

ФИЛТРИ ЗА СПЕКТРАЛНА КОРЕКЦИЯ НА ФОТОПРИЕМНИЦИ ПРИ ИЗМЕРВАНЕ НА МЕЗОПИЧНА ЯРКОСТ

Ангел Пачаманов, Димитър Павлов

Резюме: Влияние на нивото на фотопичната яркост и корелираната цветна температура на източника върху спектралната чувствителност на мезопичното зрение; Избор на криви $V_{mes}(\lambda)$ за различни нива на нормираната фотопична яркост; Изчисляване на филтри за спектрална корекция на фотоприемници на яркомери за различни категории улици.

Ключови думи: мезопично зрение, осветление при ниски светлинни нива

FILTERS FOR SPECTRAL CORRECTION OF LUMINANCE-METERS SENSORS FOR VARIOUS CATEGORIES OF STREETS

Angel Pachamanov, Dimitar Pavlov

Abstract: Influence of the level of photopic luminance and correlated color temperature of the source on the spectral sensitivity of mesopic vision. Select curves $V_{mes}(\lambda)$ for different levels of normalized photopic luminance; Calculation of filters for spectral correction of luminance-meters sensors for various categories of streets.

Keywords: mesopic photometry, street lighting with low light levels

1. Въведение

Несъответствието между величината яркост L_{ph} [1], основна нормирана величина в стандарта за улично осветление, и възприеманата *светлост* (brightness) в яркостния диапазон от 5 до 0,005 cd/m² води до преоразмеряване на външното осветление, особено за ниските нива на осветеност/яркост. В този диапазон фоторецепторите на двете системи на зрението «работят» едновременно: дневното (Photopic) – с колбички, основно разположени в централната част на окото; нощното (Scotopic) – с пръчици, равномерно разпределени по периферията на окото.

Адаптацията на окото на яркост над 5 cd/m² е функция на фотопичния поток, определен по формулата:

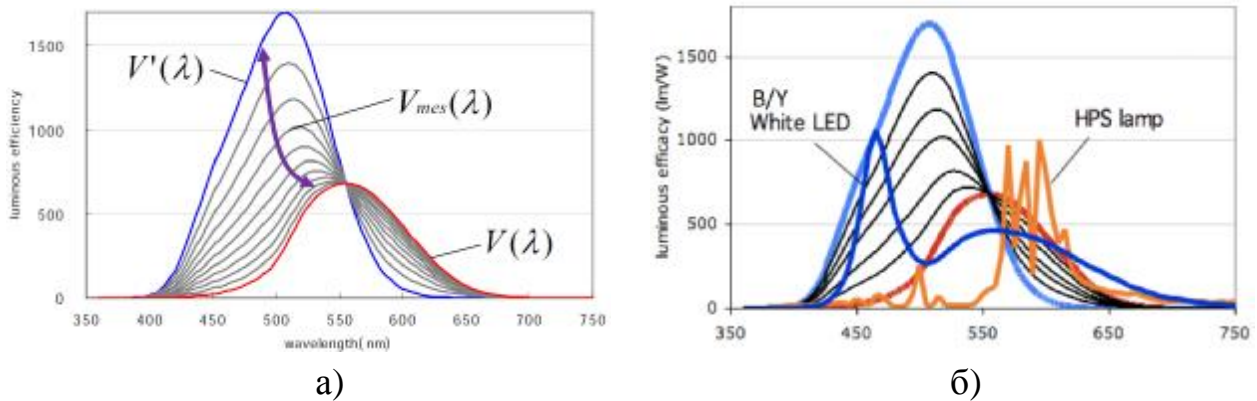
$$(1) \quad \Phi = 683 \sum_{i=1}^n j(I_i) \cdot V(I_i) \cdot \Delta I \quad [\text{lm}],$$

където 683 [lm/W] е максималната спектрална чувствителност на дневното зрение (при $\lambda_m=555$ nm); $j(I_i)$ [W/nm] – са стойности на спектралната плътност на лъчистия поток Φ_e [W] в диапазона 380-780 nm (фиг.1б); $V(\lambda_i)$ – стойности на относителната спектрална чувствителност на дневното зрение (фиг.1а); $\Delta\lambda$ – стъпка за дискретизация на диапазона 380-780 nm.

При адаптация на окото на яркост под 0,005 cd/m² зрителното усещане е функция на скотопичния поток, определен по формулата:

$$(2) \quad \Phi' = 1700 \sum_{i=1}^n j(I_i) \cdot V'(I_i) \cdot \Delta I,$$

където 1700 [lm/W] е максималната спектрална светлинна ефективност на нощното човешко зрение (при $\lambda_m=507$ nm); $V'(\lambda_i)$ – стойности на относителната спектрална чувствителност на нощното зрение (фиг.1а).



Фиг.1. Фотопично, мезопично и скотопично зрение (а) и излъчване на светлинни източници на фона на мезопични криви (б)

Международната комисия по осветление [2] препоръчва спектралната чувствителност на мезопичното зрение $V_{mes}(\lambda)$ да се определя като линейна функция на кривите за дневно и нощно зрение $V(\lambda)$ и $V'(\lambda)$ по формулата:

$$(3) \quad V_{mes}(I) = [m \cdot V(I) + (1 - m) \cdot V'(I)] / M(m),$$

където $M(m)$ е нормализираща функция, така че максималната стойност на $V_{mes}(\lambda)$ да се получи 1, а $0 \leq m < 1$ (за фотопичното зрение $m=1$).

При дефинирано поле на адаптация на всяка стойност m отговаря конкретна мезопичната яркост L_{mes} , равна на:

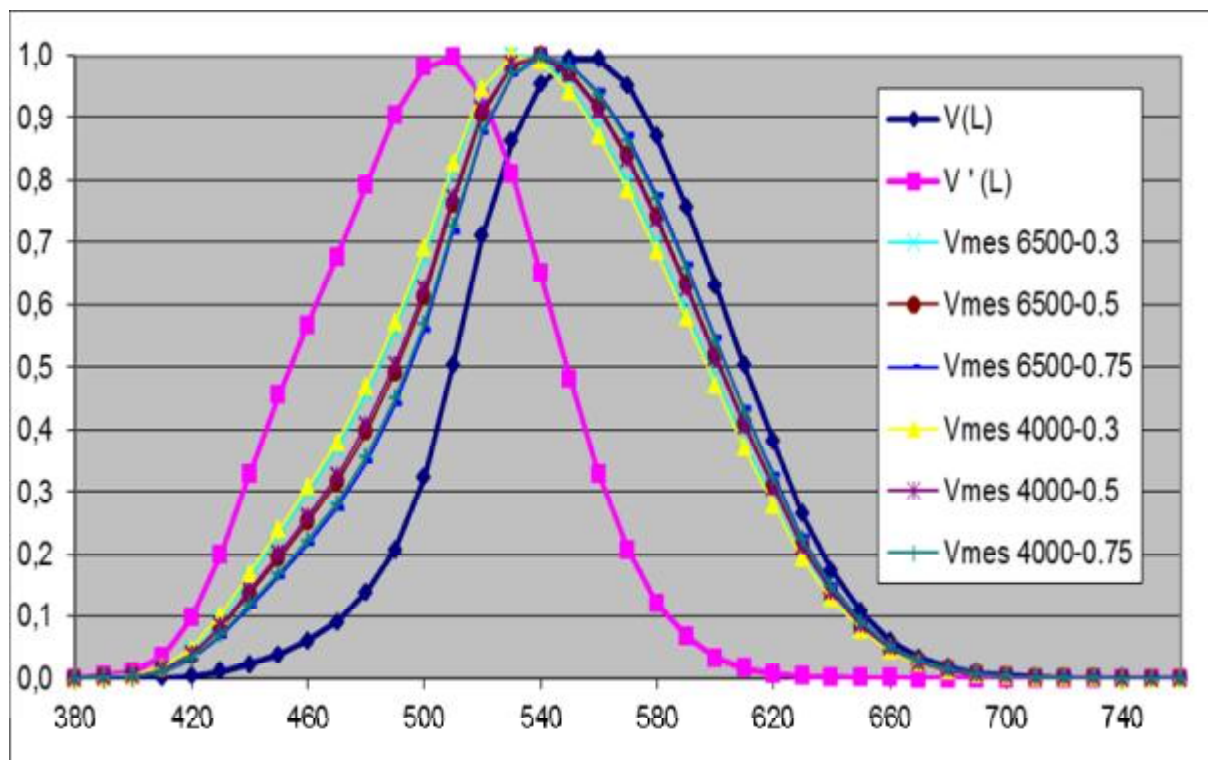
$$(4) \quad L_{mes}(I) = \frac{683}{V_{mes}(I_0)} \int_{380nm}^{780nm} V_{mes}(I) \cdot le(I) \cdot dI,$$

където $V_{mes}(\lambda_0)$ е стойността на функцията при $\lambda=555$ nm, а $le(\lambda)$ - спектралната плътност на яркостта [$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$] за дефинираното поле на адаптация.

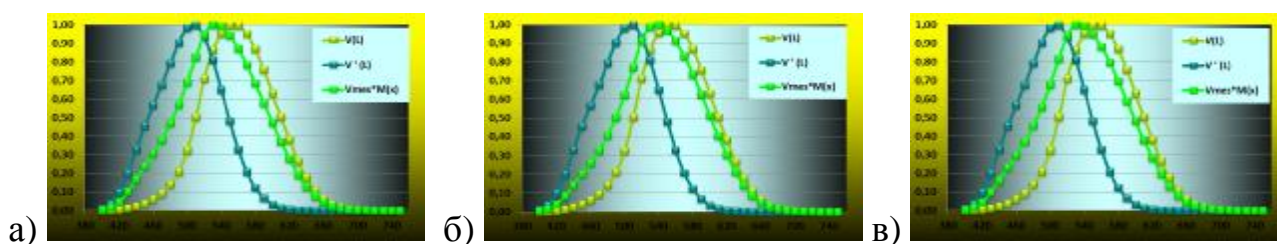
2. Същинска част

На базата на специално разработен програмен продукт по описаните по-горе зависимости са получени стойностите на спектралната чувствителност на мезопичното зрение за улици от светлотехнически класове ME6-ME4 (табл.1 и фиг.1-2) и за класове ME3-ME1 (табл.2 и фиг.3-4). Изчисленията са извършени за светлинни източници с корелирана цветна температура 4000K и 6500K.

Прави впечатление, че кривите зависят много по-силно от нивото на фотопичната яркост, отколкото от корелираната цветна температура. Затова коригиращи филтри е оправдано да се изработват само по



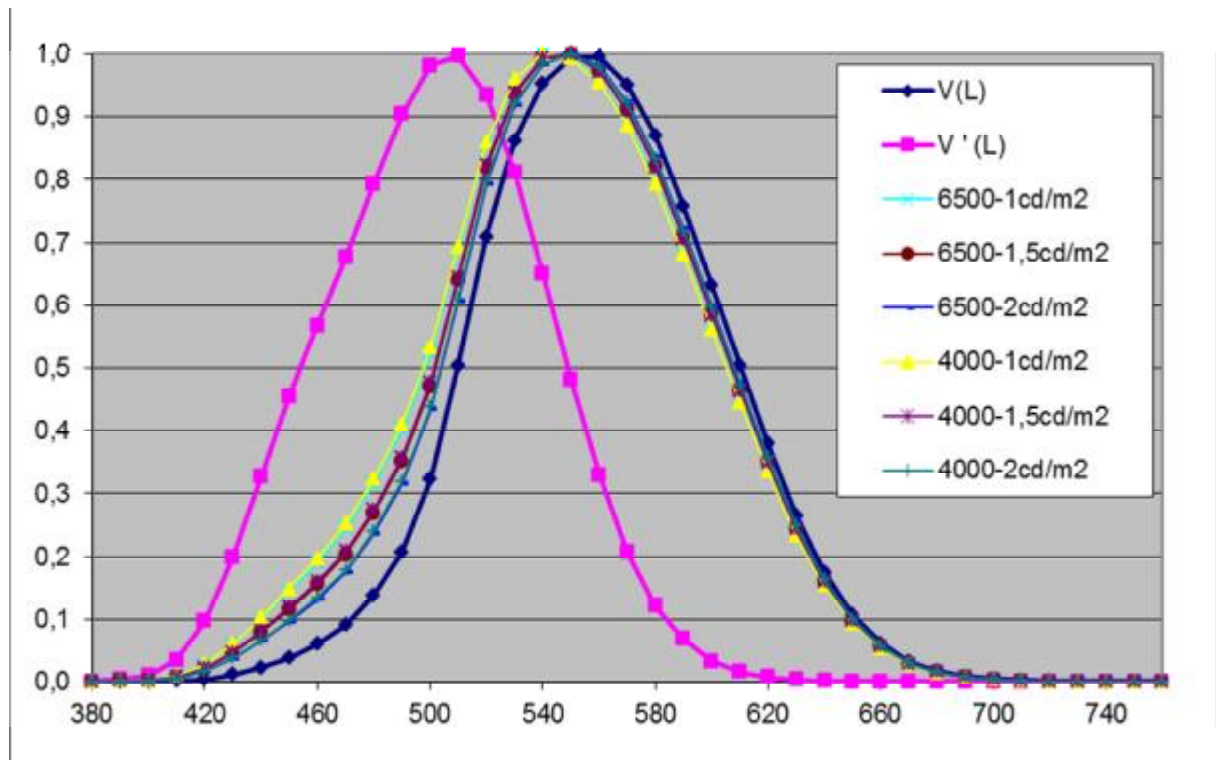
Фиг.1. Криви на спектрална чувствителност на мезопично зрение за светлинни източници 4000К и 6500К при фотопична яркост: а) 0,3 cd/m²; б) 0,5 cd/m²; в) 0,75 cd/m² (за една и съща фотопична яркост кривите почти съвпадат)



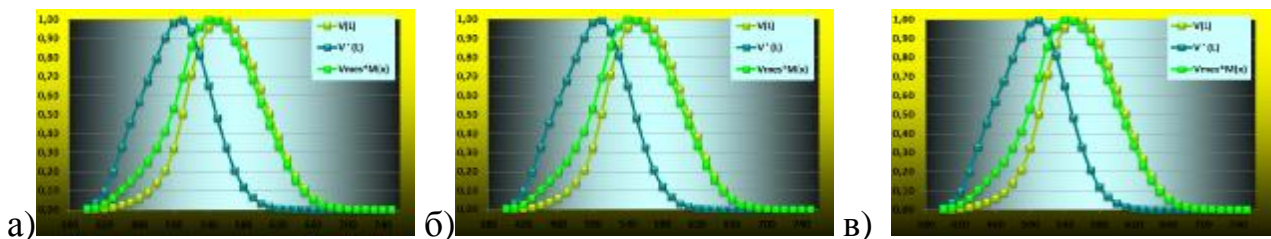
Фиг.2. Криви на спектрална чувствителност на мезопично зрение при фотопична яркост: а) 0,3 cd/m²; б) 0,5 cd/m²; в) 0,75 cd/m²

Обобщени показатели за малки стойности на яркостта:

ССТ, К	4000	6500	4000	6500	4000	6500
SCOTOPIC/PHOTOPIC S/P	1,56	2,23	1,56	2,23	1,56	2,23
ФОТОПИЧНА ЯРКОСТ	0,300	0,300	0,500	0,500	0,750	0,750
МЕЗОПИЧНА ЯРКОСТ	0,335	0,372	0,545	0,593	0,804	0,861
Vmes(555)	0,907	0,917	0,941	0,945	0,960	0,964
Smax=683/(Vmes(555), lm/W	753	745	726	723	711	709



Фиг.3. Криви на спектрална чувствителност на мезопично зрение за светлинни източници 4000K и 6500K при фотопична яркост: а) 1,0 cd/m²; б) 1,5 cd/m²; в) 2,0 cd/m² (за една и съща фотопична яркост кривите почти съвпадат)



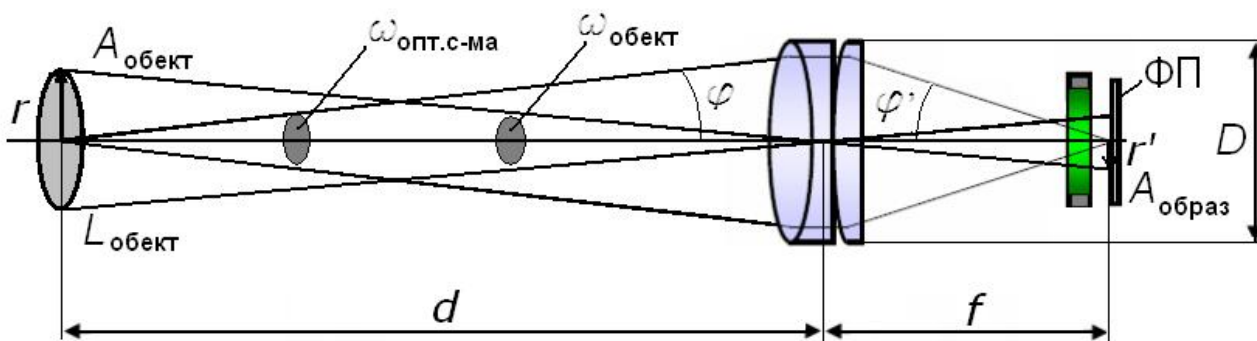
Фиг.4. Криви на спектрална чувствителност на мезопично зрение при фотопична яркост: а) 1,0 cd/m²; б) 1,5 cd/m²; в) 2,0 cd/m²

Обобщени показатели за големи стойности на яркостта:

ССТ, К	4000	6500	4000	6500	4000	6500
SCOTOPIC/PHOTOPIC S/P	1,56	2,23	1,56	2,23	1,56	2,23
ФОТОПИЧНА ЯРКОСТ, cd/m ²	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00
МЕЗОПИЧНА ЯРКОСТ, cd'/m ²	1,059	0,372	1,564	0,593	2,063	0,861
Vmes(555)	0,974	0,917	0,986	0,945	0,990	0,964
Smax=683/(Vmes(555), lm/W	701	745	693	723	690	709

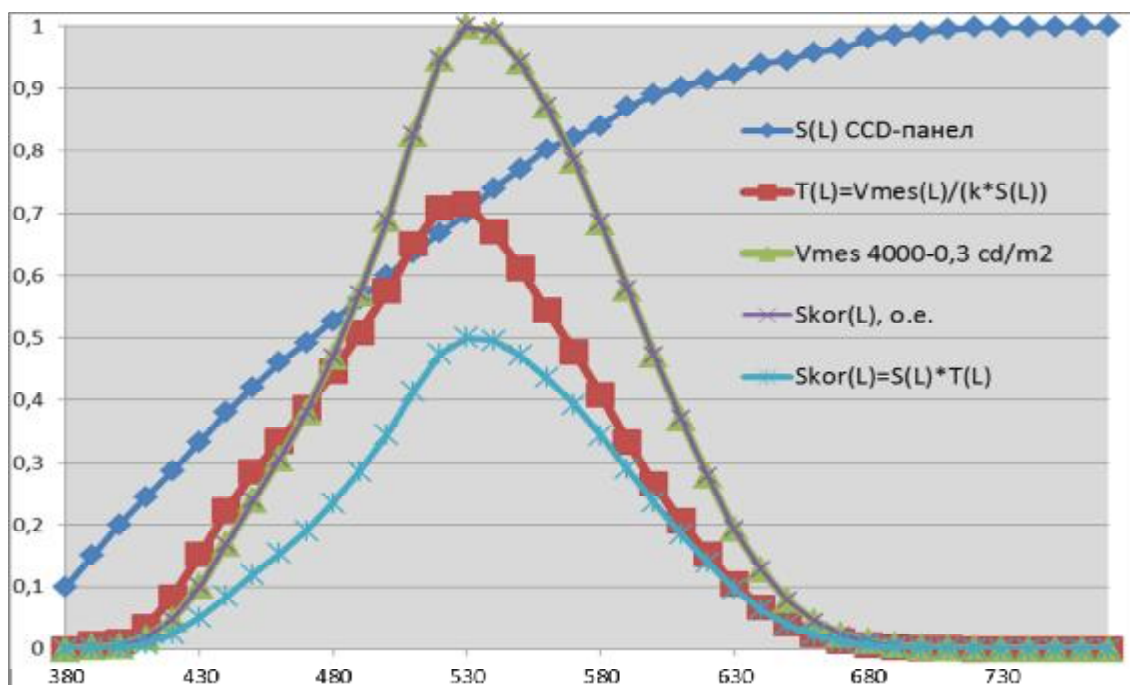
В уредите за измерване на мезопична осветеност/яркост [3] се използват CCD-матрици, чиито градивни компоненти са силициеви фотоеlementи (преобразуватели светлина-потенциал) с относителна спектрална чувствителност $S(\lambda)$, показана на фиг.6. За да се използва като фотоприемник за

мезопична яркост пред CCD-матрицата се поставя коригиращ филтър (фиг.5), със спектрални коефициенти на пропускане, изчислени по формулата $t_{mes}(I_i) = V_{mes}(I_i) / (k \cdot S(I_i))$. Резултантната чувствителност на комплекта филтър-фотоприемник ще бъде $V_{mes}(I_i) = k \cdot t_{mes}(I_i) \cdot S(I_i)$, чиито стойности са k пъти по-малки от изходните стойности $S(\lambda)$.



Фиг.5. Оптична система, филтър и фотопреобразувател на уред за измерване на яркост (фотопична, мезопична или скотопична – в зависимост от филтъра)

Получаването на стойностите на филтъра за спектрална корекция на фотоприемника са дадени в табл.3, а полученият филтър за мезопична яркост, съответстваща на фотопична яркост $0,3 \text{ cd/m}^2$ – на фиг.6. За останалите филтри се процедира по същия начин.



Фиг.6. Получаване на стойностите $t_{mes}(I_i) = V_{mes}(I_i) / (k \cdot S(I_i))$ на филтър за мезопична яркост, съответстваща на фотопична яркост $0,3 \text{ cd/m}^2$

Табл. 3

Спектрална корекция на фотоприемник с филтър за мезопична яркост,
съответстваща на фотопична яркост $0,3 \text{ cd/m}^2$

λ , nm	$S(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$V_{mes}(\lambda)$	$Skor(\lambda)$	$Skor^*(\lambda)$
380	0,100	0,000377	0,00008	0,000038	0,000075
390	0,150	0,007805	0,00234	0,001171	0,002342
400	0,200	0,011519	0,00461	0,002304	0,004608
410	0,244	0,034927	0,01704	0,008522	0,017045
420	0,286	0,083561	0,04780	0,023898	0,047797
430	0,333	0,152047	0,10126	0,050632	0,101263
440	0,380	0,222558	0,16914	0,084572	0,169144
450	0,420	0,284496	0,23898	0,119488	0,238977
460	0,460	0,333632	0,30694	0,153471	0,306941
470	0,492	0,386195	0,38002	0,190008	0,380016
480	0,527	0,445063	0,46910	0,234548	0,469096
490	0,562	0,507620	0,57056	0,285282	0,570565
500	0,600	0,574949	0,68994	0,344969	0,689938
510	0,636	0,65016	0,82700	0,413502	0,827003
520	0,669	0,708361	0,94779	0,473894	0,947788
530	0,700	0,714286	1,00000	0,500000	1,000000
540	0,740	0,670033	0,99165	0,495824	0,991649
550	0,770	0,612155	0,94272	0,471359	0,942719
560	0,802	0,543620	0,87197	0,435983	0,871967
570	0,822	0,477219	0,78455	0,392274	0,784548
580	0,840	0,407809	0,68512	0,342560	0,685119
590	0,870	0,332731	0,57895	0,289476	0,578952
600	0,890	0,264862	0,47145	0,235727	0,471455
610	0,902	0,205621	0,37094	0,185470	0,370940
620	0,913	0,152677	0,27879	0,139394	0,278787
630	0,923	0,104591	0,19307	0,096537	0,193075
640	0,940	0,067646	0,12717	0,063587	0,127174
650	0,945	0,041083	0,07765	0,038824	0,077647
660	0,958	0,023086	0,04423	0,022116	0,044232
670	0,964	0,012031	0,02320	0,011598	0,023196
680	0,980	0,006286	0,01232	0,006160	0,012320
690	0,985	0,003017	0,00594	0,002971	0,005943
700	0,990	0,001501	0,00297	0,001486	0,002971
710	0,995	0,000763	0,00152	0,000759	0,001519
720	0,998	0,000381	0,00076	0,000380	0,000760
730	0,999	0,000188	0,00038	0,000188	0,000376
740	0,998	9,06E-05	0,00018	0,000090	0,000181
750	0,999	4,35E-05	0,00009	0,000043	0,000087
760	1,000	3,66E-06	0,00001	0,000004	0,000007
770	1,000	0	0,00000	0,000000	0,000000
			max=	0,5000	

Пояснения:

$S(\lambda)$ – относителна спектрална чувствителност на фотоприемника (CCD-матрица)

Константа $k=2$ - колко пъти се допуска да се намали чувствителността на фотоприемника

$V_{mes}(\lambda)$ 4000K- $0,3 \text{ cd/m}^2$ – стойности на мезопичната крива, до която трябва да се коригира $S(L)$

$T(\lambda)=V_{mes}(L)/(k*S(\lambda))$ - изчислени коефициенти на пропускане на филтъра
 $T_{real}(\lambda)$ - реализирани коефициенти на пропускане на филтъра (тук приети равни на търсените)
 $Skor(\lambda)=S(\lambda)*T_{real}(\lambda)$ –коригирана спектрална чувствителност на фотоприемника
 $Skor^*(\lambda)$ –коригирана спектрална чувствителност на фотоприемника в относителни единици

3. Заключение

Разгледаният алгоритъм за изчисляване на филтри за спектрална корекция на фотоприемници, използвани за измерване на мезопична яркост, ще намери приложение при разработването на апаратура за контрол на улично осветление, проектирано по мезопична яркост. Същественото намаляване на инсталираните мощности, особено за събирателните и обслужващите улици, ще оправдае влаганите допълнителни средства за контрол. Следваща стъпка е разработване оптимизационен модел, на базата на който ще е възможно разликата между стойностите на изчислен и реализиран филтър да бъде минимална [4].

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] Пачаманов А., Измерване на скотопична и мезопична яркост. IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, гр. Созопол
- [4] Пачаманов А., Д. Пачаманова. Оптимизационни модели за спектрална корекция на фотоприемници чрез пълно и частично филтриране на потока. IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, гр. Созопол

Автори:

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

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