

ТИПОВИ РЕШЕНИЯ И ОЦЕНКА НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА УЛИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ, ПРОЕКТИРАНО ПО МЕЗОПИЧНА ЯРКОСТ

Димитър Павлов, Ангел Пачаманов

Резюме: Мастер план на гр. Кърджали - категоризация по улици; Избор на нормени показатели L_{ph} и преизчисляване на L_{mes} ; Процентно участие на различните улици по дължина и по инсталирана мощност; Очакван ефект за града от препроектиране на уредбите по мезопична яркост.

Ключови думи: мезопично зрение, осветление при ниски светлинни нива

TYPES OF DECISIONS AND EVALUATE THE ENERGY EFFICIENCY OF STREET LIGHTING, DESIGNED BY MESOPIC LUMINANCE

Dimityr Pavlov, Angel Pachamanov

Abstract: Master plan for Kardzhali city – categorization by street type; Selection of norm benchmarks L_{ph} and recalculation of L_{mes} ; Percentage of streets with various length and installed capacity (calculated by L_{ph} and L_{mes}); Expected impact for the city from redesigning installations from photopic luminance to mesopic luminance.

Key words: mesopic vision, street lighting at low luminance levels

1. Въведение

Приложението на най-новите изследвания в областта на мезопичното зрение може да доведе до намаляване на разходите за външно осветление на общините от 20% до 30% в зависимост от типа осветление. Това се отнася особено за приложения с ниски светлинни нива, каквито са обслужващите улици, пешеходните и парковите зони. Процентното увеличаване на мезопичната яркост спрямо фотопичната при използване на светлинни източници с различен спектрален състав е показано в табл.1 [5]. Очевидно е, че за ниски нива на фотопичната яркост L_{ph} бялата светлина е по-подходяща, тъй като на източници с по-висока цветна температура съответстват по-високи нива на мезопичната яркост L_{mes} .

2. Същинска част

2.1. Категоризация на улиците на гр. Кърджали

Кърджали е най-големият административен, промишлен, търговски и културен център на Източните Родопи. Населението му към март 2012 година е 45450 жители. Уличната мрежа на града е с обща дължина 57395 метра. При категоризацията ѝ са възприети три групи: главни улици, събирателни улици и обслужващи улици. Дължините им са съответно 21235 метра (37%), 16000 метра (28%) и 20160 метра (35%). Осветлението на тротоарите и пешеходните

зони към първите два типа улици е разгледано отделно, а за обслужващите улици – като осветление на алеи и зелени площи (табл.3).

Табл. 1

Мезопични яркости L_{mes} по типове улици за нормени нива L_{ph} и различни цветни температури на използваните светлинни източници [5]

Lph, cd/m ²	Tc, K	S/P	Lmes	Lph-red	% ик.ен.	Smes-max
0,30	2350	0,65	0,28	0,32	-7,90%	768
0,50	2350	0,65	0,47	0,53	-6,09%	732
1,00	2350	0,65	0,96	1,04	-3,94%	705
0,30	3500	1,33	0,32	0,28	6,86%	756
0,50	3500	1,33	0,53	0,47	5,33%	727
1,00	3500	1,33	1,03	0,97	3,47%	702
0,30	4000	1,56	0,33	0,27	11,60%	753
0,50	4000	1,56	0,55	0,45	9,02%	726
1,00	4000	1,56	1,06	0,94	5,89%	701
0,30	4300	1,69	0,34	0,26	14,04%	751
0,50	4300	1,69	0,55	0,45	10,92%	725
1,00	4300	1,69	1,07	0,93	7,14%	701
0,30	5000	1,93	0,36	0,24	18,64%	748
0,50	5000	1,93	0,57	0,43	14,51%	724
1,00	5000	1,93	1,10	0,90	9,51%	700

Табл.2

Нормени показатели по категории улици [1]

Светлотехнически клас на улицата	Яркост на повърхността на пътного платно при суха пътна настилка			Смущаващо заслепяване	Осветление на обкръжението
	L в cd/m ² [минимална поддържаема]	U _o [минимална]	U _l [минимална]	T _l в % [максимално]	SR 2b [минимално]
ME3	1,0	0,40	0,7	15	0,5
ME5	0,5	0,35	0,4	15	0,5
ME6	0,3	0,35	0,4	15	-

Табл.3

Инсталирана мощност и брой на осветителите по категории улици (сега)

Категория на улиците	Брой на осветителите	Инсталирана мощност, W
Градски артерии (ME3)	969	148752
Пешеходни зони, тротоари (S3)	79	5640
Събирателни улици (ME5)	406	33534
Пешеходни зони, тротоари (S3)	133	9220
Обслужващи улици (ME6)	617	38278
Алеи, зелени площи (S4)	468	28080
Общо	2672	263504

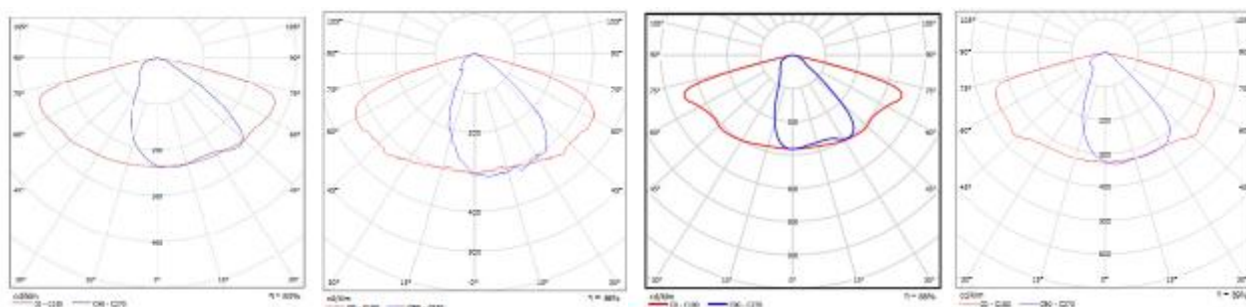
Нормените показатели за категориите улици, възприети за гр. Кърджали, са показани в табл.2. Нормирането на осветлението на тротоарите и пешеходните зони, както и на алеите и зелените площи е по осветеност, съответно 5-7 lx за първите и 3-5 lx - за вторите [1].

2.1. Сегашно състояние на уличното осветление в гр. Кърджали

Уличното осветление е реализирано с осветители с натриеви лампи с високо налягане (НЛВН) 50, 70, 100 и 150 W. Общият брой на осветителите е 2672, като от тях 1992 са улични и 680 – паркови (табл.3). Общата инсталирана мощност за улично осветление е 263504 W, съответно 148752 W за градските артерии, 5640 W за пешеходните зони и тротоарите към тях; 33534 W за събирателните улици, 9220 W за пешеходните зони и тротоарите към тях; 38278 W за обслужващите улици, 28080 W за алеи и зелени площи към тях.

2.2. Препроектиране на уличното осветление чрез подмяна на осветителите с НЛВН с LED-осветители

За да се провери доколко ефективна би била подмяната на съществуващото осветление със светодиодно, по-долу е описана замяната на съществуващите осветители с НЛВН с LED-осветители. Чрез софтуерен продукт Dialux [6] са извършени пълни светлотехнически изчисления по категории улици. За „градски артерии“ те са извършени за бул. „България“, бул.“Тракия“ и „Ардински мост“; за „събирателни улици“ - за ул. „Отец Паисий“, ул. „Осми март“ и ул. „Пирин“; за “обслужващи улици” - за ул. „Средец“, ул.“Родопи“ и ул.“Мир“. За описаните улици са използвани осветители с различно светлоразпределение и мощност, и различна цветна температура на светлинните източници. Като най-подходящи по категории улици са избрани LED-осветители BGP353 T15 1xECO156-2S/740 DW, BGP322 T35 1xECO60-2S/647 DM, BGP352 T35 1xECO91-2S/647 DC, BGP322 T35 1xECO35-2S/840 DN, съответно с мощности 145 W, 90 W, 56 W и 41 W. Светлоразпределението на осветителите е показано на фиг.1.



Фиг.1. Светлоразпределителни криви на използваните LED осветители 145 W(4000K), 90 W(5000K), 56 W(4000K) и 41 W(4000K)

При спазване на нормените показатели за различните категории улици новото LED осветление се получава с инсталирана мощност 205537 W, съответно 126063 W за градските артерии и 3896 W за пешеходните зони и тротоарите към тях; 23640 W за събирателните улици и 6358 W за пешеходните

зони и тротоарите към тях; 26392 W за обслужващите улици и 19188 W за алеи и зелени площи към тях (табл.4).

Табл.4

Инсталирана мощност и брой осветители по категории улици за препроектираното улично осветление на гр. Кърджали

Категория на улиците	Брой на осветителите	Обща инсталирана мощност, W
Градски артерии	969	126063
Пешеходни зони, тротоари	79	3896
Събирателни улици	406	23640
Пешеходни зони, тротоари	133	6358
Обслужващи улици	617	26392
Алеи, зелени площи	468	19188
Общо	2672	205537

При подмяна на старите осветители с LED осветители с по-добра оптична система инсталираната мощност се намалява, както е показано в табл.5. Общото намаляване на инсталираната мощност е 57967 W или 22%. Разпределена процентно между различните категории улици тя е 39% за градски артерии, 3% за пешеходните зони и тротоарите към тях; 17% за събирателни улици, 5% за пешеходните зони и тротоарите към тях; 21% за обслужващи улици, 15% за алеи и зелени площи към тях. От таблицата става ясно, че най-голям е ефектът при градските артерии и пешеходните зони към тях (42%); 22% е при събирателните улици и пешеходните зони към тях; 36% е при обслужващите улици и алеите към тях.

Табл.5

Намаление на инсталираните мощности по категории улици

Категория	Икономия на инсталирана мощност, W	Икономия на мощност, %
Градски артерии	22689	39%
Пешеходни зони, тротоари	1744	3%
Събирателни улици	9894	17%
Пешеходни зони, тротоари	2868	5%
Обслужващи улици	11886	21%
Алеи и зелени площи	8892	15%

2.3. Преизчисляване на уличното осветление по мезопична яркост

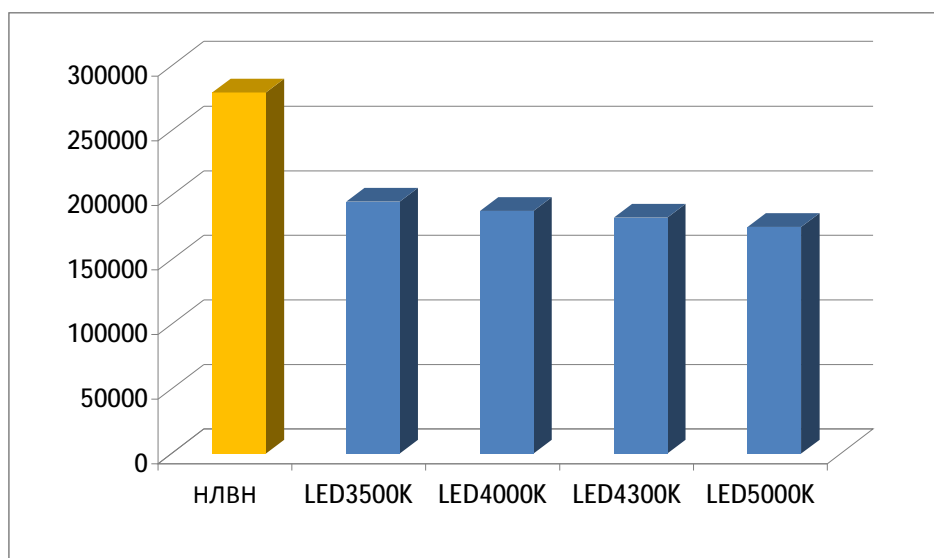
Проектирането на уличното осветление по мезопична яркост осигурява възможност за допълнително намаляване на разходите за електрическа енергия от 20% до 30% в зависимост от типа улица. Тъй като светлинните източници се различават по спектрално разпределение на излъчването, тяхната визуална ефективност се променя в зависимост от отношението S/P (скотопичен към фотопичен излъчен поток) и светлинното ниво [2]. Процентното увеличаване или намаляване на мезопичната яркост спрямо фотопичната при светлинни източници с различен спектрален състав е показано в табл.1 и б.

Табл. 6

Редуцирани фотопични яркости L_{ph-red} при проектиране по мезопична яркост L_{mes} и икономия на енергия за различни светлинни нива (по типове улици) [5]

L_{ph} , cd/m ² *	T_c , К	S/P	L_{mes}	L_{ph-red}	% ик.ен.	$S_{mes-max}$
0,10	2350	0,65	0,09	0,11	-12,80%	886
0,15	2350	0,65	0,13	0,17	-10,79%	832
0,10	3500	1,33	0,11	0,09	10,82%	851
0,15	3500	1,33	0,16	0,14	9,24%	813
0,10	4000	1,56	0,12	0,08	18,21%	844
0,15	4000	1,56	0,17	0,13	15,58%	808
0,10	4300	1,69	0,12	0,08	21,99%	841
0,15	4300	1,69	0,18	0,12	18,83%	805
0,10	5000	1,93	0,13	0,07	29,11%	835
0,15	5000	1,93	0,19	0,11	24,96%	801

*Фотопични яркости на настилка R3 със среден яркостен фактор $q_0=0,07$ при класове улици S3-S4 (за осветености 5 lx и 7 lx)



Фиг.2. Обща инсталирана мощност при замяна на съществуващите осветители с LED-осветители (3500K, 4000K, 4300K и 5000K)

Намаляването на мощността за различните типове улици е изчислена съгласно методиката, описана в [5]. Икономията на енергия е определена на база редуцирана нормена яркост в зависимост от цветната температура на използвания светлинен източник. Ако се вземат предвид и часовете работа на осветителните уредби от различен тип може да се изчисли и консумираната енергия по типове улици. За обслужващи улици, проектирани по осветеност, необходимата информация е дадена в табл. 6.

Преизчисляването на уличното осветление по мезопична яркост води до икономия на енергия от намаляване на инсталираната мощност поради подобри оптични системи на използваните LED-осветители и от заложените по-ниски нормени нива на фотопична яркост, заради проектиране по мезопично

зрение. Резултатите за получените инсталирани мощности са показани на фиг.2. При избора на LED осветители е отчетен фактът, че с напредване на възрастта на наблюдателя лещата на окото пожълтява. Затова са показани варианти на използвани светлинни източници с цветна температура от 3500K до 5000K.

Табл.7

Инсталирани мощности преизчислени с отчитане на мезопичната компонента

Категория	НЛВН инсталирана мощност, W	LED 3500K инсталирана мощност, W	LED 4000K инсталирана мощност, W	LED 4300K инсталирана мощност, W	LED 5000K инсталирана мощност, W
Градски артерии	154553	121 651	118625	117113	114 087
Пешеходни зони, тротоари	6249	3 536	3288	3 162	2467
Събирателни улици	35579	22 387	21512	21063	20 212
Пешеходни зони, тротоари	10215	5 770	5366	5 160	4770
Обслужващи улици	41302	24 571	23330	21063	20212
Алеи и зелени площи	31674	17 110	15692	14967	13 602
Общо	279572	195025	187813	182528	175350

Табл.8

Процентно намаляване на инст. мощности за различна цветна температура

Категория	LED 3500K инсталирана мощност, W	LED 4000K инсталирана мощност, W	LED 4300K инсталирана мощност, W	LED 5000K инсталирана мощност, W
Градски артерии	21,3%	23,2%	24,2%	26,2%
Пешеходни зони, тротоари	43,4%	47,4%	49,4%	60,5%
Събирателни улици	37,1%	39,5%	40,8%	43,2%
Пешеходни зони, тротоари	43,5%	47,5%	49,5%	53,3%
Обслужващи улици	40,5%	43,5%	49,0%	51,1%
Алеи и зелени площи	46,0%	50,5%	52,7%	57,1%
Общо	30,2%	32,8%	34,7%	37,3%

От табл.1 и 6 се вижда, че при използване на осветители с НЛВН за ниски яркости, инсталираната мощност трябва да се повиши - общата инсталирана мощност на НЛВН без отчитане на мезопичната компонента е 263504 W, а с отчитане на нейното влияние 279572W. Инсталираната мощност при отчитане на мезопичната компонента за LED-осветители с различна цветна температура е 10512 W за LED3500K, 17724W за LED4000K, 23000 W за LED4300K и 30187 W за LED5000K (таблици 7 и 8).

2.3. Очакван ефект от проектиране на уредбите по мезопична яркост

Разходите за осветление се определят от разходите за съоръжения, проектиране и инсталиране на уредбата; разходите за техническата поддръжка на съоръженията и разходите за електроенергия. Те участват при изчисляване на приведените годишни разходи за осветление, по чиято стойност се прави рационален избор между многото технически решения. Скъпите решения най-често осигуряват по-модерно и качествено осветление, но трябва да се вземе

предвид и годишната използваемост на уредбата, за да се изчисли дали са обосновани големи инвестиции за техника. При определяне на разхода на електроенергия в kWh е необходимо да се знае годишната продължителност на включване на осветителната уредба и работната ѝ мощност (табл.9):

$$(1) \quad W_a = P_{инст} \cdot T_p, \text{ kWh.}$$

Табл. 9

Икономия на средства от електроенергия за различните категории улици

Категория	T _A , часове	При осветители с НЛВН, лв	При LED осветители, лв	Разлика, лв
ME3	4220	125547	106397	19150
S3	4050	4568	3155	1413
ME5	4150	27833	19621	8212
S3	4050	7468	5149	2318
ME6	4100	31388	21641	9747
S4	4015	22464	15350	7114
Общо, лв		219268	171316	47953

При изчисляването на разходите за поддръжка се вземат предвид подлежащите на подмяна лампи N_{CH} , определени на база часове работа T_p на уредбата за всяка категория улица:

$$(2) \quad N_{CH} = N_L \frac{T_p}{T_N},$$

където N_L е общия брой лампи, а T_N е животът на използваните лампи в часове. Общата цена за електроенергия за осветление се изчислява по:

$$(3) \quad C_{EN} = W_a \cdot e, \text{ където } e \text{ е цената на 1 kWh електроенергия.}$$

Поддръжката на уредбата се състои в подмяна на изгорели лампи, което се комбинира с почистване на оптичните системи на осветителите:

$$(4) \quad C_{MAINT} = \sum_{i=1}^m \frac{T_L \cdot N_L}{T_N} (e_L + e_{L-CH}),$$

където m е общият брой редове осветители в улицата, e_L - цената на една лампа, e_{L-CH} - разходи за подмяна на лампа и почистване на оптичната система (приети равни на цената на една лампа).

При изчисляване на общите разходи се вземат предвид и разходите за обслужване на кредита, изтеглен за реконструкция на осветителната уредба (10-годишен кредит с годишна лихва в два варианта - 5% и 10%). Вноската за обслужване на кредит с период на погасяване T години е:

$$(5) \quad C_A = \frac{K}{\frac{1}{r} - \frac{1}{r(1+r)^T}},$$

където K е стойността на изтегления кредит за реконструкция на осветителната уредба, лв; r - годишната лихва, при която е отпуснат кредитът. Знаменателят на формулата е т.н. анюитетен фактор, показващ за колко години се изплаща

главницата на заема (през останалите години до Т се връща цената на кредита - натрупаните лихви за ползване на кредит със стойност К за години Т).

Стойността на изтегления кредит за реконструкция се определя от цената на осветителите $K_{освет}$, стойността на демонтажа на рогатки $K_{дем.рог.}$ и стойността на монтажните работи $K_{монт.раб.}$:

$$(6) \quad K = (K_{освет} + K_{дем.рог.} + K_{монт.раб.}) N_L.$$

Общите годишни разходи за реконструкция на осветлението са:

$$(7) \quad Z = C_{en} + C_{MAINT} + C_A$$

В таблици 10 и 11 са показани общите годишни разходи за двата варианта на лихвата - 5% и 10% при период на връщане на кредита 10 години. Цената на електроенергията е приета 0,20 лв/kWh. Разгледани са 4 варианта на цени на LED-осветители - от 5 пъти до 2 пъти стойността на осветителите с НЛВН. Базисните цени на осветителите с НЛВН са приети 200,150,120 и 100 лева/бр. за мощности 150 W, 100 W, 70 W и 50 W. На тези мощности съответстват LED-осветители с единични мощности 145 W, 90 W, 56 W и 41 W.

Табл. 10

Общи годишни разходи на вариантите при лихва 5%

Категория	НЛВН	LED (5) *	LED (4) *	LED (3) *	LED (2) *
ME3	163879	233937	208839	183741	158643
S3	6904	10153	8547	6501	5407
ME5	44356	75078	64562	54046	43530
S3	11365	16574	14048	10603	8939
ME6	48961	69129	60168	44187	39220
S4	35575	49897	43836	31715	28684
Общо, лв	311040	454768	400000	330793	284424

*Стойността в скобите показва с колко пъти цената на LED осветителите е по-висока от тази на осветителите с НЛВН.

Табл. 11

Общи годишни разходи на вариантите при лихва 10%

Категория	НЛВН	LED (5) *	LED (4) *	LED (3) *	LED (2) *
ME3	172144	266673	235020	203508	171996
S3	7380	11948	9925	7356	5982
ME5	47948	89312	76047	62844	49641
S3	12158	19505	16322	11997	9908
ME6	52497	81318	70014	49949	43713
S4	38220	58764	51116	35897	32092
Общо, лв	330347	527523	458444	371550	313331

*Стойността в скобите показва с колко пъти цената на LED осветителите е по-висока от тази на осветителите с НЛВН.

При проектиране на уредбите по мезопична яркост инсталираната мощност се редуцира съгласно показаните стойности в табл.7. Общите годишни разходи за осветление намаляват в зависимост от използваните осветители - в таблици 12 и 13 е показана общата икономия в лева, съответно при лихви 5% и 10%.

Табл. 12

Общи годишни разходи при оценяване и по мезопична яркост (при лихва 5%)

Осветител	НЛВН	LED (5)*	LED (4) *	LED (3) *	LED (2) *
LED3500K	311040	446081	391313	322106	275737
LED4000K	311040	440120	385353	316146	269776
LED4300K	311040	435764	380996	311789	265420
LED5000K	311040	429835	375067	305860	259491

*Стойността в скобите показва с колко пъти цената на LED-осветителите е по-висока от тази на осветителите с НЛВН.

Табл. 13

Общи годишни разходи при оценяване и по мезопична яркост (при лихва 10%)

Осветител	НЛВН	LED (5) *	LED (4) *	LED (3) *	LED (2) *
LED3500K	330347	518521	449757	362863	304643
LED4000K	330347	512561	443797	356903	298683
LED4300K	330347	508204	439440	352546	294326
LED5000K	330347	502275	433511	346617	288397

*Стойността в скобите показва с колко пъти цената на LED осветителите е по-висока от тази на осветителите с НЛВН.

3. Заключение

Подмяната на старите осветители с НЛВН с нови LED-осветители води до икономия на енергия и подобряване на качеството на услугата "публично осветление", предоставяна на населението. Разработеният примерен проект по [2] за реконструкция на уличното осветление в гр. Кърджали може да послужи като пример за „проектиране по мезопично яркост“ и за други общини в страната.

Благодарности

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2012 г., научен проект в помощ на докторант «Мезопична фотометрия и енергийна ефективност в уличното осветление», договор № 121ПД0037-01/26.04.2012.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN 13201-2:2003. Улично осветление. Част 2: Технически изисквания
- [2] CIE 191:2010 - Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance‘
- [3] Van Tichelen P., Geerken T., Jansen B. Vanden Bosch, M. (Laborelec), Van Hoof V., Vanhooydonck L. (Kreios), Vercalsteren A., City of San Josse Public Streetlight Design Guide, USA, 2011,“Final Report Lot 9: Public street lighting”, 2007/ETE/R/021 [http://www.sanjoseca.gov/transportation/SupportFiles/greenvision/PublicStreetlight Design Guide.pdf](http://www.sanjoseca.gov/transportation/SupportFiles/greenvision/PublicStreetlight%20Design%20Guide.pdf)
- [4] <http://www.philipslumileds.com> Бели светлодиоди
- [5] Пачаманов А.. Д. Павлов. Възможности за повишаване на енергийната ефективност на външно осветление на база проектиране по мезопична яркост. IV Научна конференция ЕФ2012, 28.09.2012-01.10.2012, Созопол
- [6] <http://www.dialux.com>

Автори:

Димитър Тодоров Павлов, маг. инж. – редовен докторант в катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (dpavlov@tu-sofia.bg), отговорен изпитвател в НИИКЛ “Осветителна техника” (www.onilot.com)

Ангел Саракинов Пачаманов, д-р инж. – професор в катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (pach@tu-sofia.bg), р-л НИИКЛ “Осветителна техника” (www.onilot.com)