

ОПТИМИЗАЦИОННИ МОДЕЛИ ЗА СПЕКТРАЛНА КОРЕКЦИЯ НА ФОТОПРИЕМНИЦИ ЧРЕЗ ПЪЛНО И ЧАСТИЧНО ФИЛТРИРАНЕ НА ПОТОКА

Ангел Пачаманов, Десислава Пачаманова

Резюме: *Необходимост от коригиране на спектралната чувствителност на фотоприемници; Изчисляване на филтри за корекция на спектралната чувствителност на фотоприемници; Оценка на точността на спектралната корекция; Описание на оптимизационни задачи за пълно и частично филтриране на потока; Резултати от коригиране на спектралната чувствителност на силициев фотоелемент по $V(\lambda)$.*

Ключови думи: *филтри, спектрална корекция, фотоелементи*

OPTIMIZATION MODEL FOR SPECTRAL CORRECTION PHOTOCELLS WITH FULL AND PARTIAL FLOW FILTRATION

Angel Pachamanov, Dessislava Pachamanova

Abstract: *Need to adjust the spectral sensitivity of photo receivers; Calculation of filters for spectral correction of sensitivity photo receivers; Evaluation of the accuracy of spectral correction; Description of optimization problems for full and partial flow filtration; Results from correcting the spectral sensitivity of silicon photocell to $V(\lambda)$.*

Keywords: *filters, spectral correction, photocells*

1. Въведение

Основни характеристики на всеки фотоприемник (фотоелемент или CCD-елемент) са спектралната и интегралната чувствителност в спектралния диапазон 360-830 nm, за който човешкото око е чувствително. Спектралната чувствителност $s(\lambda)$ изразява чувствителността на фотоприемника към монохроматични излъчвания с дължина на вълната λ и се представя с поредица от n стойности, заснети през 5 или 10 nm. Интегралната чувствителност s_v изразява чувствителността на приемника към излъчване със сложен спектрален състав и се измерва в A/lm [1]:

$$(1) \quad s_v = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} j_z(I) \cdot s(I) \cdot dI \Bigg/ K_m \int_{360nm}^{830nm} j_z(I) \cdot V(I) \cdot dI ,$$

където $s(\lambda)$ е абсолютната спектрална чувствителност на приемника [$A \cdot W^{-1} \cdot m^2$]; $\phi_z(\lambda)$ е относителното спектрално разпределение на потока на светлинния източник, за който се оценява интегралната чувствителност s_v ; $K_m=683$ lm/W е връзката между светлинен и лъчист поток; $V(\lambda)$ е относителната спектрална чувствителност на дневното човешко зрение.

Прието е интегралната чувствителност на приемника да се определя за спектъра на излъчване на нажежаема лампа с цветна температура 2854K (стандартен източник А) и тогава се означава със звезда:

$$(2) \quad s_V^* = \frac{\int_{I_{\min}}^{I_{\max}} j_A(I) \cdot s(I) \cdot dI}{K_m \int_{360nm}^{830nm} j_A(I) \cdot V(I) \cdot dI}.$$

Релативната интегрална чувствителност се дава като отношение на интегралната чувствителност на приемника, когато е осветен с източник Z и интегралната чувствителност на приемника, когато е осветен с източник А. Използва се като константа $a^*(Z)$, с която трябва да се разделят показанията на уред, калибриран с източник А, но оценяващ уредба, изпълнена с източници Z:

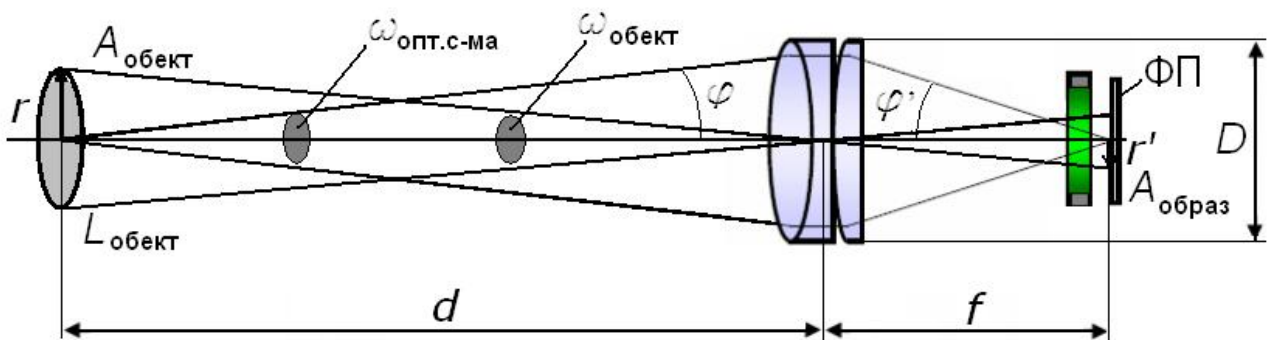
$$(3) \quad a^*(j_Z(I)) = \frac{s_Z}{s_A} = \frac{\int_{I_{\min}}^{I_{\max}} j_Z(I) \cdot s_{rel}(I) \cdot dI}{\int_{I_{\min}}^{I_{\max}} j_A(I) \cdot s_{rel}(I) \cdot dI} \cdot \frac{\int_{360nm}^{830nm} j_Z(I) \cdot V(I) \cdot dI}{\int_{360nm}^{830nm} j_A(I) \cdot V(I) \cdot dI}$$

Такава константа не е необходима, ако относителната спектрална чувствителност на приемника е точно коригирана до желаната относителна спектрална чувствителност на човешкото зрение [2,3] – дневно (фотопично) $V(\lambda)$, нощно (скотопично) $V'(\lambda)$ или смесено (мезопично) $V_{mes}(\lambda)$. За целта се използва коригиращ филтър (фиг.1), чиито спектрални коефициенти на пропускане се изчисляват по формулата $t(I_i) = V(I_i) / (k \cdot s(I_i))$ [4]. Стойностите на относителната спектрална чувствителност на комплекта филтър-фотоприемник се определят от възможността за точно реализиране на изчислените стойности $\tau(\lambda_i)$, при което $s_{kor}(I_i) = t_{real}(I_i) \cdot s(I_i) / \max(t_{real}(I_i) \cdot s(I_i))$. Оценяването на близостта на получената относителната спектрална чувствителност на комплекта филтър-фотоприемник $s_{kor}(\lambda_i)$, спрямо желаната $V(\lambda)$, се извършва по формулата [1]:

$$(4) \quad f_1^*(I) = \frac{\int_{380nm}^{780nm} |s_{kor}^*(I) - V(I)| \cdot dI}{\int_{380nm}^{780nm} V(I) \cdot dI},$$

където

$$(5) \quad s_{kor}^*(I) = s_{kor}(I) \cdot \frac{\int_{380nm}^{780nm} j_A(I) \cdot V(I) \cdot dI}{\int_{380nm}^{780nm} j_A(I) \cdot s_{kor}(I) \cdot dI}.$$



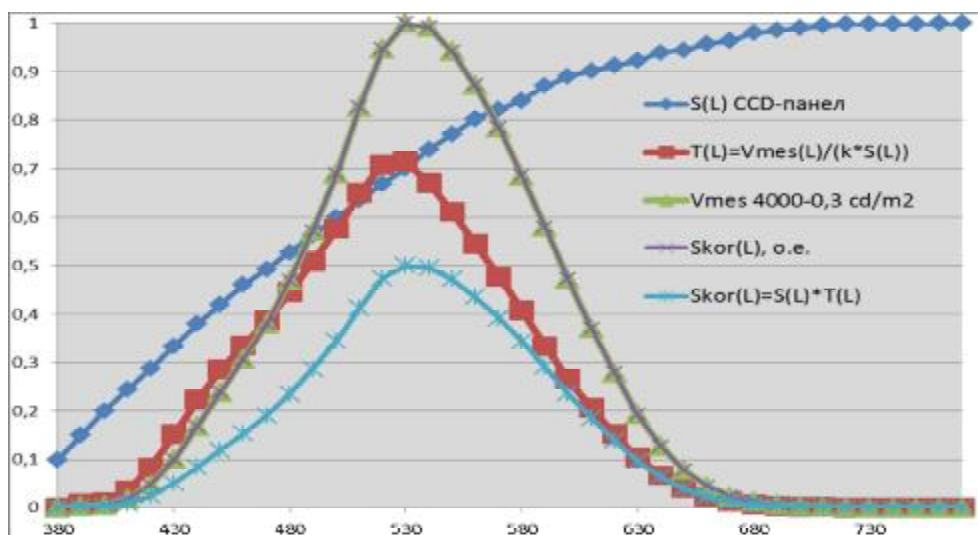
Фиг.1. Оптична система, филтър и фотоприемник (ФП) на уред за измерване на яркост (фотопична, скотопична или мезопична – в зависимост от филтъра)

2. Същинска част

На фиг.2 са показани графично изчислени стойности на филтър [4] $t(I_i) = V_{mes}(I_i)/(k \cdot s(I_i))$ към яркомер (фиг.1) за измерване на мезопична яркост [3], съответстваща на фотопична яркост $0,3 \text{ cd/m}^2$ [2]. Реализацията на филтъра е на две стъпки, за които са формулирани две оптимизационни задачи:

1) Пълно филтриране на потока: търси се набор от цветни стъкла с еднаква площ и различна дебелина, така че сумата от квадратите на разликите между изчислените стойности $\tau_{et1}(\lambda_i)$ и коефициентите на пропускане $\tau_{x1}(\lambda_i)$ на поставените едно зад друго цветни стъкла да бъде минимална;

2) Филтриране по части: търси се набор от поставени един до друг сегменти от цветни стъкла с различна площ и дебелина, така че сумата от квадратите на разликите между изчислените стойности $\tau_{et2}(\lambda_i)$ и получените коефициенти на пропускане $\tau_{x2}(\lambda_i)$ на набора стъкла да бъде минимална.



Фиг.2. Стойности $t(I_i) = V_{mes}(I_i)/(k \cdot s(I_i))$ на филтър за мезопична яркост, съответстваща на фотопична яркост $0,3 \text{ cd/m}^2$

Описание на оптимизационните задачи

I етап: пълно филтриране

Пълното филтриране представлява метод за корекция на спектралната чувствителност на фотоприемник [5], при който чрез един или няколко слоя цветни стъкла с дебелини, определени от ограничително условие за допустимо минимално пропускане $\tau_{x1}(k)$ на получения филтър1

$$(6) \quad \tau_{x1}(k) > \tau_{x1_min}$$

и необходимите коефициенти на пропускане $\tau_{et1}(i)$, така че

$$(7) \quad t_{et1}(i) = V(i)/[k_1 \cdot s(i)],$$

се реализират коефициенти на пропускане $\tau_{x1}(i)$, функция на свойствата на използваните слоеве стъкла:

$$(8) \quad t_{x1}(i) = t_r(i) \cdot t_{or}(i) \cdot t_y(i) \cdot t_{yg}(i) \cdot t_{gr}(i) \cdot t_{bl}(i).$$

Необходимите стойности на коефициентите на пропускане по (7) са определени така, че комплектът филтър1-приемник да има стойности на спектрална чувствителност кратни на тази на човешкото око $k_1 \cdot t_{et1}(i) \cdot s(i) = V(i)$. Коефициентът k_1 отразява намаляването на оригиналната спектрална чувствителност приемника $s(\lambda)$ вследствие наличие на филтър $\tau_{et1}(\lambda)$.

Уравнение (8) може да бъде изразено чрез оптичната плътност на филтър1 и параметрите на използваните цветни стъкла:

$$(9) \quad 10^{-D_{x1}(i)} = 10^{-a_r(i) \cdot d_r} \cdot 10^{-a_{or}(i) \cdot d_{or}} \cdot 10^{-a_y(i) \cdot d_y} \cdot 10^{-a_{yg}(i) \cdot d_{yg}} \cdot 10^{-a_{gr}(i) \cdot d_{gr}} \cdot 10^{-a_{bl}(i) \cdot d_{bl}},$$

където $a_r(i) = -\log t_r(i)$ е десетичен показател на поглъщане на червено стъкло [7], определен на база коефициент на пропускане $\tau_r(i)$ за дължина на вълната i при дебелина на слоя 1 mm, а d_r – дебелината му в mm (индексите отразяват цвета на използваните стъкла: red, orange, yellow, yellow-green, green, blue). Този начин на представяне е по-удобен, тъй като се работи директно с оптична плътност на материала за дебелина 1 mm при всяка дължина на вълната [7].

Ако (9) се логаритмува, оптимизационната задача се получава линейна:

$$(10) \quad D_{x1}(i) = a_r(i) \cdot d_r + a_{or}(i) \cdot d_{or} + a_y(i) \cdot d_y + a_{yg}(i) \cdot d_{yg} + a_{gr}(i) \cdot d_{gr} + a_{bl}(i) \cdot d_{bl},$$

което означава, че при зададените ограничителни условия, ако задачата има решение, то е само едно.

Параметри на оптимизационната задача са n стойности на търсената оптична плътност $D_{et}(i) = 10^{-t_{et}(i)}$ на филтър1, по n стойности на показателите на поглъщане на 6-те цветни стъкла $a_r(i)$, $a_{or}(i)$, $a_y(i)$, $a_{yg}(i)$, $a_{gr}(i)$, $a_{bl}(i)$ и минималната стойност на коефициента на пропускане τ_{x1_min} , преобразуван като максимална оптична плътност на търсения филтър $D_{x1_max} = 10^{-\tau_{x1_min}}$.

Променливи са n стойности на оптичната плътност на търсения филтър1 $D_{x1}(i) = 10^{-t_{x1}(i)}$ и 6 дебелини на отделните слоеве стъкла d_r , d_{or} , d_y , d_{yg} , d_{gr} , d_{bl} .

Целева функция е сумата от квадратите на разликите между получени и зададени стойности на коефициентите на пропускане:

$$(11) \quad \sum_{i=1}^n [t_{x1}(i) - t_{et1}(i)]^2 = \min,$$

но изразена в оптични плътности:

$$(12) \quad \sum_{i=1}^n [D_{x1}(i) - D_{et1}(i)]^2 = \min.$$

Ограничителни условия са също разрешените дебелини на стъклата на филтъра, например $d_r=0$ (липсва такъв слой); минималните технологични дебелини, напр. $d_r>0.2$, $d_{or}>0.2$, $d_y>0.2$, $d_{yg}>0.2$, $d_{gr}>0.2$, $d_{bl}>0.2$ и максималната оптична плътност на филтъра, съответстваща на уравнение (6) $D_{x1_max} = 10^{-\tau_{x1_min}}$:

$$(13) \quad D_{x1}[k] < D_{x1_max}.$$

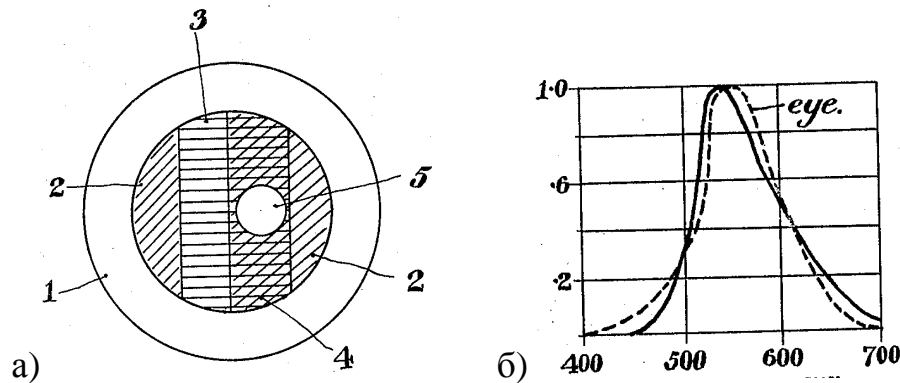
Примерни максимални оптични плътности могат да бъдат $D_{x1_max}=0.66$, което съответства на $\tau_{x1_min}=0.21$; 0,5 – 0,31; 0,4 – 0,4; 0,3 – 0,5; 0,222 – 0,6; 0,155 – 0,7. Стойностите $\tau_{x1}(i)$ на получения филтър1 се изчисляват по израза:

$$(14) \quad t_{x1}(i) = 10^{-D_{x1}(i)},$$

където $D_{xI}(i)$ са оптични плътности на получения филтър1 за решение на оптимизационната задача при дебелини на слоевете $d_{r1}, d_{or1}, d_{y1}, d_{yg1}, d_{gr1}, d_{bl1}$.

II етап: филтриране по части

По-прецизно по-нататъшно филтриране е възможно по принципа на Дреслер [6], пояснен на фиг.3а. Активната част на фотоелемент (1) е покрита със сегменти от два вида цветни стъкла (2) и (3), като с (4) е означен участък, в който те се припокриват. В средата на участък (4) е пробит отвор (5), през който част от лъчистия поток директно достига повърхността на фотоелемента. Така фототокът на фотоелемент (1) ще бъде функция на 5 компоненти на падналия поток: а) компонента Φ_5 , преминала през отвор (5); б) компонента Φ_2 , пропусната през двата сегмента на стъкло (2); в) компонента Φ_3 , пропусната от самостоятелната част на стъкло (3); г) компонента Φ_4 , пропусната през частта с припокриваните стъкла (2) и (3). Чрез подходящ подбор на цветове, дебелини и площи на двата вида стъкла, както и на отвора (5) е възможно постигане на добра корекция по $V(\lambda)$ на изходната крива на фотоелемента (фиг.3б).



Фиг.3. Принцип на Дреслер [6]: а) обяснение на патента; б) коригирана спектрална чувствителност на фотоелемент до тази на окото

При голямото разнообразие на цветни стъкла [7,8] и възможността те да се поръчват по зададени размери и дебелини, принципът на Дреслер е удачно да бъде изменен по следния начин: приема се, че общата площ на фотоелемента A е покрита с до б типа цветни стъкла с известни десетични показатели на поглъщане $a_r(\lambda), a_{or}(\lambda), a_y(\lambda), a_{yg}(\lambda), a_{gr}(\lambda), a_{bl}(\lambda)$, всяко с дебелина d_x и площ A_x , така че $A=A_r+A_{or}+A_y+A_{yg}+A_{gr}+A_{bl}$. Дебелина $d_x=0$, както и площ $A_x=0$ на някои от стъклата показва отсъствието му като компонент в търсеня филтър2. Последователността на решаване на задачата е следната:

Намират се стойностите на коефициентите на пропускане на филтър2:

$$(15) \quad t_{et2}(i) = V(i) / [k_2 \cdot s_{kor1}(i)],$$

с което се държи сметка комплектът филтър1-филтър2-фотоприемник да има стойности на спектрална чувствителност, кратни на тази на човешкото око $k_2 \cdot t_{et2}(i) \cdot s_{kor1}(i) = V(i)$. Коефициентът k_2 отразява новото намаляване на чувствителността на комплекта филтър1-фотоприемник $s_{kor1}(\lambda) = \tau_{xI}(\lambda) \cdot s(\lambda)$ вследствие необходимостта от поставянето на втори филтър $\tau_{et2}(\lambda)$.

Ограничителните условия на оптимизационната задача отново са допустимо минимално пропускане на получения филтър за зададена дължина на вълната $\tau_{x2}(k)$ и минимални размери и дебелини на цветните стъкла:

$$(16) \quad \tau_{x2}(k) > \tau_{x2_min} .$$

Целева функция е сумата от квадратите на разликите между получени и зададени стойности на коефициентите на пропускане на филтър2, т.е.

$$(17) \quad \sum_{i=1}^n [t_{x2}(i) - t_{et2}(i)]^2 = \min .$$

Стойностите на коефициентите на пропускане на търсения филтър $\tau_{x2}(i)$ се получават по израза:

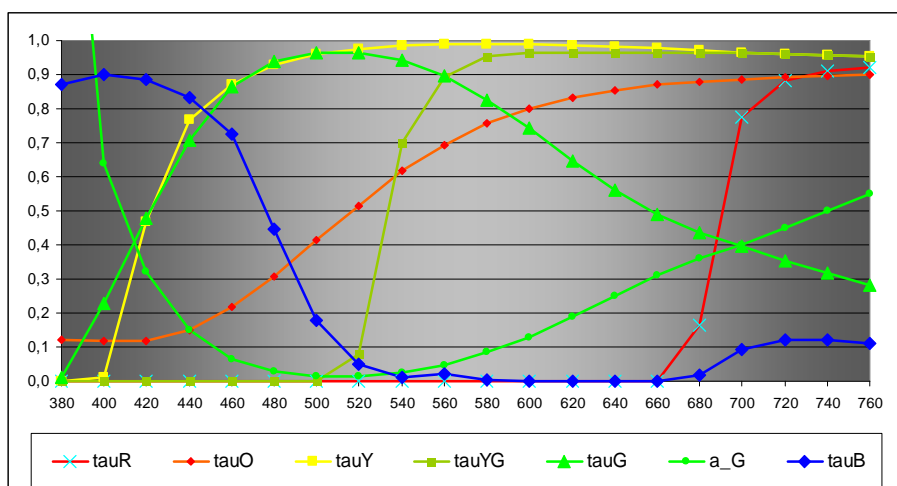
$$(18) \quad t_{x2}(i) = \frac{\Phi_{\text{преминал}}}{\Phi_{\text{постъпил}}} = \frac{A_r \cdot t_r(i) + A_{or} \cdot t_{or}(i) + A_y \cdot t_y(i) + A_{yg} \cdot t_{yg}(i) + A_{gr} \cdot t_{gr}(i) + A_{bl} \cdot t_{bl}(i)}{A} ,$$

или изразено чрез параметрите на използваните цветни стъкла:

$$(19) \quad t_{x2}(i) = (1/A) \cdot (A_r \cdot 10^{-a_r(i) \cdot d_r} + A_{or} \cdot 10^{-a_{or}(i) \cdot d_{or}} + A_y \cdot 10^{-a_y(i) \cdot d_y} + A_{yg} \cdot 10^{-a_{yg}(i) \cdot d_{yg}} + A_{gr} \cdot 10^{-a_{gr}(i) \cdot d_{gr}} + A_{bl} \cdot 10^{-a_{bl}(i) \cdot d_{bl}}) ,$$

където $a_r(i) = -\log t_r(i)$ е десетичен показател на поглъщане на червеното стъкло, определен на база коефициент на пропускане $\tau_r(i)$ за дължина на вълната i при дебелина на слоя 1 mm, а d_r – дебелината му в mm (индексите отразяват цвета на използваните стъкла: red, orange, yellow, yellow-green, green, blue).

Параметри на оптимизационната задача са по n стойности на величините $\tau_{et2}(i)$, $a_r(i)$, $a_{or}(i)$, $a_y(i)$, $a_{yg}(i)$, $a_{gr}(i)$, $a_{bl}(i)$, минималната стойност на коефициента на пропускане τ_{x2_min} и общата площ на филтъра A . Променливи са n стойности на търсения филтър $\tau_{x2}(i)$, площите на отделните стъкла A_r , A_{or} , A_y , A_{yg} , A_{gr} , A_{bl} , както и дебелините им d_r , d_{or} , d_y , d_{yg} , d_{gr} , d_{bl} .



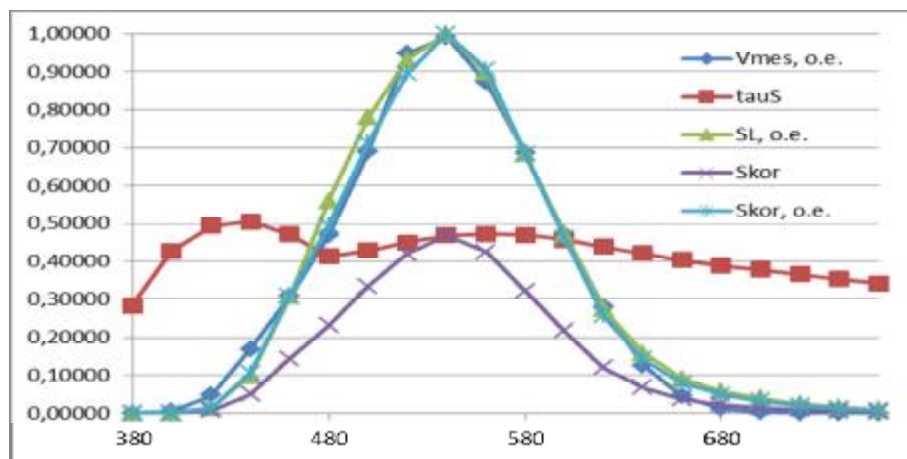
Фиг.4. Коефициенти на пропускане за дебелина 1 mm на използваните 6 типа цветни стъкла и показател на поглъщане на зеленото стъкло

РЕЗУЛТАТИ:

Двата етапа на задачата са решени чрез разработени два програмни продукта в среда AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming). Моделите, по които се търси решение, са 1ogf20.mod и 2ogf20.mod. Параметрите на задачата са зададени съответно в 1ogf20.dat и 2ogf20.dat Използван е solver minos.

Филтриране по части $\tau S(\lambda)$ на площ $A=900\text{mm}^2$ с три стъкла: $A_{\text{or}}=200\text{mm}^2$, $d_{\text{orange}}=0,8\text{ mm}$ [7, с.105-OC5]; $A_{\text{GR}}=310\text{mm}^2$, $d_{\text{green}}=0,70\text{ mm}$ [7, с.81- 3C8]; $A_{\text{BL}}=390\text{mm}^2$, $d_{\text{blue}}=4,2\text{ mm}$ [7, с.61-CC15]

λ , nm	Vmes, о.е.	tauS	SL, о.е.	Skor	Skor, о.е.	fiA	fiA.Vmes	fiA.Skor	Cs.Skor -Vmes
380	0,00008	0,28299	0,00001	0,00000	0,00000	9,79	0,0007	0,0000	0,00007
400	0,00461	0,42674	0,00060	0,00026	0,00055	14,71	0,0678	0,0080	0,00409
420	0,04780	0,49395	0,01328	0,00656	0,01400	21,00	1,0037	0,2940	0,03441
440	0,16914	0,50564	0,09841	0,04976	0,10622	28,70	4,8544	3,0484	0,06760
460	0,30694	0,47075	0,30706	0,14455	0,30854	37,81	11,6055	11,6660	0,01198
480	0,46910	0,41282	0,56128	0,23171	0,49457	48,25	22,6339	23,8632	0,00371
500	0,68994	0,42777	0,77933	0,33337	0,71158	59,86	41,2997	42,5954	0,00967
520	0,94779	0,45017	0,93110	0,41915	0,89468	72,50	68,7146	64,8644	0,09248
540	0,99165	0,46849	1,00000	0,46849	1,00000	85,95	85,2322	85,9500	0,03566
560	0,87197	0,47254	0,89814	0,42441	0,90589	100,00	87,1967	90,5894	0,00594
580	0,68512	0,46940	0,68351	0,32084	0,68484	114,40	78,3777	78,3454	0,03042
600	0,47145	0,45748	0,47224	0,21604	0,46113	129,00	60,8177	59,4863	0,03062
620	0,27879	0,43842	0,27431	0,12026	0,25670	143,60	40,0339	36,8619	0,03339
640	0,12717	0,42022	0,15946	0,06701	0,14303	158,00	20,0935	22,5984	0,00956
660	0,04423	0,40253	0,09149	0,03683	0,07861	172,00	7,6079	13,5211	0,03092
680	0,01232	0,38814	0,05788	0,02246	0,04795	185,40	2,2841	8,8898	0,03352
700	0,00297	0,37757	0,03980	0,01503	0,03208	198,30	0,5892	6,3609	0,02769
720	0,00076	0,36507	0,02480	0,00905	0,01932	210,40	0,1598	4,0655	0,01771
740	0,00018	0,35289	0,01531	0,00540	0,01153	221,70	0,0401	2,5562	0,01084
760	0,00001	0,34169	0,00928	0,00317	0,00677	232,10	0,0017	1,5707	0,00646
sum=	6,122		max=	0,46849		sum=	532,61	557,14	0,497
			f1%=100.sum(abs(Cs.Skor -Vmes))/sum(Vmes)=					8,11	
			Cs=sum(fiA.Vmes)/sum(fiA.Skor)=					0,956	



Фиг.6. Графично представяне на резултатите от филтриране по части

3. Заключение

Съгласно мярката за съгласуване $f_1\%$ [1] резултатите от спектралната корекция на фотоприемника за клас улици МЕБ са приемливи ($6 < f_1\% \leq 12$) – за контрол на параметрите на осветителни уредби е допустима мярка на съгласуване дори в последния клас ($12 < f_1\% \leq 18$). Само за прецизни измервания се изисква много добро ($f_1\% < 2$) или добро съгласуване ($2 < f_1\% \leq 6$). По подобен начин са разработени филтри за спектрална корекция на фотоприемника за останалите светлотехнически класове улици.

Резултатите от втория етап (филтриране по части) е възможно да се използват и за софтуерно настройване на филтър2 към желан вид улица - получените площи на филтър2 се заменят с коефициенти на усилване на сигналите от фотоелементи, покрити с избраните цветни стъкла. В този случай филтър1 (с пълно филтриране на потока) трябва да е избран така, че да обхваща кривите $V_{mes}(\lambda)$ за желаните класове улици МЕ6-МЕ4 или МЕ3-МЕ1 [2].

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] CIE 023/E:2012. Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters
- [2] БДС EN 13201-2:2003. Улично осветление. Част 2: Технически изисквания
- [3] CIE 191:2010 “Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance”
- [4] Пачаманов А. Измерване на скотопична и мезопична яркост. IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, гр. Созопол
- [5] Пачаманов А. Изчисляване на филтри за спектрална корекция на фотоприемници, използвани във физическата фотометрия. Известия на ВМЕИ „В.И. Ленин“, т.43, кн.9, 1988
- [6] <http://www.freepatentsonline.com/2086791.html>, Albert Dresler, Composite filter for photoelectric cells. United States Patent No.2086791/13.07.1937; Germany Patent No.698359/16.11.1933
- [7] http://optdesign.narod.ru/book/katalog_tsvetnyh_stekol.pdf, Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог. Москва, 1990
- [8] http://jsdymd.en.alibaba.com/product/545050488-213505825/Colored_Filter_Glass.html

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)

Dessislava A. Pachamanova, Ph.D. Associate Professor, Mathematics and Sciences Division of Babson College. MA, USA. <http://faculty.babson.edu/dpachamanova/>