

Оптичні методи і засоби в галузі

Системи енергетичних та світлових величин

Загальні положення

Основною величиною енергетичної та світлової систем є **потік випромінювання Φ** (Вт, якщо енергетична система та лм, якщо світлова система).

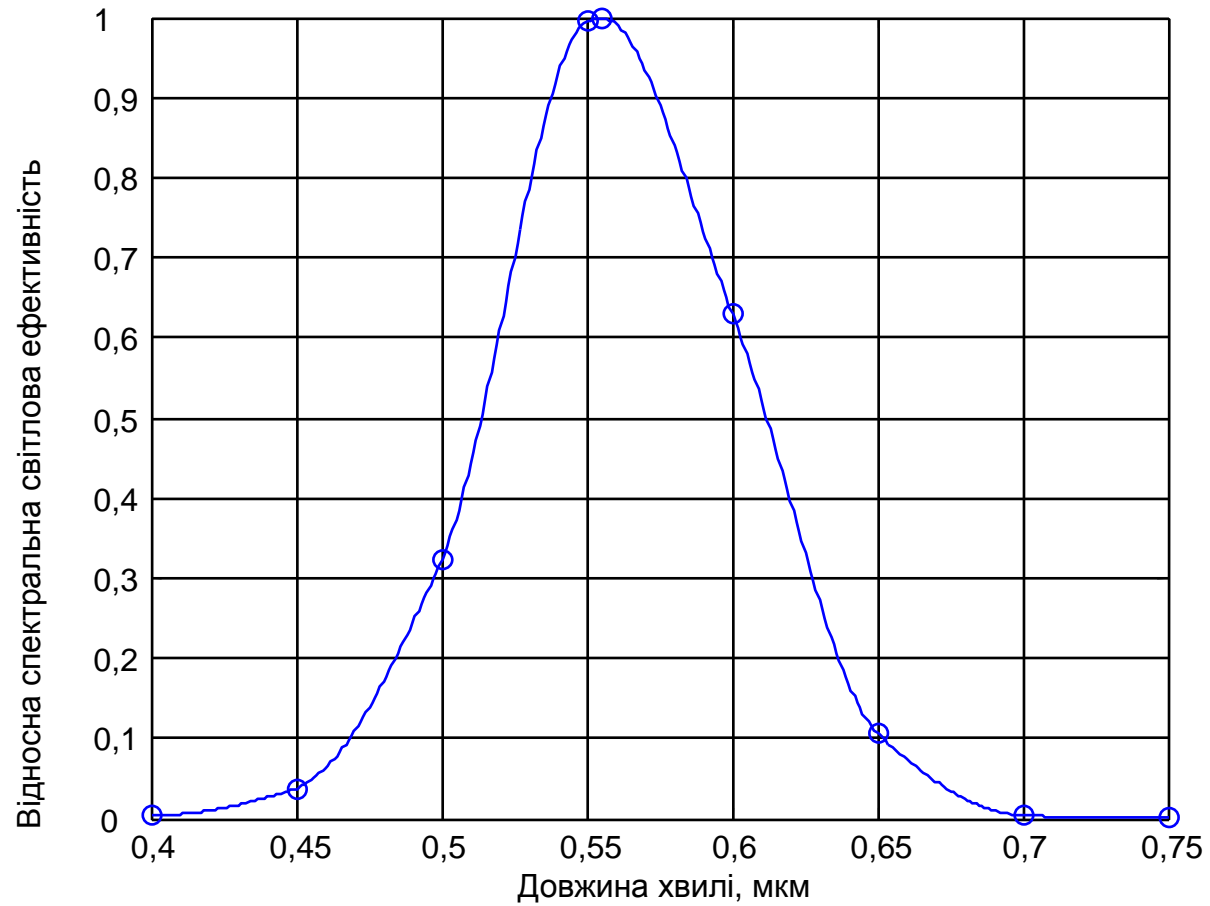
Зв'язок між енергетичними та світловими величинами встановлюють через спектральну чутливість ока K_λ .

Залежність відносної спектральної чутливості ока

$$V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{\lambda \max}}$$

від довжини хвилі називають “**крива видимості**”, “**крива відносної видимості**”, “**крива відносної спектральної світлової ефективності**”.

Загальні положення



Крива відносної спектральної світлової ефективності

Для нормального ока $K_{\lambda=0,555\text{мкм}} = 1$.

Енергетичні величини

Енергія випромінювання Q_e , яка переноситься електромагнітними хвилями, є кількісною мірою випромінювання.

Вимірюють її у Дж, ерг, калоріях, еВ, тобто у тих одиницях, у яких вимірюють інші види енергії.

Потік випромінювання Φ_e (потужність випромінювання) – кількість енергії, що випромінюється, переноситься або поглинається за одиницю часу:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}, \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт.}$$

де dQ_e - елементарна енергія випромінювання, Дж;
 dt - час, с.

Енергетичні величини

Для **рівномірного у часі** випромінювання енергії (перенесення, поглинання):

$$\Phi_e = \frac{Q_e}{t}.$$

Для **постійного потоку** випромінювання:

$$Q_e = \Phi_e t.$$

Для **змінного у часі потоку** енергія випромінювання:

$$Q_e = \int_0^t \Phi_e(t) dt$$

Енергетичні величини

Інтенсивність потоку випромінювання у певному напрямі характеризують енергетичною силою світла I_e (силою випромінювання), яка дорівнює відношенню потоку випромінювання $d\Phi_e$ до значення тілесного кута $d\Omega$, у межах якого цей потік розподіляється:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}, \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}.$$

Якщо потік рівномірно розподіляється у межах кута Ω , то:

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}.$$

Енергетичні величини

Поняття енергетичної сили світла відносять до точкового джерела, тобто джерела, найбільший розмір d якого малий порівняно з відстанню l до освітленої поверхні: $l \geq 10d$.

Енергетична сила світла – величина векторна: якщо з точки, в якій розташовано точкове джерело, у різних напрямках відкласти значення I_e , то поверхню, на якій лежать кінці векторів I_e , називають фотометричне тіло випромінювача, і характеризує вона просторовий розподіл енергетичної сили світла.

Енергетичні величини

Енергетична світність M_e характеризує поверхневу густину потоку випромінювання, що випромінюється поверхнею, і визначається відношенням потоку випромінювання $d\Phi_e$, який випромінюється у півсферу, до площі поверхні випромінювання dS :

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Для поверхні скінченних розмірів з рівномірним щодо площі випромінюванням:

$$M_e = \frac{\Phi_e}{S}.$$

Приклади: поверхня Сонця $\approx 6,1 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$;

нитка лампи розжарювання $\approx 2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$;

колба люмінесцентної лампи $\approx 300 \text{ Вт/м}^2$;

Енергетичні величини

Енергетична яскравість L_e - це поверхнева густина енергетичної сили світла у певному напрямі, що утворює кут θ з нормаллю до випромінюючої поверхні:

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos \theta}, \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}.$$

де dI_e - енергетична сила світла елемента dS випромінюючої поверхні;
 $dS \cdot \cos \theta$ - площа проекції цього елемента на площину, перпендикулярну до розглядуваного напрямку.

Енергетичні величини

Для випромінюючої поверхні скінченних розмірів S і при рівномірному щодо площі випромінюванні I_e маємо

$$L_e = \frac{I_e}{S \cos \theta}.$$

У деяких джерел енергетична яскравість не залежить від просторового напрямку: $L_e(\theta) = \text{const}$. Тому з попереднього виразу

$$I_e(\theta) = L_e S \cos \theta = I_e^0 \cos \theta,$$

закон
Ламберта

де $I_e(\theta)$ - енергетична сила світла у напрямку θ ;

I_e^0 - енергетична сила світла у напрямку, перпендикулярному до S ;

θ - кут між розглядуваним напрямком та нормаллю до поверхні (кут випромінювання).

Енергетичні величини

Закон Ламберта строго виконується тільки для ідеально розсіюючих або ідеально поглинаючих поверхонь. Але наближено йому підпорядковуються й інші випромінювачі: розжарені тіла, люмінесцентні сфери тощо. При цьому відхилення від закону істотне лише за великих значень θ , тобто у напрямках, близьких до дотичних до випромінюючої поверхні.

Для джерел, підпорядкованих закону Ламберта:

$$M_e = \pi L_e.$$

Енергетичні величини

Енергетична освітленість E_e характеризує поверхневу густину потоку випромінювання, падаючого на дану поверхню та визначається відношенням потоку випромінювання $d\Phi_e$ до площі освітленої поверхні dS :

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Для поверхонь скінченних розмірів у випадку рівномірного розподілу на поверхні:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S}.$$

Спектральні характеристики

Монохроматичне (однорідне) випромінювання має досить вузький спектральний інтервал довжин хвиль $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ і визначається довжиною хвилі λ ($\lambda_1 = \lambda - \Delta\lambda/2; \lambda_2 = \lambda + \Delta\lambda/2$).

За квантовою теорією для виникнення строго монохроматичного випромінювання потрібно, щоб рівні енергії, між якими здійснюється перехід, що супроводжується випромінюванням, були нескінченно вузькі. Проте у випадку ізольованого атома енергетичні рівні мають ширину, відмінну від нуля. Взаємодія випромінюючих атомів сприяє розширенню спектрального інтервалу – тому строго монохроматичного випромінювання не існує.

Ступінь монохроматичності характеризує відхилення від ідеальної монохроматичності:

- для безмежно вузького спектрального інтервалу $d\lambda : \mu_m = d\lambda / \lambda$;
- для спектрального інтервалу скінченної ширини $\Delta\lambda : \mu_m = \Delta\lambda / \lambda$.

Потік випромінювання, зосереджений у спектральному інтервалі від λ до $\lambda + d\lambda$ називають **монохроматичним (спектральним)** потоком випромінювання $d\Phi_{e,\lambda}$.

Спектральні характеристики

Для характеристики розподілу потоку випромінювання за довжинами хвиль у джерел із суцільним і смуговим спектром використовують **спектральну густину потоку випромінювання**:

$$\Phi_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}, \frac{\text{Вт}}{\text{МКМ}}.$$

Аналогічно визначають спектральні густини інших енергетичних величин, що якісно характеризує монохроматичне випромінювання з довжинами хвиль у межах від λ до $\lambda + d\lambda$, до величини цього інтервалу. Звідси **спектральні густини**:

- **енергетичної сили світла** $I_{e,\lambda} = \frac{dI_{e,\lambda}}{d\lambda}, \text{Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м});$
- **енергетичної світності** $M_{e,\lambda} = \frac{dM_{e,\lambda}}{d\lambda}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{м});$
- **енергетичної яскравості** $L_{e,\lambda} = \frac{dL_{e,\lambda}}{d\lambda}, \text{Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}).$

Спектральні характеристики

Функція розподілу потоку випромінювання (або іншої енергетичної характеристики величини) за спектром є найбільш важливою якісною характеристикою випромінювання, за якою можна визначити потік Φ_e для будь-якої ділянки спектра $\lambda_1 \dots \lambda_2$:

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda.$$

За складного інтегрування інтеграл у цьому виразі замінюють сумою:

$$\Phi_e = \sum_i \Phi_{e,\lambda_i} \Delta\lambda_i.$$

Світлові величини

Визначення світлових величин аналогічні визначенням відповідних енергетичних величин із відповідною заміною:

індекс “e” → “v”; “енергетичний” → “світловий”; Дж → кд

Сила світла (кандела, кд) – це сила світла, що випромінюється у перпендикулярному напрямі $1/600000$ кв.м поверхні еталонного випромінювача (чорного тіла) за температури затвердіння платини (2045 К) і тиску 101325 Па.

Світловий потік Φ_v (лм) – потужність випромінювання, яку оцінюють за її дією на людське око.

Світловий потік в 1 лм – це світловий потік, що випромінюється в одиничному тілесному куті (стерадіані) точковим джерелом із силою світла в 1 кд (кд·ср):

$$\Phi_v = 680 \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) V_\lambda(\lambda) d\lambda.$$

Світлові величини

Світлова енергія Q_v :

- для змінного у часі потоку $Q_v = \int_0^t \Phi_v(t) dt$, лм · с;

- для постійного потоку $Q_v = \Phi_v t$, лм · с.

Сила світла I_v (кд) – просторова густина світлового потоку у певному напрямку у межах тілесного кута, в якому він поширюється:

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \text{ або } I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega}.$$

Світність M_v (лм/м²) - густина випромінювання світлового потоку по площі поверхні випромінюючого тіла:

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \text{ або } M_v = \frac{\Phi_v}{S}.$$

Світлові величини

Яскравість L_v (кд/м²) – поверхнева густина сили світла у заданому напрямі, що дорівнює відношенню сили світла у цьому напрямі до площі проекції світної поверхні на площу, перпендикулярну до нього:

$$L_v = \frac{dI_v}{dS \cos \theta} \quad \text{або} \quad L_v = \frac{I_v}{S \cos \theta}.$$

Приклади: Сонце $\approx 1,5 \cdot 10^9$ кд/м²;

нитка лампи розжарювання $\approx (1,5 \dots 30) \cdot 10^6$ кд/м²;

нічне безмісячне небо $\approx 10^{-4}$ кд/м².

Світлові величини

Освітленість E_v (лк = лм/м²) – густина світлового потоку по освітлюваній поверхні, що дорівнює відношенню світлового потоку до площі поверхні на яку він падає:

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \text{ або } E_v = \frac{\Phi_v}{S}.$$

Приклади: освітленість сонячними променями у літній полудень на середніх широтах $\approx 10^5$ лк;

освітленість від повного Місяця $\approx 0,2$ лк;

освітленість, створювана вуличним освітленням ≈ 10 лк;

Спектральні густини світлових величин $\Phi_{v,\lambda}; M_{v,\lambda}; L_{v,\lambda}$ та інших визначають аналогічно енергетичним величинам $\Phi_{e,\lambda}; M_{e,\lambda}; L_{e,\lambda}$ тощо.

Зв'язок між енергетичними та світловими одиницями

Звідки, власне, береться поняття відносної спектральної чутливості ока?

Якщо у видимій області спектра у межах вузького інтервалу довжин хвиль виміряти енергетичний потік $d\Phi_{e,\lambda}$ (Вт) та світловий потік $d\Phi_{v,\lambda}$ (лм), то їхнє відношення називають **спектральна світлова ефективність випромінювання**:

$$K_{\lambda} = \frac{d\Phi_{v,\lambda}}{d\Phi_{e,\lambda}}, \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}.$$

Вона і характеризує спектральну чутливість ока.

Зв'язок між енергетичними та світловими одиницями

Для монохроматичного випромінювання $K_{\lambda=0,555\text{мкм}} = 680 \text{ лм/Вт}$.

Це означає, що:

$$\lambda = 0,555\text{мкм} : 1 \text{ лм} = 1/680 \text{ Вт} \Rightarrow 1 \text{ Вт} = 680 \text{ лм};$$

$$\lambda = 0,5\text{мкм} : 1 \text{ Вт} = 220 \text{ лм};$$

$$\lambda = 0,7\text{мкм} : 1 \text{ Вт} = 2,8 \text{ лм}.$$

Відношення

$$V_{\lambda} = \frac{K_{\lambda}}{K_{\lambda\text{max}}}$$

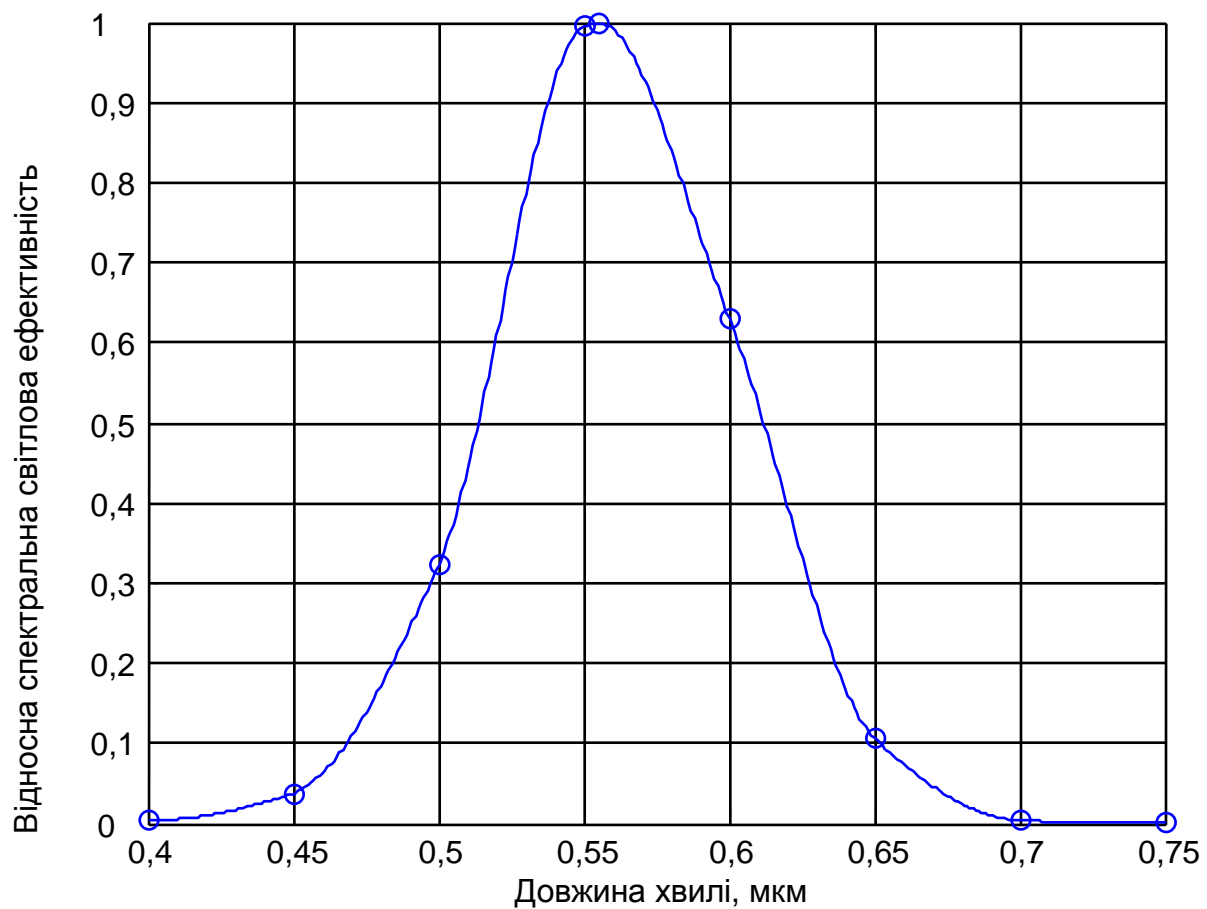
ї називають “**відносна спектральна світлова ефективність**”, “**відносна спектральна чутливість ока**”. А її графік називають “**крива відносної спектральної світлової ефективності**”, “**крива видимості**” – наступний слайд.

Зв'язок між енергетичними та світловими одиницями

Значення відносної спектральної світлової ефективності – таблиця.

λ , мкм	V_λ
0,4	0,004
0,45	0,038
0,50	0,323
0,55	0,995
0,555	1
0,60	0,631
0,65	0,107
0,70	0,004
0,75	0,0001

Зв'язок між енергетичними та світловими одиницями



Крива відносної спектральної світлової ефективності

Зв'язок між енергетичними та світловими одиницями

$$\left. \begin{aligned} K_{\lambda} &= \frac{d\Phi_{\nu,\lambda}}{d\Phi_{e,\lambda}} \Rightarrow d\Phi_{\nu,\lambda} = K_{\lambda} \cdot d\Phi_{e,\lambda} \\ \nu_{\lambda} &= \frac{K_{\lambda}}{K_{\lambda \max}} \Rightarrow K_{\lambda} = \nu_{\lambda} \cdot K_{\lambda \max} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow d\Phi_{\nu,\lambda} = \nu_{\lambda} \cdot K_{\lambda \max} \cdot d\Phi_{e,\lambda} = 680 \nu_{\lambda} d\Phi_{e,\lambda}$$

Тобто відповідність між монохроматичним потоком $d\Phi_{e,\lambda}$ (Вт)
та світловим потоком $d\Phi_{\nu,\lambda}$ (лм).

Зв'язок між енергетичними та світловими одиницями

Видимий світловий потік розраховують за всім видимим діапазоном:

$$\Phi_v = 680 \int_{0,4}^{0,76} \Phi_e(\lambda) \nu_\lambda(\lambda) d\lambda, \text{ лм.}$$

Аналогічно системі світлових величин, що оцінюють випромінювання за його дією на око, будують системи величин для оцінки випромінювання за його дією на будь-який приймач. Такі величини називають ефективними. Вони утворюються як і світлові, в результаті інтегрування відповідних енергетичних величин за спектром з урахуванням чутливості приймача на різних довжинах хвиль. Під час побудови системи таких величин і використовують **спектральну характеристику даного приймача** $S(\lambda)$, а не ν_λ .