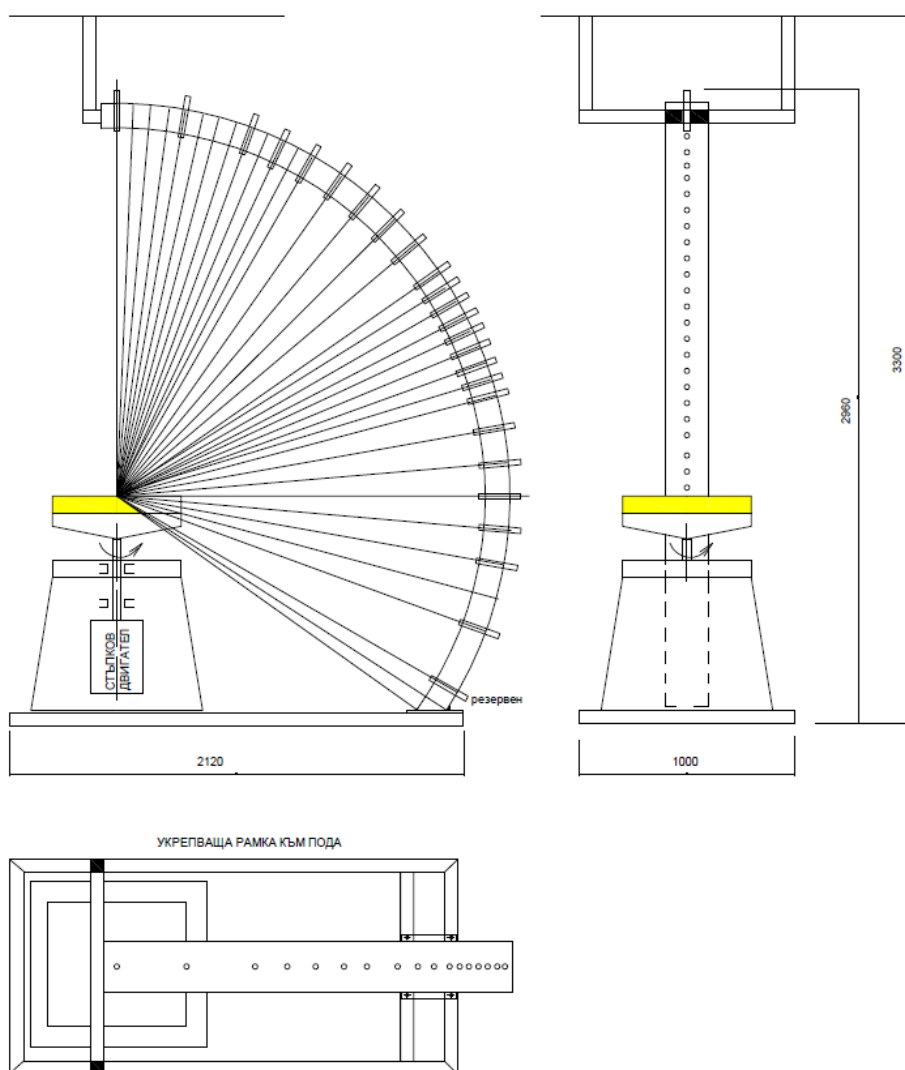
4.3. Конструирание на телецентричен фотометър. Фотометриране на опитните образци, корекции на оптичните системи и окончателна доработка

4.3.1. Механична конструкция и геометрии на измерване

На *Фиг. 4.23.* е показана механичната конструкция на разработения телецентричен фотометър. Фотометърът заема площ 2,5 м² (2,5 x 1 м) в единия ъгъл на учебна лаборатория, като измерванията по γ са ограничени от 0 до 120 градуса, заради наличната височина на помещението (3 м). При измерване по γ от 0 до 90 градуса е достатъчна височина на помещението 2,4 м.

На специална гредка във вид на дъга, избиращелно в 24 от 61 отвората са закрепени яркомери, измерващи 24 стойности на яркостта на осветителя, докато той се върти около оста си за промяна на полуравнините "С". Яркомерите са насочени към оптичния център на осветителя ($\gamma=0$ е към яркомер №1). Усиленият сигнал на всеки яркомер се измерва

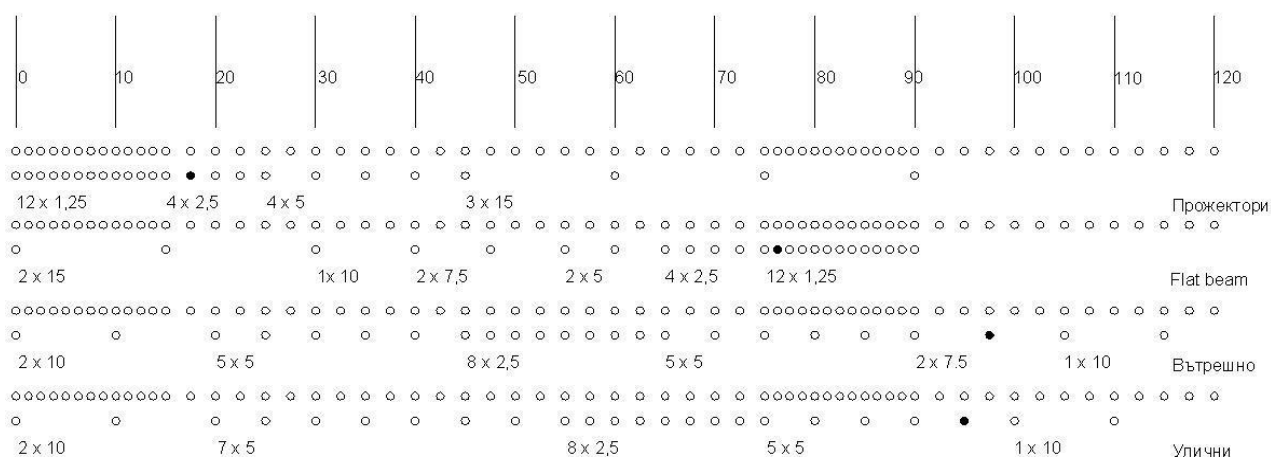
последователно чрез 12-битов аналого-цифров преобразувател и резултатът се записва в паметта на микропроцесорна система за измерване и управление.



Фиг. 4.23. Механична конструкция на разработения телецентричен фотометър

Времето за измерване на светлоразпределението на осветителя е функция на скоростта на въртене по ъгъл “С”, което се осъществява посредством двигател и редуктор. Двигателят може да бъде както асинхронен, така и стъпков. В конкретното изпълнение се използва стъпков двигател за намаляване времето на фотометриране. При уличен или тунелен осветител тип "плосък лъч" максималният брой измерени стойности е $52 \times 24 = 1248$ (52 “С” – равнини, всяка с по 24 стойности по γ).

По ъгъл γ са възможни четири варианта за измерване на “типични” светлоразпределителни криви (Фиг. 4.24.): а) СРК на прожектори; б) СРК на осветители тип “плосък лъч”; в) СРК на осветители за вътрешно осветление; г) СРК на улични осветители. Черните точки показват наличие на рид-контакт, по който, ако в отвора има яркомер, програмата автоматично разпознава мрежата за фотометриране и прилага съответстващата обработка на резултатите от измерването.



Фиг. 4.24. Четири варианта за измерване на “типични” СРК

4.3.5. Изработка на фотометъра

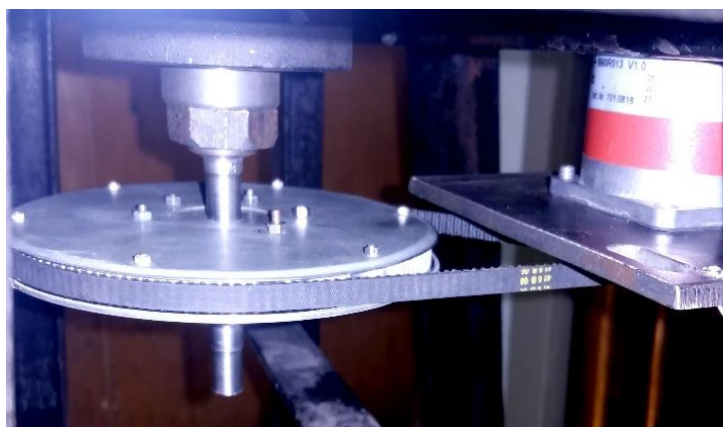
Механичната конструкция на фотометъра е усвоена за производство от учебния експериментален завод на Технически университет - София.

Поетапно са изрязани всички елементи от специалната дъгообразна гредка, според изискването за измерване на различни видове осветители, съгласно Фиг. 4.24., с последващо сглобяване, заваряване и боядисване.

Докомплектовката на механичната част на фотометъра е направена в катедрите „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“ и „Електрически машини“. Разработена и произведена е специална фотометрична „маса“, с която може да се изменят измервателните S равнини на изследвания осветител. За целта е избран подходящ стъпков двигател, окомплектован с всички необходими елементи за предаване на въртеливото движение към подвижната част на фотометричната маса (вж. Фиг. 4.28. и Фиг. 4.29.).



Фиг. 4.28. Фотометрична маса за изменение на S равнините



Фиг.4.29. Електрозадвигване чрез стъпков двигател

Общ вид на фотометъра към момента на завършване на дисертационния труд е показан на Фиг. 4.32., 4.33., 4.34.



Фиг. 4.32. Общ вид на фотометъра за измерване на светодиодни осветители



Фиг. 4.33. Дъгообразна греда с монтирани яркомери



Фиг.4.34. Фотометрична маса с изпитван осветител

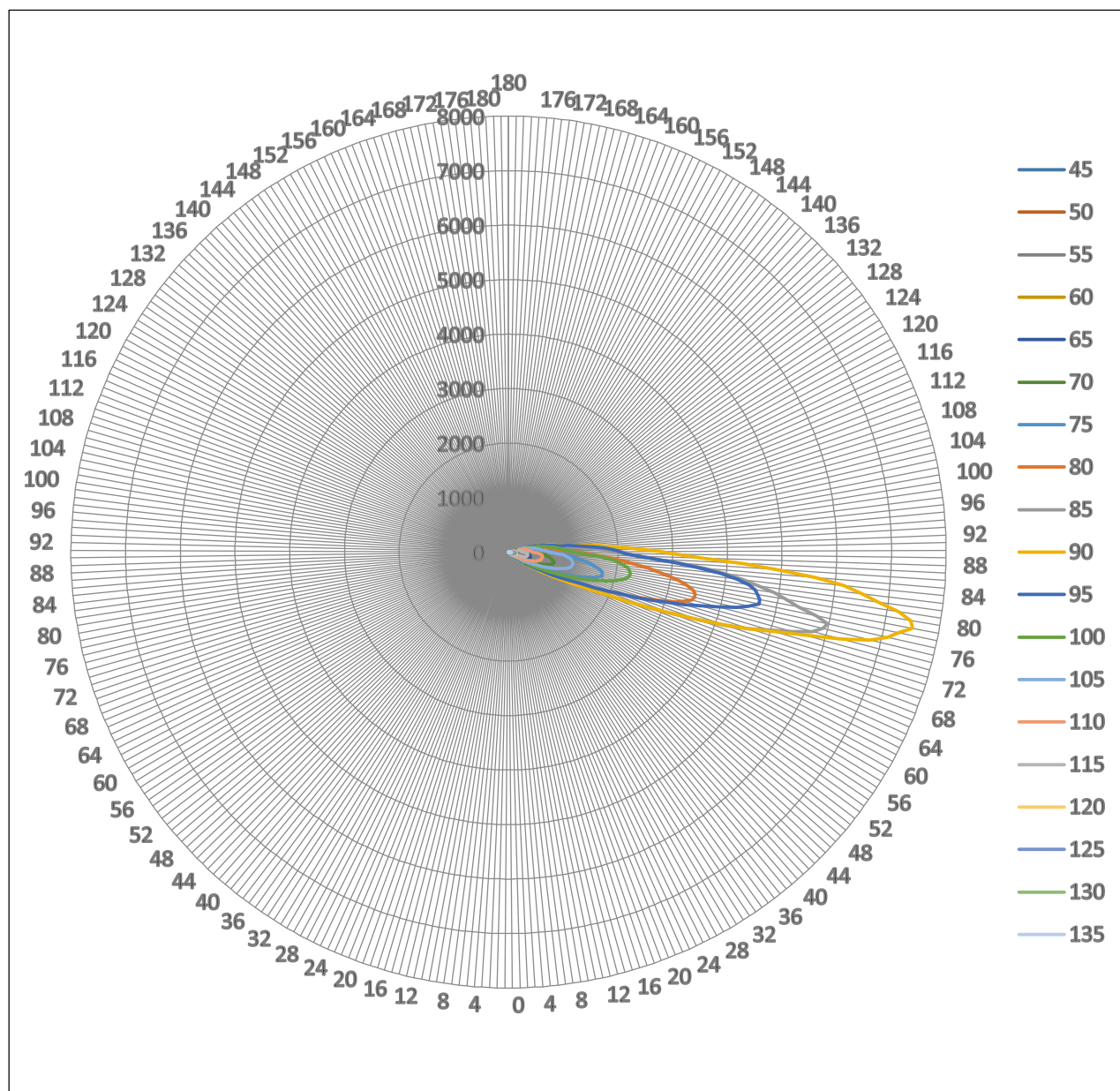
Фотометърът може да функционира в ръчен режим. Предстои разработване на програмно осигуряване за провеждане на измервания в автоматичен режим. Също така предстои разработване на методики за работа с фотометъра и за оценка на грешките от измерването. Ще бъдат направени сравнителни анализи за получените резултати от разработения фотометър и фотометърът на лаборатория НИИКЛ “Осветителна техника” към ТУ София. Всички предстоящи работи не са предмет на настоящия дисертационен труд

4.4. Резултати от фотометрирането, корекции на оптичните системи и окончателно оформяне

Разработеният и произведен LED осветител от тип „Flat beam” е измерен на фотометъра в лаборатория НИИКЛ “Осветителна техника” към ТУ София.

Измерването на осветителя е направено от $C45$ до $C135$ градуса, като максималният интензитет се получава при $C=90$ градуса и $\gamma=79$ градуса. $C0$ е в посока на движението при дясно разположен осветител. Ориентацията на осветителя $Z=90$ градуса в Диалукс отговаря на завъртане на $C0$ на -45 градуса (положителна посока се приема движението по часовата стрелка при поглед отгоре). Ориентацията на осветителя $Z=100$ градуса отговаря на завъртане на равнината $C0$ на -55 градуса (максимумът отива на -145 градуса спрямо посоката на движението), за което положение ще се правят изчисленията.

Светлоразпределението на разработения осветител е представено на Фиг. 4.36..



Фиг. 4.36. Светлоразпределителна крива (СРК) на изпитвания осветител

Поради използване на лещи с по-голямо разсейване (вместо лещи с ъгъл на разсейване 4 градуса са използвани такива с 6 градуса ъгъл на разсейване), част от потока се излъчва над $\gamma=88$ градуса, което е недопустимо заради заслепяването. Излъчването над $\gamma=88$ градуса трябва да се „изреже“.

Възможни варианти за „изрязване“ на излъчването над 88 градуса, което е причинено от използването на реални лещи с ъгъл на разсейване 6 градуса, вместо заложените при конструиране 4 градусови лещи, са:

1. Наклоняване на осветителя „надолу“. Тази мярка ще има ограничен ефект при намаляване на заслепяването. За увеличаване на ефекта и допълнително намаляване на заслепяването ще трябва и екраниране на осветителя с козирка. Тази мярка ще има следния недостатък – губи се ефективност от облъчване на „далечните“ полета, които допринасят много за огледалното отражение на настилка при ъгъл, съизмерим с ъгъла на наблюдение, което е основното предимство на технологията „плосък лъч“.
2. Конструиране на приспособление, тип „рефрактор“, осигуряващо отклоняване на „паразитния“ заслепяващ поток към стените на тунела, тъй като и те трябва да имат

яркост, съизмерима на яркостта на пътното платно (на два метра от височината на стените.)

Допълнително трябва да се има предвид, че при светлотехнически изчисления със стандартни програми като Диалукс, необходимите стойности на яркостта за далечните полета може и да не се получат, тъй като при малките ъгли, стандартните светлотехнически програми нямат стойности за отражението на настилка – стандартните програми имат яркостни фактори до 12Н, докато при програмите за „плосък лъч“ те трябва да са до 28Н.

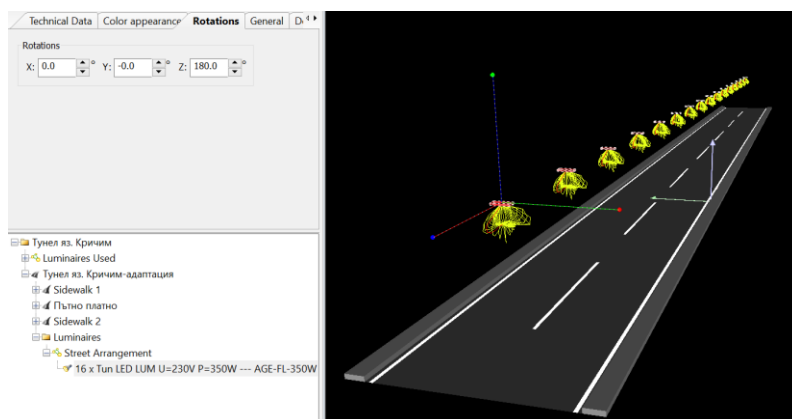
4.5. Разработване на типови решения за прилагане на осветителите за пътни тунели. Техничко-икономическа обосновка на решенията

4.5.2. Техничко-икономически сравнения на вариантите

Проектните решения са направени на базата на пътен тунел при язовир Кричим, разположен на главен път III-866 „Михалково - Кричим“.

ВАРИАНТИ на осветителни уредби, с които е възможно постигането на желаните яркости в тунела:

I ВАРИАНТ - решение със симетрични осветители, LED 360W, монтирани на 5.4 м по тавана над осевата линия



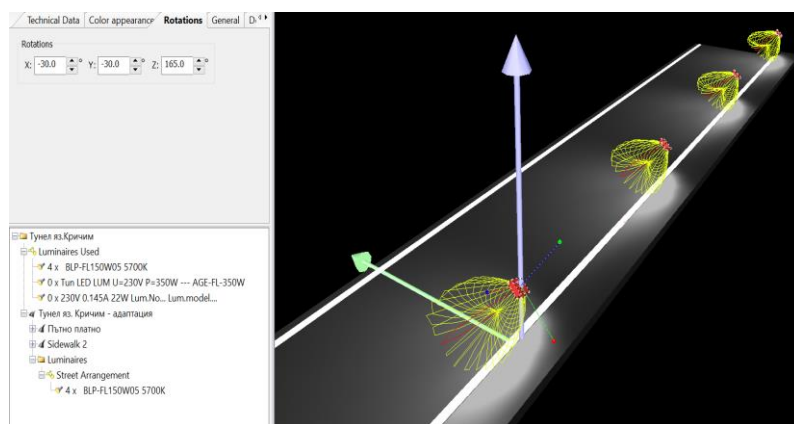
Фиг. 4.39. Геометрия на пътя и насочване на избрания осветител при Вариант I

II ВАРИАНТ - решение с $1/4 L_{th}$ от симетрични осветители, LED 360W, 240W, 150W, 90W на 5.4 м по тавана над осевата линия + $3/4 L_{th}$ от асиметрични осветител, LED 150W на 1.1 м по стената

$1/4 L_{th}$ от симетрични осветители, LED 360W, 240W, 150W, 90W на 5.4 м по тавана над осевата линия

+

$3/4 L_{th}$ от асиметрични осветител, LED 150W, 100W на 1.1 м по стената



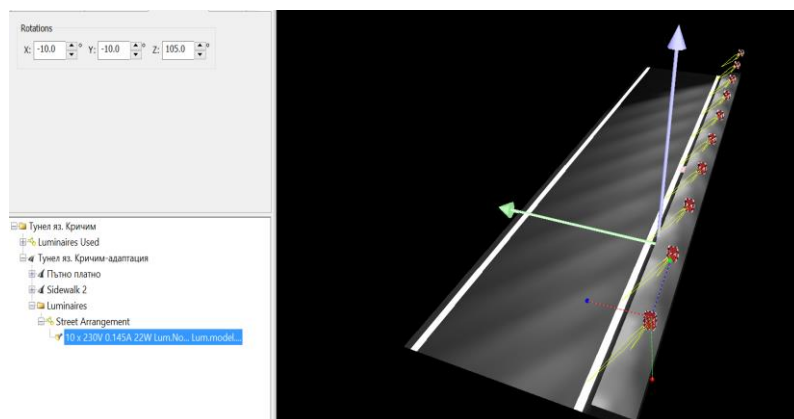
Фиг. 4.40. Геометрия на пътя и насочване на избрания осветител при Вариант II – $3/4L_{th}$

III ВАРИАНТ - решение с $1/4 L_{th}$ от симетрични осветители, LED 360W, 240W, 150W, 90W на 5.4 м по тавана над осевата линия + $3/4 L_{th}$ от осветител „плосък лъч“, LED 16W, 8W, 4W на 1.1 м по стената

$1/4 L_{th}$ от симетрични осветители, LED 360W, 240W, 150W, 90W на 5.4 м по тавана над осевата линия

+

$3/4 L_{th}$ от осветител „плосък лъч“, LED 16W, 8W, 4W на 1.1 м по стената



Фиг. 4.41. Геометрия на пътя и насочване на избрания осветител при Вариант III – $3/4L_{th}$

4.5.3. Резултати. Икономическа обосновка на решенията

При годишна използваемост на степените осветление на тунела, съответстваща на работата на групите осветители съгласно Таблица 4.9.,

Таблица 4.9. Годишна използваемост на четирите степени на осветителната уредба

Степен %	Часове работа на степен	Годишна използваемост, %	Раб. група осветители	Тежаст на гр.	Раб. група1	Раб. група2	Раб. група3	Раб. група4
25	2300	50,0%	1	25%	1	0	0	0
50	1400	30,4%	2	25%	1	1	0	0
75	700	15,2%	3	25%	1	1	1	0
100	200	4,3%	4	25%	1	1	1	1
	4600	100%			4600	2300	900	200

се получават следните резултати:

I ВАРИАНТ - решение със симетрични осветители, LED 360W, монтирани на 5.4 м по тавана над осевата линия

Таблица 4.10. Резултати Вариант I

ГРУПА ОСВ.	БР.	М-ст, W	М-ст, %	Год. използв., ч.	Необх. енергия, kWh/year	Год. използв., %	Инстал. м-ст, W	Ед. цена, лв./W	Инвестиция, лв. (PP)
ДНЕВНО ДЕЖУРНО	6	150	100%	4600	4140		900	3	2700
НОЩНО ДЕЖУРНО	6	150	67%	4160	2508				
0-25%		12240	25%	2300	7038	50,0%	12240	3	36720
25-50%		12240	50%	1400	8568	30,4%			
50-75%		12240	75%	700	6426	15,2%			
75-100%		12240	100%	200	2448	4,3%	PP*, лв.		39420
ОБЩО				4600	31128	100%	30% монтаж, лв.		11826
% СПРЯМО МАКС.		13140	100,00%	4600	60444	51,5%	PP, лв.		51246

Таблица 4.11. Резултати Вариант I - продължение

Средна цена енергия:		0,25 лв./kWh						
Лихва Γ =		0,06						
Продължителност на кредита Tkredit:		5 год.						
Пълна продължителност на работа на уредбата Tur:		25 год.						
Стойност на кредита, C_A	Цена на енергията, C_{EN}	Цена на експл. C_{MAINT}	Год. C_A+OE , до Ткр.	Год. C_A+OE , след Ткр.	C_A+OE , за Ткр.	C_A+OE , за Tur-Tкр.	LCC, за Tur	Среден разход, LLC/Tur
BGN/year	BGN/year	BGN/year	BGN/year	BGN/year	BGN	BGN	BGN	BGN/year
12166	7782	2050	21998	9832	109989	196642	306631	12265
		4,00 %						
60828 лв. - Върната сума на Банката								
9582 лв. - Платени лихви на Банката по кредита								

II ВАРИАНТ - решение с $1/4 L_{th}$ от симетрични осветители, LED 360W, 240W, 150W, 90W на 5.4 м по тавана над осевата линия + $3/4 L_{th}$ от асиметрични осветител, LED 150W на 1.1 м по стената

Таблица 4.12. Резултати Вариант II

ГРУПА ОСВ.	БР.	М-ст, W	М-ст, %	Год. използв., ч.	Необх. енергия, kWh/year	Год. използв., %	Инстал. м-ст, W	Ед. цена, лв./W	Инвестиция, лв. (PP)
ДНЕВНО ДЕЖУРНО	6	150	100%	4600	4140		900	3	2700
НОЩНО ДЕЖУРНО	6	150	67%	4160	2508		3570	1	3570
0-25%		10000	25%	2300	5750	50,0%	10000	3,75	37500
25-50%		10000	50%	1400	7000	30,4%			
50-75%		10000	75%	700	5250	15,2%			
75-100%		3570	100%	200	714	4,3%	PP*, лв.		43770
ОБЩО				4600	25362	100%	20% монтаж, лв.		8754
% СПРЯМО МАКС.		14470	100%	4600	66562	38,1%	PP, лв.		52524

Таблица 4.13. Резултати Вариант II- продължение

Средна цена енергия:		0,25 лв./kWh						
Лихва r=		0,06						
Продължителност на кредита Tkredit:		5 год.						
Пълна продължителност на работа на уредбата Tur:		25 год.						
Стойност на кредита, C _A	Цена на енергията, C _{EN}	Цена на експл. C _{MAINT}	Год. C _A +OE, до Ткр.	Год. C _A +OE, след Ткр.	C _A +OE, за Ткр.	C _A +OE, за Tur- Tkr.	LCC, за Tur	Среден разход, LLC/Tur
BGN/year	BGN/year	BGN/year	BGN/year	BGN/year	BGN	BGN	BGN	BGN/year
12469	6341	2050	20860	8391	104298	167812	272111	10884
		3,90%						
62345 лв. - Върната сума на Банката								
9821 лв. - Платени лихви на Банката по кредита								

III ВАРИАНТ - решение с 1/4 L_{th} от симетрични осветители, LED 360W, 240W, 150W, 90W на 5.4 м по тавана над осевата линия + 3/4 L_{th} от осветител „плосък лъч“, LED 16W, 8W, 4W на 1.1 м по стената

Таблица 4.14. Резултати Вариант III

ГРУПА ОСВ.	БР.	М-ст, W	М-ст, %	Год. използв., ч.	Необх. енергия, kWh/year	Год. използв., %	Инстал. м-ст, W	Ед. цена, лв./W	Инвестиция, лв. (PP)
ДНЕВНО ДЕЖУРНО	6	150	100%	4600	4140		900	3	2700
НОЩНО ДЕЖУРНО	6	150	67%	4160	2508		3570	1	3570
0-25%		612	25%	2300	352	50,0%	612	15	9180
25-50%		612	50%	1400	428	30,4%			
50-75%		612	75%	700	321	15,2%			
75-100%		3570	100%	200	714	4,3%	PP*, лв.		15450
ОБЩО				4600	8464	100%	50% монтаж, лв.		7725
% ПРЯМО МАКС.		5082	100%	4600	23377	36,2%	PP, лв.		23175

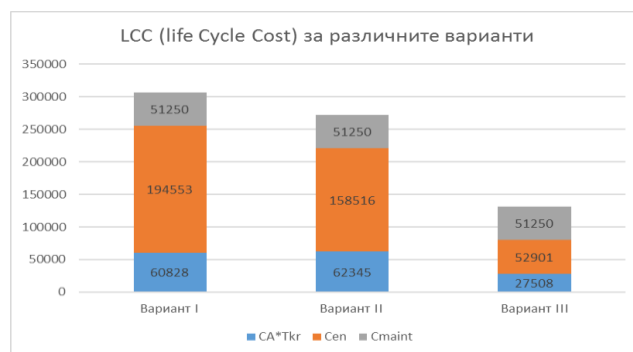
Таблица 4.15. Резултати Вариант III- продължение

Средна цена енергия:		0,25 лв./kWh						
Лихва r=		0,06						
Продължителност на кредита T _{credit} :		5 год.						
Пълна продължителност на работа на уредбата T _{ur} :		25 год.						
Стойност на кредита, C _A	Цена на енергията, C _{EN}	Цена на експл. C _{MAINT}	Год. C _A +OE, до Ткр.	Год. C _A +OE, след Ткр.	C _A +OE, за Ткр.	C _A +OE, за T _{ur} -T _{kr} .	LCC, за T _{ur}	Среден разход, LLC/T _{ur}
BGN/year	BGN/year	BGN/year	BGN/year	BGN/year	BGN	BGN	BGN	BGN/year
5502	2116	2050	9668	4166	48338	83320	131659	5266
		8,84%						
27508 лв. - Върната сума на Банката								
4333 лв. - Платени лихви на Банката по кредита								

Обобщение на получените резултати е направено в Таблица 4.16. и на графиката от Фиг. 4.42..

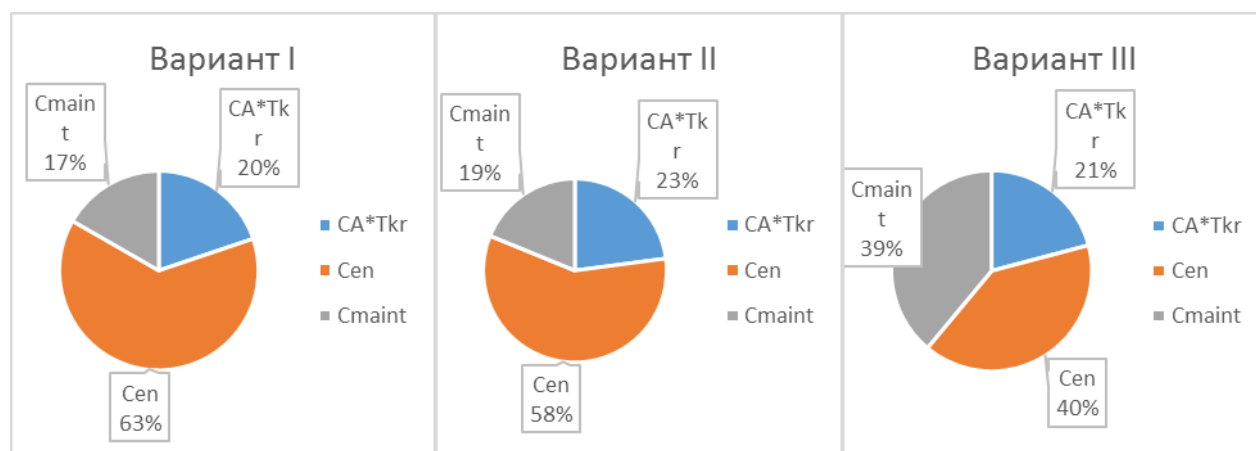
Таблица 4.16. Обобщени резултати Вариант I, II, III

№ Вариант	C _A *T _{kr} , BGN	C _{en} , BGN	C _{maint} , BGN	LCC за T _{ur} , BGN	Среден разход, LCC/T _{ur} , BGN/year
Вариант I	60828	194553	51250	306631	12265
Вариант II	62345	158516	51250	272111	10884
Вариант III	27508	52901	51250	131659	5266



Фиг. 4.42. Обобщени резултати Варианти I, II и III

Процентно съотношение на различните съставни части на LCC за различните варианти е показано на Фиг. 4.43., Фиг.4.44. и Фиг. 4.45..



Фиг. 4.43.

Фиг. 4.44.

Фиг. 4.45.

Изменението на средните годишни разходи за различните варианти при промяна на T_{иг} и процентно съотношение на годишните разходи за различните варианти при положение, че вариант I е приет за 100% при изменение на T_{иг}, е показано в Таблица 4.17..

Таблица 4.17. Изменение на средни годишни разходи за различно T_{иг}

T _{иг} год	Вариант I		Вариант II		Вариант III	
	лв/год	%	лв/год	%	лв/год	%
10	18990	100%	17701	93%	9991	53%
15	15254	100%	13914	91%	7366	48%
20	13386	100%	12021	90%	6053	45%
25	12265	100%	10885	89%	5266	43%

4.5.4. Изводи

От направеното изследване, могат да се направят следните изводи:

1. Основна част от разходите за пълната продължителност на работа на осветителната уредба на пътен тунел са разходите за електроенергия. Поради тази причина е целесъобразно да се търсят решения с по-малка инсталирана мощност на осветителната уредба или доставчици, предлагащи по-ниска цена на електроенергията (от свободния пазар или собствена ФВЕЦ), което може съществено да намали разходите за енергия, а от там и общите разходи;
2. Чрез използването на осветители „плосък лъч“ за осветление на входната и преходната зони на пътен тунел, може да се постигне намаляване на разходите за пълната продължителност на работа на осветителната система до 43% от разходите с конвенционални LED осветители;
3. Чрез използването на обикновени асиметрични LED осветители за осветление на входната и преходната зони на пътен тунел, които са монтирани на стената, може да се постигне намаляване на разходите за пълната продължителност на работа на осветителната система с до 11% от разходите с конвенционални LED осветители;
4. С удължаване срока на експлоатация на осветителната уредба, средните годишни разходи за осветителната уредба намаляват;
5. За по-нататъшно рационализиране на разходите за пълната продължителност на работа на осветителната уредба, може да се прецизират разходите за експлоатация на уредбите и то най-вече при варианта с използване на осветители „плосък лъч“, тъй като при тях разходите за поддръжка достигат до 39% от целия разход за осветителната уредба.
6. Използването на осветители „плосък лъч“ има бъдеще в осветлението на най-енергоемките зони на пътен тунел – входната и преходната зони.

4.6. Определяне на оптимално съотношение между класически и LED осветители при пътен тунел по критерий LCC

Класическото дневно адаптационно осветление в пътните тунели се изпълнява с 3-5 групи осветители, като при четири хранващи линии се осъществяват 4 степени на осветлението: 25, 50, 75, 100%. Те се включват по ниво на адаптационната яркост L_{20} преди тунела до получаване на яркост $L_{th} > R \cdot L_{20}$ на платното във входната зона, където $R = 0.03 \div 0.06$ зависи от категорията на тунела. Годишната часова използваемост на четирите степени за условията на България е приблизително 2300, 1400, 700, 200 часа (съответно 4600/2300/900/200 работа на всяка група) [30]. Поради все още високата цена на светодиодните тунелни осветители (приема се 3 лв/W, а за класическите 1 лв/W), различната годишна часова използваемост на четирите степени е предпоставка за намиране оптимално съотношение между групите класически и LED осветители, на база критерия ”разходи за осветление за пълната продължителност на работа на уредбата” (Life Cycle Cost).

4.6.2. Резултати от изследването

В Таблица 4.25., Таблица 4.26. и Таблица 4.27. са показани резултатите от изчисления с изложената в точка 4.5.1 методика. Определена е годишната цена на осветлението на южен портал на двупосочен тунел [84], като са отчетени разходите за пълната продължителност на работа на уредбата. Реконструкцията се извършва с краткосрочен кредит с показаните в таблицата параметри. Прието е дежурното осветление на тунела да бъде с LED осветители.

Таблица 4.25. Показатели на уредба с експлоатационен срок 25 години при извършване на реконструкция с кредит с годишен лихвен процент $r = 6\%$ и време за връщане $N = 5$ години

ДЕЖ. ОСВ. 100% LED	PP, BGN	C_A , BGN/year	C_{EN} , BGN/year	C_{MAINT} , BGN/year	Год. CA+OE, до Ткр, BGN/year	Год. CA+OE, след Ткр, BGN/year	CA+OE, до Ткр, BGN	CA+OE, след Ткр, BGN	LCC, за Тур, BGN	Среден разход, LLC/Тур, BGN/year	C_{MAINT} %PP /year.	kWh /year
0%LED	22942	5446	7309	2753	15508	10062	77542	201240	278782	11151	12%	36544
25%LED	29901	7098	6658	1794	15551	8453	77755	169051	246806	9872	6%	33292
50%LED	36860	8750	6333	1696	16779	8029	83896	160576	244473	9779	5%	31666
75%LED	43819	10402	6206	1805	18414	8011	92068	160221	252289	10092	4%	31030
100%LED	50778	12055	6178	2031	20263	8209	101317	164176	265493	10620	4%	30888

Таблица 4.26. Показатели на уредба с експлоатационен срок 20 години при извършване на реконструкция с кредит с годишен лихвен процент $r = 6\%$ и време за връщане $N = 5$ години

ДЕЖ. ОСВ. 100% LED	PP, BGN	C_A , BGN/year	C_{EN} , BGN/year	C_{MAINT} , BGN/year	Год. CA+OE, до Ткр, BGN/year	Год. CA+OE, след Ткр, BGN/year	CA+OE, до Ткр, BGN	CA+OE, след Ткр, BGN	LCC, за Тур, BGN	Среден разход, LLC/Тур, BGN/year	C_{MAINT} %PP /year.	kWh /year
0%LED	22942	5446	7309	3441	16197	10750	80983	161254	242237	12112	15%	36544
25%LED	29901	7098	6658	2243	16000	8901	79998	133516	213513	10676	8%	33292
50%LED	36860	8750	6333	2119	17203	8453	86016	126790	212806	10640	6%	31666
75%LED	43819	10402	6206	2256	18865	8462	94324	126935	221259	11063	5%	31030
100%LED	50778	12055	6178	2539	20771	8717	103856	130749	234604	11730	5%	30888

Таблица 4.27. Показатели на уредба с експлоатационен срок 15 години при извършване на реконструкция с кредит с годишен лихвен процент $r=6\%$ и време за връщане $N=5$ години

ДЕЖ. ОСВ. 100% LED	PP, BGN	C_A , BGN/year	C_{EN} , BGN/year	C_{MAINT} , BGN/year	Год. CA+OE, до Ткр, BGN/year	Год. CA+OE, след Ткр, BGN/year	CA+OE, до Ткр, BGN	CA+OE, след Ткр, BGN	LCC, за Тур, BGN	Среден разход, LLC/Тур, BGN/year	C_{MAINT} %PP /year.	kWh /year
0%LED	22942	5446	7309	4588	17344	11897	86719	118974	205693	13713	20%	36544
25%LED	29901	7098	6658	2782	16538	9440	82692	94400	177092	11806	9%	33292
50%LED	36860	8750	6333	2705	17789	9039	88945	90386	179331	11955	7%	31666
75%LED	43819	10402	6206	2971	19579	9177	97896	91768	189664	12644	7%	31030
100%LED	50778	12055	6178	3385	21617	9563	108087	95629	203716	13581	7%	30888

4.6.3. Изводи

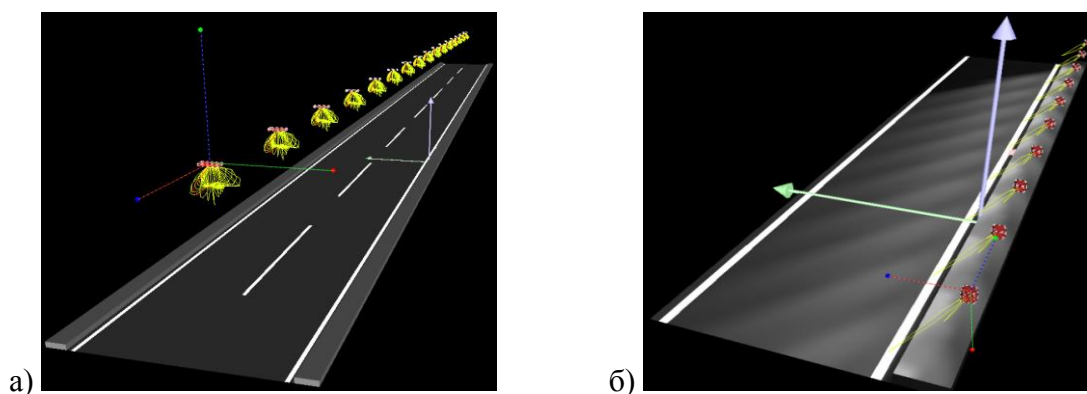
От направените разчети с цени на LED осветители 3 пъти по-големи от тези на конвенционалните осветители, могат да се направят следните изводи:

1. Независимо от срока на експлоатация, най-изгодни са варианти с 25% и 50% LED осветители;
2. При срок на експлоатация 25 г., вариантите са почти равностойни и всички степени могат да бъдат изпълнени с LED осветители.

4.7. Хибридна система за дневно адаптационно осветление на пътни тунели

Както бе отбелязано и в **точка 4.6.**, управлението на дневното осветление във входната и преходната зони на пътен тунел се осъществява по адаптационната яркост L_{20} в 20-градусово поле преди тунела, до получаване на яркост на платното във входната зона $L_{th} > R * L_{20}$, където $R=0.03 \div 0.06$ и зависи от категорията на тунела и интензивността на трафика. При зададена максимална стойност L_{20max} за годината, максималната яркост L_{th_max} на платното във входната зона обикновено се реализира от четири групи осветители. Заради комфорта при пътуване, основната група осветители (1) са класически LED осветители (*Фиг. 4.48. а*)), разположени по тавана, като с тях освен пътното платно се осветяват и стените на тунела на височина 2 м (боядисани в бяло). Останалите 3 групи осветители са от тип "плосък лъч", монтирани ниско по стените (*Фиг. 4.48. б*)). Те са около 8 пъти по-ефективни от таванните осветители и със значително по-малка единична мощност.

За географското положение на България, часовете работа за година на степен 25%, реализирана от група осветители 1, са около 2300 часа; на степен 50% - 1400 часа; на степен 75% - 700 часа; на степен 100% - 200 часа. При захранване от подходящи преобразуватели напрежение-ток трите групи осветители от тип "плосък лъч" могат да се димират плавно от проектната яркост $L_{th}=R*L_{20max}$ до яркост $L_{th}=0.25*R*L_{20max}$ [30, 90].



Фиг.4.48. Хибридна система за дневно адапционно осветление със симетрични LED осветители 360W по тавана за обезпечаване на $1/4 L_{th_max}$ (а) и LED осветители „плосък лъч“ 22 W и 11W на 1.1 м по стената за обезпечаване на $3/4 L_{th_max}$ (б)

4.7.1. Резултати от изследването

В Таблица 4.31., Таблица 4.32. и Таблица 4.33. са показани резултатите от изчисления с изложената в точка 4.5.1 методика. Определена е годишната цена на осветлението на тунела, като са отчетени разходите за пълната продължителност на работа на уредбата. Реконструкцията се извършва с краткосрочен кредит с показаните в таблицата параметри.

Таблица 4.31. Резултати за класическото решение

PP, BGN	r, %	Tur, year	C _A , BGN /year	W _A , kWh/year	e, BGN/kWh	Cen, BGN/year	LCC, BGN за Tur	LCC/Tur, BGN/year
234000	4	25	14979	187200	0,25	46800	1544470	61779

Таблица 4.32. Резултати за хибридно решение 1: степени 25/50/75/100

PP, BGN	r, %	Tur, year	C _A , BGN /year	W _A , kWh/year	e, BGN/kWh	Cen, BGN/year	LCC, BGN за Tur	LCC/Tur, BGN/year
146250	4	25	9362	117585	0,25	29396	968950	38758
* 63%						** 63%		*** 63%

Таблица 4.33. Резултати за хибридно решение 2: степени 12,5/37,5/87,5/100

PP, BGN	r, %	Tur, year	C _A , BGN /year	W _A , kWh/year	e, BGN/kWh	Cen, BGN/year	LCC, BGN за Tur	LCC/Tur, BGN/year
131300	4	25	8405	74336	0,25	18584	674717	26989
* 56%						** 40%		*** 44%

* инвестиции като процент на тези за класическа уредба

** год. разходи за енергия като процент спрямо тези за класическа уредба

*** общите год. разходи на база LCC като процент спрямо тези за клас. уредба

4.7.2. Изводи

От направения анализ могат да се направят следните изводи:

1. Новото решение („плосък лъч“) осигурява 37% намалени годишни разходи за енергия при 37% по-ниски инвестиции. При разделяне на първата група осветители на две (втората подгрупа се включва в диапазона 87,5-100% L_{th_max}) и при запазване на броя на осветителите „плосък лъч“, прегрупирани като втора и трета група, горните съотношения са по-благоприятни и решението осигурява 60% намалени годишни разходи за енергия при 44% по-ниски инвестиции. Общите годишни разходи за осветление, изчислени на база продължителността на работа на уредбата, са с 56% по-малки;
2. Ниско разположените по стените осветители имат по-лесна експлоатация, което намалява разходите за почистване и смяна на осветители;

ГЛАВА ПЕТА

ЕНЕРГИЙНО ЕФЕКТИВНИ РЕШЕНИЯ ЗА ОСВЕТЛЕНИЕ И ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕ НА ПЪТНИ ТУНЕЛИ.

5.1. Основни методи за рационализиране на разходите за осветление на пътни и градски тунели

Намаляването на експлоатационните разходи за тунелното осветление основно се свързва с намаляване консумацията на електроенергия чрез прилагане на ефективни светлинни източници и оптични системи [28, 66, 67, 68], рационално управление на осветлението [76, 39, 75], а напоследък и с използване на локални фотоволтаични станции за електрозахранване на осветителната уредба през деня [71].

С прилагането на тези мерки трикратно се намалява консумацията на енергия за осветление, която се покрива от сравнително малки фотоволтаични станции, имащи максимална производителност, когато консумацията на осветлението е най-висока.

Проектно решение

За извършване на анализа се разглежда пътен тунел в гр. Смолян - среден по дължина градски тунел (430 м), проектиран през 2001 г. с класическа уредба с НЛВН. Заложеното управление на дневното адаптационно осветление е на пет степени, комбинация от включване на пет групи осветители чрез контактори от 1 до 5.

Същност на разработката

В конкретния тунел са използвани следните мерки за намаляване на разходите за изкуствено осветление:

1. Дежурното осветление ще се изгради с класически светлодиодни осветители, които поради по-ефективните оптични системи имат по-висок коефициент на използване на потока, при което изискванията за осветяване на платното и стените на тунела се покриват с 1/3 по-малка мощност от осветителите с НЛВН.
2. Дневното адаптационно осветление е рационално да се изпълни със светлодиодни осветители тип „плосък лъч“, осигуряващи добро използване на отражателните характеристики на пътното покритие – при тях ъглите на падане на светлината са съизмерими с ъгъла на наблюдение на пътя, при което с много по-малък поток се постига 2-3 пъти по-голяма яркост на настилката, съответно мощността на адаптационното осветление се намалява трикратно [68].

3. Чрез използване на параметрични преобразуватели за константен ток [77, 78, 30] се осигурява плавно димиране на светодиодните осветители и рационално адаптивно управление [75], заради приетия експлоатационен фактор MF. Възможно е и прилагане на технологията Constant Light Output (CLO-осветители), като по-големите инсталирани мощности се използват пропорционално на остаряването на уредбата.

4. Проектирана е локална фотоволтаична електрозахранваща станция, позволяваща намаляване на разходите за осветление на тунела, поради възможността да продава енергия на енергийната система или на общински обекти [71].

5.1.1. Тунелни осветители “плосък лъч” с оптимално светлоразпределение

Решена е оптимизационна задача с целева функция: “Постигане на зададени количествени и качествени показатели на тунелна осветителна уредба с минимален светлинен поток”. Ограничения на модела са нормените показатели на уредбата - обща и надлъжна равномерност на яркостта, показател на заслепяване, показател на контраста на осветлението и яркост на стените на тунела. Проблемът е формулиран като задача на линейното програмиране [28, 66, 67]. Получените теоретични светлоразпределения във вид на интензитети на светлината по посока на елементарните участъци от пътното платно, както и съответстващите им светлинни потоци, позволяват светодиодните осветители да се проектират по технология [68], вариант на класически метод за проектиране на прожекторни осветителни уредби - чрез набор от «елементарни прожектори» с различни ъгли на разсейване и мощност на излъчване, използвайки програма за прожекторно осветление. Чрез определените «прободи» (база за получаване на ъглите за насочване) на «елементарните прожектори» са получени площадките за монтаж на светодиодните модули с вторична оптика. Технологията на изработка на осветителя осигурява точно спазване на получените в процеса на проектиране ъгли на насочване, а конструкцията му - ефективно охлаждане (Фиг. 5.1.).



а)

б)

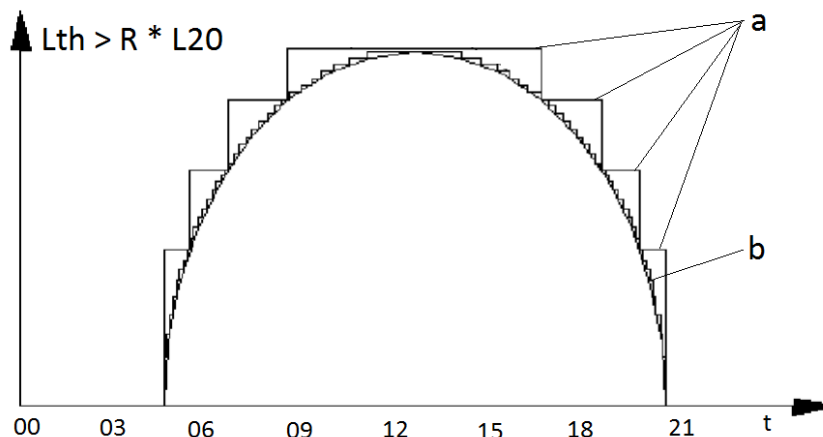
Фиг. 5.1. Снимка на разработения осветител “плосък лъч” (а) с мощност 28W (3640 lm) и свързване на светодиодите на „елементарните прожектори“ (б)

5.1.2. Групово димиране на светодиодните осветители с параметрични преобразуватели за константен ток [77]

Икономически най-изгодно е управлението на дневното тунелно осветление да се осъществява с един димируем токов кръг [76, 39, 75], като останалите токови кръгове се включват по ниво на адаптационната яркост преди навлизане в тунела - димируемият токов кръг постоянно ги допълва до необходимата яркост на платното във входната зона [5]:

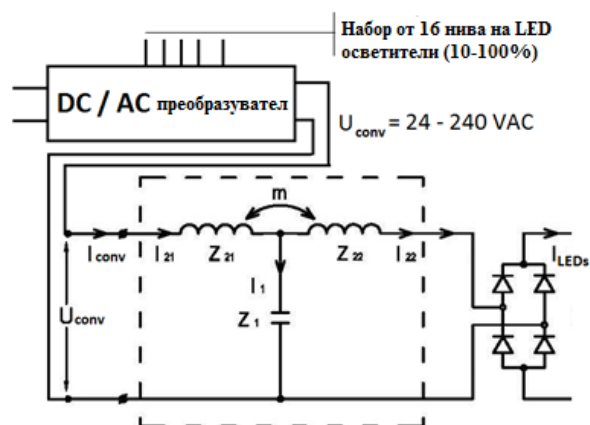
$$(5.1) \quad L_{th} = R \cdot L_{20}$$

Така повечето осветители се захранват от стандартни драйвери, а само едната група осветители е с групово димиране (Фиг. 5.2.).



Фиг. 5.2. Степенно управление на дневното осветление с 4 групи осветители (a) и „плавно“, ако едната от тях се димира на 8 или 16 стъпки (б). Спестената енергия е пропорционална на площта между двете начупени линии

Заради надеждност и простота, за захранване на димируемите осветители се използва групов променливотоков преобразувател напрежение-ток, изграден с дросели и кондензатори (Фиг. 5.3.). Размерът на такъв преобразувател се намалява значително, ако се работи на повишена честота. Тъй като товарът на осветителите е за постоянен ток, преобразувателят напрежение-ток е с двупътен токоизправител на изхода си.



Фиг. 5.3. Управляем DC/AC инвертор и серийно захранване на 8-10 осветителя „плосък лъч“ от параметричен преобразувател напрежение-ток [79]

При константно променливо напрежение на входа на преобразувателя напрежение-ток, токът на изхода е константен, т.е. за регулиране на тока през осветителите. Специално

конструирания DC/AC преобразувател трябва да осигурява различни константни напрежения, съответстващи на зададените стойности на тока към светодиодните осветители (обикновено 8 или 16 стойности) - DC/AC преобразувателят се захранва от общите шини за постоянно напрежение на ФВС. Напрежението на изхода на токоизправителя е функция на броя последователно включени светодиодни осветители.

Предимство на този начин на захранване е, че при късо съединение на изхода, консумираният ток от DC/AC преобразувателя е близък до нула. Недостатък на разглежданото решение е наличието на пулсации на потока на осветителите, поради еднофазно двупътно изправяне на тока (при DC/AC преобразувател с мрежова честота). Пулсациите се намаляват до няколко процента при използване на трифазен преобразувател напрежение-ток, с трифазен двупътен токоизправител на изхода (Фиг. 4.13.). Това решение предполага и трифазно изпълнение на DC/AC преобразувателя.

5.1.3. Проектиране на локална фотоволтаична електрозахранваща станция

За разглеждания тунел изходните данни за изграждане на фотоволтаична станция са дадени в Таблица 5.1. За определяне на плановия разход на енергия са използвани източници [39, 30, 71]. Така са получени изходните данни за проектиране на ФВС (Таблица 5.2.).

Таблица 5.1. Дежурно и дневно адаптационно осветление със светодиодни осветители

М-ст \ Портал	Север	Юг	Редукция за LED осветители
Рдеж., W	2040	2040	0.67
Радапт., W	12840	18120	0.33
Рдеж.ред., W	1367	1367	2734
Радапт.ред., W	4237	5980	10217

Таблица 5.2. Изходни данни за проектиране на фотоволтаичната станция

Енергия за дежурно осветление, kWh/год.	7982
Енергия за адаптационно осветление, kWh/год. при часова използваемост $T_a = 4600$ h/год.	24855
Обща енергия за осветление kWh/год.:	32837
Средна мощност за периода T_a , kW	7.88

5.2. Анализ на ефективността и технико-икономическа обосновка за изграждане на фотоволтаична система (ФВС)

5.2.1. Икономическа обосновка за изграждане на ФВС

32837	Необходима електроенергия за адаптационно и дежурно осветление на тунела, kWh/year
3.44	Средногодишно дневно производство на електроенергия от 1kWp инст. мощност в Смолян, kWh/ден
365	Дни от годината, в които ФВС работи
1256	Годишно производство от 1kWp ($365 \cdot 3.44$), kWh/year
26.15	Необходима пикова мощност на централата, kWp
57	Брой панели за необходимата пикова мощност
10	Избран брой панели в ред
6	Избрани редове панели на ФВС
60	Избран общ брой панели на ФВС

30.3	Пикова мощност P_{pp} на ФВС, kWp
55221	Необходима инвестиция K за ФВС, BGN
7151	Годишна вноска $Ca = K / (1/r - 1 / (r * (1+r)^{Tkr}))$ за обслужване на кредит K за години Tkr , BGN/year
71514	Реална цена на придобиване на ФВС (върнати на банката $Ca * Tkr$), BGN
38054	Произведена енергия за година, kWh/year
0.25	Един. цена на енергията по дневна тарифа, BGN/kWh
9513	Приход на средства Cb от произведена електроенергия (спестени средства от незакупена енергия), BGN/year
18240	Нетни приходи за периода на кредита $Tkr=10$ г. $NPV = -K + C_b * (1/r - 1 / (r * (1+r)^{Tkr}))$, BGN
142702	Нетни приходи след изплащане на кредита (от 11 до 25-та година), BGN
160942	Общо приходи от продадена електроенергия за 25 години, BGN

5.2.2. Разходи (+) и приходи (-) за 25 години при захранване на тунелно осветление чрез ФВС

71514	Цена на ФВС с лихвите по кредита, BGN
55221	Експлоатационни разходи за ФВС за 25 години: 100% от цената на ФВИЦ (4% на година), BGN
-18240	Приходи от продадена енергия за периода на кредита
-142702	Приходи от продадена енергия след периода на кредита
-34207	Рекапитулация за 25 годишни разходи за ФВС, BGN (знак "-" означава печалба от дейността)
-1368	Годишни разходи при захранване на тунелното осветление от ФВС, BGN (знак "-" означава печалба от дейността)

5.2.3. Разходи за тунелно осветление при купуване на електроенергия от енергийната система

2.734	Мощност на дежурното осветление kW
1.82	Средна мощност на дежурното осветление, kW
7982	Годишна консумация на енергия от деж. осветление, kWh
0.1967	Цена на енергията за дежурното осветление, BGN/kWh
1570	Годишни разходи за енергия за дежурното осветление, BGN/year
24855	Годишна консумация на електроенергия от адаптационното осветление, kWh
0.25	Един. цена на енергията по дневна тарифа, BGN/kWh
6214	Годишни разходи за енергия за адаптационно осветление, BGN/year
7784	Общи годишни разходи за осветление, BGN/year
194590	Разходи за осветление за 25 години при захранване от енергийната система, BGN

5.2.4. Сравнение на разходите при захранване от енергийната система и от ФВС

194590	Разходи за осветление за 25 години при захранване от енергийната система, BGN
7784	Средни годишни разходи при захранване от енергийната система, BGN/year
-34207	Разходи за осветление за 25 години при захранване от ФВИЦ, BGN (знак „-“ означава приход)
-1368	Средни годишни разходи за осветление при захранване от ФВС, BGN (знак „-“ означава приход)

5.3. Изводи

От направените изследвания могат да се направят следните препоръки за намаляване на разходите за тунелно осветление:

1. Прилагане на съвременни ефективни светлинни източници (мощни светодиоди) чрез използване на осветители със светлоразпределение, съобразено с отразителните характеристики на пътната настилка – насрещно излъчване по технология “Flat Beam” за най-енергоемката част на тунелното осветление – адаптационното осветление, с което рязко се намаляват инсталираните мощности, съответно разходите за осветление;
2. Подходящо управление на дневното осветление чрез димиране на първата степен и динамична промяна на диапазоните на работа на останалите степени – по алгоритъм, позволяващ нормите за осветяване на платното да се спазват на границата на допустимите стойности, компенсирайки залагания при проектирането експлоатационен коефициент MF (Maintenance Factor) – така се съхранява продължителността на работа на светлинните източници и допълнително се икономисва около 10% енергия спрямо степенното регулиране;
3. При наличие на терени, проектирането на ФВС е за максималната мощност, която се разрешава за ползване без разрешителен режим (30 kWp). Така с продадената енергия през деня ще се компенсира закупената електроенергия през нощта за дежурното осветление;
4. При наличие на общински обекти в околността на тунела, продажба на електроенергия на енергийната система не се налага, тъй като те ползват електроенергия от локалната ФВС. Така "акумулирането" на енергията става по естествения взаимноизгоден за общинските потребители начин – с размествени във времето потребители.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По-съществени резултати, които определят теоретичния и практически принос на дисертационната работа са:

Научно-приложни приноси

1. Оценени са възможностите за подобряване енергийната ефективност на тунелното осветление чрез математическо моделиране на взаимното влияние на яркостите на стените и платното върху количествените и качествените показатели на осветителната уредба. Набелязани са пътища за подобряване използването на потока на светлинните източници, а оттам и енергоефективността на осветителите. Обоснована е необходимостта от разработване на светодиоден осветител със специална оптика за реализиране на енергоефективно светлоразпределение по технологията “плосък лъч” (глава втора);

2. Разработен е математически модел и програмен продукт за получаване на оптимизирани по разход на енергия светлоразпределения за осветители тип «плосък лъч» за входните зони на пътни тунели (глава трета);

Приложни приноси

3. Осъществено е физическо моделиране на полученото светлоразпределение и е разработен експериментален образец на осветител. За анализ на точността за реализация на оптималното решение и съответно коригирането му е конструиран и реализиран специализиран телецентричен фотометър за фотометриране на светодиодни осветители и прожектори, който ще бъде използван и в учебния процес (глава четвърта);

4. Определени са светлотехническите показатели на осветителни уредби с конструираните осветители, разработени са типови решения на база технико-икономическа обосновка на решенията (глава четвърта).

5. Анализирано е прилагането на локални фотоволтаични електрозахранващи системи в тунелното осветление и условията, при които те стават изгодни спрямо централизираното електрозахранване (глава пета).

ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [1] *Пачаманов А., Петров С., Рахнева В.*, Влияние на отразения от платното светлинен поток върху яркостта на стените на пътен тунел. Дванадесета международна конференция по електрически машини, задвижвания и енергийни системи, 16-18 Октомври 2008, София, България, Стр.378-382
- [2] *Пачаманов А., Пачаманова Д., Петров С.*, Оптимизиране на светлоразпределението на тунелни осветители от тип "Плосък лъч", Известия на ТУ-София, том 55/2008 , с.186-196
- [3] *Пачаманов, А., Петров С.*, Енергийноефективни светлоразпределения от тип "Плосък лъч" за пътни тунели, Годишник на ТУ-София, Том 60, книга 2, 2010, Стр. 9-20
- [4] *Пачаманов, А., Костадинов К., Петров С.*, Светлодиоден осветител от тип "Плосък лъч" за пътни тунели Годишник на ТУ-София, Том 60, книга 2, 2010, Стр. 21-27
- [5] *Пачаманов А., Костадинов К., Христов К., Петров С.*, Моделиране на светлоразпределението на светодиодни осветители. UNITECH'10 – 19-20 ноември – гр. Габрово
- [6] *Пачаманов А., Петров С.*, Телецентричен фотометър за измерване на светлоразпределение на светодиодни осветители. Енергиен форум 2015
- [7] *Pachamanov A., Pregyov B., Petrov S., Stoev P.*, Opportunities for Using Photovoltaic Power Stations to Road Tunnels. Fourteenth international conference on electrical machines, drives and power systems ELMA 2015, 2-3 October 2015, Varna, Bulgaria
- [8] *Petrov S.*, Rationalization of expenses for the lighting of road and urban tunnels, Conference proceedings, Volume 1 (pp. 115 - 120) 2016 (XV International Scientific Conference "RE & IT – 2016" Renewable Energy & Innovative Technologies, 10-11 June, Smolyan, Bulgaria)
- [9] *Petrov S., Pachamanov A.*, Selection of classical and/or LEDs lighting for road tunnel under criterion lifecycle costs of the installation, Conference proceedings, Volume 1 (pp. 121 - 127) 2016 (XV International Scientific Conference "RE & IT – 2016" Renewable Energy & Innovative Technologies, 10-11 June, Smolyan, Bulgaria)
- [10] *Петров С., Пачаманов А., Павлов Д.*, Типови решения за тунелна осветителна уредба с LED осветители от тип „плосък лъч“, Национална младежка конференция по осветление с международно участие, Осветление'2016, 21 – 23 Октомври - София, България
- [11] *Пачаманов А., Петров С., Павлов Д.*, Определяне на оптимално съотношение между класически и LED осветители при пътен тунел по критерий LCC, Национална младежка конференция по осветление с международно участие, Осветление'2016, 21 – 23 Октомври - София, България
- [12] *Пачаманов А., Петров С., Иванов Д.*, Фотоволтаични станции към пътни тунели или използване на енергия от свободния пазар, Национална младежка конференция по осветление с международно участие, Осветление'2016, 21 – 23 Октомври - София, България
- [13] *Пачаманов А., Петров С., Николова К.*, Хибридна система за дневно адаптационно осветление на пътни тунели, Национална младежка конференция по осветление с международно участие, Осветление'2016, 21 – 23 Октомври - София, България

Abstract

Stoyan Savov Petrov

RATIONALIZATION OF EXPENSES FOR THE LIGHTING OF ROAD TUNNELS

Abstract of a dissertation for acquiring of scientific and educational degree “PhD”

The dissertation deals with the possible ways for rationalization of expenses for the lighting of road tunnels - 1) application of modern efficient light sources for day lighting - LEDs; 2) use of luminaries with optimized light distribution adapted to the reflection characteristics of road surface - a counter beam "Flat beam" technology for the most energy-consuming part of the tunnel lighting - entrance and transition zones; 3) adequate control of day lighting by dimming the first stage of lighting and dynamic change in the ranges of operation of all other stages; 4) design of local photovoltaic power supply stations (PVS), enabling reduction in energy costs which provides additional autonomy of the power supply system.

CONTRIBUTIONS OF THE DISSERTATION

1. The opportunities to improve the energy efficiency of tunnel lighting are assessed through mathematical modelling of mutual influence of the luminance of walls and road surface on performance indicators of the lighting system. Ways to improve the use of the luminous flux of light sources have been identified and hence the energy efficiency of luminaires. The necessity to develop LEDs luminaire with special optics for the implementation of energy efficient light distribution technology "Flat beam" has been well-founded (Chapter Two);

2. A mathematical model and software have been developed to receive optimized in energy consumption light distributions of luminaries of “flat beam” type for the threshold and transition zones of road tunnels (Chapter Three);

3. A physical modeling of the received light distribution has been performed and a sample of the luminary has been developed. For analysis of the accuracy of realization of optimal light distribution, a telecentric photometer for photometry of LEDs luminaries and floodlights has been designed and constructed. It will be used also in the educational process (Chapter Four);

4. The lighting performance indicators of lighting systems have been determined while using the designed luminaries. Standard design solutions have been developed, based on technical-economic justification of solutions (Chapter Four);

5. Application of local photovoltaic power systems for power supply of tunnel lighting has been analyzed. The conditions under which the PVS become profitable in comparison with the grid power supply are determined (Chapter Five).

The dissertation consists of 152 pages with 102 figures and 79 tables. It includes a summary, five chapters, conclusions, list of publications and literature. 152 literature sources have been cited, 75 of which written in Latin, 58 – in Cyrillic and 19 web addresses. There are thirteen publications made, concerning the problems of the dissertation – 8 on conferences with international participation in Bulgaria.