

# ИЗМЕРВАНЕ НА СКОТОПИЧНА И МЕЗОПИЧНА ЯРКОСТ

Ангел Пачаманов

**Резюме:** Фотопична, скотопична и мезопична яркост. Граница на намаляване на чувствителността на фотоприемника при зададени ограничения от оптичната система на яркомера. Алгоритъм за изчисляване на мезопична яркост по фотопична и скотопична яркост на дефинираното поле. Директно измерване на мезопична яркост на база филтър, осигуряващ чувствителност  $V_{mes}(\lambda)$  на силициев фотоприемник. Прилагане на CCD матрици за измерване на малки мезопични яркости.

**Ключови думи:** мезопично зрение, яркомери със CCD матрици

## MEASURING OF SCOTOPIC AND MESOPIC LUMINANCE

Angel Pachamanov

**Abstract:** Photopic, scotopic and mesopic luminances. Limit of reducing the sensitivity of the receiver viewed with restrictions set by the optical system of the luminance-meter. Algorithm for calculating of mesopic luminance with photopic and scotopic luminances in defined field. Direct measurement of mesopic luminance based of filter, providing sensitivity  $V_{mes}(\lambda)$  of silicon photo-receptor. Application of CCD arrays for measuring small mesopic luminance.

**Keywords:** mesopic photometry, luminance-meters with CCD arrays

### 1. Въведение

Яркостта е основна величина в осветителната техника, на която е пропорционално зрителното усещане. Дефинира се като повърхностна плътност на интензитета на светлината от светеща повърхност  $S$  в посока на наблюдател, разположен на достатъчно голямо разстояние, така че светещата повърхност да може да се приеме за точков излъчвател:

$$(1) \quad L = \frac{I}{S'} = \frac{\Phi/w}{S'}$$

където  $\Phi$  е светлинният поток, попадащ в отвора на окото на

наблюдателя;  $\omega$  – пространствен ъгъл, под който се вижда отвора на окото от центъра на светещата повърхност;  $S'$  е площ на проекцията на светещата повърхност в равнина перпендикулярна на посоката на наблюдателя.

При адаптация на окото на яркост над  $5 \text{ cd/m}^2$  (дневно зрение, осигурявано от три типа фоторецептори с форма на колбички, разположени основно в централната част на ретината) зрителното усещане е функция на т.н. фотопичен поток, определен по формулата:



$$(2) \quad \Phi = 683 \sum_{i=1}^n j(I_i) \cdot V(I_i) \cdot \Delta I \quad [\text{lm}],$$

където 683 [lm/W] е максималната спектрална светлинна ефективност на дневното зрение, получена за монохроматично излъчване с дължина на вълната  $\lambda_m=555 \text{ nm}$  (лъчист поток с мощност 1/683 W, излъчен при  $\lambda_m=555 \text{ nm}$  съответства на светлинен поток  $\Phi=1 \text{ lm}$ );  $j(I_i) = \Delta\Phi_e(I_i)/\Delta I$  [W/nm] – стойности на спектралната плътност на лъчистия поток  $\Phi_e$  [W] в диапазона 380-780 nm;  $V(\lambda_i)$  – стойности на относителната спектрална чувствителност на дневното зрение;  $\Delta\lambda$  – стъпка за дискретизация на диапазона 380-780 nm.

Зрителното усещане при адаптация на окото на яркост под  $0,005 \text{ cd/m}^2$  (нощно зрение, осигурявано от фоторецептори с форма на пръчици, разположени равномерно по цялата ретина) е функция на т.н. скотопичен поток, определен по формулата:

$$(3) \quad \Phi' = 1700 \sum_{i=1}^n j(I_i) \cdot V'(I_i) \cdot \Delta I,$$

където 1700 [lm/W] е максималната спектрална светлинна ефективност на нощното зрение, получена за монохроматично излъчване с дължина на вълната  $\lambda_m=507 \text{ nm}$  (лъчист поток с мощност 1/1700 W, излъчен при  $\lambda_m=507 \text{ nm}$  е равностоен на светлинен поток  $\Phi'=1 \text{ lm}$ );  $j(I_i) = \Delta\Phi_e(I_i)/\Delta I$  [W/nm] – стойности на спектралната плътност на лъчистия поток  $\Phi_e$  [W] в диапазона 380-780 nm;  $V'(\lambda_i)$  – стойности на относителната спектрална чувствителност на нощното зрение;  $\Delta\lambda$  – стъпка за дискретизация на диапазона 380-780 nm.

Величината фотопична яркост  $L$ , изчислена по формула (1), е приета за основна величина при оценяване осветяването на повърхности, като нормираната ѝ стойност [1] в стандарта за улично осветление е за поток  $\Phi$ , определен по уравнение (2). В действителност стойността ѝ се „покрива“ с понятието *светлост* (brightness) само при осветяване на сиви повърхности (сините повърхности се възприемат като по-светли от червените повърхности).

Величината скотопична яркост  $L'$  се отнася за случая, когато в уравнение (1) вместо  $\Phi$ , изчислен по (2) се замести  $\Phi'$ , изчислен по (3). При ниски яркостни нива (фотопична яркост под  $0,005 \text{ cd/m}^2$ ) възприеманата светлост (brightness) при цветни повърхности съответства на измерената стойност  $L'$ , тъй като нощното зрение не е „цветно“ и всичко се вижда в нюанси на сивото.

Разлика между „това, което се измерва (фотопична яркост) и това което се вижда (светлост)“ съществува и в яркостния интервал от 5 до  $0,005 \text{ cd/m}^2$ , в който фоторецепторите на двете системи «работят» едновременно: с колбички, основно разположени в централната част на окото, и с пръчици, равномерно разпределени по цялата ретина на окото. За този диапазон се въвежда величината „мезопична яркост“  $L_{mes}$ , която по подобие на фотопичната яркост  $L$  се определя по (1), но за поток  $\Phi_{mes}$  [2], получен по формулата:

$$(4) \quad \Phi_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(I_0)} \sum_{i=1}^n j(I_i) \cdot V_{mes}(I_i) \cdot \Delta I,$$

където  $V_{mes}(\lambda_0)$  е стойността на функцията  $V_{mes}(\lambda)$  при  $\lambda=555$  nm, а  $\varphi(\lambda)$  - спектралната плътност на лъчистия поток [ $W \cdot nm^{-1}$ ]. Разликата между „това, което се измерва (мезопична яркост) и това което се вижда (светлост)“ не е в такава степен, каквато е между фотопична яркост и светлост, но съществува. Това е така, защото в модела на CIE [2] спектралната чувствителност на мезопичното зрение  $V_{mes}(\lambda)$  се определя като линейна функция на кривите за дневно и нощно виждане  $V(\lambda)$  и  $V'(\lambda)$ , а те са получени при осветяване на ахроматична повърхност:

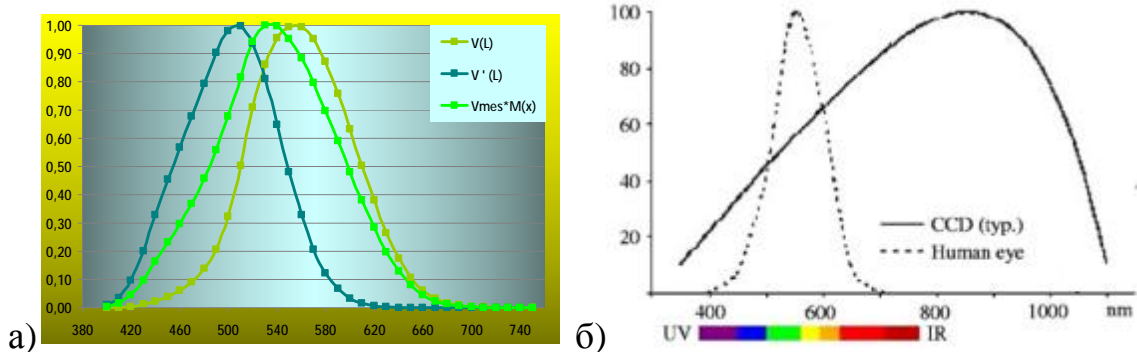
$$(5) \quad V_{mes}(I) = [m \cdot V(I) + (1 - m) \cdot V'(I)] / M(m),$$

където  $0 \leq m < 1$ , а  $M(m)$  е нормализираща функция, избрана така, че максималната стойност на  $V_{mes}(\lambda)$  да се получи 1. Когато  $m=1$ ,  $V_{mes}(\lambda)=V(\lambda)$  – зрението е фотопично; когато  $m=0$ ,  $V_{mes}(\lambda)=V'(\lambda)$  – зрението е скотопично.

## 2. Същинска част

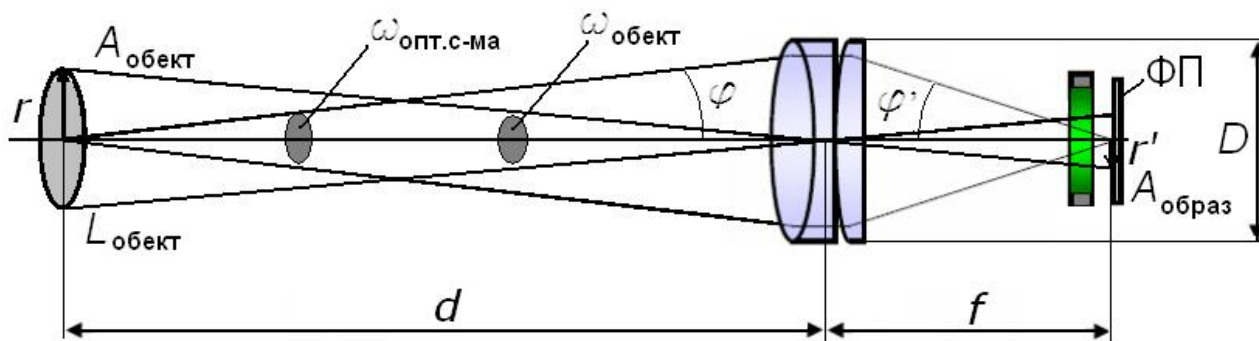
### 2.1. Основни зависимости при измерване на яркост

Съгласно изложеното в т.1, разликата при измерване на фотопична и скотопична яркост е в спектралната чувствителност на използвания фотоприемник. При първата тя съвпада с кривата на дневното зрение  $V(\lambda)$ , а при втората – с кривата на нощното зрение  $V'(\lambda)$  (фиг.1а).



Фиг.1. Спектрална чувствителност: а) на човешко зрение - скотопично  $V'(\lambda)$ , мезопично  $V_{mes}(\lambda)$  за  $0.3 \text{ cd/m}^2$  и фотопично  $V(\lambda)$ ; б) на CCD матрица (силициевы фотоелементи със спектрална чувствителност  $s(\lambda)$ )

Силициевият фотоелемент е с относителна спектрална чувствителност  $s(\lambda)$  показана на фиг.1б. За да може да се използва като фотоприемник за фотопична яркост пред него се поставя коригиращ филтър (фиг.2), със спектрални коефициенти на пропускане, изчислени по формулата  $t_{PH}(I_i) = V(I_i) / s(I_i)$ . Съответно, за измерване на скотопична яркост, пред силициевия фотоелемент се поставя филтър със стойности  $t_{SC}(I_i) = V'(I_i) / s(I_i)$ . Резултантната чувствителност на комплектите филтър-фотоприемник ще бъде:  $V(\lambda) = \tau_{PH}(\lambda) \cdot s(\lambda)$ , за измерване на фотопична яркост и  $V'(\lambda) = \tau_{SC}(\lambda) \cdot s(\lambda)$ , за измерване на скотопична яркост.



Фиг.2. Постановка за извеждане на основните зависимости между величините при измерване на яркост

### Връзка между основните величини

Два пространствени ъгъла са с важна роля при измерване на яркост: ъгълът  $\omega_{\text{обект}}$ , под който обектът се вижда от яркомера и ъгълът  $\omega_{\text{опт.с-ма}}$ , под който отворът на оптичната система на яркомера се вижда от обекта. Последният бързо се променя при промяна на разстоянието до обекта  $d$ . Яркостта на обекта  $L_{\text{обект}}$  се преобразува в яркост на изображението върху светлочувствителната повърхност на фотоприемника на разстояние, приблизително равно на фокусното разстояние  $f$  на системата от лещи.

Ако се въведе показател  $\eta$ , отчитащ ефективността при получаване на образа, попадалият върху фотоприемника светлинен поток е  $\Phi_{\text{ФП}} = \eta \cdot \Phi_D$ , където  $\Phi_D$  е светлинният поток, постъпващ през отвора на яркомера.

Интегралната чувствителност  $S = I_{\text{ph}} / \Phi_{\text{ФП}}$  на фотоелемент се представя с тока във външната верига на накъсосъединените анод и катод, когато върху повърхността му попада светлинен поток  $1 \text{ lm}$  ( $1/683 \text{ W}$  на монохроматично излъчване с дължина на вълната  $555 \text{ nm}$ ).

Интегралната чувствителност на фотоелементите се определя със стандартен източник тип „А“ (нажежаема лампа с цветна температура  $2854\text{K}$ ) като измереният фототок се разделя на произведението от активната площ на фотоелемента и реализираната осветеност на повърхността. Например, ако фотоелемент с площ  $15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  има ток на к.с.  $25 \cdot 10^{-6} \text{ A}$  и на повърхността му е реализирана осветеност  $E = 2000 \text{ lx}$ :

$$S = I_{\text{ph}} / \Phi = I_{\text{ph}} / (A_{\text{ФП}} \cdot E) = 25 \cdot 10^{-6} / (15 \cdot 10^{-6} \cdot 2000) = 0,000833 \text{ A/lm}$$

Ако светлината е от монохроматичен източник с излъчване при  $555 \text{ nm}$  интегралната чувствителност може да се изрази и в  $\text{A/W}$ :

$$S_e = I_{\text{ph}} / \Phi_e = (0,000833 \text{ A/lm}) / ((1/683) \text{ W/lm}) = 0,569 \text{ A/W}.$$

За да се определи стойността на фототока  $I_{\text{ph}}$  при различна площ на обекта  $A_{\text{обект}}$  и различни разстояния до обекта  $d$  трябва да се изведе връзката между стойността на фототока  $I_{\text{ph}}$  и яркостта на обекта  $L$ :

$$(6) \quad I_{\text{ph}} = S h \cdot \Phi_D = S h \cdot I_{\text{обект}} \cdot v_{\text{опт.с-ма}} = S h \cdot L \cdot A_{\text{обект}} \cdot v_{\text{опт.с-ма}},$$

където  $A_{\text{обект}} = \omega_{\text{обект}} \cdot d^2$  е площ, перпендикулярна на направлението на наблюдение, а пространственият ъгъл  $\omega_{\text{опт.с-ма}} = \pi \cdot D^2 / (4 \cdot d^2)$  се определя от диаметъра на отвора на яркомера  $D$  и разстоянието до обекта  $d$ .

След заместване в (6) за фототока  $I_{ph}$  се получава:

$$(7) \quad I_{ph} = S \cdot h \cdot L \cdot w_{\text{обект}} \cdot \frac{p \cdot D^2}{4},$$

*т.е. при известна интегрална чувствителност на фотоприемника  $S$  и зададена минимална яркост на обекта  $L$  големината на фототока  $I_{ph}$  еднозначно се определя от диаметъра  $D$  на входящия отвор на оптичната система и пространствения ъгъл  $w_{\text{обект}} = A_{\text{обект}} / d^2$ .*

Ако са зададени минималната стойност на фототока  $I_{ph}$  (поне два пъти над шума на фотоелемента), диаметърът  $D$  на оптичната система и минималната стойност на яркостта на обекта  $L$ , която трябва да се измерва, необходимата интегрална чувствителност на фотоприемника се получава от израза:

$$(8) \quad S = \frac{4 \cdot I_{ph}}{h \cdot L \cdot w_{\text{обект}} \cdot p \cdot D^2},$$

а необходимата площ, върху която трябва да се фокусира образът на обекта и от която се определя фокусното разстояние на оптичната система:

$$(9) \quad A_{\text{фП}} = \frac{I_{ph}}{S \cdot E},$$

където  $E$  [lx] е осветеността на активната повърхност на фотоелемента.

### **Определяне на размера на изображението и създаваната осветеност**

Отворът на филтъра пред фотоприемника е с размери, съответстващи на редуцирания размер на обекта (фиг.2), изчислен по закона на Клаузиус (1864):

$$(10) \quad n \cdot r \cdot \sin j = n' \cdot r' \cdot \sin j',$$

където  $n$  и  $n'$  са показателите на пречупване на средите, в които се намират обектът и образът му. Ако за удобство се приеме, че  $n = n' = 1$ , а  $A_{\text{обект}}$  да е кръг с радиус  $r$ , то образът му  $A_{\text{образ}}$  също е кръг, но с радиус  $r'$ . Тогава необходимите параметри на обекта и изображението ще бъдат:

$$(11) \quad r' = r \frac{\sin j}{\sin j'}; \sin j = \sin(\arctg \frac{D/2}{d}); \sin j' = \sin(\arctg \frac{D/2}{f}); A_{\text{обект}} = p \cdot r^2; A_{\text{образ}} = p \cdot r'^2,$$

при което създаваната осветеност от изображението ще бъде:

$$(12) \quad E_{\text{фП}} = \frac{\Phi_{\text{фП}}}{A_{\text{образ}}} = \frac{h \cdot \Phi_D}{p \cdot r'^2} = \frac{h \cdot L \cdot A_{\text{обект}} \cdot v_{\text{опт.с-ма}}}{p \cdot r'^2} = \frac{h \cdot L \cdot A_{\text{обект}} \cdot p \cdot D^2 / (4 \cdot d^2)}{p \cdot r'^2 \cdot \sin^2 j' / \sin^2 j} =$$

$$= \frac{h \cdot L \cdot p \cdot \sin^2 j'}{\sin^2 j} \cdot \text{tg}^2 j = \frac{h \cdot L \cdot p \cdot \sin^2 j'}{\cos^2 j} \approx h \cdot L \cdot p \cdot \sin^2 j' \text{ [lx]},$$

тъй като  $\cos^2 j \approx 1$ .

### Прилагане на методиката:

**Да се изчисли** оптична система на яркомер, използващ фотоелемент OSD60-E с активна площ  $100 \text{ mm}^2$ , диаметър  $11,3 \text{ mm}$ ; интегрална чувствителност  $S=56 \text{ nA/lx}$ ; ток на тъмно  $8 \text{ nA}$ ; относителна спектрална чувствителност  $s(\lambda)$ , съгласно крива 2 (вдясно).

**Да се определи** минималната яркост на пътното платно, която може да се регистрира за зададени размери на полето  $8 \times 40 \text{ m}$  и зададен диаметър на лещата  $D$ , така че фототока  $I_{ph}$  да надхвърля 1 път тока на тъмно.

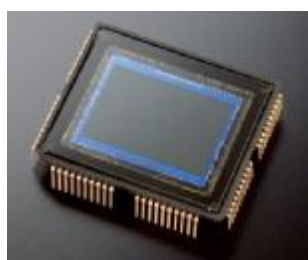
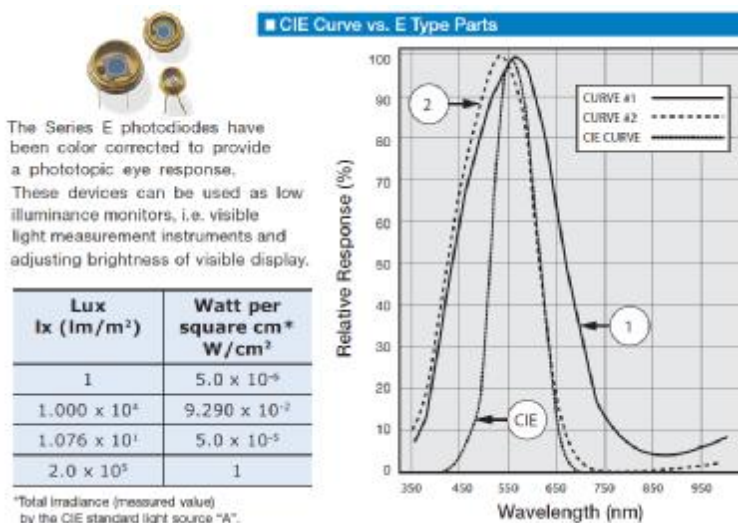
Яркомерът е на  $60 \text{ m}$  пред полето и е насочен към центъра му под ъгъл  $1$  градус.

**Фокусното разстояние  $f$**  на лещата да се определи така, че образът на обекта почти изцяло да запълва площта на фотоелемента.

**Решение в четири варианта\***. Разликата от описаното по-горе е, че участъкът от пътното платно се проектира върху фотоелемента като трапец, а не като кръг.

| $\eta$ | $L, \text{ cd/m}^2$ | $D, \text{ mm}$ | $f, \text{ mm}$ | $\alpha, ^\circ$ | $d, \text{ m}$ | $S, \text{ nA/lx}$ | $A, \text{ mm}^2$ | $I_t, \text{ nA}$ | $E, \text{ lx}$ | $I_{ph}, \text{ nA}$ |
|--------|---------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| 0,9    | 20                  | 40              | 100             | 1                | 80             | 56                 | 100               | 8                 | 0,272           | 11,5                 |
| 0,9    | 10                  | 50              | 100             | 1                | 80             | 56                 | 100               | 8                 | 0,133           | 9,0                  |
| 0,9    | 5                   | 80              | 100             | 1                | 80             | 56                 | 100               | 8                 | 0,061           | 11,5                 |
| 0,9    | 1                   | 300             | 200             | 1                | 80             | 350                | 600               | 32                | 0,0023          | 33,8                 |

\* четвъртият вариант е само за илюстрация, в случай че се използва фотоелемент с активна площ  $600 \text{ mm}^2$ , с диаметър  $\phi 25 \text{ mm}$ . Заради по-високата чувствителност с него може да се измерва яркост до  $1 \text{ cd/m}^2$ , но при диаметър на лещата  $300 \text{ mm}$ !



**Извод:** За измерване на скотопична и мезопична яркост фотоелементите от класически тип са неприложими, поради ниска интегрална чувствителност, водеща до големи размери на оптичната система. За измерване на нива на яркостта от  $0,005$  до  $5 \text{ cd/m}^2$  (мезопична) с оптична система с нормални размери като фотоприемник е по-удачно да се използват CCD-матрици (Charge Coupled Device). Поради възможността да натрупват заряди в елементарни «фотоелементи» за продължителен период от време те са с многократно по-висока чувствителност. Комплектоването им с микропроцесорни системи за обработка на информацията ги прави удобни за определяне не само на средната яркост, но и за разпределението на яркостта по пътното платно.

## 2.2. Измерване на мезопична яркост

### Косвен метод за измерване на мезопична яркост

Определянето на чувствителността на окото в яркостния интервал от  $5$  до  $0,005 \text{ cd/m}^2$ , когато едновременно работят системите за дневно и нощно виждане, е проблемно поради различното пространствено разположение на

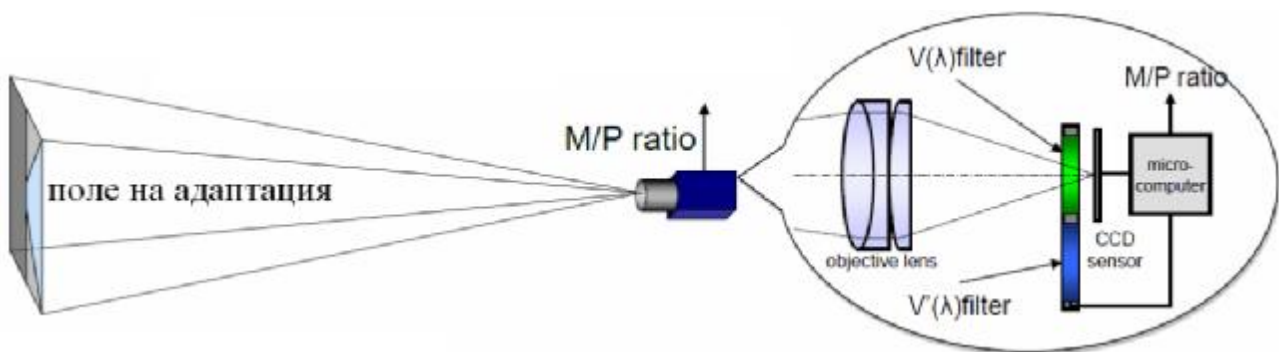
двата вида рецептори в окото и различната им чувствителност. Мезопичното зрение е функция на светлинното ниво (определящо активността на фоторецепторите от двете системи) и адаптационното поле (определяно от ъгъла на наблюдение), определящо степента на възбуждане на периферно разположените пръчици. Приетият от СІЕ линеен модел за получаване на  $V_{mes}(\lambda)$ , съгласно формула (5) само частично отразява описаните по-горе особености. Тъй като засега не е предложено нещо по-добро за замяна на този модел, техническите устройства за измерване и контрол на мезопичната яркост се основават на него. Алгоритъм за изчисляване на мезопична яркост по фотопична и скотопична яркост е публикуван в [2]. Разработен е така, че да не се налага да се дефинира поле на адаптация - мезопичната яркост  $L_{mes}$  и конкретната стойност на  $m$  се получават чрез итерационна формула, в която определящи са предварително измерените фотопична  $L_{ph}$  и скотопична  $L_{sc}$  яркост. Започва се от  $m_0=0,5$  и след няколко итерации се достига до действителната стойност  $L_{mes}$ :

$$(13) \quad L_{mes(n)} = \frac{m_{(n-1)} \cdot L_{ph} + (1 - m_{(n-1)}) \cdot L_{sc} \cdot V'(I_0)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)}) \cdot V'(I_0)},$$

$$(14) \quad m_{(n)} = a + b \cdot \log_{10}(L_{mes(n)}),$$

където  $V'(\lambda_0)=683/1699=0,402$  е стойността на  $V'(\lambda)$  при 555 nm, а двете константи са:  $a=0,767$  и  $b=0,3334$  [2].

Този алгоритъм е в основата на яркомер (фиг.3) за мезопична яркост [4], който чрез изчислено отношение между мезопична и фотопична яркост  $M/P$  позволява да се получи мезопичната яркост  $L_{mes}=(M/P) \cdot L_{PH}$ . Двете яркости се получават с помощта на два филтъра, осигуряващи спектрална чувствителност  $V(\lambda)$  и  $V'(\lambda)$  на използвания фотоприемник - CCD матрица.



Фиг.3. Яркомер за последователно измерване на фотопична и скотопична яркост за изчисляване на  $M/P$  отношение [4]

### **Директно измерване на мезопична яркост чрез филтър $\tau_{mes}(\lambda)$**

Кривите  $V_{mes}(\lambda)$  са различни за различните нива фотопична яркост, нормирана в стандарта за улично осветление по категории улици [1]. Това предполага разработване на серия филтри за спектрална корекция по  $V_{mes}(\lambda)$ , съответстващи на нивата фотопична яркост на всеки тип улица [3].

Конкретната мезопична яркост  $L_{mes}$  се определи по израза:

$$(13) \quad L_{mes}(I) = \frac{683}{V_{mes}(I_0)} \int_{380nm}^{780nm} V_{mes}(I).le(I).dI ,$$

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

### 3. Заключение

Прилагането на принципа „проектиране по мезопична яркост/осветеност“ изисква необходимостта от разработване на уреди за измерване на реализираните показатели на осветителните уредби. Разгледаните особености при измерване на фотопична, скотопична и мезопична ще бъдат използвани при конструиране на измервателна апаратура за целите на изследователската работа и за нуждите на експлоатацията (регистрираща и управляваща).

### 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., Д. Павлов. Филтри за спектрална корекция на фотоприемници при измерване на мезопична яркост. IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, гр. Созопол
- [4] Tatsukiyo Uchida, Yuqin Zong, Cameron Miller, and Yoshi Ohno. A Practical Photometer for CIE Performance Based Mesopic Photometry System. CORM 2011: May 4-6, 2011, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD
- [5] 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

**Автор:** Ангел Саракинов Пачаманов, д-р инж. – професор в катедра “Електро-снабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, email: [pach@tu-sofia.bg](mailto:pach@tu-sofia.bg), Р-л НИИКЛ “Осветителна техника” ([www.onilot.com](http://www.onilot.com))