

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний авіаційний університет

# ФІЗІОЛОГІЧНА ОПТИКА ТА КОЛОРИМЕТРІЯ

Практикум  
для здобувачів вищої освіти  
ОС «Бакалавр» спеціальності 141  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Київ 2023

УДК 537.533.3(076.5)  
Ф 504

Укладачі:

*Т. Ю. Шкварницька* — канд. техн. наук, доцент кафедри;

*Т. І. Яремич* — старший викладач кафедри;

*О. О. Шелуха* — канд. техн. наук, доцент кафедри.

Рецензент *С. О. Дмитрієв* — д-р техн. наук, проф (професор кафедри конструкцій літальних апаратів Аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету)

*Затверджено науково-методично-редакційною радою Національного авіаційного університету (протокол № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2023 р.).*

**Фізіологічна оптика та колориметрія:** практикум / уклад. :  
Ф 504 Т. Ю. Шкварницька, Т. І. Яремич, О. О. Шелуха. — К. : НАУ, 2023. —  
\_36 с.

Містить короткі теоретичні відомості та завдання для поточного контролю знань на практичних заняттях із дисципліни «Фізіологічна оптика та колориметрія».

Для здобувачів вищої освіти ОС «Бакалавр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

## ВСТУП

Курс «Фізіологічна оптика та колориметрія» викладається студентам денної і заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

У даному курсі розглядаються основні уявлення і поняття фізіологічної оптики та колориметрії, основні закономірності та методи кількісної оцінки роботи органу зору, методи колориметричних розрахунків характеристик випромінювання, що необхідні для якісної та кількісної оцінки світлового та колориметричного середовища, в якому перебуває людина.

Метою вивчення дисципліни є засвоєння студентами основних уявлень і понять фізіологічної оптики та колориметрії, механізму сприймання світла і кольору, що необхідні для вивчення спеціальних дисциплін.

Розглядаються основні закономірності роботи органу зору, методи кількісної оцінки колориметричних характеристик випромінювання. Надаються методи кількісної оцінки роботи органу зору, якості відтворення кольору та розрахунку колориметричних характеристик різних випромінювачів.

У результаті вивчення дисципліни студент мусить:

Знати: основні закономірності роботи органу зору, методи кількісної оцінки колориметричних характеристик випромінювання.

Вміти: використовувати методи кількісної оцінки роботи органу зору, характеристик випромінювання, оцінювати спектральний склад випромінювання, розуміти в колориметричних характеристиках різних випромінювачів та якості відтворення кольору.

# СВІТЛО. ЗІР. КОЛІР. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ.

## 1. Світлові величини

В світлотехніці, де основним приймачем інформації про навколишній світ є зір, прийнята система світлових величин і одиниць. Як відомо, світловий потік - променевий потік, що оцінюється за його дії на очей, відносна спектральна чутливість якого визначається стандартизованою функцією спектральної ефективності випромінювання  $V(\lambda)$ . Крива  $V(\lambda)$  і значення цієї функції для денного зору наведені на рис. 1 та в таблиці Додатку 1.

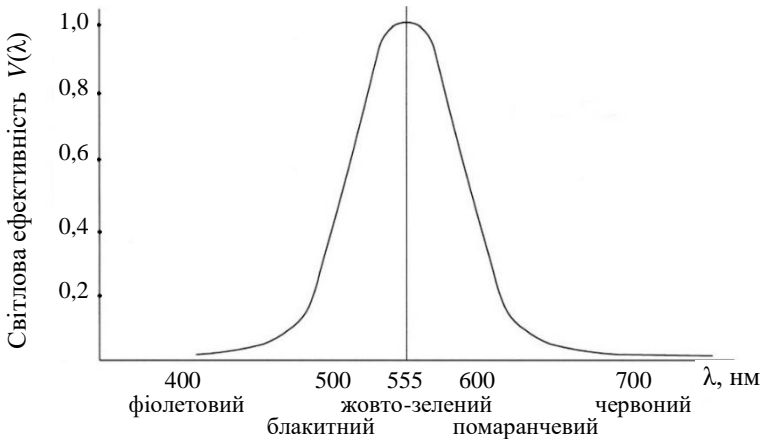


Рис. 1. Відносна спектральна ефективність  $V(\lambda)$  для денного зору.

Як встановлено в результаті вимірів, максимальне значення спектральної світлової ефективності, яку прийнято за одиницю відповідає монохроматичному потоку з довжиною хвилі  $\lambda=555$  нм (жовто-зелений) та дорівнює приблизно 683 лм/Вт. [1]

Відповідно, монохроматичний світловий потік випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$  може бути представлений у вигляді:

$$\Phi_{\lambda} = 683 \cdot V_{\lambda} \cdot \Phi_{e\lambda},$$

де  $\Phi_{\lambda}$  – світловий потік випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$ , лм;  $V_{\lambda}$  – значення відносної спектральної світлової ефективності для випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$ , лм/Вт (Додаток 1);  $\Phi_{e\lambda}$  – значення променистого потоку випромінювання заданої довжини хвилі  $\lambda$ , Вт.

В табл. 1 наведені орієнтовні межі монохроматичних випромінювань, отриманих при розкладанні природнього денного білого світла

на спектр, та кордони пурпурних кольорів, відсутніх в спектрі і одержаних змішанням синьо-фіолетових з червоним кольорів, величина яких вказується зі знаком штрих.

Біле світло - складне світло, що складається з випромінювання всього видимого діапазону довжин хвиль від червоного до фіолетового. Все розглядається у висвітленні білим світлом.

Таблиця 1

**Межі ділянок спектра і пурпурних кольорів.**

Колір	Межі ділянок спектра та пурпурних кольорів, $\lambda$ в нм
червоний	760 - 620
червоно-жовтогарячий	620 - 600
помаранчевий	600 - 590
жовтогарячий	590 - 580
жовтий	580 - 570
жовто-зелений	570 - 550
зелений	550 - 520
зелено-блакитний	520 - 500
блакитний	500 - 485
синій	485 - 470
синьо-фіолетовий	470 - 440
фіолетовий	440 - 380
фіолетово-пурпурний	380 - 520'
пурпурний	520' - 560'
пурпурно-червоний	560' - 760

Повна характеристика кольору включає в себе якісний і кількісний показники – кольоровість (колірність) і яскравість (світлота) (табл. 2).

Таблиця 2

**Параметри кольору**

Об'єктивні	Довжина хвилі $\lambda$ , нм	Чистота P, %	Яскравість L, кд/м <sup>2</sup>
Відчуття	Кольоровий тон	Насиченість H, пороги	Світлота V, пороги
	КОЛЬОРОВІСТЬ (КОЛІРНІСТЬ)		ЯСКРАВІСТЬ (СВІТЛОТА)

**Завдання для поточного контролю знань**

1.1. Променевий потік монохроматичного випромінювання з  $\lambda=700$  нм,  $\Phi_{e\lambda}=10$  Вт. Визначити світловий потік і кольоровість цього випромінювання.

1.2. Дві однакові межі білої призми опромінюються променистими потоками  $\Phi_{e\lambda_1}$  ( $\lambda_1=500$  нм) і  $\Phi_{e\lambda_2}$  ( $\lambda_2=450$  нм) (рис. 2) і мають однакові яскравості в умовах денного зору. Якщо  $\Phi_{e\lambda_1}=10$  Вт, чому дорівнює потік  $\Phi_{e\lambda_2}$ ? Визначити колір граней призми.

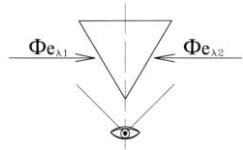


Рис. 2

1.3. Два монохроматичних джерела випромінюють однакові світлові потоки з довжинами хвиль  $\lambda_1=555$  нм та  $\lambda_2=650$  нм. Визначити кольоровість і співвідношення променевих потоків цих джерел.

1.4. Променеві потоки монохроматичних випромінювань  $\Phi_{e\lambda_1}=\Phi_{e\lambda_2}=\Phi_{e\lambda_3}=100$  Вт. Визначити світлові потоки і кольоровість цих випромінювань, якщо  $\lambda_1=400$  нм,  $\lambda_2=555$  нм та  $\lambda_3=740$  нм.

1.5. Дві плоскі білі пластинки опромінюються, одна променевим потоком з довжиною хвилі  $\lambda_1=460$  нм, інша потоком з  $\lambda_2=550$  нм. Яким має бути відношення променевих потоків, що падають на пластинки, щоб пластинки були однакової яскравості. Який колір кожної пластинки?

1.6. Монохроматичні світлові потоки  $\Phi_{\lambda_1}=\Phi_{\lambda_2}=\Phi_{\lambda_3}=6800$  лм. Визначити променисті потоки і кольору цих випромінювань, якщо  $\lambda_1=390$  нм,  $\lambda_2=555$  нм та  $\lambda_3=760$  нм.

1.7. Два монохроматичних джерела випромінюють однакові променеві потоки з довжинами хвиль  $\lambda_1=500$  нм та  $\lambda_2=650$  нм. Визначити колір і співвідношення світлових потоків цих джерел.

1.8. Дві однакові поверхні висвітлюються однаковими світловими потоками з  $\lambda_1=450$  нм та  $\lambda_2=500$  нм. Визначити променевий потік з  $\lambda_2$ , якщо променевий потік з  $\lambda_1$  дорівнює 50 Вт. Назвати кольоровість світлових потоків.

1.9. Дві плоскі білі поверхні висвітлюються одна світловим потоком  $\Phi_{\lambda_1}=1000$  лм ( $\lambda_1=450$  нм), інша світловим потоком  $\Phi_{\lambda_2}=2000$  лм ( $\lambda_2=600$  нм). Визначити їх променеві потоки і кольоровість.

1.10. Променеві потоки монохроматичних випромінювань з  $\lambda_1=600$  нм і  $\lambda_2=555$  нм відповідно становлять  $\Phi_{e\lambda_1}=10$  Вт та  $\Phi_{e\lambda_2}=5$  Вт. Визначити кольоровість і співвідношення їх світлових потоків.

1.11. Променеві потоки монохроматичних випромінювань  $\Phi_{e\lambda_1}=\Phi_{e\lambda_2}=\Phi_{e\lambda_3}=60$  Вт. Визначити їх світлові потоки, якщо  $\lambda_1=460$  нм,  $\lambda_2=550$  нм та  $\lambda_3=700$  нм. Назвати кольоровість світлових потоків.

## 2. Оптична система ока

Глибина акомодациї – відстань між найдалшою й найближчою точками ясного бачення називають глибиною акомодациї. Вимірюється в діоптріях.

Глибину акомодациї  $A$  [дптр] розраховують:

$$A = \frac{1}{l_б} - \frac{1}{l_д},$$

де  $l_б$  та  $l_д$  – відстані відповідно від найближчої та найдалшої спостережуваних точок до ока, м.

Діаметр зіниці  $d$  [мм] можна розрахувати за рівнянням:

$$d = 5 \cdot 3 \text{th}(0,4 \cdot \lg L_\phi),$$

де  $L_\phi$  – яскравість фону,  $\text{кд} \cdot \text{м}^2$ .

Середнє око – спрощена фізична модель ока, яка представляє собою оптичну систему, що має, на відміну від схематичного ока, тільки одну поверхню, що заломлює (рис. 3).

Заломлююча сила ока [дптр] - виражається за рівнянням:

$$\frac{(n_2 - n_1)}{r} = \frac{n_2}{S'} - \frac{n_1}{S},$$

де  $n_1, n_2$  – показники переломлення повітря й склоподібного тіла,  $r$  – радіус кривизни роговиці,  $S'$  – довжина ока,  $S$  – відстань до об'єкта спостереження.

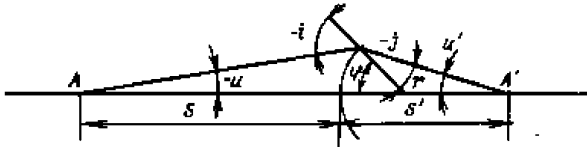


Рис. 3. Хід променів

### Параметри середнього ока

Заломлююча сила – 58,8 дптр. Задня фокусна відстань ока  $f_2=23,8$  мм. Радіус кривизни заломлюючої поверхні  $r=6,8$  мм. Показники заломлення  $n_1=1$ , другого середовища  $n_2=1,4$ . Оптична сила -  $n_2 / f_2$ .

Освітленість сітківки в зоні зображення об'єкта:

$$E_c = \frac{\tau g}{(f_2 - r)^2} \cdot L_o d^2,$$

де  $E_c$  – освітленість сітківки, лк;  $\tau$  – коефіцієнт пропускання очних

середовищ;  $g$  – площа зіниці ока,  $\text{см}^2$ ;  $f_2$  – задня фокусна відстань ока;  $r$  – радіус кривизни заломлюючої поверхні середнього ока;  $L_o$  – яскравість об'єкта,  $\text{кд}\cdot\text{м}^{-2}$ ;  $d$  – діаметр зіниці ока,  $\text{см}$ .

$$E_c = g \cdot L_o,$$

де  $E_c$  – освітленість сітківки, трол;  $g$  – площа зіниці,  $\text{мм}^2$ .

Ефективна (дійсна) освітленість сітківки:

$$E_{c-e} = \frac{g_e \cdot L_o \cdot \tau}{(f_2 - r)^2},$$

де  $E_{c-e}$  – ефективна освітленість сітківки, лк;  $g_e$  – ефективна площа зіниці,  $\text{см}^2$ .

$$E_{c-e} = g_e \cdot L_o,$$

де  $E_{c-e}$  – ефективна освітленість сітківки, трол;  $g_e = \pi r^2(1 - 0,0425r^2 + 0,00067r^4)$  – ефективна площа зіниці,  $\text{мм}^2$ ;  $r$  – радіус зіниці,  $\text{мм}$ .

Освітленість зіниці круглою плямою з кутовим розміром кола  $15'$ ,

$$E_s = 0,665 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^2 \cdot L_o,$$

де  $E_s$  – освітленість зіниці, лк;  $\alpha$  – кутовий розмір круга, мін.

Абсолютна світлова чутливість [ $\text{кд}\cdot\text{м}^{-2}$ ] – визначається як величина, зворотна величині абсолютного світлового порога, тобто найменшій величині світлового подразника, при якому вже виникає зорове відчуття. Визначається при  $L_\phi = 0$ :

$$L_{\Pi} = L_{\Pi \alpha=50} (0,047 + \sqrt{\Delta\omega})^2,$$

де  $L_{\Pi \alpha=50} = 10^{-6}$ ,  $\text{кд}\cdot\text{м}^{-2}$  – абсолютний світловий поріг – яскравість кола з білим випромінюванням, що виявляється на фоні з  $L_\phi=0$  при кутовому розмірі кола  $\alpha=50^\circ$  й імовірності виявлення  $p=0,5$ ;  $\omega$  – тілесний кут, у межах якого видне коло.

$$L_{\Pi} = 2,06 \cdot 10^{-9} \cdot \Delta\omega^{-1},$$

де  $L_{\Pi}$  – порогова яскравість кола, що виявляється на фоні з яскравістю  $L_\phi=0$ ,  $\Delta\omega$  – тілесний кут, що опирається на коло з кутовим розміром  $\alpha < 15'$ ,  $\Delta\omega = 0,665 \cdot 10^{-8} \alpha^2$  при  $\alpha < 15'$ .  $L_{\Pi} = c \cdot \alpha^n$  (табл. 3). [5]

Таблиця 3

Залежність коефіцієнтів  $n$  та  $c$  від  $\alpha$

$\alpha$ , не більше	$15'$	$15'$ — $120'$	$120'$ — $600'$
$n$	2	1,25	0,54
$c$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$10^{-2}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$



Пороговий блиск  $E_{\text{Пб}}$  [лк] – порогова освітленість зіниці, при  $L_{\text{ф}}=0$

$$E_{\text{Пб}} = L_{\text{П}} \cdot \Delta\omega,$$

де  $\Delta\omega$  – тілесний кут, у межах якого розташоване джерело, що має абсолютну граничну яскравість.

### ***Завдання для поточного контролю знань***

2.1. Визначте без урахування та з урахуванням акомодатії заломлюючу силу середнього ока, якщо на кожную діоптрію акомодатії показник заломлення збільшується на 0,004, а радіус кривизни зменшується на 0,04 мм. Дана глибина акомодатії  $A=3$  дптр.

2.2. Визначте перше та друге фокусні відстані та оптичну силу редукованого ока. Дано:  $n_1=1$ ,  $n_2=1,4$   $r=6,8$  мм.

2.3. Середнє око має фокусну відстань  $f_2=23,8$  мм та  $n_2=1,4$  розташовано у воді з показником заломлення  $n_1=1,33$ .

Визначте першу фокусну відстань, радіус кривизни та заломлюючу силу редукованого ока розташованого у воді.

2.4. На відстані 13 мм від роговиці ока розташована збираюча лінза. При цьому точка, що розташована у передньому фокусі її, видна як ближня точка ясного зору.

Визначте глибину акомодатії такого ока, якщо фокусна відстань лінзи  $f_1=25$  мм.

2.5. Визначте глибину акомодатії нормального ока, якщо ближні відстані дорівнюють 0,25 м та 0,3 м.

2.6. Визначте глибину акомодатії ока, у якого ближня відстань дорівнює 0,45 м, а дальня 1 м.

2.7. Визначте діаметри зіниці ока за яскравостей поля зору  $L_1=1$  кд·м<sup>-2</sup> та  $L_2=100$  кд·м<sup>-2</sup>.

2.8. Об'єкт спостереження має форму кола з кутовим розміром діаметра  $d=10'$ . Яскравість кола  $L_0=1000$  кд·м<sup>-2</sup>, він розташований на фоні з яскравістю  $L_{\text{ф}}=10$  кд·м<sup>-2</sup>. Лінія зору спрямована до центра кола й перпендикулярна його площини. Коло випромінює так само, як стандартне джерело білого світла типу А. Спектральні коефіцієнти пропускання  $\tau_{\lambda}$  очних середовищ наведені нижче:

$\lambda$ , нм	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
$\tau_{\lambda}$	0,09	0,16	0,32	0,43	0,46	0,5	0,53	0,56	0,57	0,59	0,61	0,63	0,65	0,66	0,69

Визначте освітленість сітківки в люксах та троландах; освітленість зіниці та ефективну освітленість сітківки.

2.9. Кругла пляма має яскравість  $L_0=1000$  кд·м<sup>-2</sup> і розташована на фоні з яскравістю  $L_\phi=1$  кд·м<sup>-2</sup>. Кутовий розмір діаметра плями  $\alpha=10'$ . Пляма випромінює, як стандартне джерело А. Лінія зору перпендикулярна площини плями.

Визначте освітленість сітківки в люксах та троландах, освітленість зіниці.

2.10. Кругла пляма має яскравість  $L_0=1000$  кд·м<sup>-2</sup> і розташована на фоні з яскравістю  $L_\phi=0,005$  кд·м<sup>-2</sup>. Кутовий розмір діаметра плями  $\alpha=10'$ . Пляма випромінює, як стандартне джерело А. Лінія зору перпендикулярна площини плями.

Визначте освітленість сітківки в люксах та троландах, освітленість зіниці.

2.11. Кутовий розмір діаметра круглої плями  $\alpha=10'$ . Пляма розташована на фоні з  $L_\phi=0$ .

Визначте граничну яскравість плями й пороговий блиск, якщо лінія зору спрямована до центра плями й перпендикулярна його площини.

2.12. Рівнояскрава куля, кутовий розмір якої із точки спостереження дорівнює  $\alpha=12'$ , розташована на фоні з яскравістю,  $L_\phi=0$ . Лінія зору спрямована до центра кулі. Освітленість зіниці  $E_s=4$  лк.

Визначте: освітленість сітківки; ефективну освітленість сітківки; світловий потік, випромінюваний кулею.

2.13. Рівнояскрава куля з кутовим розміром діаметра  $\alpha=12'$ , розташована на фоні з яскравістю,  $L_\phi=0$ . Лінія зору спрямована до центра кулі. Освітленість зіниці  $E_s=0,2$  лк.

Визначте: освітленість сітківки; ефективну освітленість сітківки в троландах.

2.14. Рівнояскравий циліндр у якого бокова поверхня випромінює монохроматичний однорідний потік з  $\lambda=600$  нм, розташовано як показано на рис. 4 Лінія зору співпадає з  $l$ . Дано: освітленість, створювана на зіниці ока  $E=0,1$  лк, яскравість фона  $L_\phi=1$  кд·м<sup>-2</sup>,  $H=3$  м;  $l=4$  м;  $h=0,5$  м;  $D=2,5$  м.

Визначте освітленість сітківки в троландах, яку створює фон і циліндр, променевий та світловий потоки, що випромінює бічна поверхня циліндра.

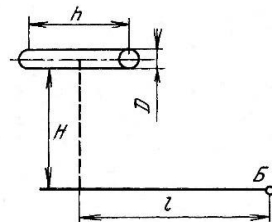


Рис. 4

### 3. Функції зору

Контрастна чутливість – здатність людини бачити об'єкти, що слабо відрізняються за яскравістю від фону. [4]

Визначається величиною, зворотною пороговому контрасту

$$k_{\Pi} = \frac{\Delta L}{L_{\Phi}}$$

де  $\Delta L$  – порогова різниця яскравостей,  $L_{\Phi}$  – яскравість фону, кд·м<sup>-2</sup>.

Пороговий негативний контраст кола при ймовірності виявлення  $p=0,5$

$$(k_{\Pi})_{0,5} = \frac{1}{b \cdot L_{\Phi}^{1-a}},$$

де  $a$  та  $b$  – параметри, що залежать від кутового розміру кола і яскравості фону (Додаток 2).

Пороговий позитивний контраст кола при ймовірності виявлення  $p=0,5$ :

$$(k_{\Pi})_{0,5} = k_s (10^{0,9\alpha} - 1) = k_s \cdot C_{\alpha},$$

де  $\alpha$  – кутовий розмір (при  $1' < \alpha < 16'$ ) кола, мін.;  $k_s$  – параметр, що залежить від  $L_{\Phi}$ ,  $k_s = 0,2 / (1 + \lg L_{\Phi})$ .

Пороговий контраст компактного об'єкта з імовірністю виявлення  $p=0,5$  (метод порогів)

$$(k_{\Pi})_{0,5} = k_s C_{\alpha_{\text{екв}}},$$

$C_{\alpha_{\text{екв}}}$  визначається за вираженням  $C_{\alpha_i}$  для кола із заміною  $\alpha_i$  на  $\alpha_{\text{екв}}$ , де  $\alpha_{\text{екв}} = 2\sqrt{(A/\pi)}$ ;  $A$  – площа компактного об'єкта в кутових мінутах у квадраті.

Значення  $C_{\alpha_i}$ , наведені в табл. 4

Таблиця 4

Залежність  $C_{\alpha_i}$  від  $\alpha_i$

$\alpha_i$	$\alpha < 1'$	$1 < \alpha < 16'$	$\alpha > 16'$
$C_{\alpha_i}$	$\frac{1}{10^{0,9\alpha_0} - 1}$	$\frac{11,9}{\alpha^2}$	$\frac{0,693}{\sqrt{\alpha}}$

Пороговий контраст прямокутника при ймовірності виявлення  $p=0,5$

$$k_{\Pi d} = \sqrt{k_{\Pi l} \cdot k_{\Pi d}} = k_s \sqrt{C_{d_{\text{екв}}} \cdot C_{b_{\text{екв}}}},$$

де  $l$  і  $d$  – кутові розміри сторін прямокутника,  $k_{\Pi l}$  і  $k_{\Pi d}$  – еквівале-

нтні граничні контрасти з виявлення квадратів з кутовими розмірами сторін  $l$  і  $d$  у кутових мінутах.

Пороговий контраст при заданій ймовірності виявлення  $p$  :

$$(k_{\Pi})_p = (k_{\Pi})_{0,5}(1 + \sigma_{\text{отн}}x_{p+}),$$

де  $(k_{\Pi})_p$  і  $(k_{\Pi})_{0,5}$  – порогові контрасти при ймовірності виявлення  $p$  і  $p=0,5$ ;  $\sigma$  – середня квадратична похибка граничного контрасту;  $x_{p+}$  – визначають за  $\Phi^*(x)=p$  (Додаток 3);  $\sigma_{\text{отн}}=\sigma/(k_{\Pi})_{0,5}=0,333$  при визначенні порогового контрасту методом порогів.

Пороговий контраст, знайдений за методом постійних стимулів:

$$(k_{\Pi})_{0,5}^{\text{п.с.}} = \sigma x_{p-},$$

де  $x_{p-}$  визначають по  $\Phi^*(x)=p^-$  (Додаток 3);  $p^-$  – ймовірність правильної відповіді про відсутність пред'явлення стимулу,  $p^-=1-p_{\text{ф.тр}}$ ;  $p_{\text{ф.тр}}$  – ймовірність фіктивних тривог;  $\sigma$  – середня квадратична похибка.

$$(k_{\Pi})_{0,5} = (k_{\Pi})_{0,5} \frac{x_{p-}}{3} = (k_{\Pi})_{0,5} c_1$$

Пороговий контраст із ймовірністю  $p$ , знайдений методом постійних стимулів

$$(k_{\Pi})_p^{\text{п.с.}} = (k_{\Pi})_{0,5} \left(1 + \frac{x_{p+}}{x_{p-}}\right)$$

При двох альтернативах без інструкцій спостерігачеві

$$\sigma_{\text{отн}}^{\text{п.с.}} = \frac{\sigma}{(k_{\Pi})_{0,5}^{\text{п.с.}}} = \frac{1}{x_{p-}},$$

де  $(k_{\Pi})_{0,5}^{\text{п.с.}}$  – пороговий контраст, знайдений методом постійних стимулів при ймовірності виявлення  $p=0,5$ ;  $x_{p-}$  – визначається по  $\Phi^*(x)=1-p_{\text{ф.тр}}$ ,  $p_{\text{ф.тр}}$  – ймовірність фіктивних тривог, яка залежить від інструкції спостерігача й апіорної ймовірності пред'явлення сигналу (стимулу). Значення параметрів наведені в табл. 5.

Таблиця 5

**Значення параметрів для різних інструкцій**

Параметр	Інструкція				
	небажані пропуски сигналів	небажані пропуски сигналів і фіктивні тривоги			небажані фіктивні тривоги
$p_{\text{апр}}$	0,5	0,35	0,5	0,75	0,5
$p_{\text{ф.тр}}$	0,34	0,098	0,14	0,21	0,04
$\sigma_{\text{отн}}^{\text{п.с.}}$	2,44	0,775	0,925	1,21	0,57
$c_1 = x_{p-}/3$	0,138	0,43	0,36	0,27	0,585

По Блэкуэллу:

$\sigma_{\text{отн}}^{\text{П.С.}} = 0,48$  при чотирьох альтернативах,

$\sigma_{\text{отн}}^{\text{П.С.}} = 0,39$  с виправленням на випадковий успіх.

$$(p_{\text{ф.тр}})_{p_{\text{апр}}} = \frac{(p_{\text{ф.тр}})_{0,5} \cdot p_{\text{апр}}}{0,5},$$

де  $(p_{\text{ф.тр}})_{p_{\text{апр}}}$  і  $(p_{\text{ф.тр}})_{0,5}$  – відповідно ймовірності фіктивних тривог при апріорних імовірностях  $p_{\text{апр}}$  й 0,5.

Імовірність виявлення  $p_{\text{іст}}$  з виправленням на випадковий успіх

$$p_{\text{іст}} = \frac{(p_{\text{вияв}} - p_{\text{ф.тр}})}{1 - p_{\text{ф.тр}}},$$

де  $p_{\text{вияв}}$  – імовірність виявлення об'єкта.

Ефективна яскравість

$$L_{\text{эф}} = \frac{1}{\vartheta} \int_0^{t_p} L(t) f(t) dt,$$

де  $L(t)$  – функція зміни фотометричної яскравості спалаху;  $f(t)$  – функція інерції зору;  $\vartheta$  – час інерції.

Функції інерції зору

Аллара  $f(t) = e^{-t_p/\vartheta}$ ,

Блонделя й Рея  $f(t) = \frac{\vartheta^2}{(\vartheta + t_p)^2}$ .

Залежність часу інерції  $\vartheta$  від яскравості фону наведена в таблиці 6.

Таблиця 6

**Залежність часу інерції  $\vartheta$  від яскравості фону**

$L_{\text{ф}}, \text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	10	100	1000
$\vartheta, \text{с}$	0,2	0,2	0,19	0,167	0,134	0,1	0,066	0,051	0,05

Яскравість завіси, що вуалює,

$$\beta_e = \frac{10 \cdot E_3}{\theta},$$

де  $\beta_e$  – яскравість завіси, що вуалює,  $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $E_3$  – освітленість зіниці ока,  $\theta$  – кут між лінією зору й напрямком променю світла від точкового джерела до ока.

Для різних яскравостей центральної  $L_1$  і периферичної  $L_2$  зон поля спостереження яскравість завіси, що вуалює  $\beta_e$ , описується при  $L_1 > L_2$  виразом

$$\beta_e = 2\pi m L_2 f(\theta) \frac{\theta}{\theta_1}^2,$$

де  $m=3 \cdot 10^{-3}$ .

Сприйманий контраст

$$k' = \frac{k}{(1 + \beta_e / L_\Phi)},$$

де  $k'$  та  $k$  – сприйманий контраст і контраст об'єкта з фоном;  $\beta_e$  – яскравість завіси, що вуалює,  $L_\Phi$  – яскравість фону.

Світлота фону та найпростіших фігур при  $L_\Phi > L_0$

Світлота фону:

$$B_i = \int_0^{L_i} \frac{dL}{\Delta L_n}.$$

1) нічний зір

$$B_i = b_1 \int_0^{L_i} \frac{dL}{L^{a_1}} = \frac{b_1}{1-a_1} L^{(1-a_1)} = 800 L_i^{0,5};$$

при  $L_i \leq 0,01$  кд·м<sup>-2</sup>  $B_{0,01}=80$  порогів;

2) сутінковий зір

$$B_i = B_{0,01} + \frac{b_2}{1-a_2} (L_i^{(1-a_2)} - 0,01^{(1-a_2)});$$

при  $0,01 < L_i < 10$  кд·м<sup>-2</sup>  $B_{10}=80 + 400(10^{0,3} - 0,25) = 780$  порогів;

3) денний зір

$$B_i = 780 + \frac{b_3}{1-a_3} (L_i^{(1-a_3)} - 10^{(1-a_3)}) = 780 + 6000(L_i^{0,02} - 1,05).$$

Значення параметрів  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$  наведені в таблиці 7.

Таблиця 7

**Параметри для визначення світлоти фону**

Параметр	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
Значення	0,5	0,7	0,98	400	120	120

Вирази, що описують світлоту фону наведені у таблиці 8.

Таблиця 8

**Вирази світлоти фону**

Діапазон яскравості фону, кд·м <sup>-2</sup>	Світлота $B_\Phi$ , порого
$L_\Phi \leq 0,01$	$B_\Phi = 800 L_\Phi^{0,5}$
$0,01 \leq L_\Phi \leq 10$	$B_\Phi = 80 + 400(L_\Phi^{0,3} - 0,25)$
$L_\Phi > 10$	$B_\Phi = 780 + 6000(L_\Phi^{0,02} - 1,05)$

### *Завдання для поточного контролю знань*

3.1. Визначте значення негативних порогових контрастів кола, розташованого на фоні з яскравістю  $L_{\phi}=3,7$  кд·м<sup>-2</sup> при ймовірності виявлення  $p=0,5$ . Кутові розміри кола  $\alpha_1=1'$  й  $\alpha_2=100'$ . Лінія зору перпендикулярна площини кола.

3.2. Визначте граничні різниці яскравостей кола з негативним контрастом при ймовірності виявлення  $p=0,5$ .

Кутові розміри кола  $\alpha_1=1'$  й  $\alpha_2=10'$ . Коло розташовується на фоні з яскравістю  $L_{\phi 1}=3,7$  кд·м<sup>-2</sup>,  $L_{\phi 2}=200$  кд·м<sup>-2</sup>. Лінія зору перпендикулярна площині кола.

3.3. Визначте значення позитивних порогових контрастів кола, кутовий розмір якого  $\alpha=10'$ , при яскравостях фону:  $L_{\phi 1}=1$  кд·м<sup>-2</sup>,  $L_{\phi 2}=10$  кд·м<sup>-2</sup>,  $L_{\phi 3}=40$  кд·м<sup>-2</sup>,  $L_{\phi 4}=200$  кд·м<sup>-2</sup> та мінімальні значення порогових контрастів при цьому кутовому розмірі кола. Лінія зору перпендикулярна площині кола. Імовірність виявлення  $p=0,5$ .

3.4. Пороговий контраст кола, знайдений методом порогів,  $(k_{п})_{0,5}=0,049$  при ймовірності виявлення  $p=0,5$ .

Визначте порогові контрасти цього об'єкта спостереження для ймовірностей виявлення  $p=0,65$  й  $p=0,99$ .

3.5. Визначте позитивні порогові контрасти кола з ймовірностями виявлення  $p=0,5$  і  $p=0,99$ . Коло розташоване на рівнояскравому фоні з яскравістю фону  $L_{\phi}=100$  кд·м<sup>-2</sup> і має кутовий розмір  $\alpha=2,5'$ . Граничні контрасти будуть використані в наступних ситуаціях: 1) необхідно мати мінімум пропусків сигналів (наприклад, при відбракуванні відповідальних деталей); 2) небажані й пропуски сигналів і фіктивні тривоги (наприклад, при роботі оператора за екраном локатора); 3) небажані фіктивні тривоги (наприклад, при відбракуванні невідповідних деталей).

3.6. Визначте світлоту фона, якщо яскравість  $L_{\phi 1}=0,01$  кд·м<sup>-2</sup>,  $L_{\phi 2}=1$  кд·м<sup>-2</sup>,  $L_{\phi 3}=1000$  кд·м<sup>-2</sup>.

3.13. Коло з кутовим розміром діаметра має: 1) яскравість  $L_0=100$  кд·м<sup>-2</sup> на фоні з яскравістю  $L_{\phi}=10$  кд·м<sup>-2</sup>; 2)  $L_0=10$  кд·м<sup>-2</sup> на фоні  $L_{\phi}=100$  кд·м<sup>-2</sup>. Визначте на скільки порогів світлота кола відрізняється від світлоти фона у першому та другому випадках.

3.7. Джерело світла працює з неперервно повторюючими проблисками. Фотометрична яскравість  $L=10^5$  кд·м<sup>-2</sup>. Період проблиска  $T=0,016$  с. Час проблиска  $t=0,001$  с. Визначте ефективну яскравість проблиска.

#### 4. Колориметрична система RGB

Колориметрія - наука про кількісне вираження кольору. Як показують дослідження, будь-який колір може бути отриманий змішуванням трьох так званих основних кольорів в певних співвідношеннях, взаємно незалежних, тобто таких кольорів, які не можуть бути отримані змішуванням двох інших.

У колірній системі RGB в якості основних кольорів прийняті монохроматичні випромінювання:

- червоний R з довжиною хвилі  $\lambda=700,0$  нм;
- зелений G з довжиною хвилі  $\lambda=546,1$  нм;
- синій B з довжиною хвилі  $\lambda=435,8$  нм.

Будь-який колір  $\Phi$  в системі RGB може бути відтворений шляхом змішання основних кольорів RGB у відповідних кількостях  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$ :

$$\Phi = r'R + g'G + b'B,$$

таке рівняння називають колірним рівнянням, а коефіцієнти  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$  – координатами кольору.

Яскравість кольору  $L$  визначається:

$$L = 683 \cdot (r' \Lambda_R + g' \Lambda_G + b' \Lambda_B)$$

де  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$  – координати кольору;  $\Lambda_R$ ,  $\Lambda_G$ ,  $\Lambda_B$  – яскравості коефіцієнти основних кольорів системи RGB.

За одиниці основних кольорів RGB прийняті різні їх кількості - вони обрані так, щоб при їх змішуванні можна було отримати рівноенергетичний білий:

$$R - \lambda_R=700 \text{ нм}, \Phi_R=683 \text{ лм}, L_R=683 \text{ кд}\cdot\text{м}^{-2}, \Lambda_R=1;$$

$$G - \lambda_G=546,1 \text{ нм}, \Phi_G=3135 \text{ лм}, L_G=3135 \text{ кд}\cdot\text{м}^{-2}, \Lambda_G=4,591;$$

$$B - \lambda_B=435,8 \text{ нм}, \Phi_B=41 \text{ лм}, L_B=41 \text{ кд}\cdot\text{м}^{-2}, \Lambda_B=0,06,$$

де  $\Phi_R$ ,  $\Phi_G$ ,  $\Phi_B$ ,  $L_R$ ,  $L_G$ ,  $L_B$ ,  $\Lambda_R$ ,  $\Lambda_G$ ,  $\Lambda_B$  – відповідно світлові потоки, яскравості і яскравісні коефіцієнти основних кольорів системи RGB.

Таким чином, для отримання білого необхідно забезпечити таку пропорцію суміші:

$$\Lambda_R : \Lambda_G : \Lambda_B = (L_R : L_G : L_B) / 683 = 1 : 4,591 : 0,06$$

Якщо потрібно визначити тільки якісну характеристику кольору – кольоровість, то зручніше мати справу не з абсолютними величинами  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$ , а з їх співвідношеннями:

$$r = r' / r' + g' + b' = r' / m; \quad g = g' / r' + g' + b' = g' / m; \quad b = b' / r' + g' + b' = b' / m;$$
$$m = r' + g' + b',$$

де  $r$ ,  $g$ ,  $b$  – координати кольоровості;  $m$  – модуль кольору.



Система RGB при всій своїй простоті володіє істотними недоліками, що утрудняють виконання кольірних розрахунків на її основі. Не заглиблюючись в суть цих проблем, відзначимо лише, що основним недоліком системи є наявність негативних координат для великої групи реальних кольорів. Другим недоліком системи RGB є необхідність розрахунку всіх трьох компонентів кольору при визначенні його яскравості.

З цих причин міжнародною комісією з освітлення (МКО) була запропонована колориметрична система XYZ. [2]

### ***Задачі для поточного контролю знань***

4.1. Випромінювання характеризується наступним кольоровим рівнянням:  $\Phi = R+5G+4B$ . Визначити координати кольоровості випромінювання  $r$ ,  $g$  та його яскравість в системі RGB.

4.2. Яскравість джерела випромінювання  $L=6690$  кд·м<sup>-2</sup> та координати кольоровості випромінювання цього джерела в системі RGB  $r=0,2$ ;  $g=0,1$ . Запишіть кольірне рівняння випромінювання цього джерела.

4.3. Визначити подібність і відмінність кольорів  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$  за кольоровістю та яскравістю, які характеризуються наступними кольірними рівняннями в системі RGB:

- 1)  $\Phi_1 = 0,3R+0,5G+0,2B$  та  $\Phi_2 = 0,1R+0,5G+0,4B$ ;
- 2)  $\Phi_1 = 2R+3G+5B$  та  $\Phi_2 = R+1,5G+2,5B$ ;
- 3)  $\Phi_1 = R+2G+3B$  та  $\Phi_2 = 2R+G+2B$ ;
- 4)  $\Phi_1 = 0,3R+3G+0,2B$  та  $\Phi_2 = R+3G+2B$ .
- 5)  $\Phi_1 = 3R+G+2B$  та  $\Phi_2 = R+3G+2B$
- 6)  $\Phi_1 = 0,3R+3G+0,2B$  та  $\Phi_2 = R+5G+4B$
- 7)  $\Phi_1 = 0,1R+0,5G+0,4B$  та  $\Phi_2 = R+3G+2B$

4.4. Випромінювання характеризуються кольірними рівняннями. Визначити подібність і відмінність кольорів за кольоровістю та яскравістю:

- 1)  $\Phi_1 = 2R+3G+5B$  та  $\Phi_2 = 0,3R+0,5G+0,2B$ ;
- 2)  $\Phi_1 = 2R+3G+5B$  та  $\Phi_2 = 2R+G+2B$ ;
- 3)  $\Phi_1 = 0,1R+0,5G+0,4B$  та  $\Phi_2 = R+5G+4B$ ;
- 4)  $\Phi_1 = 0,3R+3G+0,2B$  та  $\Phi_2 = R+3G+2B$ .
- 5)  $\Phi_1 = 0,3R+0,5G+0,2B$  та  $\Phi_2 = R+1,5G+2,5B$ ;
- 6)  $\Phi_1 = 3R+G+2B$  та  $\Phi_2 = R+1,5G+2,5B$ ;
- 7)  $\Phi_1 = R+2G+3B$  та  $\Phi_2 = R+5G+4B$ .

## 5. Колориметрична система МКО XYZ

Основні кольори RGB тут замінені нереальними, неіснуючими в природі квітами XYZ, що грають лише роль зручних математичних символів. Ці кольори були обрані так, щоб полегшити колориметричні розрахунки. За допомогою лінійних перетворень вдалося від системи RGB перейти до системи XYZ.

В системі XYZ колірне рівняння має вигляд:

$$\Phi = x'X + y'Y + z'Z,$$

де  $\Phi$  – шуканий колір випромінювання, який може бути отриманий змішуванням основних кольорів XYZ в кількостях  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ;  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – основні кольори;  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  – координати кольору.

Відповідно до умов побудови колориметричної системи XYZ світлові потоки основних кольорів  $X$  та  $Z$  –  $\Phi_X$  та  $\Phi_Z$ , а отже, їх яскравості  $L_X$  та  $L_Z$  прийняті рівними нулю, а світловий потік кольору  $Y$  –  $\Phi_Y = 683$  лм і його яскравість  $L_Y = 1$ .

Таким чином, для кількісної оцінки кольору випромінювання досить визначити ординату  $y'$ . Яскравість визначається:

$$L = 683 \cdot (x'L_X + y'L_Y + z'L_Z),$$

де  $L$  - яскравість кольору;  $L_X$ ,  $L_Y$ ,  $L_Z$  - яскравості коефіцієнти основних кольорів XYZ.

Так як  $L_X = 0$  та  $L_Z = 0$ , а  $L_Y = 1$ , то  $L = 683 \cdot y'$ . [2]

### *Задачі для поточного контролю знань*

5.1. Випромінювання характеризується наступним кольоровим рівнянням:  $\Phi = 2X + 3Y + 5Z$ . Визначити координати кольоровості випромінювання ( $x$ ;  $y$ ) і його яскравість в системі XYZ.

5.2. Випромінювання характеризуються колірними рівняннями. Визначити подібність і відмінність кольорів

1)  $\Phi_1 = 2X + 3Y + 5Z$  та  $\Phi_2 = 0,3X + 0,5Y + 0,2Z$ ;

2)  $\Phi_1 = 2X + 3Y + 5Z$  та  $\Phi_2 = X + 1,5Y + 2,5Z$ ;

3)  $\Phi_1 = 0,1X + 0,5Y + 0,4Z$  та  $\Phi_2 = X + 5Y + 4Z$ ;

4)  $\Phi_1 = 0,3X + 3Y + 0,2Z$  та  $\Phi_2 = X + 3Y + 2Z$ .

5.3. Визначити відмінності яскравостей кольорів, які характеризуються наступними колірними рівняннями в системах RGB і XYZ:  $\Phi_1 = 0,3R + 0,5G + 0,2B$  та  $\Phi_2 = 0,3X + 0,5Y + 0,2Z$ .

5.4. Визначити відмінності яскравостей кольорів, які характеризуються наступними колірними рівняннями в системах RGB і XYZ:  $\Phi_1 = 0,3X + 3Y + 0,2Z$  та  $\Phi_2 = R + 1,5G + 2,5B$ .

## 6. Діаграма кольоровості

Для якісної оцінки кольору необхідно вміти визначити його кольоровість. Розрахункові координати кольору  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  дозволяють в свою чергу визначити координати кольоровості з співвідношень:

$$x = x' / m, \quad y = y' / m, \quad z = z' / m,$$

де  $m = x' + y' + z'$ .

Звідси видно, що:  $x + y + z = 1$ .

Отже, для характеристики кольоровості досить двох координат ( $x$ ;  $y$ ), що дозволяє зображати кольоровість випромінювання точкою в прямокутній системі координат ХУ на діаграмі кольоровості (Додаток 4). [4]

Діаграми кольоровості побудовані по відношенню до еталонів білого світла МКО: джерела А (лампа розжарювання), В (пряме сонячне світло), С (дифузне світло північного неба) та Е (теоретичний рівноенергетичний, ідеально білий).

Колірна температура – це температура абсолютно чорного тіла, при якій кольоровість випромінювання абсолютно чорного тіла і шуканого випромінювання однакові, вимірюється в градусах К.

Характеристики кольоровості випромінювання різних джерел світла - колірні температури і координати кольоровості (табл. 9).

Таблиця 9

**Кольорові характеристики випромінювання різних джерел світла**

	Джерела світла	Колірна температура $T_k, ^\circ K *$	Індекс кольоро- передачі $R_a, \%$	Координати кольоровості	
				$x$	$y$
Еталони білого світла	А (лампа розжарювання)	2856	-	0,448	0,407
	В (пряме сонячне світло)	4874	-	0,348	0,352
	С (світло блакитного неба)	6774	-	0,310	0,316
	Е (рівноенергетичний білий)	5460	-	0,330	0,330
Теплові джерела світла	ЛН і ГЛН	2700-3000	100 Для теплових джерел світла це умовна величина	0,448	0,407
Газорозрядні джерела світла	Люмінесцентні лампи:				
	ЛТБ	2700	53	0,430	0,390
	ЛБ	3500	57	0,400	0,400
	ЛТБЦ	2700	80	0,460	0,410
	ЛЕЦ	3900	85	0,380	0,370
	ЛХБ	4500	65	0,360	0,390
ЛХЕЦ	5200	93	0,340	0,350	

	ЛДЦ	6000	92	0,330	0,350
	ЛД	6500	73	0,320	0,340
	Нагрієва лампа високого тиску НЛВД	1900-3000	20-85	0,500	0,410
	Дугова ртутна лампа				
	ДРЛ	3300-4000	40-59	0,390	0,400
	Ксенонова лампа	6300	> 80	0,330	0,330
	Металогалогенні лампа	2200-6700	55-93	0,308	0,318
Напів-провідникові джерела світла	світлодіоди	2950	≥75	0,440	0,410
	СД	3150	-	0,450	0,450
		3370	-	0,410	0,390
		3500	-	0,420	0,390

Для оцінки кольоровості випромінювання треба визначити довжину хвилі  $\lambda$ , нм – колірною тону та чистоти  $P$ , % – насиченості по діаграмі кольоровості по відношенню до еталонного білому (рис. 5).

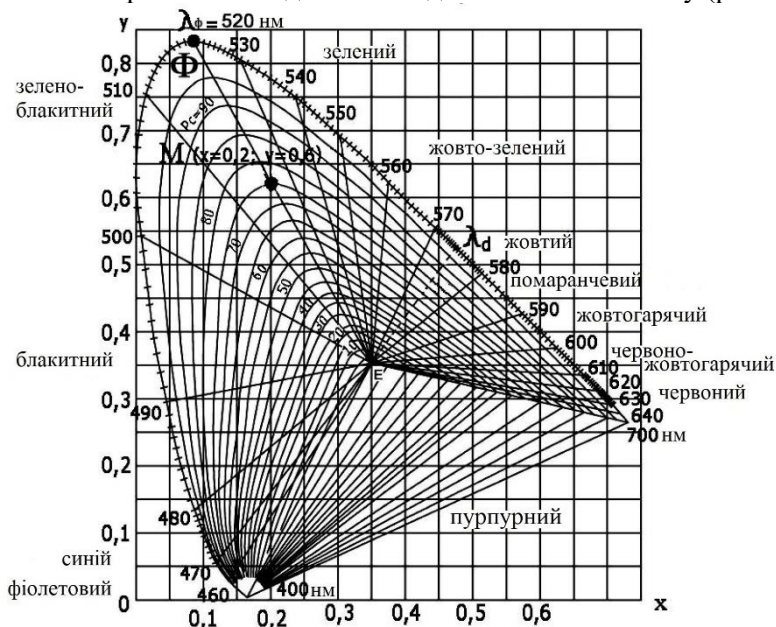


Рис. 5. Визначення довжини хвилі і чистоти кольору по діаграмі кольоровості по відношенню до джерела Е.

Між чистотою кольору (концентричні криві рівної чистоти) і довжиною хвилі, зазначеної на кривій спектральних і прямих пурпурних квітів, з одного боку, і координатами кольоровості  $x, y$ , з іншого, є взаємозв'язок. Провівши на діаграмі кольоровості пряму з точки бі-

лого кольору Е через точку заданої кольоровості М ( $x=0,2$ ;  $y=0,6$ ) (рис. 5) до перетину з кривою кольоровості спектральних квітів, отримуємо точку Ф. Відповідно до закону адитивного змішування кольорів ця точка визначає кольоровість деякого монохроматичного випромінювання Ф з довжиною хвилі  $\lambda$ , суміш якого з білим однако- ва по кольоровості з заданим М ( $x, y$ ).

Таким чином, користуючись діаграмою кольоровості, легко перейти від координат кольоровості  $x, y$  до довжини хвилі - колірному тону та чистоті - насиченості. Поєднавши точку, наприклад, кольору М, який визначається на колірному графіку координатами  $x, y$  з точкою білого «Е» і продовживши цю пряму до перетину з кривою чистих спектральних кольорів (точка Ф), визначимо довжину хвилі монохроматичного випромінювання  $\lambda$ , що визначає колірний тон кольору М. По концентричних кривих рівної чистоти (від 0% до 100%) знаходимо Р (%) чистоту кольору М.

Кольоровий тон і чистота кольору будуть різні для випромінювання М в залежності від того, по відношенню до якого «білого» вони визначені. На рис. 6 показані лінії одного і того ж колірному тону, що проходять через точку білого.

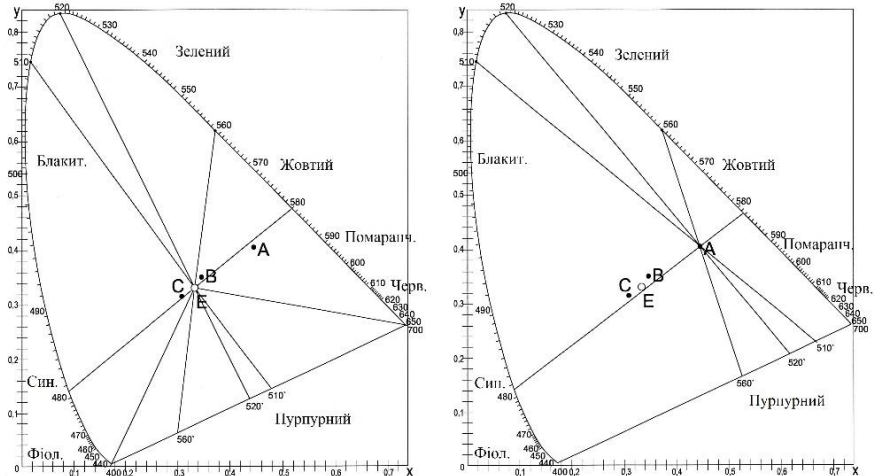


Рис. 6. Визначення додаткових кольорів по діаграмі кольоровості.

Кольори, які опинилися на кінцях цих прямих ліній, називаються *додатковими*, так як при адитивному змішуванні в певних пропорціях вони можуть дати біле світло. За діаграмою можна визначити пари

додаткових кольорів: наприклад, блакитний з  $\lambda=510$  нм і пурпурний з  $\lambda=510'$  нм; оранжево-жовтий з  $\lambda=580$  нм і синій з  $\lambda=480$  нм (для джерела Е). Для джерела А спостерігаються зрушення в області помаранчевих спектральних кольорів.

### ***Задачі для поточного контролю знань***

6.1. Порівняти кольоровості випромінювань лампи розжарювання і люмінесцентної лампи ЛД.

6.2. Користуючись діаграмою кольоровості для рівноенергетичного білого, зіставити кольоровості випромінювань наступних люмінесцентних ламп:

- 1) ЛТБ і ЛХБ;
- 2) ЛБ і ЛДЦ;
- 3) ЛТБ і ЛД;
- 4) ЛТБЦ і ЛД;
- 5) ЛБ і ЛДЦ
- 6) ЛТБЦ і ЛХБ;
- 7) ЛДЦ і ЛТБЦ.

6.3. Порівняти колірний тон джерел «А», «В» і «С» користуючись колірної діаграмою рівноенергетичного білого «Е».

6.4. Визначити пари додаткових кольорів при освітленні лампою розжарювання («А»), прямим сонячним світлом («В») і світлом неба («С») для випромінювань:

- 1) з  $\lambda=580$  нм, 520 нм, 500 нм, 490 нм;
- 2) з  $\lambda=480$  нм, 510 нм, 530 нм, 600 нм;
- 3) з  $\lambda=470$  нм, 500 нм, 540 нм, 600 нм;
- 4) з  $\lambda=680$  нм, 620 нм, 570 нм, 440 нм.

6.5. Порівняти кольоровості випромінювань двох кольорів, користуючись діаграмою кольоровості з заданими координатами:

- 1)  $x_1=0,3$ ;  $y_1=0,4$  і  $x_2=0,5$ ;  $y_2=0,3$  (діаграми для джерел «А» і «С»);
- 2)  $x_1=0,4$ ;  $y_1=0,2$  і  $x_2=0,2$ ;  $y_2=0,4$  (діаграми для джерел «В» і «С»);
- 3)  $x_1=0,2$ ;  $y_1=0,2$  і  $x_2=0,2$ ;  $y_2=0,7$  (діаграми для джерел «А» і «С»);
- 4)  $x_1=0,4$ ;  $y_1=0,2$  і  $x_2=0,4$ ;  $y_2=0,5$  (діаграми для джерел «В» і «С»).

6.6. Порівняти кольоровості випромінювань різних світлодіодів користуючись діаграмою для рівноенергетичного білого «Е»:

- 1)  $x_1=0,44$ ;  $y_1=0,41$ ;  $T_K=2950$  К та  $x_2=0,39$ ;  $y_2=0,37$ ;  $T_K=3500$  К;
- 2)  $x_1=0,42$ ;  $y_1=0,39$ ;  $T_K=3500$  К та  $x_2=0,45$ ;  $y_2=0,45$ ;  $T_K=3150$  К;
- 3)  $x_1=0,41$ ;  $y_1=0,39$ ;  $T_K=3370$  К та  $x_2=0,44$ ;  $y_2=0,41$ ;  $T_K=2950$  К.

## 7. Колірна відмінність. Колірний контраст

За допомогою колірних розрахунків вирішуються завдання зіставлення кольорів двох будь-яких поверхонь при рівних умовах освітлення або порівняння кольору об'єкта при висвітленні різними джерелами світла. Різницю в кольорі прийнято характеризувати колірним контрастом (табл.10).

Таблиця 10

**Градації колірного контрасту**

Колірний контраст, група		Величина колірного контрасту, пороги
Малий	M1	0 - 10
	M2	10 - 21
	M3	21 - 32
Середній	C1	32 - 43
	C2	43 - 54
	C3	54 - 65
Великий	B1	65 - 76
	B2	76 - 87
	B3	88 і більше

Колірний контраст – міра відмінності кольорів по колірному тону, насиченості і світлині, що оцінюється в колірних порогах або порогах кольоровідмінності. Колірний поріг або поріг кольоровідмінності – мінімальна колірна відмінність, виявлена оком в певних умов спостереження, коли між порівнюваними кольорами неможливо «укласти» третій, що відрізняється від кожного з них. Користуючись поняттям «колірний поріг», можна зручно і наочно оцінити відмінності між двома кольорами числом порогів кольоровідмінності. Слід зауважити, що величина колірного порога не однакова для різних кольорів. Найбільша величина колірного порогу спостерігається в області зелених і блакитних кольорів, найменша – в фіолетово-пурпуровій області.

Для того, щоб можна було визначити контраст по кольоровості за кольоровим графіком безпосереднім виміром, кольоровий графік був трансформований, отримані в результаті графіки отримали назву рівноконтрастних. На таких діаграмах система координат  $xu$  є вже не прямокутною, проте масштаб колірних порогів зберігається приблизно постійним в межах всієї діаграми (рис. 7).

Відстань між двома точками, що відповідають двом кольоровостям на рівноконтрастній діаграмі, визначає число колірних порогів між цими кольоровостями (з урахуванням масштабу графіка). [3]

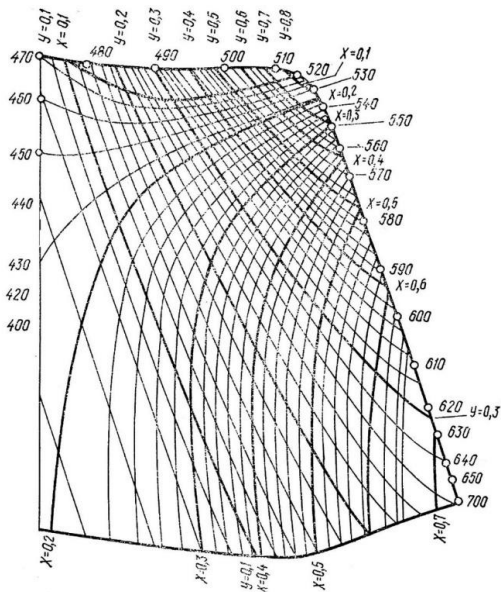


Рис. 6. Рівноконтрастна діаграма кольоровості. М 1:4.8

Колірний контраст визначається:

$$k_E = \sqrt{(k_K^2 + k_B^2)},$$

де  $k_E$  – колірний контраст, порого;  $k_K$  – контраст за кольоровістю, порого;  $k_B$  – контраст за світлотою, порого.

Контраст за кольоровістю визначається за координати кольоровості двох кольорів і відношенням їх коефіцієнтів відбиття  $\rho_o / \rho_\Phi$  або яскравостей  $L_o / L_\Phi$ , потрібно по рівноконтрастній діаграмі (рис. 7) визначити довжину відрізка між двома точками на графіку з координатами  $(x, y)$  і помножити її на коефіцієнт  $n$ , знайдений за графіком (рис. 8).

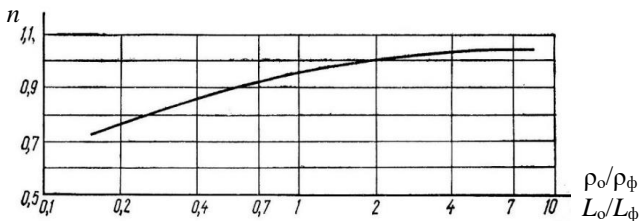


Рис. 8. Залежність контрасту по кольоровості від відношення яскравостей або коефіцієнтів відбиття об'єкта і фону



Контраст за світлотою  $k_B$  визначається за допомогою графіка (рис. 9) за відомими коефіцієнтами відбиття об'єкта  $\rho_o$  і фону  $\rho_\phi$ .

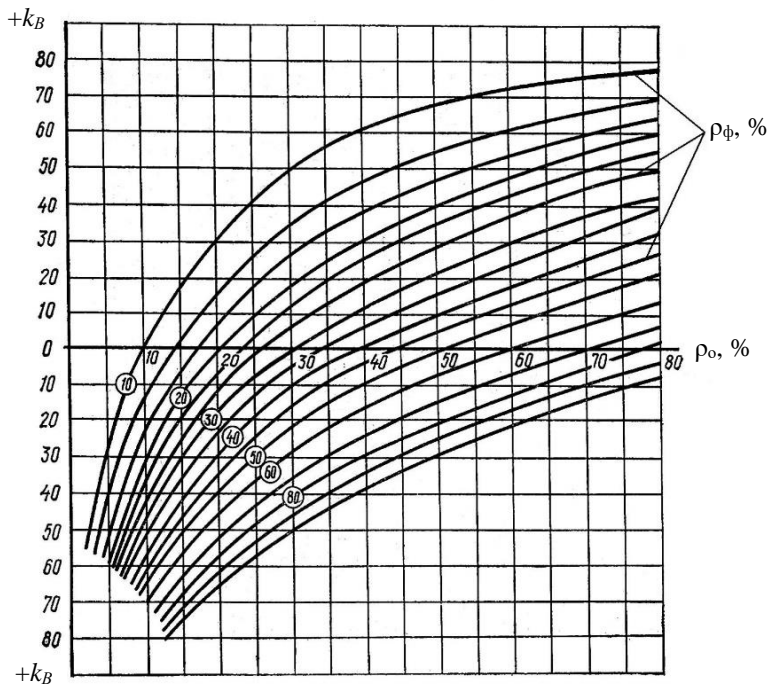


Рис. 9. Контраст за світлотою в залежності від коефіцієнтів відбиття об'єкта і фону.

### Завдання для поточного контролю знань

7.1. Потрібно визначити колірний контраст між двома кольорами, з яких один є фоном, інший об'єктом на фоні:  $x_o=0,27$ ;  $y_o=0,45$ ;  $x_\phi=0,33$ ;  $y_\phi=0,32$ ;  $\rho_o=60\%$  і  $\rho_\phi=30\%$ .

7.2. Визначити колірний контраст між двома кольорами, з яких один є фоном, інший об'єктом на фоні:

- 1)  $x_o=0,2$ ;  $y_o=0,3$ ;  $\rho_o=30\%$  та  $x_\phi=0,4$ ;  $y_\phi=0,4$ ;  $\rho_\phi=20\%$ ;
- 2)  $x_o=0,3$ ;  $y_o=0,3$ ;  $\rho_o=40\%$  та  $x_\phi=0,45$ ;  $y_\phi=0,35$ ;  $\rho_\phi=20\%$ ;
- 3)  $x_o=0,4$ ;  $y_o=0,3$ ;  $\rho_o=45\%$  та  $x_\phi=0,3$ ;  $y_\phi=0,2$ ;  $\rho_\phi=30\%$ ;
- 4)  $x_o=0,25$ ;  $y_o=0,35$ ;  $\rho_o=50\%$  та  $x_\phi=0,35$ ;  $y_\phi=0,3$ ;  $\rho_\phi=25\%$ ;
- 5)  $x_o=0,4$ ;  $y_o=0,3$ ;  $\rho_o=30\%$  та  $x_\phi=0,3$ ;  $y_\phi=0,2$ ;  $\rho_\phi=20\%$ ;
- 6)  $x_o=0,35$ ;  $y_o=0,2$ ;  $\rho_o=40\%$  та  $x_\phi=0,3$ ;  $y_\phi=0,4$ ;  $\rho_\phi=20\%$ ;
- 7)  $x_o=0,3$ ;  $y_o=0,25$ ;  $\rho_o=50\%$  та  $x_\phi=0,3$ ;  $y_\phi=0,4$ ;  $\rho_\phi=25\%$ ;
- 8)  $x_o=0,4$ ;  $y_o=0,2$ ;  $\rho_o=40\%$  та  $x_\phi=0,3$ ;  $y_\phi=0,3$ ;  $\rho_\phi=20\%$ .

## 8. Кольоропередача

Кольоропередачею називають вплив джерел світла на сприйняття кольору матеріального об'єкта. Проблема оцінки якості відтворення кольору особливо актуальна у зв'язку з широким використанням штучних джерел білого світла, які розрізняються за кольоровими характеристиками - теплових, розрядних, напівпровідникових (табл. 9). Для оцінки сприйняття кольору матеріальних об'єктів при освітленні їх штучними джерелами кольорового світла термін кольоропередача - не використовується. [2]

Для оцінки якості передачі кольору МКО рекомендує колориметричний метод – метод контрольних кольорів. В основу цього методу покладено розрахунок середнього значення зміни кольору спеціально відібраних кольорових зразків. Суть методу оцінки кольору МКО полягає в зіставленні кольору обраних контрольних зразків (викрасок) при освітленні їх досліджуваними і еталонними джерелами білого світла. Набір кольорових зразків складається з восьми основних і шести додаткових (в разі необхідності) викрасок. Координати кольору деяких з них в системі МКО наведені в табл. 11.

Таблиця 11

**Контрольні зразки МКО при висвітленні стандартним джерелом А**

Зразки	Найменування кольору	Координати кольору в системі МКО		
		$x'$	$y'$	$z'$
1.	жовто-зелений	30,85	32,02	3,10
2.	блакитний	26,88	27,44	12,86
3.	світло-фіолетовий	34,36	28,22	18,67
4.	пурпурний	39,87	31,23	15,94
5.	червоний	22,17	12,66	1,61
6.	жовтий	74,12	68,40	3,65
7.	зелений	13,63	16,35	4,66
8.	синій	3,38	3,14	7,63

В якості еталонного випромінювання приймається стандартне джерело найбільш близький по колірній температурі до досліджуваного. Вимірювання кольору контрольних зразків при освітленні досліджуваного джерела в порівнянні з еталонним оцінюються в колірних порогах по рівноконтрастній діаграмі (рис. 8). Ці зміни називають колірним зсувом  $\Delta E_i$ . Для даного зразка індекс передачі кольору  $i$ -го зразка  $R_i$  пов'язаний з колірним зсувом  $\Delta E_i$  співвідношенням:

$$R_i = 100 - 4,6E_i ,$$

де  $\Delta E_i$  – колірний зсув  $i$ -го зразка, виражене в рівноконтрастній системі.

Якість передачі кольору оцінюється загальним індексом кольоропередачі, який вимірюється в % і розраховується як середньоарифметичне восьми значень спеціальних індексів кольоропередачі  $R_i$ , які визначаються для групи контрольних зразків МКО з восьми викрасок, що мають номери від 1 до 8:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i .$$

Індекс кольоропередачі еталонного джерела приймається рівним 100%. Звідси джерела світла за якістю кольоропередачі поділяються приблизно на чотири класи: високої ( $R_a > 80$ ), середньої ( $R_a = 80-70$ ), низької ( $R_a < 70$ ) і незадовільної ( $R_a < 40$ ) якості.

Індекси кольоропередачі сучасних ламп вказані в табл. 8. У маркуванні ламп поліпшеної кольоропередачі вводяться слова «делюкс» ( $R_a = 80-85\%$ ), «супер делюкс» ( $R_a = 85-90\%$ ), «екстра делюкс» ( $R_a \geq 90\%$ ) (табл. 12).

Таблиця 12

**Кольоровість і групи кольору**

Колірна температура, К	Кольорова гама	Група кольору	Загальний індекс передачі кольору $R_a$
		1А, 1В	$R_a \geq 90; 90 \geq R_a \geq 80$
нижче 3300 К	тепла	2	$80 \geq R_a \geq 60$
від 3300 К до 5000 К	нейтральна	3	$60 \geq R_a \geq 40$
вище 5000К	холодна	4	$40 \geq R_a \geq 20$

### **Задачі для поточного контролю знань**

8.1. Визначити загальний індекс передачі кольору  $R_a$  нейтрально білого світлодіода, якщо колірні зрушення для  $i$ -х зразків МКО складають відповідно:

$$\begin{array}{cccc} \Delta E_1=5,4 & \Delta E_3=1,5 & \Delta E_5=10,2 & \Delta E_7=0,4 \\ \Delta E_2=8,9 & \Delta E_4=6,5 & \Delta E_6=1,1 & \Delta E_8=2,3 \end{array}$$

Оцінити до якого класу належить дане джерело світла за якістю кольоропередачі.

8.2. Визначити загальний індекс  $R_a$  кольоропередачі «триколькового» білого світлодіода, якщо колірні зрушення для  $i$ -х зразків МКО складають відповідно:

$$\begin{array}{cccc} \Delta E_1=8,5 & \Delta E_2=5,1 & \Delta E_3=4,8 & \Delta E_4=2,8 \\ \Delta E_5=4,6 & \Delta E_6=1,5 & \Delta E_7=1,1 & \Delta E_8=2,8 \end{array}$$

Оцінити до якого класу належить дане джерело світла за якістю кольоропередачі.

8.3. Розрахувати загальний індекс кольоропередачі  $R_a$  люмінесцентних ламп, якщо їх спеціальні індекси кольоропередачі  $R_i$  складають відповідно:

- люмінесцентна лампа №1

$R_1=85$                        $R_2=92$                        $R_3=95$                        $R_4=90$

$R_5=93$                        $R_6=94$                        $R_7=91$                        $R_8=94$

- люмінесцентна лампа №2

$R_1=42$                        $R_2=65$                        $R_3=62$                        $R_4=52$

$R_5=55$                        $R_6=61$                        $R_7=68$                        $R_8=63$

Порівняти кольоропередачу даних люмінесцентних ламп, зазначивши до якого класу за вимогами до кольоропередачі вони відносяться.

8.4. Розрахувати загальний індекс передачі кольору  $R_a$  тепло-білих з  $T_K=2700$  К та  $T_K=4100$  К, світлодіодів, якщо їх спеціальні індекси кольоропередачі  $R_i$  восьми зразків МКО відповідно складають:

- тепло-білі СД з  $T_K=2700$  К та  $\sum_{i=1}^8 R_i = 600$

- білі СД з  $T_K=4100$  К та  $\sum_{i=1}^8 R_i = 664$

Визначити до якого класу за вимогами до кольоропередачі відносяться дані лампи і порівняти їх властивості.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зеленков І. А. Фотометрія: Навчальний посібник. Київ: НАУ, 2003. 212с.
2. Malacara-Hernandez D. Color vision and colorimetry: theory and applications. Proc. of SPIE. 2011. 188 p.
3. Koenderink J.J. Color for the Sciences. MA, USA: The MIT Press, 2010. 760 p.
4. Овчинников С. С., Таряник М. М., Лутай О. В. Конспект лекцій з курсу «Фізіологічна оптика та колориметрія». Харків: ХНАМГ, 2021. 79 с.
5. Овчинников С.С., Сіробаба О. О. Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи студентів з дисципліни «Фізіологічна оптика та колориметрія». Харків: ХНАМГ, 2010. 43 с.

Відносна спектральна світлова ефективність випромінювання  $V(\lambda)$ 

$\lambda$ , нм	$V_\lambda$	$\lambda$ , нм	$V_\lambda$	$\lambda$ , нм	$V_\lambda$	$\lambda$ , нм	$V_\lambda$
380	0,00004	425	0,00726	470	0,0910	515	0,6083
381	0,00004	426	0,00806	471	0,0950	516	0,6299
382	0,00005	427	0,00889	472	0,0992	517	0,6511
383	0,00005	428	0,00976	473	0,1035	518	0,6717
384	0,00006	429	0,01070	474	0,1080	519	0,6914
385	0,00006	430	0,0116	475	0,1126	520	0,7100
386	0,00007	431	0,0126	476	0,1175	521	0,7277
387	0,00008	432	0,0136	477	0,1225	522	0,7449
388	0,00009	433	0,0146	478	0,1278	523	0,7615
389	0,00010	434	0,0157	479	0,1333	524	0,7776
390	0,00012	435	0,0168	480	0,1390	525	0,7932
391	0,00014	436	0,0180	481	0,1448	526	0,8082
392	0,00015	437	0,0192	482	0,1507	527	0,8225
393	0,00017	438	0,0204	483	0,1567	528	0,8363
394	0,00019	439	0,0217	484	0,1629	529	0,8495
395	0,00022	440	0,0230	485	0,1693	530	0,8620
396	0,00024	441	0,0243	486	0,1761	531	0,8739
397	0,00027	442	0,0257	487	0,1833	532	0,8851
398	0,00031	443	0,0270	488	0,1909	533	0,8956
399	0,00035	444	0,0284	489	0,1991	534	0,9056
400	0,00040	445	0,0298	490	0,2080	535	0,9149
401	0,00045	446	0,0323	491	0,2173	536	0,9238
402	0,00049	447	0,0329	492	0,2270	537	0,9320
403	0,00054	448	0,0345	493	0,2371	538	0,9398
404	0,00059	449	0,0362	494	0,2476	539	0,9471
405	0,00064	450	0,0380	495	0,2586	540	0,9540
406	0,00071	451	0,0399	496	0,2701	541	0,9604
407	0,0008	452	0,0418	497	0,2823	542	0,9661
408	0,0009	453	0,0438	498	0,2951	543	0,9713
409	0,00104	454	0,0459	499	0,3087	544	0,9760
410	0,0012	455	0,0480	500	0,3230	545	0,9803
411	0,00138	456	0,0502	501	0,3382	546	0,9840
412	0,00156	457	0,0525	502	0,3544	547	0,9873
413	0,00174	458	0,0549	503	0,3714	548	0,9902
414	0,00195	459	0,0574	504	0,3890	549	0,9928
415	0,00218	460	0,0600	505	0,4073	550	0,9950
416	0,00244	461	0,0627	506	0,4259	551	0,9969
417	0,00274	462	0,0654	507	0,4450	552	0,9983
418	0,00310	463	0,0681	508	0,4642	553	0,9994
419	0,00352	464	0,0709	509	0,4836	554	1,0000
420	0,00400	465	0,0739	510	0,5030	555	1,0001
421	0,00455	466	0,0769	511	0,5229	556	1,0002
422	0,00515	467	0,0802	512	0,5436	557	0,9995
423	0,00581	468	0,0836	513	0,5648	558	0,9984
424	0,00651	469	0,0872	514	0,5865	559	0,9969

*Продовження додатку 1*

$\lambda$ , нм	$V_\lambda$	$\lambda$ , нм	$V_\lambda$	$\lambda$ , нм	$V_\lambda$	$\lambda$ , нм	$V_\lambda$
560	0,9950	608	0,5283	656	0,0771	704	0,00310
561	0,9926	609	0,5156	657	0,0729	705	0,00291
562	0,9898	610	0,5030	658	0,0688	706	0,00273
563	0,9865	611	0,4905	659	0,0648	707	0,00256
564	0,9828	612	0,4781	660	0,0610	708	0,00241
565	0,9786	613	0,4658	661	0,0574	709	0,00225
566	0,9741	614	0,4535	662	0,0539	710	0,00210
567	0,9691	615	0,4412	663	0,0506	711	0,00195
568	0,9638	616	0,4291	664	0,0475	712	0,00182
569	0,9581	617	0,4170	665	0,0446	713	0,00170
570	0,9520	618	0,4049	666	0,0418	714	0,00159
571	0,9455	619	0,3929	667	0,0391	715	0,00148
572	0,9386	620	0,3810	668	0,0366	716	0,00139
573	0,9313	621	0,369	669	0,0343	717	0,00130
574	0,9235	622	0,357	670	0,0320	718	0,00121
575	0,9154	623	0,3449	671	0,0299	719	0,00113
576	0,9069	624	0,3329	672	0,0280	720	0,00105
577	0,9881	625	0,3210	673	0,0263	721	0,00097
578	0,8890	626	0,3092	674	0,0247	722	0,00091
579	0,8796	627	0,2977	675	0,0232	723	0,00084
580	0,8700	628	0,2864	676	0,0219	724	0,00079
581	0,8600	629	0,2755	677	0,0206	725	0,00074
582	0,8496	630	0,2650	678	0,0194	726	0,00069
583	0,8388	631	0,2549	679	0,0182	727	0,00064
584	0,8277	632	0,2450	680	0,0170	728	0,00060
585	0,8163	633	0,2354	681	0,0158	729	0,00056
586	0,8046	634	0,2261	682	0,0148	730	0,00052
587	0,7928	635	0,2170	683	0,0138	731	0,00048
588	0,7809	636	0,2082	684	0,0128	732	0,00045
589	0,7690	637	0,1996	685	0,0119	733	0,00042
590	0,7570	638	0,1912	686	0,0111	734	0,00039
591	0,7479	639	0,1830	687	0,0103	735	0,00036
592	0,7327	640	0,1750	688	0,00956	736	0,00034
593	0,7202	641	0,1672	689	0,00886	737	0,00031
594	0,7076	642	0,1596	690	0,00820	738	0,00029
595	0,6949	643	0,1523	691	0,00759	739	0,00027
596	0,6822	644	0,1452	692	0,00705	740	0,00025
597	0,6694	645	0,1382	693	0,00656	741	0,00023
598	0,6565	646	0,1316	694	0,00612	742	0,00021
599	0,6437	647	0,1251	695	0,00573	743	0,00020
600	0,6310	648	0,1188	696	0,00536	744	0,00018
601	0,6183	649	0,1128	697	0,00503	745	0,00017
602	0,6054	650	0,1070	698	0,00471	746	0,00016
603	0,5926	651	0,1014	699	0,00440	747	0,00015
604	0,5797	652	0,0961	700	0,00410	748	0,00014
605	0,5668	653	0,0911	701	0,00381	749	0,00013
606	0,5539	654	0,0862	702	0,00355	750	0,00012
607	0,5410	655	0,0816	703	0,00332	751	0,00011

Закінчення додатку 1

$\lambda$ , нм	$V_\lambda$	$\lambda$ , нм	$V_\lambda$	$\lambda$ , нм	$V_\lambda$	$\lambda$ , нм	$V_\lambda$
752	0,00010	757	0,00007	762	0,00005	767	0,00004
753	0,00010	758	0,00007	763	0,00005	768	0,00003
754	0,00009	759	0,00006	764	0,00005	769	0,00003
755	0,00008	760	0,00006	765	0,00004	770	0,00003
756	0,00008	761	0,00006	766	0,00004		

Додаток 2

Параметри  $a$  та  $b$

Кутівий розмір кола $\alpha$	Яскравість фону, кд·м <sup>-2</sup>					
	$L_\Phi \leq 0,01$		$0,01 \leq L_\Phi \leq 10$		$L_\Phi \geq 10$	
	$1-a$	$b$	$1-a$	$b$	$1-a$	$b$
0,5'	0,88	0,22	0,65	0,08	0,34	0,16
1	0,86	1,44	0,60	0,40	0,32	0,73
2	0,84	4,4	0,57	1,4	0,27	2,8
5	0,8	18	0,53	5,5	0,22	11,5
10	0,76	40	0,48	11,5	0,17	23
20	0,69	87	0,44	22	0,13	45
50	0,57	100	0,4	40	0,07	70
200	0,5	200	0,35	71	0,03	120
1500	0,5	400	0,3	120	0,02	120

Додаток 3

Значення функції розподілу при  $\sigma=1, m=0$

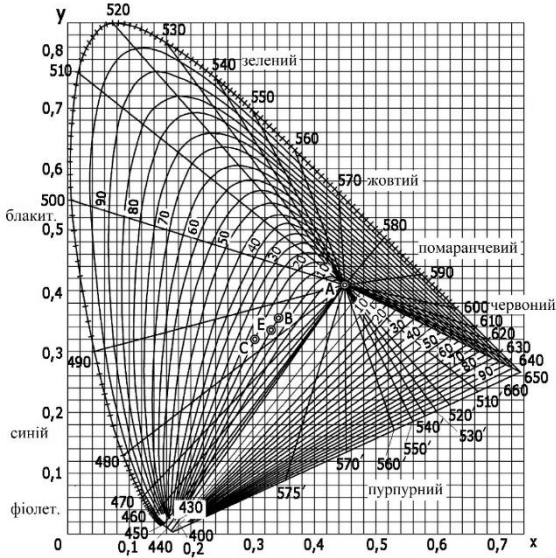
$x$	$\Phi^*(x)$	$\Delta x$	$x$	$\Phi^*(x)$	$\Delta x$
-0,00	0,5000	40	-1,00	1587	24
-0,05	4801	40	-1,05	1469	23
-0,10	4602	40	-1,10	0,1357	22
-0,15	4404	40	-1,15	1251	21
-0,20	4207	39	-1,20	1151	20
-0,25	4013	39	-1,25	1056	18
-0,30	3821	38	-1,30	0968	17
-0,35	3632	38	-1,35	0885	16
-0,40	3446	37	-1,40	0808	15
-0,45	3264	36	-1,45	0735	14
-0,50	3085	35	-1,50	0667	13
-0,55	2912	35	-1,55	0606	12
-0,60	0,2743	34	-1,60	0,0548	11
-0,65	2578	32	-1,65	0495	10
-0,70	2420	31	-1,70	0446	10
-0,75	2266	30	-1,75	0401	9
-0,80	2119	29	-1,80	0359	8
-0,85	1977	28	-1,85	0322	8
-0,90	1841	27	-1,90	0288	7
-0,95	1711	26	-1,95	0256	6

Закінчення додатку 3

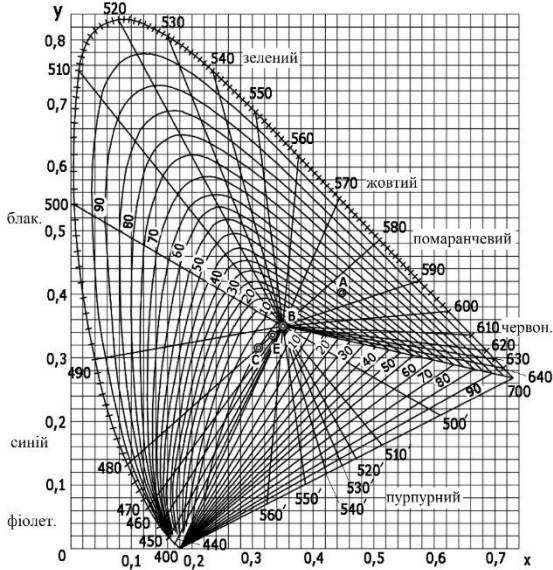
$x$	$\Phi^*(x)$	$\Delta x$	$x$	$\Phi^*(x)$	$\Delta x$
-2,00	0228	49	1,00	8413	24
-2,10	0179	40	1,05	8531	23
-2,20	0139	32	1,10	0,8643	22
-2,30	0107	25	1,15	8749	21
-2,40	0082	20	1,20	8849	20
-2,50	0062	15	1,25	8944	18
-2,60	0047	12	1,30	9032	17
-2,70	0035	9	1,35	0,9115	16
-2,80	0,0026	7	1,40	9192	15
-2,90	0,0019	5	1,45	9265	14
-3,00	0014	4	1,50	9332	13
-3,10	0010	3	1,55	9394	12
-3,20	0007	2	1,60	0,9452	11
-3,30	0005	2	1,65	9505	10
-3,40	0003	1	1,70	9554	10
-3,50	0002	0	1,75	9599	9
-3,60	0002	1	1,80	9641	8
-3,70	0001	0	1,85	9678	8
-3,80	0001	1	1,90	9713	6
-3,90	0000	0	1,95	9744	6
0,00	5000	40	2,00	9772	49
0,05	5199	40	2,10	9821	40
0,10	0,5398	40	2,20	9861	32
0,15	5596	40	2,30	9893	25
0,20	5793	39	2,40	9918	20
0,25	5987	39	2,50	9938	15
0,30	6179	38	2,60	9953	12
0,35	6368	38	2,70	9965	9
0,40	6554	37	2,80	9974	7
0,45	6736	36	2,90	0,9981	5
0,50	6915	35	3,00	9986	4
0,55	7088	35	3,10	9990	3
0,60	0,7257	34	3,20	9993	2
0,65	7422	32	3,30	9995	2
0,70	7580	31	3,40	9997	1
0,75	7734	30	3,50	9998	0
0,80	7881	29	3,60	9998	1
0,85	8023	28	3,70	9999	0
0,90	8159	27	3,80	9999	1
0,95	8289	26	3,90	1,0000	



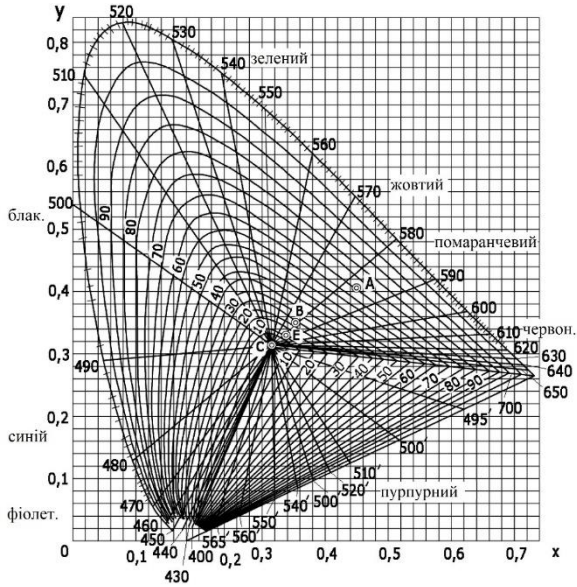
Діаграма кольоровості  $xu$  з лініями рівної чистоти кольору по відношенню до джерела А



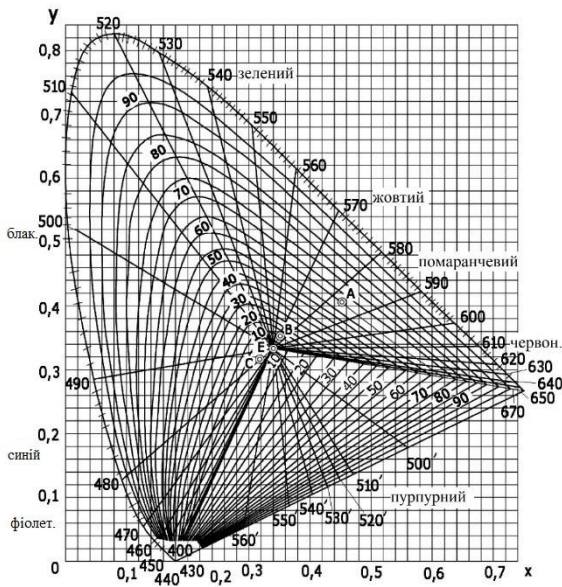
Діаграма кольоровості  $xu$  з лініями рівної чистоти кольору по відношенню до джерела В



**Діаграма кольоровості  $xu$  з лініями рівної чистоти кольору по відношенню до джерела С**



**Діаграма кольоровості  $xu$  з лініями рівної чистоти кольору по відношенню до джерела E**



## ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. Світлові величини	4
2. Оптична система ока	7
3. Функції зору	11
4. Колориметрична система RGB	16
5. Колориметрична система МКО XYZ	18
6. Діаграма кольоровості	19
7. Колірна відмінність. Колірний контраст	23
8. Кольоропередача	26
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	28
ДОДАТКИ	29



*Навчальне видання*

# ФІЗІОЛОГІЧНА ОПТИКА ТА КОЛОРИМЕТРІЯ

Практикум  
для здобувачів вищої освіти  
ОС «Бакалавр» спеціальності 141  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі:

ШКВАРНИЦЬКА Тетяна Юріївна  
ЯРЕМІЧ Тетяна Іванівна  
ШЕЛУХА Олексій Олегович