

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені
Івана Пулюя

*Електромеханічний факультет
Кафедра світлотехніки та електротехніки*

СВІТЛОВІ ПРИЛАДИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ (Частина I)

для студентів напрямку підготовки 6.050701
«Електротехніка та електротехнології»



Тернопіль
2015

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені
Івана Пулюя

*Електромеханічний факультет
Кафедра світлотехніки та електротехніки*

СВІТЛОВІ ПРИЛАДИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ (Частина I)

для студентів напряму підготовки 6.050701
«Електротехніка та електротехнології»

Тернопіль
2015

Світлові прилади. Конспект лекцій (Частина I) для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» / Укл. Л.М.Костик; ТНТУ, 2015 р. – 79 с.

Укладач: к.т.н., доц. Костик Л.М.

Рецензент: д.т.н., проф. Андрійчук В.А.

Відповідальна за випуск: Костик Л.М.

Методичні вказівки розглянуті і затверджені на засіданні кафедри світлотехніки та електротехніки
Протокол № ____ від _____ 2015 р.

Схвалено і рекомендовано до друку методичною радою ЕМФ Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № ____ від _____ 2015 р.

Посібник складено з врахуванням матеріалів літературних джерел, наведених у переліку .

Лекція 1

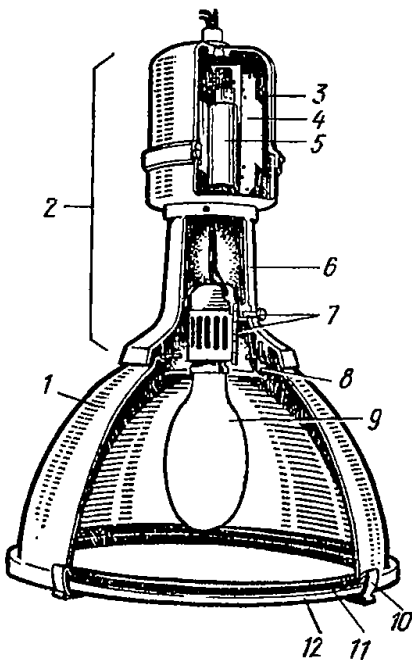
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СВІТЛОВІ ПРИЛАДИ

Завдання світлових приладів (СП):

- перетворення потоку випромінювання джерела (просторовий, спектральний перерозподіл, поляризація випромінювання джерела світла);
- комутація і стабілізація електричного струму;
- захист джерела світла (ДС) і оптичного пристрою від забруднень і механічних пошкоджень;
- ізоляція ДС від вибухо-, пожежонебезпечного і вологого середовища;
- захист від ураження електричним струмом.

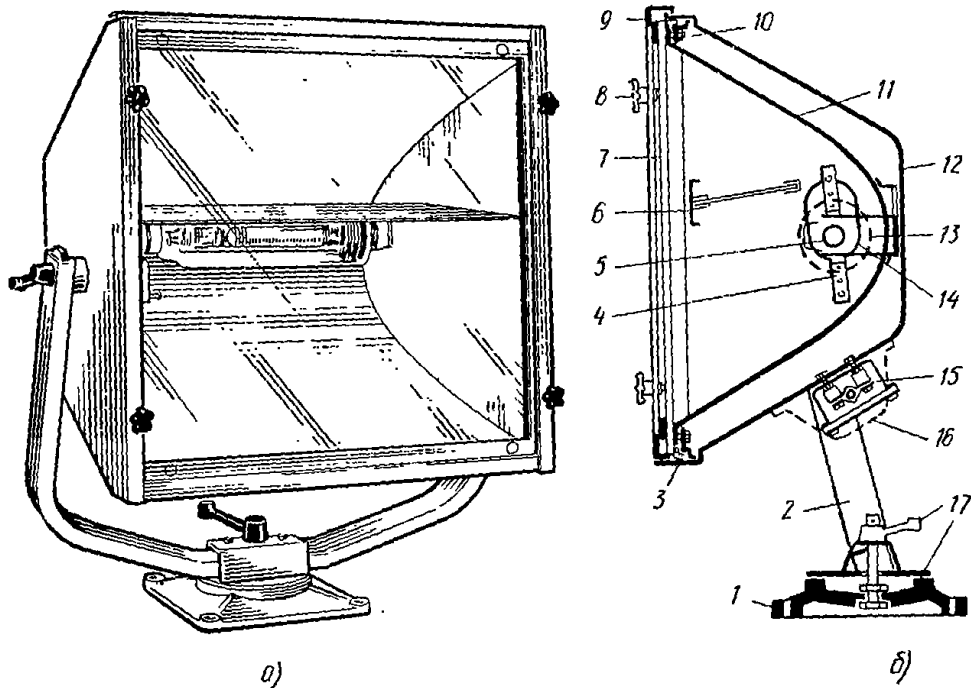
Світловий прилад – прилад, що складається з одного чи більшої кількості джерел світла і пристрою, що перетворює потік випромінювання для освітлення (опромінення), сигналізації і проєкції.

Оптичний прилад – прилад, що перерозподіляє потік випромінювання джерела з метою створення дійсного чи уявного оптичного зображення тіла випромінювання.



Типова конструкція світильника::

1 – металевий відбивач, 2 – корпус світильника, 3 – камера ПРА, 4 – дросель, 5 – компенсуючий конденсатор, 6 – стакан, 7 – стопорний гвинт для регулювання положення світлого тіла, 8 – відбортовка по горловині відбивача, 9 – лампа, 10 – замки, 11 – захисне скло, 12 – відбортовка по краю відбивача.



Типова конструкція параболоциліндричного прожектора:

1 – основа; 2 – ліра; 3 – силіконова ущільнююча прокладка; 4 – планка; 5 – патрон; 6 – дзеркальний екран; 7 – захисне скло; 8 – гвинтові барашки; 9 – рама; 10 – пристрій для кріплення відбивача до корпусу; 11 – торці; 12 – корпус; 13 – лампа; 14 – планка фокусуючого пристрою; 15 – клемна коробка; 16 – кожух; 17 – поворотний стіл.

1.1. Класифікація світлових приладів за ступенем концентрації світлового потоку

1.1.1. Прожектор

Прожектор – це СП, який за допомогою оптичного пристрою захоплює світловий потік джерела у великому тілесному куті і концентрує його в малому (плоский кут розкриття 1-2°).

Параболокругові прожектори



Параболоциліндричні прожектори



Фари



Світлофори



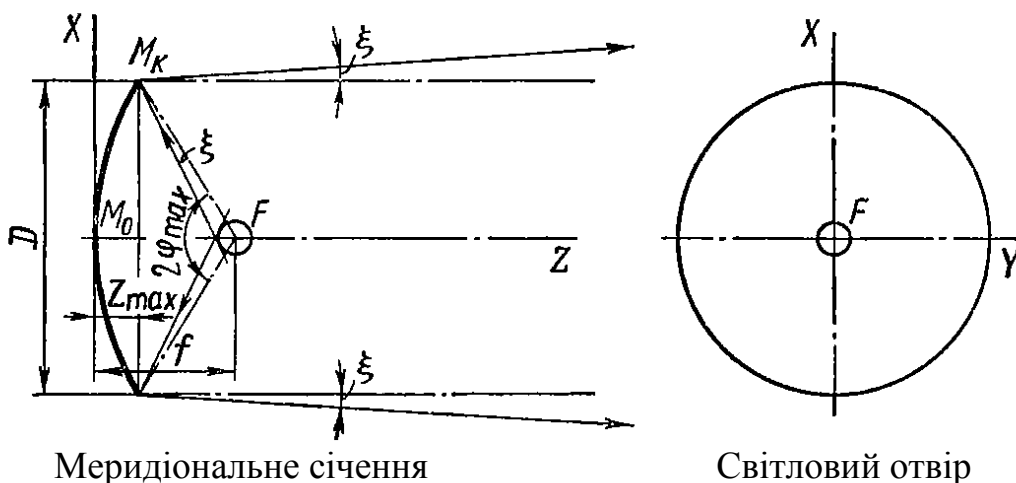
Маяки



Прожектор характеризується *максимальною концентрацією світлового потоку*, що означає, що вся чи значна частина активної поверхні оптичного пристрою повинна бути світлою в напрямку осі світлового пучка СП з безкінечності. Яскравість цієї поверхні дорівнює яскравості джерела світла (при $\rho = 1, \tau = 1$).

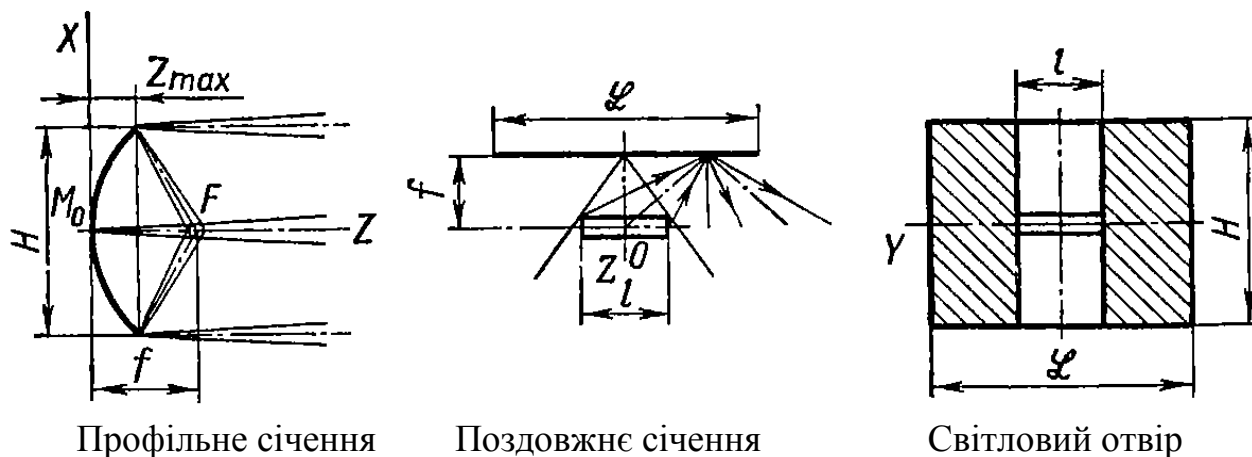
Світловий отвір – це проекція активної поверхні оптичного пристрою на площину, перпендикулярну до оптичної осі.

Параболоїдний дзеркальний відбивач



Міра концентрації світлового потоку дзеркального параболоїда: $\frac{I_{oc}}{I_{\dot{A}\dot{N}}} = \frac{D^2}{d_{\dot{A}\dot{N}}^2}$

Параболоциліндричний дзеркальний відбивач



Міра концентрації світлового потоку параболоциліндричного відбивача: $\frac{I_{oc}}{I_{\dot{A}\dot{N}}} = \frac{H}{d}$

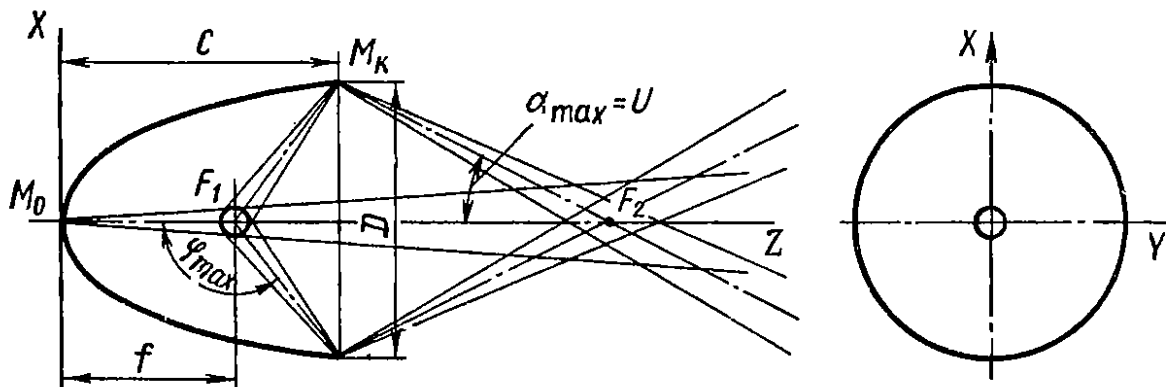
До приладів прожекторного класу відносяться СП, фокальні промені яких після відбивання всіма точками хоча б одного меридіонального січення оптичного пристрою (безабераційного) направлені паралельно оптичній осі.

1.1.2. Проектор

Проектор – це СП, який за допомогою оптичного пристрою заховає світловий потік джерела у великому тілесному куті і концентрує його в малому об'ємі чи на поверхні малої площі (розміри освітлювальної площадки набагато менші розмірів оптичного пристрою).



Еліпсоїдний дзеркальний відбивач



Профільне (меридіональне січення)

Світловий отвір, видимий з т. F_2

У т. F_2 утворюється дійсне збільшене зображення джерела світла і весь світловий потік буде сконцентрований в об'ємі, що займає це зображення.

Міра концентрації проєктора – освітленість площадки, яка розміщена всередині зображення ДС перпендикулярно до оптичної осі: $E = L_{\tilde{N}D} \rho \sin^2 \alpha_{\max}$

Світловий отвір повністю світиться тільки для деякої ділянки оптичної осі, розмір якої визначається розміром дійсного зображення.

До приладів проєкторного класу відносяться СП, фокальні промені яких після відбивання всіма точками хоча б одного меридіонального січення оптичного пристрою (безабераційного) направлені в одну точку на оптичній осі.

1.1.3. Світильник

Світильник – світловий прилад, який за допомогою оптичного пристрою захоплює світловий потік у великому тілесному куті і перероподіляє його також у великому тілесному куті (до 4π)

Світла частина оптичного пристрою, як правило, не може заповнювати весь світловий отвір і мати розмір, що дорівнює одному з розмірів цього отвору.

Промислові світильники



Світильники для адміністративних приміщень



Світильники для місцевого освітлення



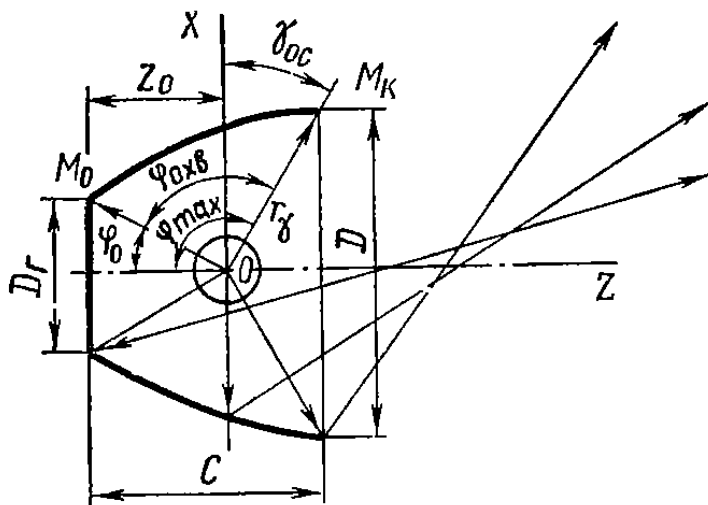
Світильники для зовнішнього освітлення



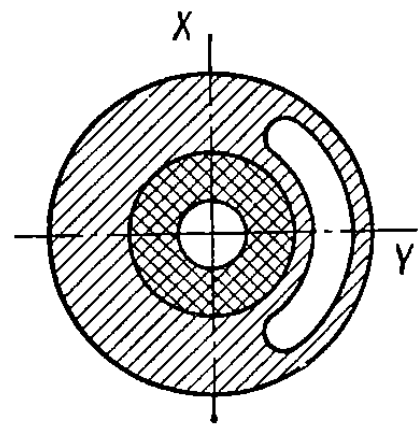
Побутові світильники



Дзеркальний відбивач світильника



Меридіональне січення



Світловий отвір, видимий в напрямку α

Світильники, які мають світлорозсіюючі елементи, не створюють дійсного чи уявного зображення джерела світла, тобто не створюють значної концентрації світлового потоку в заданих напрямках простору. Активна поверхня таких елементів має яскравість значно меншу, ніж яскравість джерела світла, і її можна вважати самосвітною.

1.2. Класифікація світлових приладів за призначенням

Освітлювальні (деякі світлосигнальні) – використовуються в освітлювальних установках, де приймачем є око людини. Їх спектральна область випромінювання обмежена видимою частиною оптичного спектру.

Опромінювальні прилади – призначені для роботи в УФ, видимій та ІЧ чи у всій області оптичного випромінювання. Приймачами є бактерії, людина, сільськогосподарські тварини, рослини, лакофарбові і полімерні покриття, об'єкти нагрівання і сушіння.

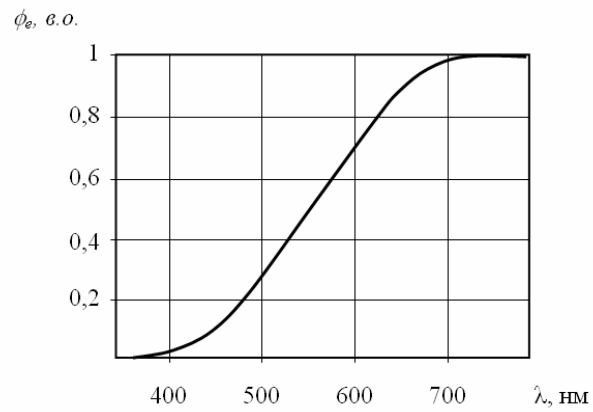
Світлосигнальні прилади – використовують випромінювання для передачі інформації у вигляді сигналів, кодованих за допомогою зміни спектрального складу випромінювання джерел, зміни частоти і тривалості імпульсів потоку випромінювання.

Лекція 2

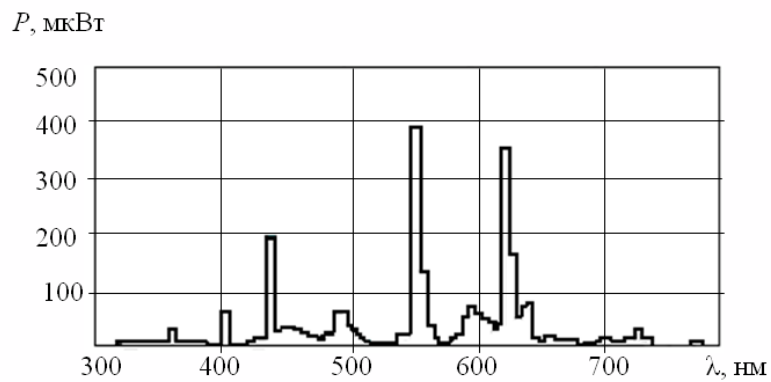
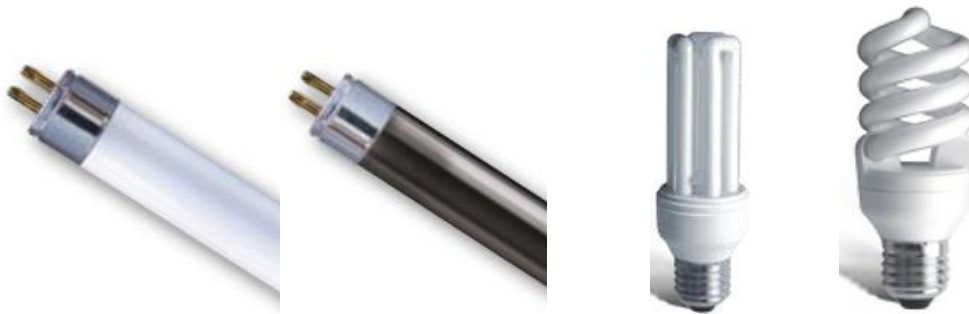
ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ

2.1. Джерела світла

Теплові джерела



Розрядні лампи низького тиску



Розрядні лампи високого тиску



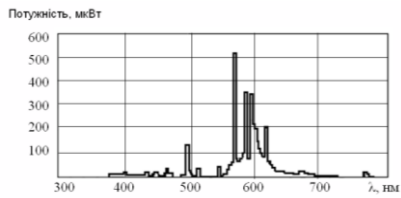
ДНаТ



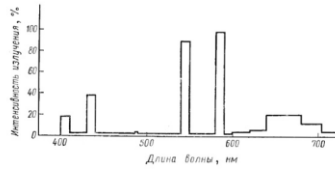
ДРЛ



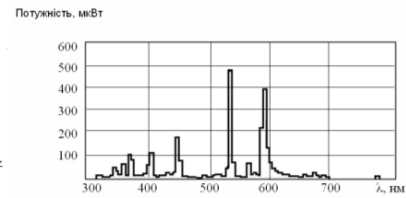
ДРИ



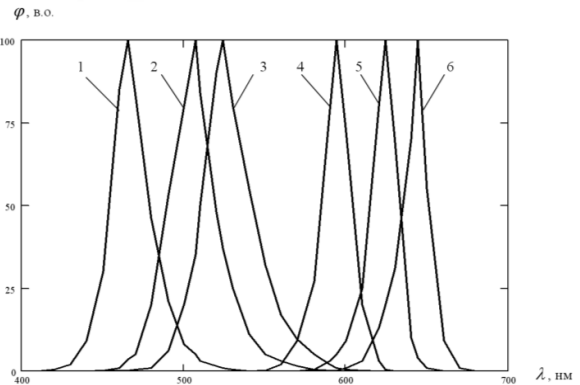
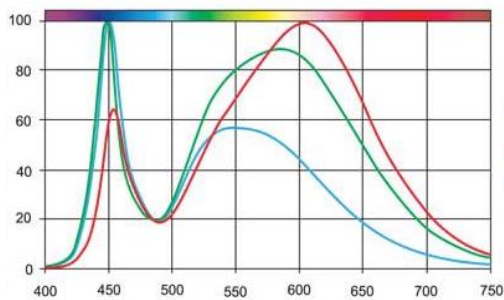
ДНаТ
ДРИ



ДРЛ



Напівпровідникові лампи



Довжина хвилі, нм: 1 – синього, 2 – синьо-зеленого, 3 – зеленого, 4 – жовтого, 5 – янтарного, 6 – червоного кольору світіння.

Світні тіла (СТ):

- *поверхневі випромінювачі* – світні тіла, що генерують випромінювання своїми поверхнями (ЛР, КГ, ЛЛ, ДРЛ, ДнаТ з полікристалічною керамічною оболонкою);
- *об'ємні випромінювачі* – світні тіла, що генерують випромінювання зовнішніми і внутрішніми елементами (ДРИ, ДРИШ, ДКсТ, ДКсШ, ДКсЭл, ДнаТ).

Розрахункове світне тіло (замінник реального СТ) – тіла, які мають однакові розміри з реальними, але простішу форму; рівні світлові потоки, приблизно рівні значення фактичної та розрахункової максимальної яскравостей.

Якщо нерівномірність яскравості $\frac{L_{\max}}{L_{\text{cp}}} \leq 1,5$, то світне тіло вважають

рівнояскравим, $L_{\text{cp}} = \frac{\hat{O}_{\varepsilon}}{\pi A}$ – середня яскравість реального світного тіла.

$\frac{L_{\max}}{L_{\text{cp}}} = 1,5 \dots 1,8$ – ЛР, $\frac{L_{\max}}{L_{\text{cp}}} = 2 \dots 2,5$ – ДнаТ, $\frac{L_{\max}}{L_{\text{cp}}} = 2,5 \dots 3,5$ – ДРЛ, $\frac{L_{\max}}{L_{\text{cp}}} = 3 \dots 4,5$ – ДРИ.

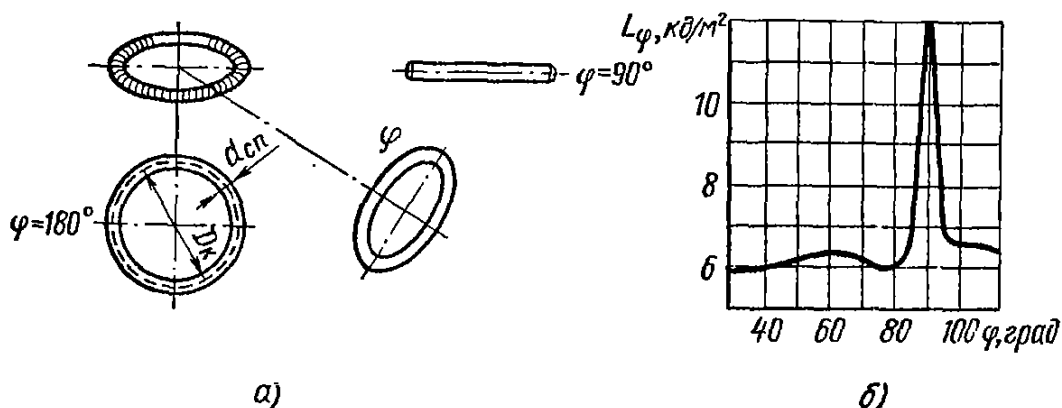
Габаритна яскравість – середня яскравість геометричного замінника світного тіла в напрямку φ :

$$L_{\varphi} = \frac{I_{\varphi}}{A_{\varphi}}, \quad I_{\varphi} \text{ – сила світла в напрямку } \varphi, \quad A_{\varphi} \text{ – площа проекції}$$

геометричного замінника на площину, перпендикулярну напрямку φ .

Коефіцієнт заповнення габариту – відношення площі проекції світного тіла до площі проекції замінника для напрямку φ :

$$\Gamma = \frac{A_{\varphi \text{СТ}}}{A_{\varphi}}, \quad \Gamma < 1.$$



Тороїдний замінник кільцевого світного тіла (ЛР):

а) – проекція замінника, б) крива розподілу габаритної яскравості

2.2. Світлотехнічні матеріали

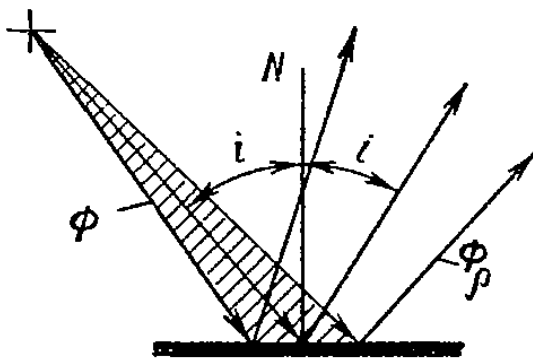
Світлові прилади містять матеріали:

Світлотехнічні – світлоперетворюючі пристрої, які перерозподіляють світловий потік в просторі, зменшують яскравість ДС, змінюють спектральний склад випромінювання і його поляризацію;

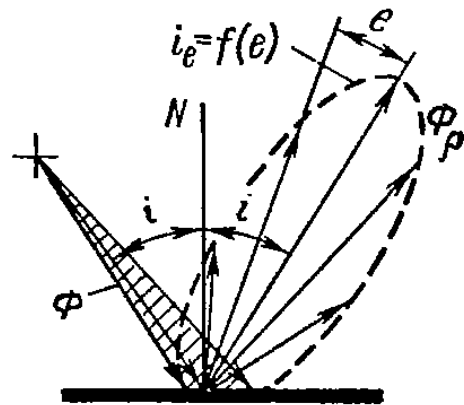
Електротехнічні – пристрої для комутації, стабілізації струму і живлення ДС;

Конструкційні – деталі СП для кріплення ДС, установки і фокусування СП, захисту ДС і оптичних елементів від механічних ушкоджень, впливу навколишнього середовища.

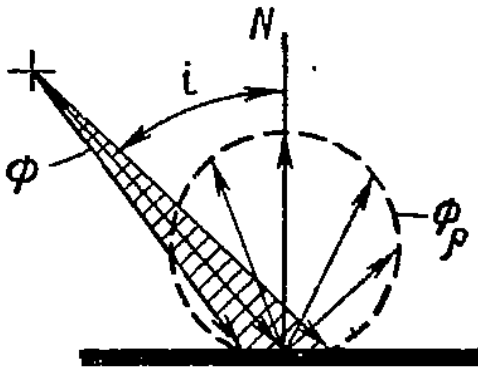
Світловідбиваючі матеріали



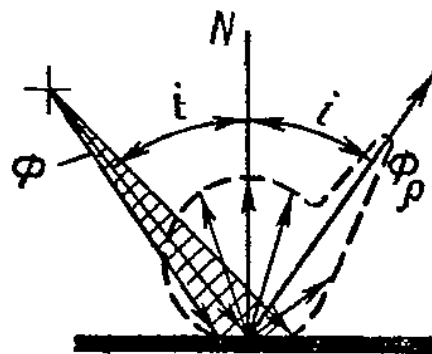
Направлене відбивання



Направлено-розсіююче відбивання

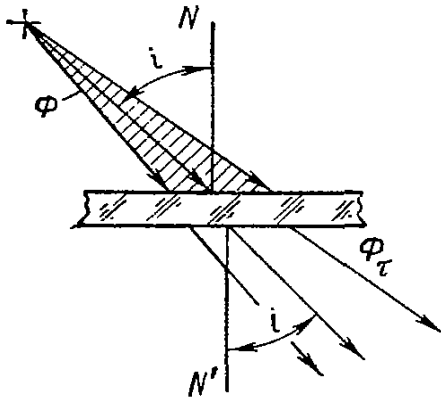


Дифузне відбивання

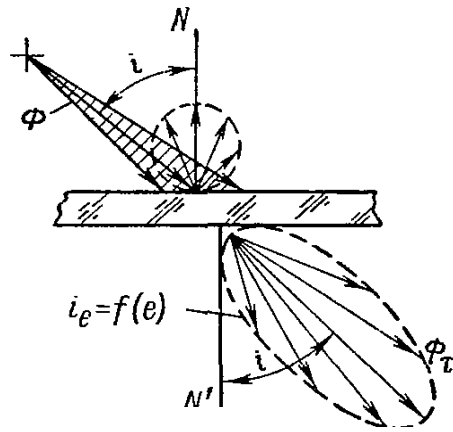


Змішане відбивання

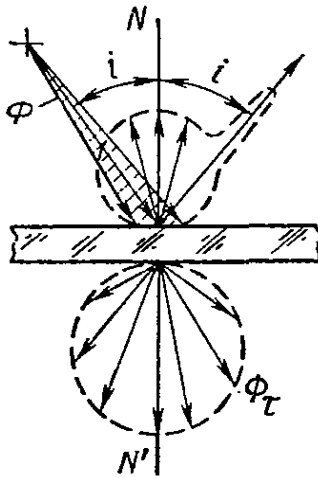
Світлопропускаючі матеріали



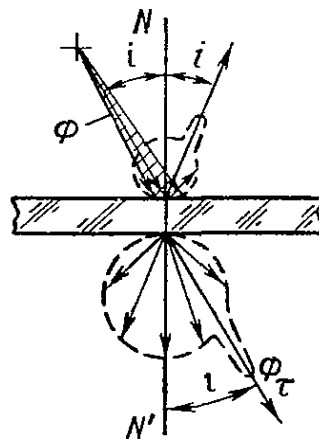
Направлене пропускання



Направлено-розсіяне пропускання



Дифузне пропускання



Змішане пропускання

1. Матеріали з направленим відбиванням (пропусканням) світла – це матеріали, які відбивають (пропускають) світловий потік так, що тілесний кут в падаючому і відбитому (пропущеному) світлі зберігається по величині.

Матеріали:

поліровані метали, іноді з захисними покриттями зі скла і плівок; металізовані покриття на скляних поверхнях

плоске силікатне і органічне скло; пластмаси прозорі

Вироби:

відбивачі

лінзи; заломлюючі елементи; дисперсійні елементи

Коефіцієнт відбивання дзеркальних матеріалів:

Срібло	0,90...0,92
Скляне посріблене дзеркало	0,85...0,86
Алюміній	0,85...0,90
Альзак-алюміній	0,80...0,84
Родій	0,72...0,74
Кадмій	0,62...0,64
Хром	0,61...0,62
Нікель	0,55...0,60

Матеріали з направлено-розсіяним відбиванням (пропусканням) світла – це матеріали, які мають тілесний кут у відбитому (пропущеному) світлі більший, ніж у падаючому, а напрям осі тілесного кута у падаючому і відбитому (пропущеному) світлі однаковий.

Матеріали:

алюміній оксидований; алюміній силікатне і органічне скло з травлений; нікель гальванічний; хімічним (кислотне травлення) чи алюмінієва фарба на нітролаці; механічним (піскоструменева обробка) покриття, отримані шоопуванням матуванням

При $i = 0 \dots 60^\circ$ для відбивачів форма фотометричного тіла розсіювання – еліпсоїд, велика вісь якого орієнтована напрямком дзеркального відбивання. При $i > 60^\circ$ фотометричне тіло стає несиметричним.

При $i \leq 30^\circ$ для розсіювачів форма фотометричного тіла розсіювання – еліпсоїд.

$$\tau = \tau_i + \tau_a,$$

τ_i – коефіцієнт направлено-розсіяного пропускання;

τ_a – коефіцієнт дифузного пропускання.

Для $i = 0 \dots 30^\circ$ $\tau_a = 0,1 \dots 0,2$.

Для $i > 30^\circ$ τ_i зменшується, а τ_a збільшується.

Матеріали з дифузним відбиванням (пропусканням) світла – це матеріали, які відбивають (пропускають) світловий потік в межах тілесного кута 2π . Напрямок максимальної сили світла співпадає з нормаллю і є віссю тілесного кута.

Матеріали:

сірчаноокислий барій; емаль біла глушене скло; молочне скло (на основі алюмінату цинку); крейда; (включення 1 мкм, 100000 на 1 мм³); гіпс; емаль фарфорова; клеєва фарба; молочне накладне скло нітролаки білі

Матеріали із змішаним відбиванням (пропусканням) скла – це матеріали, які характеризуються дифузним розсіюванням і направленим відбиванням (пропусканням) світла.

Матеріали:

керамічні емалеві покриття опалове і опалінове скло (включення 100-200 нм, 100000 на 1 мм³)

$$\rho = \rho_i + \rho_a,$$

Для $i = 0 \dots 45^\circ$ $\rho_a = 0,50 \dots 0,65$.

Для $i > 45^\circ$ ρ_i збільшується, а ρ_a зменшується.

Лекція 3

ТИПИ СВІТЛОРОЗПОДІЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

3.1. Загальна характеристика типів світлорозподілюючих пристроїв

Оптичні пристрої – перерозподіл світлового потоку здійснюється утворенням збільшеного чи зменшеного уявного чи дійсного зображення світлого тіла джерела.

$$L = L_{CT} (\rho, \tau = 1).$$

<i>Відбиваючі пристрої:</i>	<i>Заломлюючі пристрої:</i>	<i>Відбиваючо-заломлюючі пристрої:</i>
дзеркальні відбивачі: параболоїдної форми (прожектор); еліпсоїдної форми (проектор); будь-якої форми (світильник)	френелівські лінзи (прожектор); асферичні і конденсорні лінзи (проектор)	лінзові розсіювачі (світильник); призматичні пристрої (світильник)

Дифузні пристрої – перерозподіляють випромінювання свіченням усієї поверхні з яскравістю, приблизно однаковою у всіх напрямках і на порядок меншою порівняно з яскравістю світлого тіла джерела.

$$L \ll L_{CT} (\rho, \tau = 1).$$

<i>Відбиваючі пристрої:</i>	<i>Пропускаючі пристрої:</i>
дифузні відбивачі (світильник)	дифузні розсіювачі (світильник)

Матовані пристрої – на всій поверхні утворюють розпливчасте зображення світлого тіла. Яке порівняно із свіченням всієї поверхні є плямою підвищеної яскравості.

$$L < L_{CT} (\rho, \tau = 1).$$

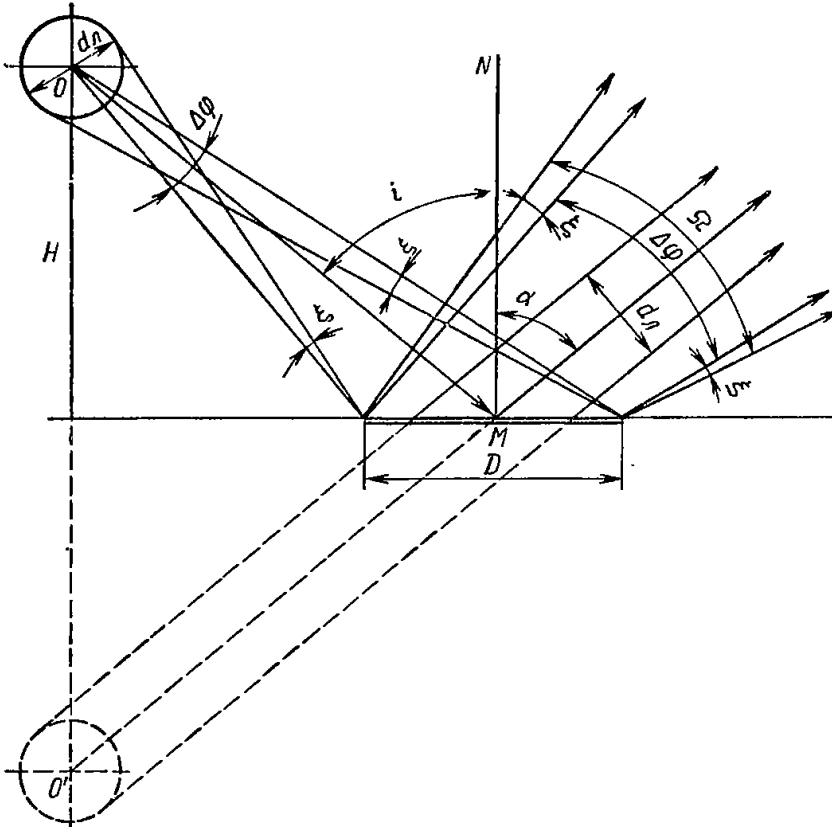
<i>Відбиваючі пристрої:</i>	<i>Пропускаючі пристрої:</i>
матовані відбивачі (світильник)	матовані розсіювачі (світильник)

3.2. Характер свічення дзеркальних і дифузно-відбиваючих елементів

Джерело світла – рівнояскраве кульове світне тіло з $I_{\epsilon\alpha} = const$.

Приймач випромінювання – плоский елемент дискової форми з дзеркальним або дифузним відбиванням.

3.2.1. Дзеркальний елемент



$\Delta\varphi$ – кутовий розмір дзеркального елемента;

2ξ – кутовий розмір джерела світла;

$i = \alpha$ – кути падіння і відбивання променя OM ;

Ω – плоский кут тілесного кута ω , в межах якого диск відбиває падаючий світловий потік, $\Omega = \Delta\varphi + 2\xi$.

Яскравість дзеркального елемента: $L_{\alpha\zeta} = \rho L_{CT}$.

Сила світла в напрямку α : $I_\alpha = \rho L_{CT} A_\alpha$.

При $D < d_\epsilon$ зображення джерела світла перекриває диск.

Тоді $I_\alpha = \rho L_{CT} A_1 \cos \alpha$, A_1 – площа диска.

При $D > d_\epsilon$ зображення джерела світла перекриває диск не повністю.

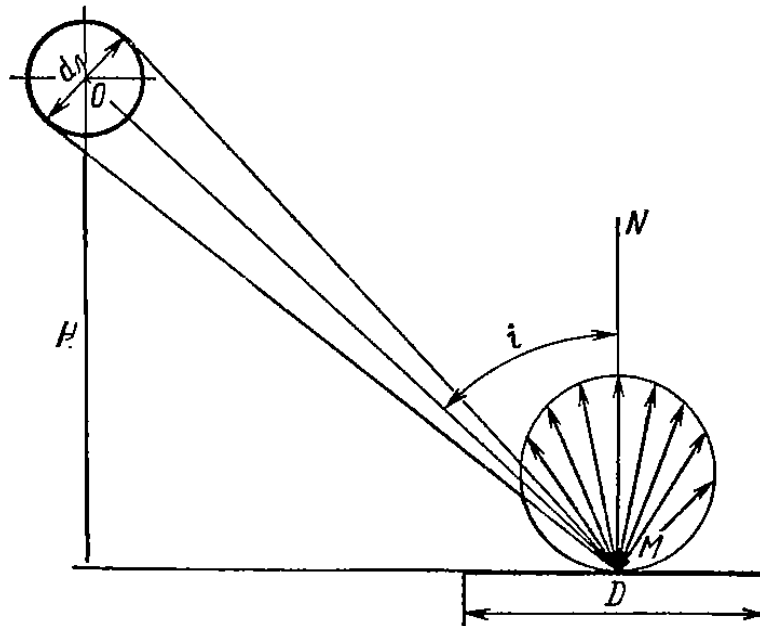
Тоді $I_\alpha = \rho L_{CT} A_2 \cos \alpha$, A_2 – площа світлої частини диска.

При $i = \alpha$ $A_2 \cos \alpha = \frac{\pi d_\epsilon^2}{4}$ і $I_\alpha = \rho I_\epsilon$.

Для напрямків α , коли зображення джерела є неповним, $A_2 \cos \alpha < \frac{\pi d_\epsilon^2}{4}$ і

$I_\alpha < \rho I_\epsilon$.

3.2.2. Дифузний елемент



Яскравість диска: $L_{\alpha} = \frac{M}{\pi} = \rho \frac{E}{\pi}$, M – світимість диска, лм/м^2 .

Для реального (нерівнояскравого) дифузного елемента яскравість визначається освітленістю елемента і коефіцієнтом яскравості елемента матеріалу.

$\rho = \frac{1}{2\pi} \int r_{\alpha\beta} d\omega$, $r_{\alpha\beta}$ – коефіцієнт яскравості матеріалу в напрямку (α, β) .

$$L_{\alpha\beta} = \frac{M_{\alpha\beta}}{\pi} = r_{\alpha\beta} \frac{E}{\pi}$$

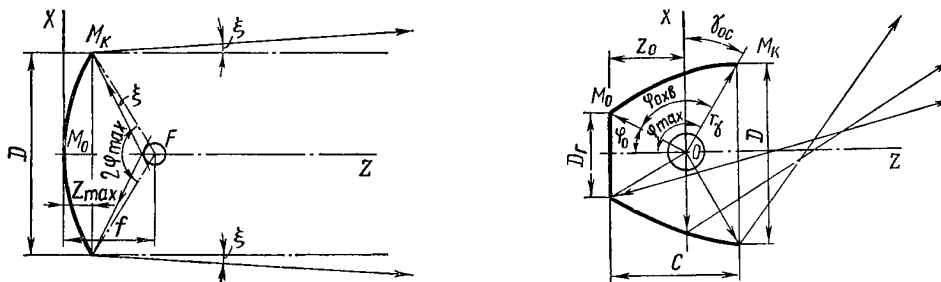
Для дифузних матеріалів $r_{\alpha\beta} > 1$, для направлено-розсіюючих $r_{\alpha\beta} > 20$.

3.2.3. Відмінності у свіщенні дзеркальних та дифузних елементів

Дзеркальний елемент	Дифузний елемент
Створює уявне зображення, що визначає світлу частину і яскравість $L_{\alpha\beta} = \rho L_{\beta\alpha}$	Не створює уявного зображення, його поверхня світиться вся з яскравістю $L_{\alpha} = \frac{\rho A}{\pi}$
Видимий світлим в межах тілесного кута $\Delta\omega$, що визначається розмірами відбиваючого елемента і джерела	Видимий світлим в межах тілесного кута 2π не залежно від розмірів елемента і джерела
При зміні відстані між джерелом і елементом $L_{\alpha\beta} = \text{const}$, $\Delta\omega = \text{var}$, $\hat{O} = \text{var}$	При зміні відстані між джерелом і елементом $L_{\alpha} = \text{var}$, $\Delta\omega = 2\pi$, $\hat{O} = \text{var}$

Лекція 4

ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ СВІТЛОРОЗПОДІЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ



Світловий отвір – проекція активної поверхні світлорозподілюючого пристрою на площину, перпендикулярну осі приладу.

Оптична вісь – вісь обертання для круглосиметричних або одна з осей просторової прямокутної системи координат (вісь СП для несиметричних відбивачів).

Світловий центр відбивача т. O – центр полярних координат (r, φ, ψ) . Для параболоїдної, параболоциліндричної, еліпсоїдної форм світловим центром є **фокус** або **фокальна лінія**.

Фокусна віддаль – віддаль між вершиною відбивача M_0 і його фокусом F .

Осьовий (фокальний) промінь – промінь, що виходить із світлового центру чи фокуса. При співпаданні з променем з джерела він є реальним, при неспівпаданні – умовним.

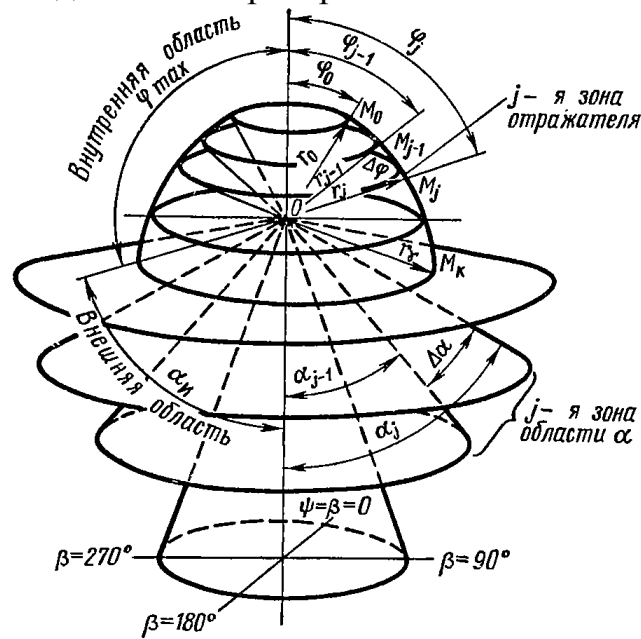
Центральний промінь – промінь, що виходить з геометричного центра світлого тіла джерела (може бути реальним і умовним). У сфокусованому пристрої центральний і осьовий промені співпадають.

Кут обхвату відбивача – тілесний кут ω_{\max} , в межах якого видима його активна поверхні з т. $O(F)$. Вимірюється **плоским кутом обхвату** $2\varphi_{\max}$ або $2\varphi_{i \text{ відб}} = 2(\varphi_{\max} - \varphi_0)$ для відбивача з горловиною.

Кут випромінювання – тілесний кут, в межах якого СП надсилає потік випромінювання.

Геометричні параметри відбивача – діаметр D , ширина H , довжина L , глибина C , відстань від світлового центра до площини горловини відбивача Z_0 .

Внутрішня область – частина простору, охоплена світлорозподілюючим пристроєм. Вимірюється його тілесним кутом обхвату. В цій області світловий потік падає на світлорозподілюючий пристрій.

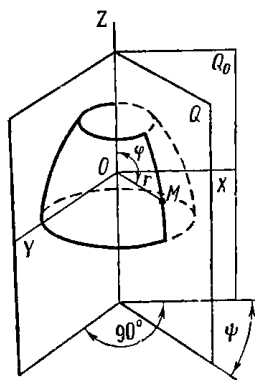


Зовнішня область – частина простору, всередині якого перерозподіляється світловий потік світлорозподілюючого пристрою.

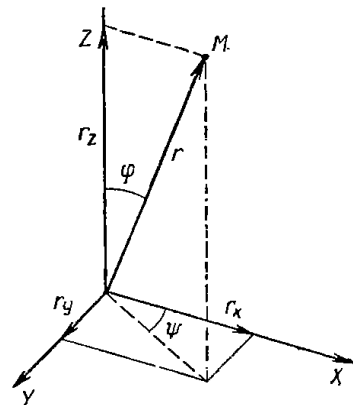
Меридіональна (поздовжня, профільна) площина – площина Q , яка проходить через вісь симетрії OZ або через іншу вісь (для некрутосиметричних СП) так, що утворилося профільне січення.

Екваторіальна (поперечна) площина – площина, перпендикулярна меридіональній. Її січення іноді виявляє твірну поверхні світлорозподілюючого пристрою.

Системи координат світлового приладу Внутрішня область



Система полярних координат (r, φ, ψ)



Система прямокутних координат XYZ

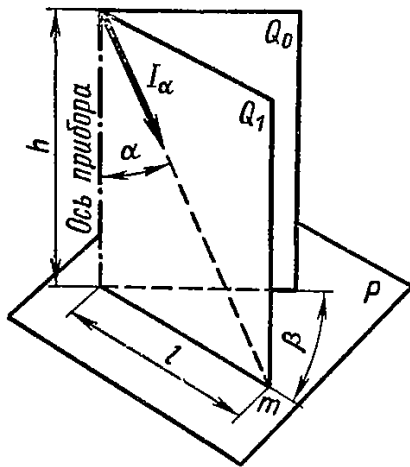
Центр координат суміщають з світловим центром (полярна система) або вершиною відбивача (прямокутна система).

Співвідношення між системами координат:

$$r_x = r \sin \varphi \cos \psi, \quad r_y = r \sin \varphi \sin \psi, \quad r_z = r \cos \varphi.$$

Зона світлорозподіляючого пристрою – частина його поверхні, виділена двома круговими конусами з кутами розкриття φ_{j-1}, φ_j , вершини яких суміщені із світловим центром т. O .

Зовнішня область



Система координат (α, β)

Кут α відраховується від напрямку нижньої півосі СП і орієнтує деякий напрям меридіональної площини Q_1 . $\alpha = 0 \dots 180^\circ$.

Кут β лежить в екваторіальній площині P і утворюється двома площинами Q_0 і Q_1 . Q_0 визначає початок відліку. $\beta = 0 \dots 360^\circ$.

Для будь-якої площини Q :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{h}$$

Зона зовнішньої області – частина цієї області, виділена двома круглоконічними поверхнями з кутами розкриття α_{j-1}, α_j , вершини яких суміщені із світловим центром т. O .

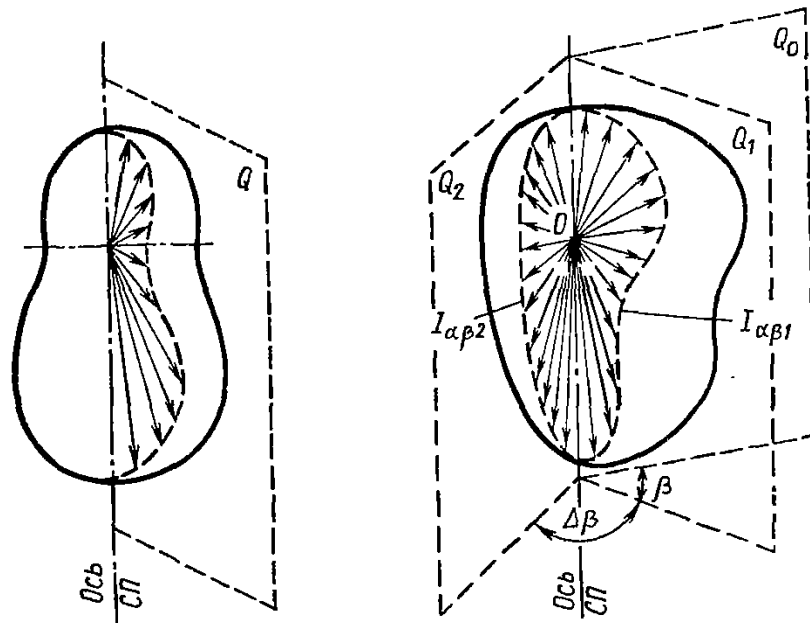
Лекція 5

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ

- 1) сила світла та її розподіл у просторі;
- 2) освітленість та її розподіл по поверхні освітлюваного об'єкта;
- 3) яскравість світної поверхні та її розподіл по поверхні світлорозподіляючого пристрою і по різних напрямках простору;
- 4) ККД;
- 5) коефіцієнт підсилення;
- 6) спектральний склад випромінювання;
- 7) поляризація випромінювання.

5.1. Сила світла та її розподіл у просторі

$$I_{\alpha,\beta} = \frac{d\hat{O}}{d\omega}, \text{ КД}$$



Фотометричне тіло – геометричне місце кінців радіус-векторів, які виходять із світлового центру приладу, довжина яких пропорційна силі світла приладу у відповідному напрямку.

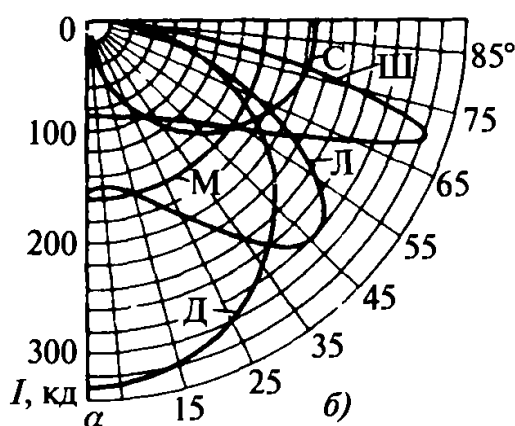
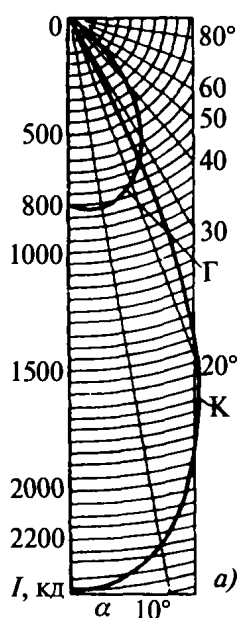
Крива сили світла (КСС) – крива залежності сили світла СП від меридіональних та екваторіальних кутів, отримана перетином фотометричного тіла СП меридіональною чи екваторіальною площинами.

Типи КСС світильників

Позначення типу КСС	Назва типу КСС у верхній і нижній півсферах	Зона можливих напрямків максимальної сили світла, град.	Значення коефіцієнтів форми КСС
К	Концентрована	0-15	$\hat{E}_\delta \geq 3$
Г	Глибока	0-30; 180-150	$2 \leq \hat{E}_\delta < 3$
Д	Косинусна	0-35; 180-145	$1,3 \leq \hat{E}_\delta < 2$
Л	Півширока	35-55; 145-125	$1,3 \leq \hat{E}_\delta$
Ш	Широка	55-85; 125-95	$1,3 \leq \hat{E}_\delta$
М	Рівномірна	0-90; 180-90	$\hat{E}_\delta \leq 1,3$ при $I_{\min} > 0,7I_{\max}$
С	Синусна	70-90; 110-90	$\hat{E}_\delta < 1,3$ при $I_0 < 0,7I_{\max}$

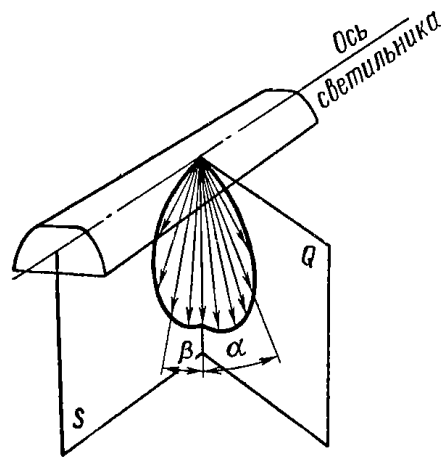
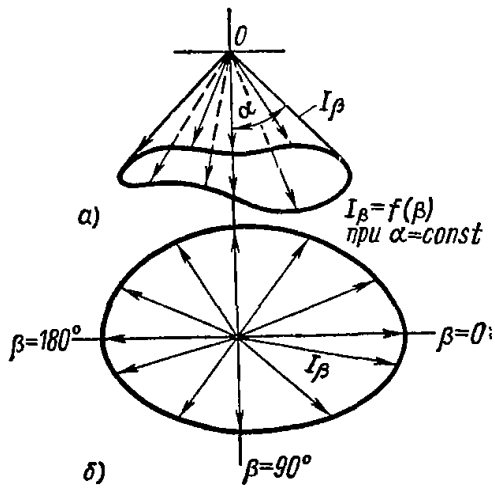
Коефіцієнт форми \hat{E}_δ – відношення максимальної сили світла I_{\max} в меридіональній площині до умовного середньоарифметичного значення сили світла для тієї ж площини I_{cp} :

$$\hat{E}_\delta = \frac{I_{\max}}{I_{cp}},$$



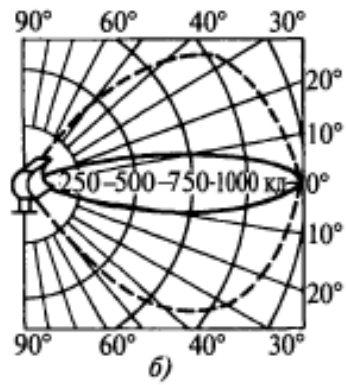
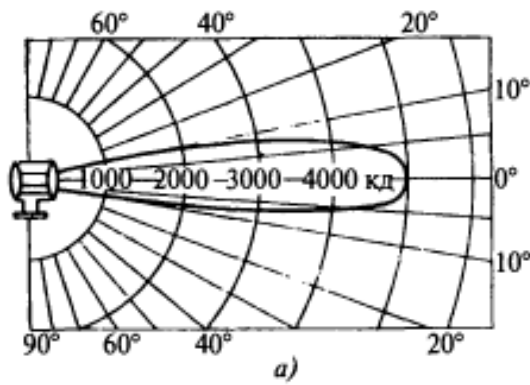
Типи КСС $I(\alpha)$, приведені до світлового потоку 1000 лм:

а) – Г, К; б) – Д, Л, М, С, Ш.

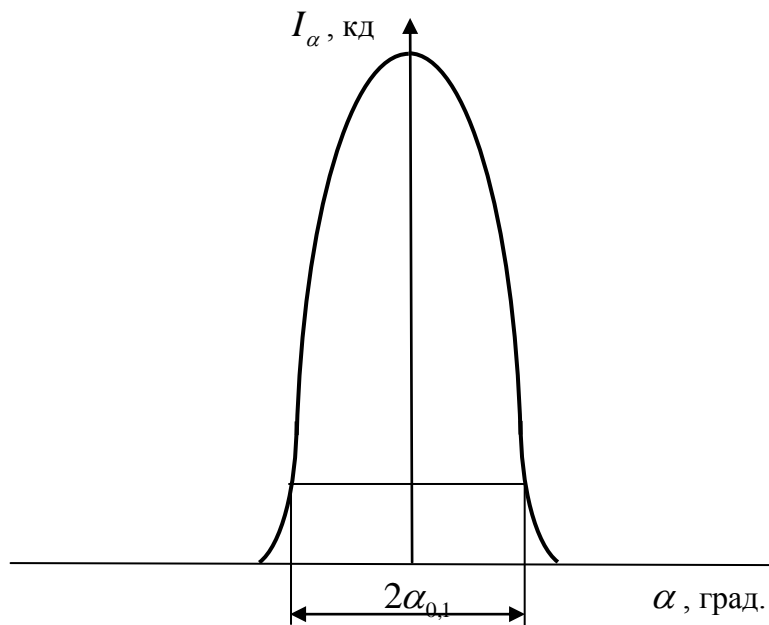


Побудова КСС $I(\beta)$ при $\alpha = const$

Екваторіальна S і меридіональна Q
 площини для люмінесцентного СП



КСС осесиметричних прожекторів: а) з однією віссю симетрії; б) з двома
 осями симетрії



КСС прожектора в прямокутній системі координат

Класи світильників за світлорозподілом

Позначення класу світильника	Найменування класу світильника за світлорозподілом	Частка світлового потоку, що направляється в нижню півсферу, $\frac{\hat{O}_i}{\hat{O}_{\pi a}}$, %
П	Прямого світла	Більше 80
Н	Переважно прямого світла	60-80
Р	Розсіяного світла	40-60
В	Переважно відбитого світла	20-40
О	Відбитого світла	20 і менше

5.2. Освітленість та її розподіл по поверхні освітлюваного об'єкта

$$E = \frac{d\hat{O}}{dA}, \text{ лк}$$

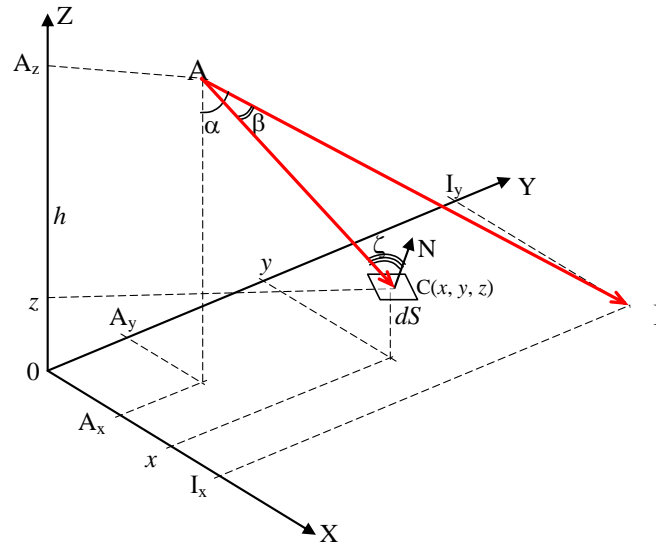
Види освітленості:

- 1) освітленість ділянки площини E_c ;
- 2) просторова освітленість – сума нормальних освітленостей у даній точці поля E_0 ;
- 3) середня сферична освітленість $E_{4\pi}$ – середня освітленість поверхні сфери зникаюче малого радіуса;
- 4) середня напівсферична освітленість $E_{2\pi}$ – середня освітленість сферичної поверхні півсфери зникаюче малого радіуса;
- 5) середня циліндрична освітленість E_{ϕ} – середня освітленість бокової поверхні циліндра із зникаюче малими розмірами його висоти та діаметра основи.

Освітленість від світлового приладу із симетричним світловим розподілом згідно точкового методу:

$$E_c = \frac{I(\beta)}{(AC)^2} \cdot \cos \zeta,$$

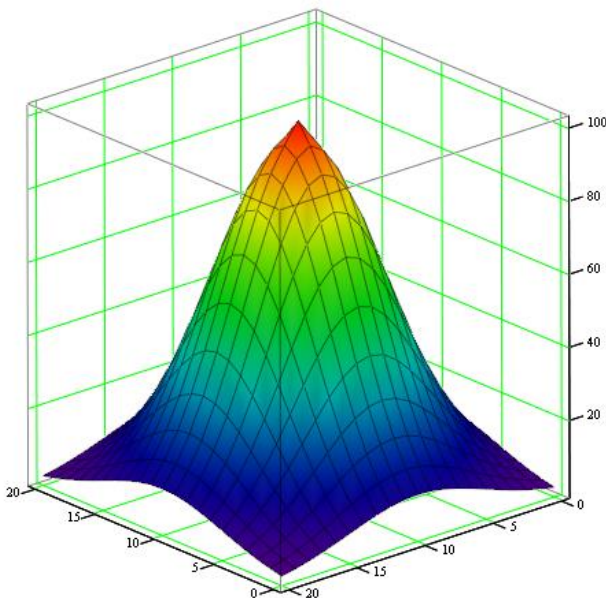
$I(\beta)$ – сила світла в напрямку площини освітлення, кд;



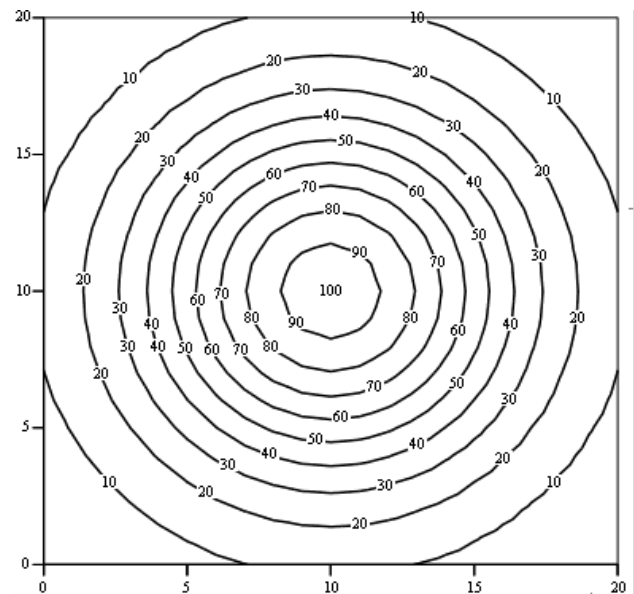
AI – оптична вісь світлового приладу; α – кут між оптичною віссю світлового приладу і вертикаллю; β – кут між оптичною віссю світлового приладу і напрямом до вибраної точки поля; N – одиничний вектор нормалі до поверхні dS ; ζ – кут між напрямом до вибраної точки поля і нормаллю.

Тіла рівних значень освітленості – тіла, поверхні яких є геометричним місцем точок однакових її значень.

Перетин тіл рівних значень освітленості екваторіальною площиною дає сліди у вигляді просторових **кривих рівних освітленостей (ізолюкси)** точок, які відповідають змінним значенням висоти підвісу світлового приладу над площиною перетину і відстані від проекції точкового джерела світла на площину та постійному кутіві нахилу оптичної осі світлового приладу до площини освітлення.



Тіло рівних значень освітленості елементарних площадок від одного точкового джерела світла



Криві рівного освітлення поверхні від одного точкового джерела світла

5.3. Яскравість світної поверхні та її розподіл по поверхні світлорозподілюючого пристрою і по різних напрямках простору

У точці поверхні джерела яскравість – це відношення сили світла, що випромінюється елементом в цьому напрямі, до добутку площі і косинуса кута поширення випромінювання:

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \theta}, \text{ кд/м}^2$$

У точці поверхні приймача світла яскравість – це відношення освітленості, що створюється в цій точці приймача, в площині, яка перпендикулярна до напрямку поширення випромінювання, до елементарного тілесного кута, в якому міститься потік, що створює цю освітленість:

$$L = \frac{dE}{d\omega}, \text{ кд/м}^2$$

У точці на шляху поширення елементарного пучка світла яскравість – це відношення світлового потоку, який переноситься пучком випромінювання, до добутку площі перерізу пучка, тілесного кута, який заповнений пучком світла, кута між нормаллю до ділянки джерела та напрямом поширення випромінювання:

$$L = \frac{d^2\hat{O}}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\omega}, \text{ кд/м}^2$$

5.4. Коефіцієнт корисної дії

Коефіцієнт корисної дії (ККД) світлового приладу – це відношення його корисного потоку до світлового потоку джерел світла цього світлового приладу:

$$\eta = \frac{\hat{O}_{\hat{e}}}{\sum_{i=1}^n \hat{O}_{\hat{v}}},$$

де n – кількість ламп у світильнику.

Корисний потік світлового приладу залежить від форми кривої світлорозподілу СП, характеристик об'єктів освітлення.

Для світлових приладів, весь світловий потік яких може бути корисно використаний, ККД характеризується відношенням всього потоку СП до потоку лампи:

$$\eta = \frac{\hat{O}_{\hat{n}\hat{a}}}{\sum_{i=1}^n \hat{O}_{\hat{v}}}$$

Для СП прожекторного класу приймається корисний потік, який поширюється в межах кута розсіювання.

5.5. Коефіцієнт підсилення

Коефіцієнт підсилення – величина, що характеризує підсилення СП світла лампи у даному напрямку.

Коефіцієнт підсилення СП з круглосиметричними джерелами світла (ЛР, ДРЛ, ДРИ) – це відношення максимальної сили світла приладу до середньосферичної сили світла:

$$K_n = \frac{I_{max}}{I_{\bar{\rho}}}, \quad I_{\bar{\rho}} = \frac{\hat{O}_{\bar{\rho}}}{4\pi}.$$

Коефіцієнт підсилення СП з лінійними джерелами світла (ЛЛ, трубчасті РЛ високого тиску) – відношення максимальної сили світла приладу до максимальної сили світла лампи:

$$K_n = \frac{I_{max}}{I_{\bar{\rho}max}}, \quad I_{max} = \frac{\hat{O}_{\bar{\rho}}}{m_{\bar{\rho}}},$$

$m_{\bar{\rho}}$ – коефіцієнт, що залежить від типу лампи:

$m_{\bar{\rho}}=9,25$ – для люмінесцентних ламп,

$m_{\bar{\rho}}=\pi^2$ – для лампи типу ДНаТ,

$m_{\bar{\rho}}=11,0$ – для ламп типу ДРИ,

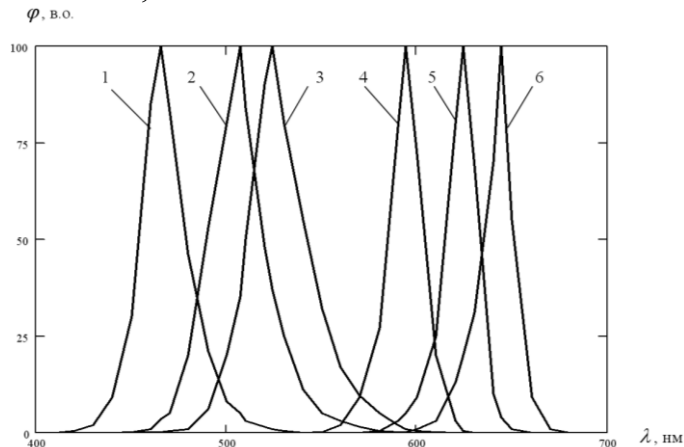
$m_{\bar{\rho}}=12,3$ – для ламп типу ДКсТ.

5.6. Спектральний склад випромінювання

Спектральний розподіл визначається джерелом випромінювання і конструкцією самого приладу.

За спектральним складом СП поділяють на прилади з:

- монохроматичним (квазімонохроматичним, однорідним) випромінюванням;

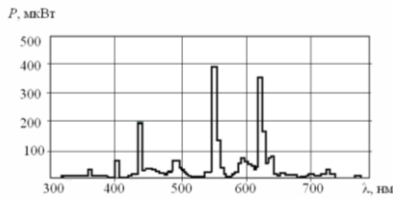


Відносний спектральний розподіл випромінювання світлодіодів:

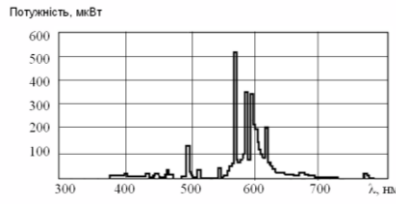
1 – синього, 2 – синьо-зеленого, 3 – зеленого, 4 – жовтого,

5 – янтарного, 6 – червоного кольору свічення.

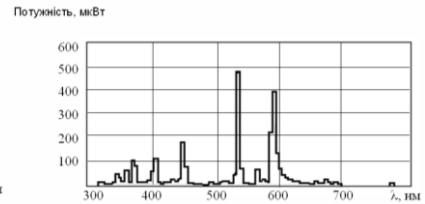
- багатолінійчатим розподілом;



ЛЛ

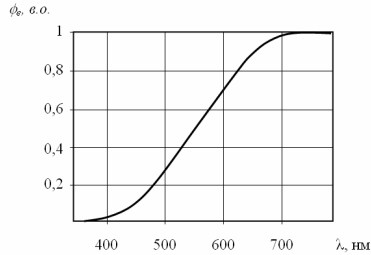


ДНаТ

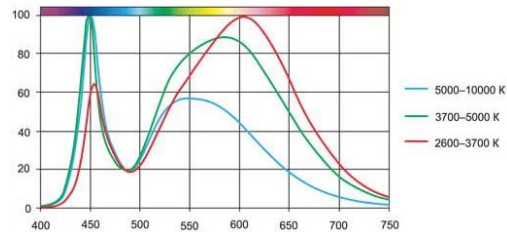


ДРИ

- неперервним (суцільним) розподілом.

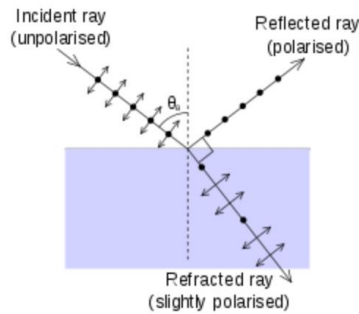


ЛР, ГЛ, КГЛ

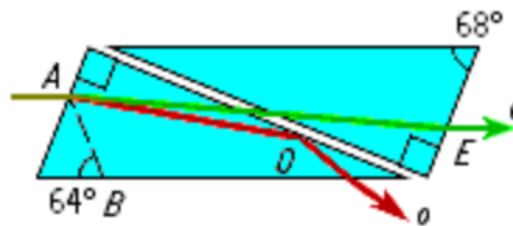


Білі світлодіоди

5.7. Поляризація випромінювання



Дзеркало Брюстера



Призма Ніколя

Пропустивши пучок неполяризованого світла через поляризаційну призму, отримують два світлових пучки, потоки кожного з яких складають половину світлового потоку неполяризованого випромінювання, зменшеного на коефіцієнт пропускання призми. Світловий потік після проходження другої призми може розкластися на потоки \hat{O}_1 і \hat{O}_2 :

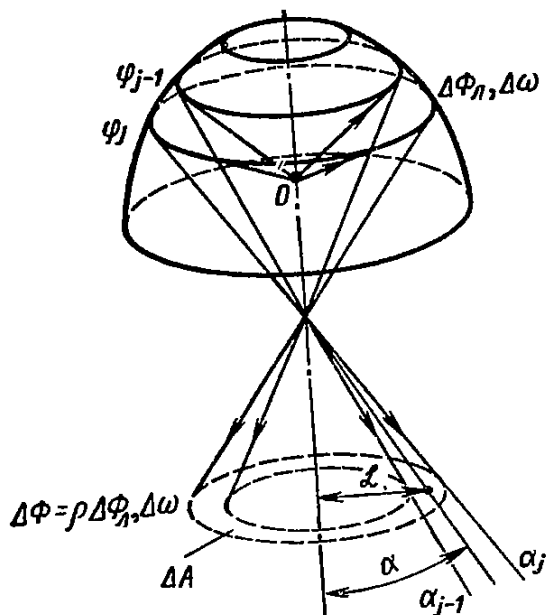
$$\hat{O} = \hat{O}_1 + \hat{O}_2 = \hat{O} \cos \Theta + \hat{O} \sin \Theta,$$

де Θ – кут між головними оптичними площинами двох поляризаційних призм.

Лекція 6

МЕТОДИ СВІЛОТЕХНІЧНОГО РОЗРАХУНКУ СВІТЛОВИХ ПРИБЛАДІВ

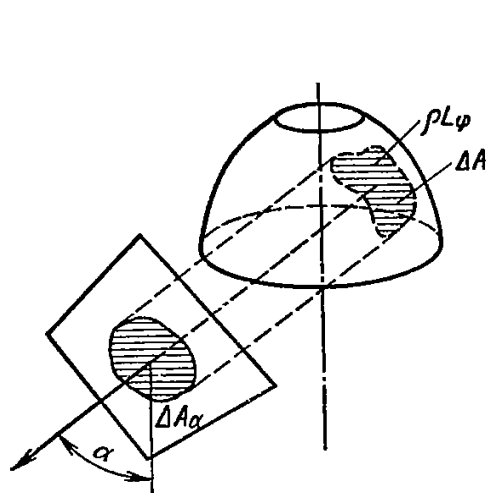
6.1. Метод, що базується на розрахунку світлового потоку, що випромінює СП в різні зони простору чи на різні ділянки поверхні



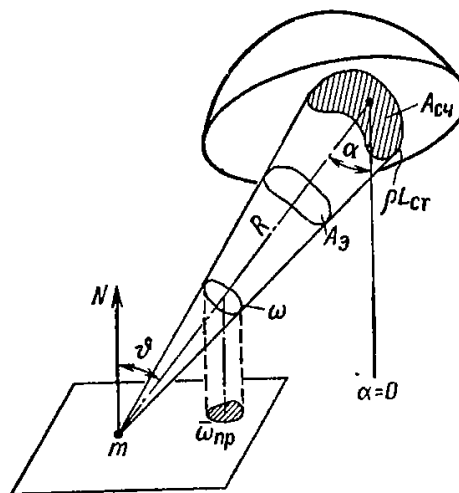
Метод використовують для:

- точкового світлого тіла;
- рівномірного розподілу світлового потоку в певній зоні простору;
- доцільний для дифуздорозсіюючих оптичних пристроїв;
- доцільний для світлових приладів з малою концентрацією світлового потоку і малими та простої форми світними тілами.

6.2. Методи, що базуються на розрахунку площі і яскравості частини СП, яка видна світлою з деякого напрямку чи точки спостереження (опис випромінювання розглядається з точки зору геометричної або фізичної оптики)



$$I_\alpha = \rho L A_\alpha$$



$$E = \rho L \Delta \bar{\omega}_{np}$$

6.2.1. Метод оптичних зображень

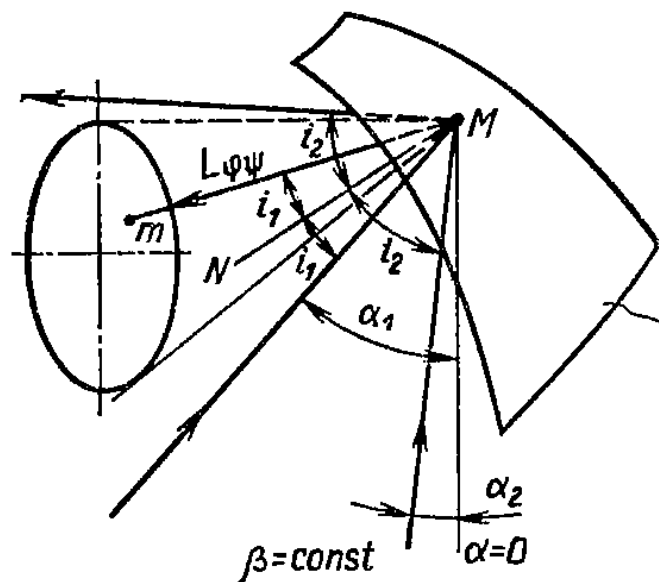
Розглядають кожний промінь, що виходить з світлого тіла джерела, і прослідковують його проходження в оптичній системі. Основою є аналіз оптичного зображення джерела.

Особливість методу: чітке зображення всього світлого тіла і свічення всієї поверхні для точок освітлювальної поверхні, що знаходяться всередині зображення,ю і повне її згасання для точок, що знаходяться поза зображенням.

Недоліки: похибки через нерівномірність свічення поверхні відбивача, громіздкість побудов і розрахунків, зменшення фізичної наглядності.

6.2.2. Метод зворотнього ходу променів

Полягає у розрахунку яскравості і площі світлої частини світлового приладу, прослідковуючи хід сукупності умовних променів, що впали на поверхню оптичної системи із зовнішньої області по вибраному напрямку, використовуючи правило дзеркального відбивання або заломлення.



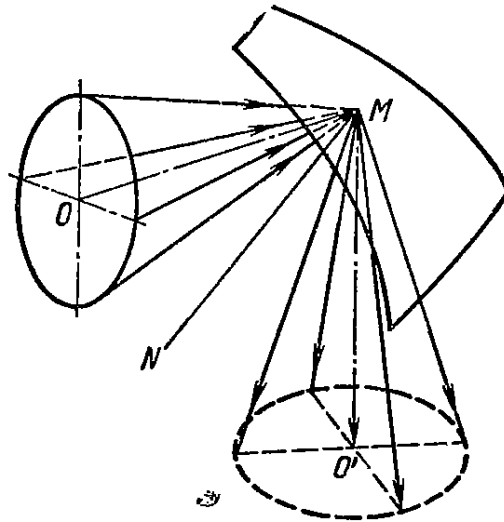
Переваги: висока точність врахування форми, розмірів і яскравості світлого тіла, можливість автоматизації розрахунків.

Недоліки: відсутність фізичної наглядності, громіздкість внаслідок аналізу двох множин – точок світлого тіла і відбивача).

6.2.3. Метод елементарних відображень

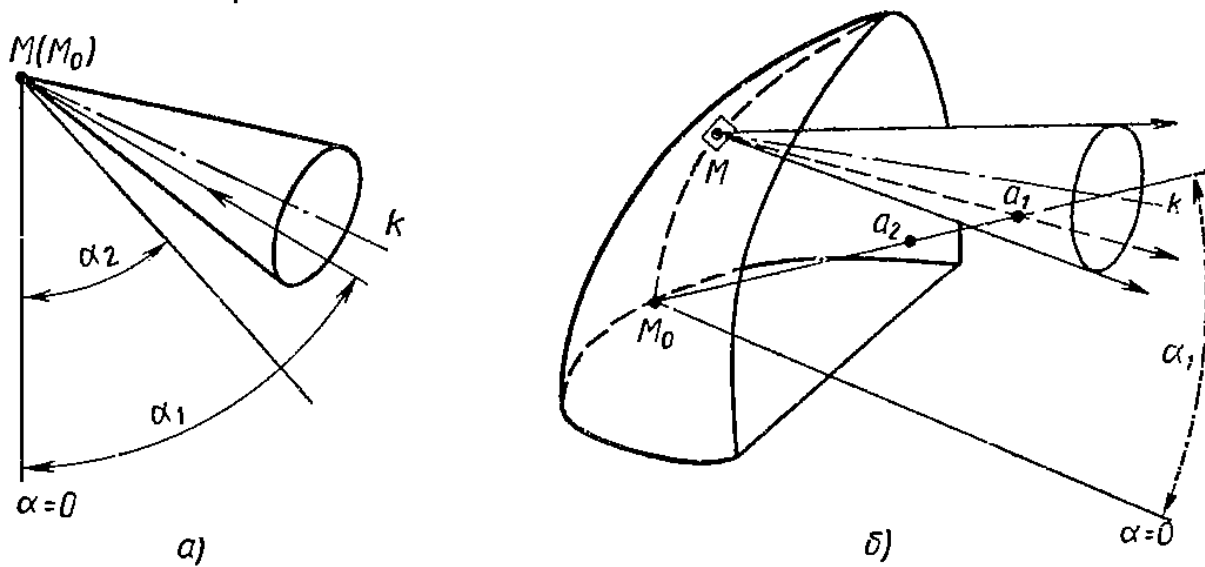
Множини променів джерела і оптичної системи об'єднують в підмножину, що дає узагальнену інформацію про всі точки оптичної системи і властивості світлого тіла джерела.

При найпростішому кінцевому групуванні променів вважають, що весь простір насичений світловими променями, що складають кінчні пучки з вершинами на точках випромінюючих або опромінюваних поверхнях.



Елементарне відображення (ЕВ) – конічний пучок променів, які падають від світлого тіла на точку поверхні оптичного пристрою і надсилаються ним у навколишній простір.

Розміри, форма, положення в просторі світлового пучка оптичного пристрою визначаються розмірами і формою конічних пучків світлого тіла і властивостями оптичної системи.



Свічення т.М для: а) нескінченно великої відстані, б) для скінченної відстані

Переваги методу: враховує повне і часткове свічення для різних напрямків відстаней з врахуванням реального розміщення світлових променів у просторі, наглядність, простота.

Недоліки: розрахунки форми і розмірів ЕВ вимагають певних припущень, аналіз розміщення ЕВ здійснюється за допомогою площинного зображення, що викликає похибки.

Лекція 7

ФОРМА І РОЗМІРИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ

Крайові промені ЕВ – промені, що знаходяться на поверхні конуса.

Кутовий розмір ЕВ – кут між крайовими променями в площині, що перетинає ЕВ по його осі.

ξ – кутовий розмір ЕВ в меридіональній площині.

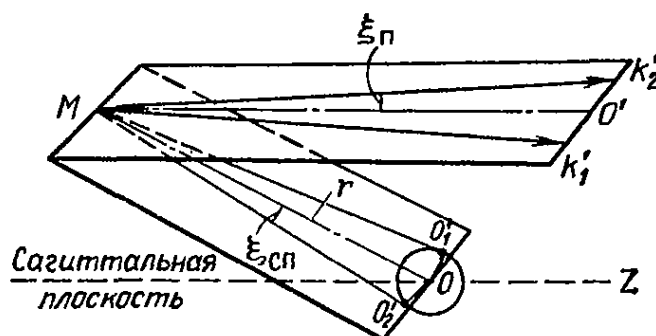
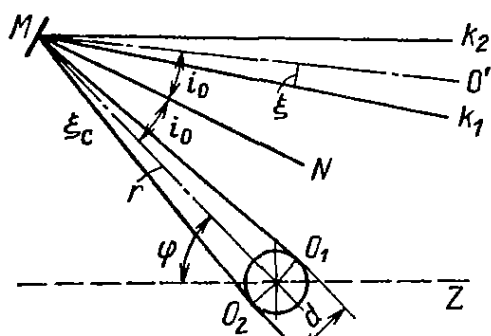
ξ_n – кутовий розмір ЕВ в сагітальній площині.

ξ_c – кутовий розмір світного тіла в меридіональній площині.

ξ_{cn} – кутовий розмір світного тіла в сагітальній площині.

У падаючому випромінюванні форма і розміри ЕВ залежать тільки від форм і видимих розмірів світного тіла.

7.1. Дзеркальний елемент



Для кульового світного тіла: $2\xi_c = 2\xi_{cn} = 2\arcsin \frac{d}{2r}$,

d – діаметр світного тіла.

Для $r \gg d$ $\xi_c \approx \frac{d}{2r}$

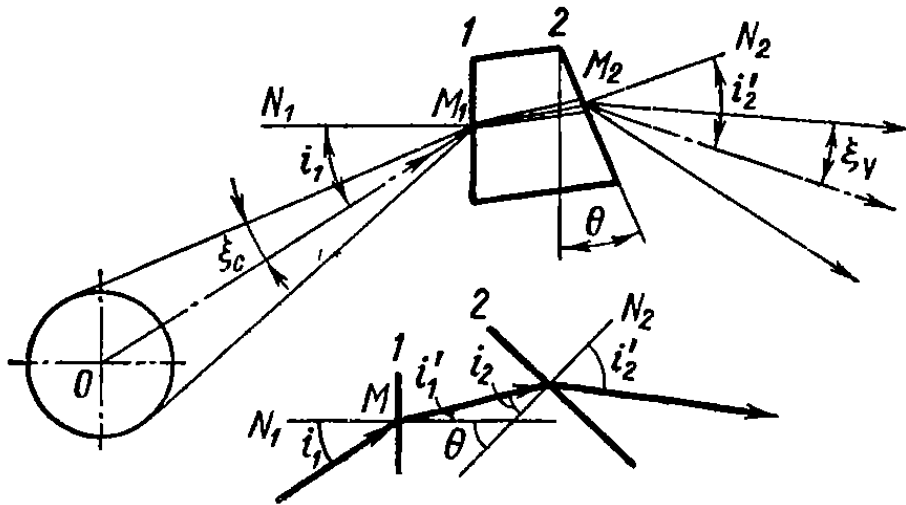
Орієнтація ЕВ у просторі визначається напрямом його осевого променя MO' , який фіксується координатами (α, β) . Т.М фіксується координатами (φ, ψ) . Тобто для будь-якого оптичного пристрою можна встановити залежності $\alpha(\varphi)$ і $\beta(\psi)$.

Слід елементарного відображення – світла пляма, що утворюється на екрані на шляху ходу променів ЕВ.

Контурна лінія сліду ЕВ – геометричне місце слідів крайових променів ЕВ з центром в т. O' .

7.2. Заломлюючий елемент

Монохроматичне світне тіло



$$2\xi_v \neq 2\xi_c$$

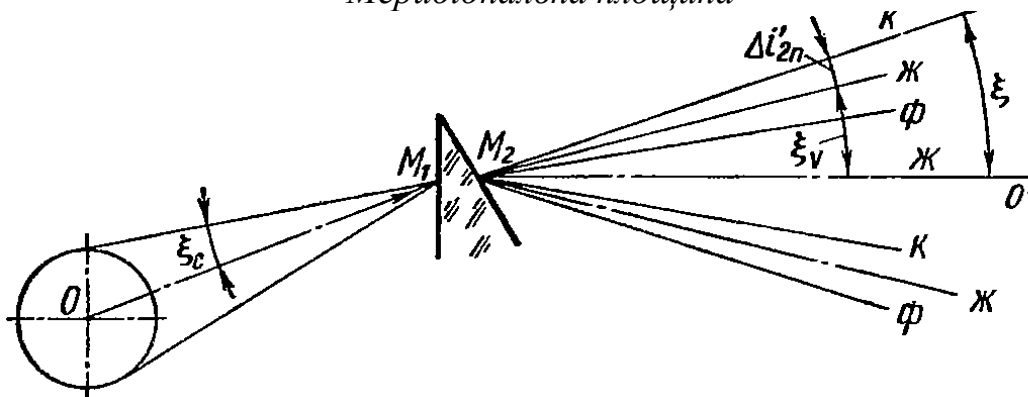
Показник заломлення $V = \frac{\cos i_1 \sqrt{n^2 - \sin^2 i_2'}}{\cos i_2' \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}}$.

Залежно від співвідношення i_1 і i_2' можливо $V > 1$ і $V < 1$

$$V = \frac{\xi_v}{\xi_c}, \quad \xi_v = V \xi_c$$

Немонохроматичне світне тіло

Меридіональна площина



$$\xi = \xi_v + \Delta i'_{2n}, \quad \xi = \xi_v + U \xi_c = \xi_c (V + U),$$

$$\Delta i'_{2n} = \frac{\Delta n \sin \theta}{\cos i_1' \cos i_2'} \text{ — кут, який утворюється крайовими фіолетовими і}$$

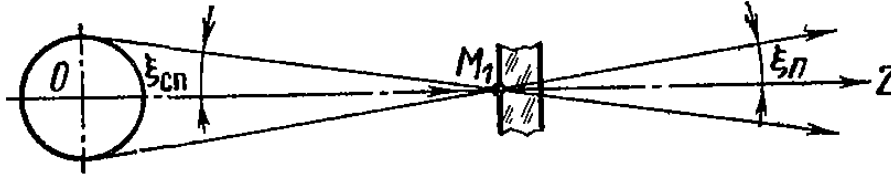
червоними променями з кутом, що має $\lambda = 589 \text{ нм}$;

Δn — половина повної дисперсії, що дорівнює приросту показника заломлення для фіолетового і червоного випромінювання;

$U = \frac{i_2'}{\xi_c}$ – показник дисперсійного впливу.

$$(V + U) > 1, \quad \text{тобто} \quad \xi > \xi_c$$

Сагітальна площина



У сагітальній площині заломлюючий елемент вважають плоскопаралельним, тобто заломлюючу і дисперсійну дію не враховують, тобто:

$$\xi_n = \xi_{nc}, \quad V = 1, \quad U = 0.$$

У січеннях, проміжних між меридіональним і сагітальним, невідповідність між розмірами ξ і ξ_c характеризується коефіцієнтами, які лежать в межах $(V + U) \dots 1$

Для кульового світлого тіла ЕВ має форму еліптичного конуса з великою віссю у меридіональній і з малою віссю в сагітальній площинах.

7.3. Направленорозсіюючий елемент

Якщо фотометричне тіло розсіювання є еліпсоїдом обертання ($\frac{v}{q} \leq 0$), то

кожний промінь після відбивання матовано-дзеркального елемента розділиться на безліч променів у межах фотометричного тіла однаково у всіх областях.

$$\xi = \xi_c (1 + W), \quad \xi_n = \xi_{cn} (1 + W_n),$$

$W = \frac{e_p}{\xi_c}$, $W_n = \frac{e_p}{\xi_{cn}}$ – показники розсіювання в меридіональній і сагітальній площині;

e_p – половинний кут розсіювання.

Для заломлюючого розсіюючого елемента розміри ЕВ також змінюються однаково у всіх напрямках на кут $2e_p$. Крім того враховується заломлююча і дисперсійна дії.

7.4. Дифузний елемент

Форма і розміри ЕВ практично не залежать від форми і розмірів падаючого ЕВ. Кут розкриття ЕВ дорівнює 90° .

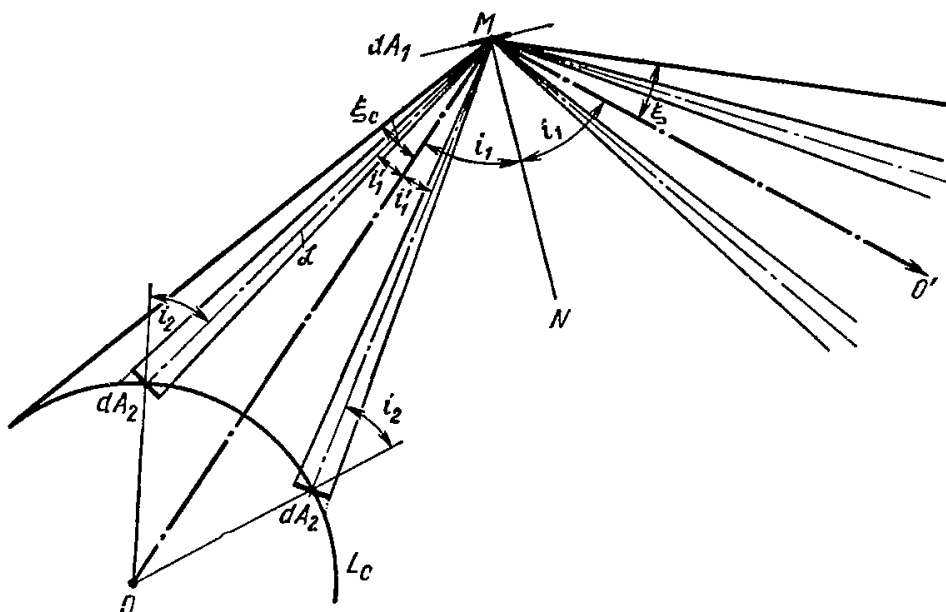
7.5. Кутові розміри елементарних відображень різних типів елементів

Тип оптичного елемента		Кутові розміри ЕВ	
		Меридіональна площина	Сагітальна площина
Дзеркальний		$\xi = \xi_c$	$\xi_n = \xi_{cn}$
Заломлюючий		$\xi = \xi_c (V + U)$	$\xi_n = \xi_{cn}$
Направлено- розсіюючий	відбиваючий	$\xi = \xi_c (1 + W)$	$\xi_n = \xi_{cn} (1 + W_n)$
	заломлюючий	$\xi = \xi_c (1 + W)(V + U)$	$\xi_n = \xi_{cn} (1 + W_n)$
Дифузнорозсіюючий		$\xi = 90^\circ$	$\xi_n = 90^\circ$

Лекція 8

СВІТЛОВИЙ ПОТІК ПРОМЕНІВ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ

8.1. Рівняння світлових потоків елементарного відображення



Освітленість елемента dA_1 від деякої ділянки dA_2 поверхні кульового світлого тіла з яскравістю $L_c = const$:

$$dE = \frac{L_c dA_2 \cos i_2}{2 \mathcal{L}^2} [\cos(i_1 + i_1') + \cos(i_1 - i_1')]]$$

Світловий потік, що падає з ділянки джерела dA_2 на ділянку відбивача dA_1 :

$$d^2 \hat{O} = dE dA_1 = L_c dA_2 \cos i_2 \cos i_1 \cos i_1' \frac{dA_1}{\mathcal{L}^2}$$

$$d^2 \hat{O} = L_c d^2 N = L_c dN_1 dN_2,$$

$d^2 N$ – міра множини геометричних променів:

$dN_1 = dA_1 \cos i_1$ – кількість конічних пучків, що падають з ділянки джерела dA_2 на ділянку відбивача dA_1 ,

$$N_1 = \int_{A_1} dA_1 \cos i_1$$

$dN_2 = \frac{dA_2 \cos i_2 \cos i_1'}{\mathcal{L}^2}$ – кількість променів у цих пучках променів,

$$N_2 = \int_{A_2} \frac{dA_2 \cos i_2 \cos i_1'}{\mathcal{L}^2} = \int_{\omega_{np}} d\bar{\omega}_{np} = \bar{\omega}_{np \bar{n}}$$

$\hat{O} = L_c \int_{A_1} \int_{\omega_{np}} dA_1 \cos i_1 d\omega_{np} = L_c N_1 N_2$ – рівняння світлових потоків

елементарного відображення.

8.2. Яскравість променів ЕВ

8.2.1. Дзеркальний елемент

Світловий потік, що падає на елемент ідеальної дзеркальної поверхні:

$$d\hat{O}_n = L_c \pi \sin^2 \xi_c dA_1 \cos i_1$$

Після відбивання:

$$N_1 = dA_1 \cos i_1, \quad N_2 = \pi \sin^2 \xi_c.$$

Оскільки $d\hat{O} = \rho d\hat{O}_n$, то $L = \rho L_c$.

Для рівнояскравого світлого тіла яскравість променів ЕВ дзеркального відбивання постійна. Для нерівнояскравого – подібна закону розподілу яскравості променів падаючого ЕВ.

Для заломлюючого елемента з ідеально прозорого оптичного скла і монохроматичного випромінювання:

$$L = \tau L_c$$

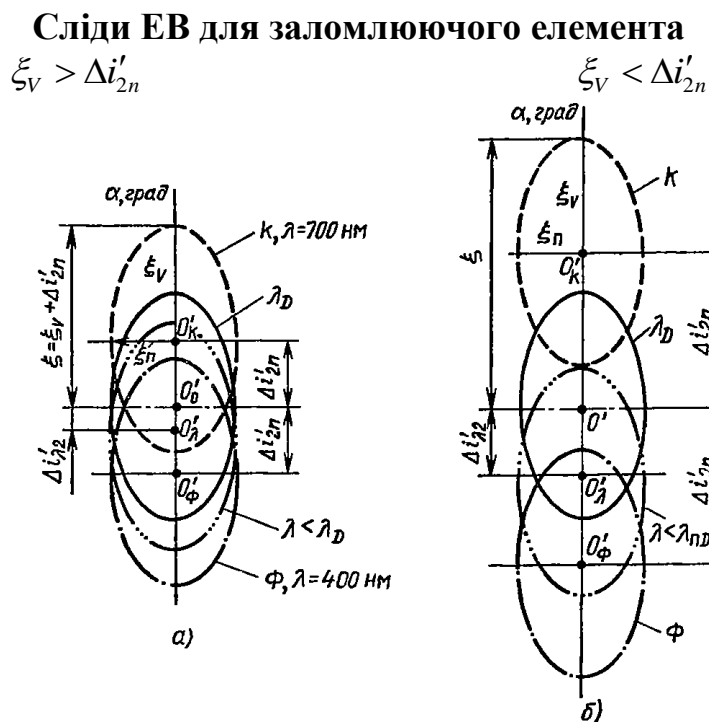
Для немонохроматичного випромінювання ЕВ складається з безлічі монохроматичних ЕВ, зсунутих в меридіональній площині на деякі кути.

Яскравість променя в деякому напрямку дорівнює сумі яскравостей монохроматичних ЕВ у тому ж напрямку.

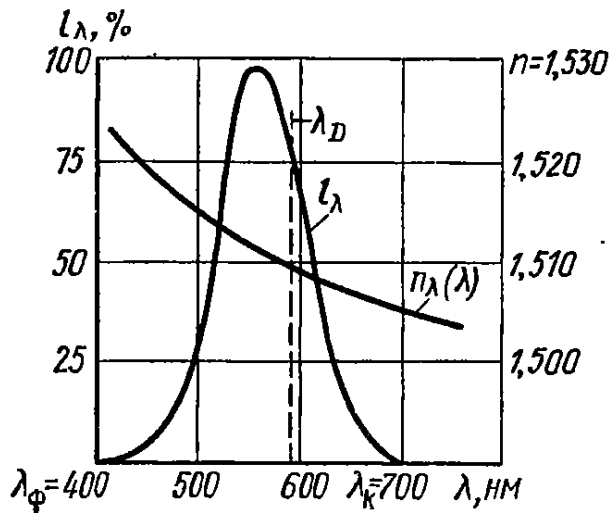
8.2.2. Заломлюючий елементи

Розміри ЕВ для заломлюючого елемента:

$$\xi = \xi_V + \Delta i'_{2n}$$



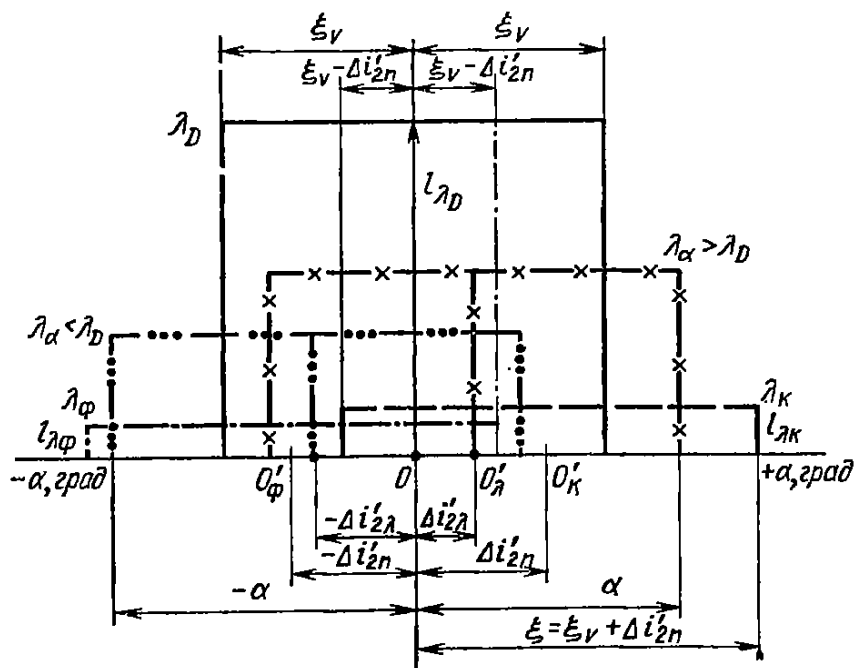
$\lambda_D = 589,3$ нм – середня довжина хвилі (лінія Фраунгофера)



Криві спектральної густини яскравості $l_\lambda(\lambda)$ і дисперсії $n_\lambda(\lambda)$

Кожне ЕВ зображають прямокутником з висотою l_λ і довжиною $2\xi_V$. Значення α визначається значенням дисперсійного зсуву $\Delta i'_{2n}$. $\alpha = 0$ для прямокутника з λ_D .

Розрахунок яскравості променів при $\xi_V > \Delta i'_{2n}$



Для кутів $0 \leq \alpha < (\xi_V - \Delta i'_{2n})$ всі ЕВ від λ_ϕ до λ_o перекривають ці напрямки і сумарна яскравість променів ЕВ дорівнює яскравості світлого тіла (при $\tau = 1$).

Для кутів $(\xi_V - \Delta i'_{2n}) < \alpha \leq (\xi_V + \Delta i'_{2n})$ кількість монохроматичних ЕВ різна, але для всіх напрямків є складова λ_ϕ , тобто нижня границя інтегрування $l_\lambda(\lambda) \in \lambda_\phi$.

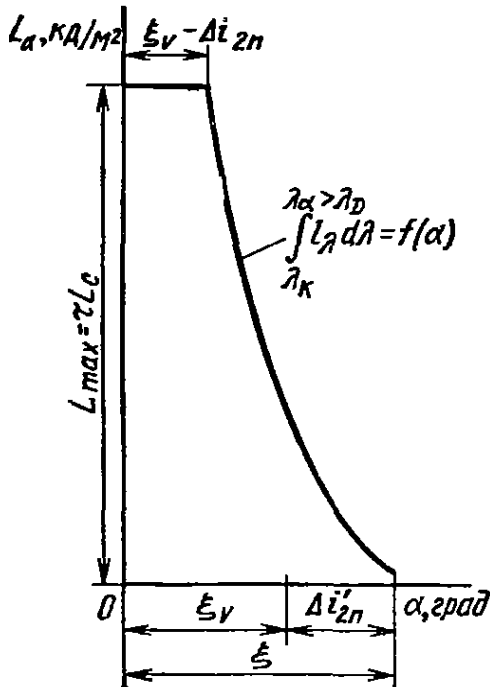
Для знаходження верхньої границі інтегрування знаходять ЕВ з довжиною хвилі λ_α , яке крайовим променем співпадає з виділеним напрямком.

Для цього:

- знаходять кут зміщення ЕВ у заданому напрямку: $\Delta i'_{2\lambda} = \alpha - \xi_v$;

- знаходять значення дисперсії: $\Delta n_\lambda = \frac{\Delta i'_{2\lambda} \cos i'_1 \cos i'_2}{\sin \theta}$;

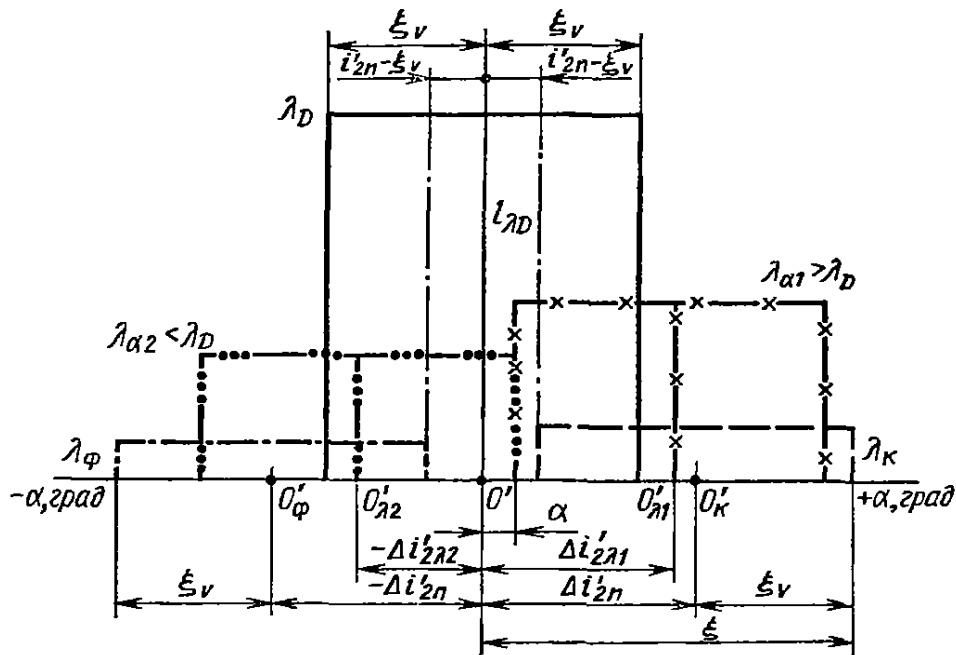
- по кривій дисперсії і Δn_λ знаходять λ_α .



$$L_\alpha = \int_{\lambda_c}^{\lambda_\alpha} l_\lambda d\lambda \text{ закон зменшення яскравості}$$

променів ЕВ у профільній площині заломлюючого елемента

Розрахунок яскравості променів при $\xi_v < \Delta i'_{2n}$



Всередині ЕВ немає напрямків, які перекриваються всіма монохроматичними ЕВ. Тому максимальна яскравість не може дорівнювати яскравості світного тіла.

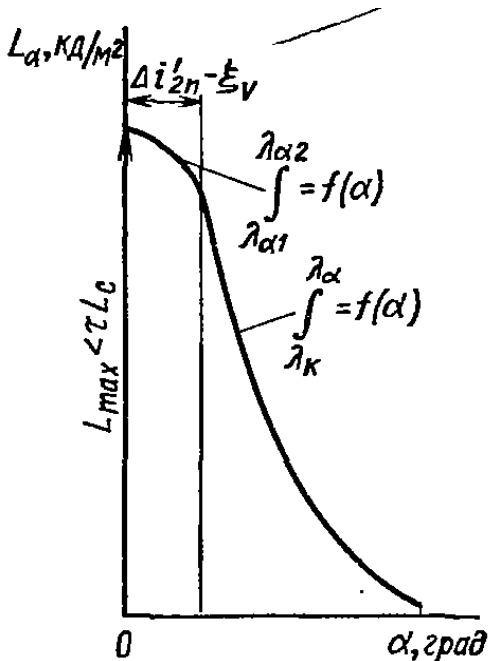
Напрямок α не перекривають ні червоний, ні фіолетовий прямокутники, тому границі інтегрування будуть $\lambda_{\alpha 1}$ і $\lambda_{\alpha 2}$. Вони знаходяться так:

- знаходять кути зміщення ЕВ у заданому напрямку справа і зліва:

$$\Delta i'_{2\lambda 1} = \alpha + \xi_V; \quad \Delta i'_{2\lambda 2} = \alpha - \xi_V;$$

- знаходять значення дисперсії: $\Delta n_{\lambda 1}$ і $\Delta n_{\lambda 2}$;

- по кривій дисперсії і Δn_{λ} знаходять $\lambda_{\alpha 1}$ і $\lambda_{\alpha 2}$.



Для напрямку $0 \leq \alpha < (\Delta i'_{2n} - \xi_V)$

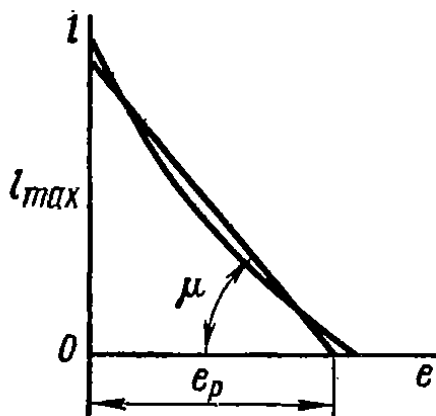
$$L_{\alpha} = \int_{\lambda_{\alpha 1}}^{\lambda_{\alpha 2}} l_{\lambda} d\lambda$$

Для напрямку $\alpha > (\Delta i'_{2n} - \xi_V)$

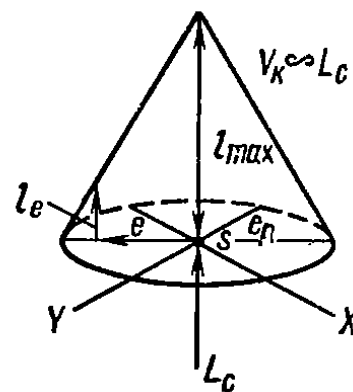
$$L_{\alpha} = \int_{\lambda_{\alpha}}^{\lambda_{\alpha}} l_{\lambda} d\lambda$$

8.2.3. Направлено-розсіюючий елемент

Нехай поверхня – дзеркально матована, тіло розсіювання – еліпсоїд з $\frac{v}{q} \leq 0,05$. Розподіл яскравості променів розсіювання $l(e)$ - лінійний і круглосиметричний.



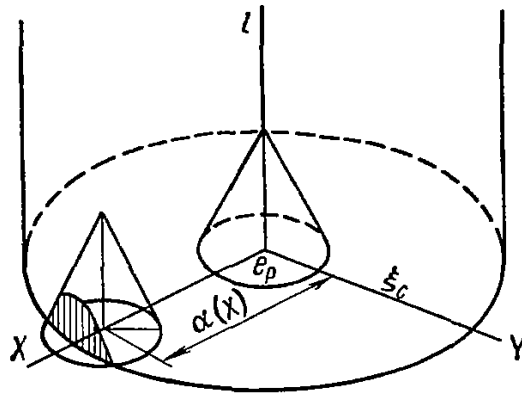
Крива розсіювання



Конус розсіювання

Сума яскравостей всіх променів пропорційна об'єму конуса розсіювання і яскравості падаючого променя джерела.

Розрахунок яскравості променів при $e_p < \xi_c$

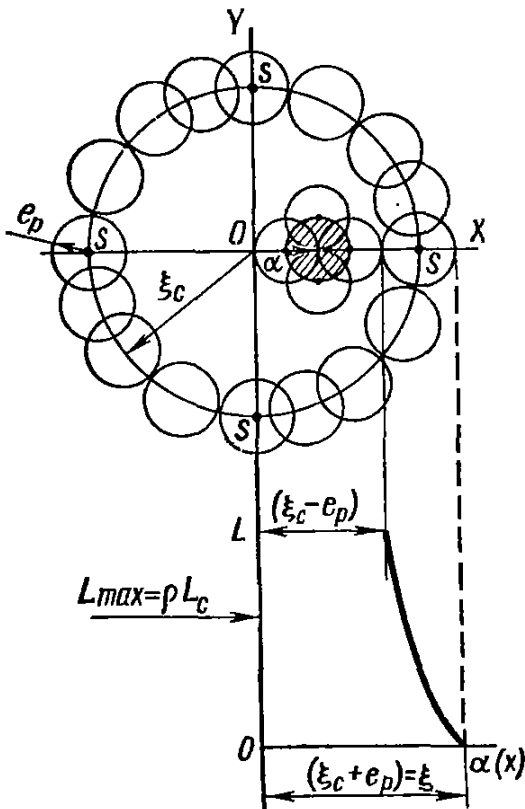


Для знаходження яскравості в напрямку α знаходять множину променів, які співпадають з даним напрямком. Міра променів – площа фігури, поміщеної всередину кривої, що описується центрами кругів розсіювання, які стосуються т.а.

Яскравість променя EB, відбитого в напрямку α , дорівнює сумі яскравостей променів, які опираються на точки вказаної фігури. Сумарна яскравість:

$$L = C \int \int \int_{X Y l} l_e dx dy dl = C \int \int \int_V l_e dx dy dl,$$

C – коефіцієнт пропорційності,
 X, Y – осі кутових відстаней α ,
 l_e – відносне значення яскравості.

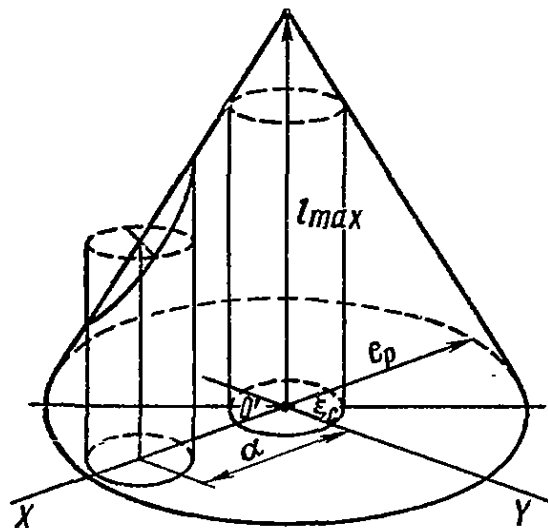


Для кутів $0 \leq \alpha < (\xi_c - e_p)$ сумарна яскравість пропорційна об'єму конуса розсіювання V_e , тобто для цих кутів $L_\alpha = \rho L_c = const$.

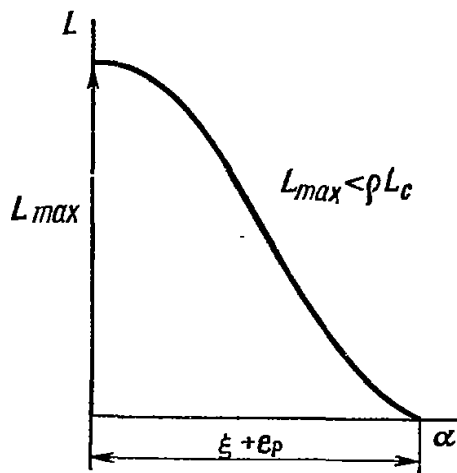
Для кутів $(\xi_c - e_p) < \alpha < (\xi_c + e_p)$ яскравість $L_\alpha = L_c \frac{V'_\alpha}{V_e}$,

V'_α – об'єм частини конуса, що знаходиться всередині циліндра з основою, що дорівнює кругу з діаметром світного тіла, центр якого лежить в початку координат (X, Y, l_e)

Розрахунок яскравості променів при $e_p > \xi_c$



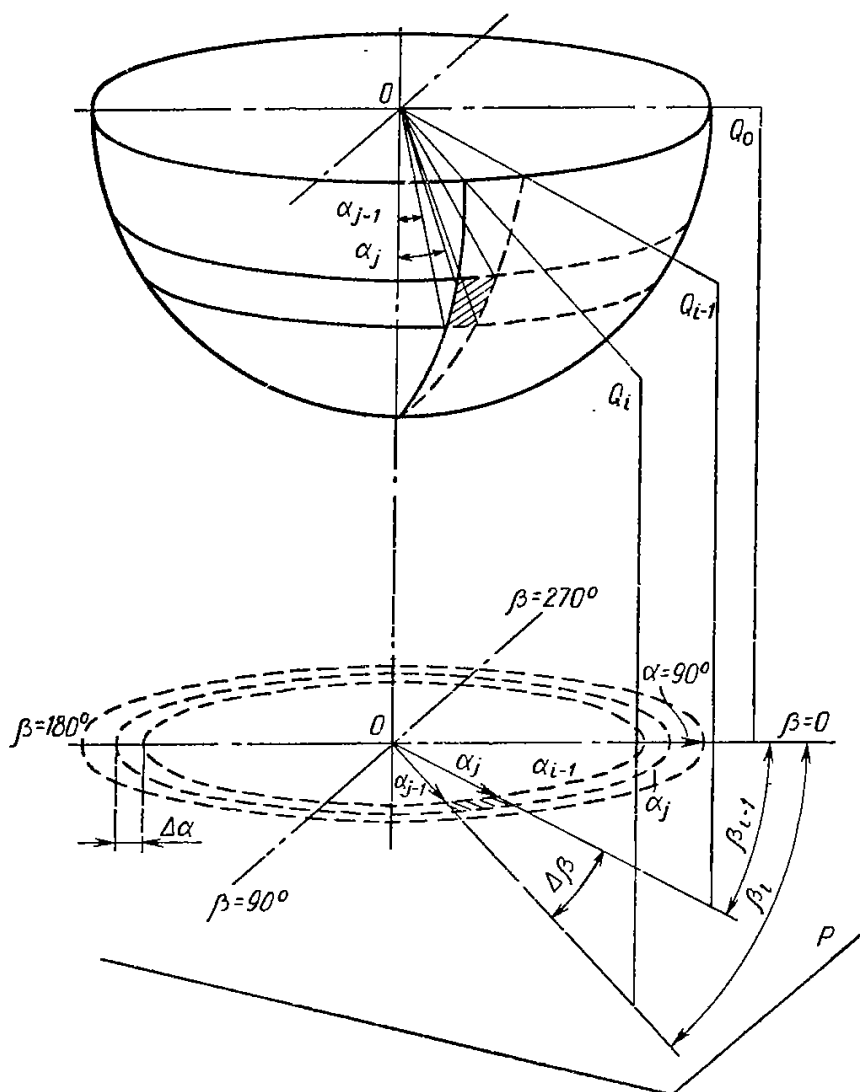
Закон зменшення яскравості променів відбитого ЕВ описується законом зменшення об'єму тіла, вирізаного циліндром з конуса.



$$L_{\max} = \frac{3\rho L_c \xi_c^2 \left[(e_p - \xi_c) + \frac{\xi_c}{3} \right]}{e_p^3} < \rho L_c$$

Лекція 9

СИСТЕМА ВІДОБРАЖЕНЬ СВІТЛОВОГО ПУЧКА І ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ НА ПЛОЩИНУ



Площина відображень містить:

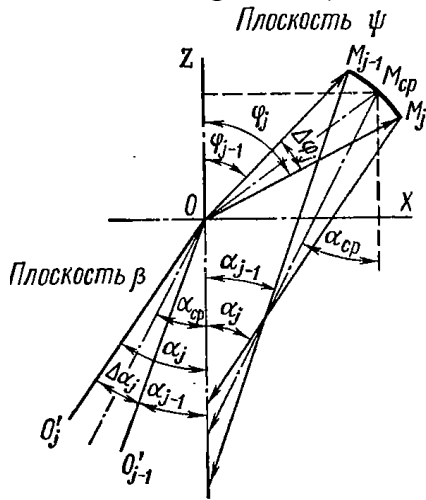
- систему кутів α, β ;
- відображення поверхні оптичного пристрою чи його зони на площині (α, β) ;
- відображення світлового пучка приладу на площині (α, β) і вигляді слідів ЕВ.

Площина відображення перпендикулярна до осі світлового приладу і віддалена на нескінченно велику відстань (кутовий розмір світлового приладу не більше $1'$).

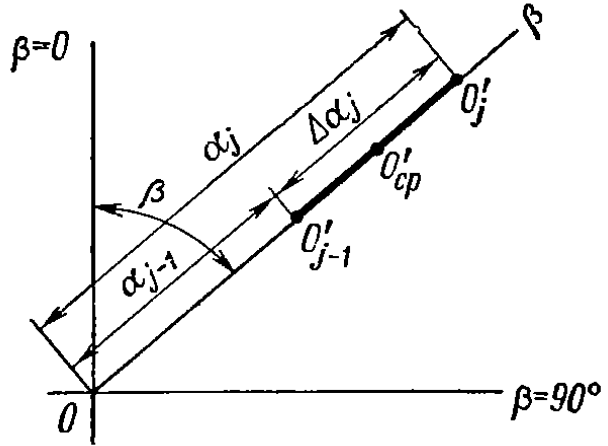
Якщо $\Delta\alpha = \text{const}$ то кореляційний коефіцієнт, який враховує нерівномірність лінійного масштабу кутів α , $C_{\alpha\beta} = \frac{\alpha}{\sin \alpha}$.

Нехай відбивач – кругло симетричний, ідеально дзеркальний. Промінь, який падає в деякій меридіональній площині ψ буде відбиватися в тій самій

площині ψ (β – для зовнішнього простору). При неперервному переміщенні осевого променя OM в площині ψ відбитий промінь буде неперервно переміщатися в площині $\psi = \beta$, утворюючи різні кути α з віссю світлового приладу ($\beta = const$). Т.М(φ, ψ) поверхні відображається у вигляді т.О'(α, β) (слід осевого променя).



Хід осевих променів



Зображення точок M_{j-1}, M_j зони розгортки осевих променів $\Delta\alpha_j$ на ГПК

Розгортка осевих променів – кутова відстань між крайніми осевими променями, що лежать в одній площині:

$\Delta\alpha_j = \alpha_j - \alpha_{j-1}$ – розгортка осевих променів в меридіональній площині;

$\Delta\beta_j = \beta_j - \beta_{j-1}$ – розгортка осевих променів в екваторіальній площині.

Міра концентрації світлового потоку, що розподіляє оптичний елемент:

$$\zeta = \frac{\Delta\alpha}{2\xi}$$

Максимальна концентрація світлового потоку

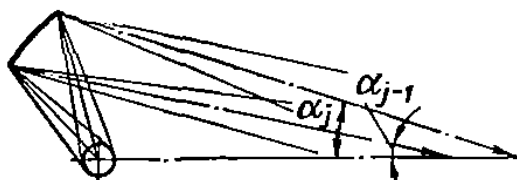
$$\zeta = 0$$

Прожектор параболоїдний		$\alpha_{j-1} = \alpha_j = 0$ $\Delta\alpha = 0$
Світильник (параболкругова зона)		$\alpha_{j-1} = \alpha_j \neq 0$ $\Delta\alpha = 0$
Елемент лінзи Френеля (монохроматичне світло)		$\alpha_{j-1} = \alpha_j = 0$ $\Delta\alpha = 0$

Середня концентрація світлового потоку

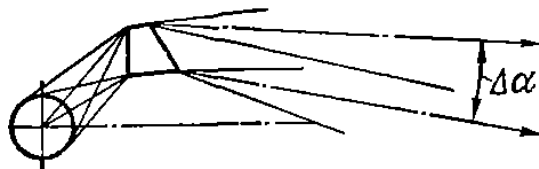
$$0 < \zeta < 1$$

Світильник
(дзеркальна зона)



$$\Delta\alpha < 2\xi$$

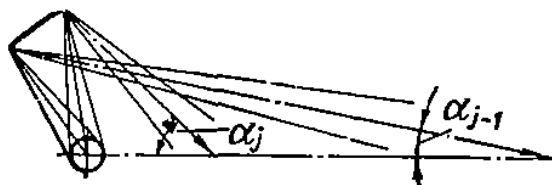
Світильник
(призматичний
елемент,
монохроматичне
світло)



$$\Delta\alpha = \Delta\varphi V < 2\xi$$

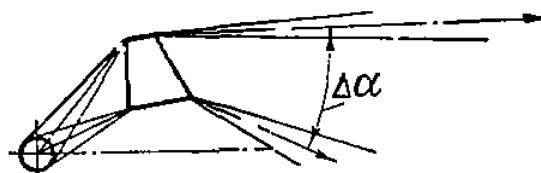
Мінімальна концентрація світлового потоку
 $\zeta \geq 1$

Світильник
(зона дзеркального
відбивача)



$$\Delta\alpha > 2\xi$$

Світильний
(призматичний
елемент)



$$\Delta\alpha = \Delta\varphi V > 2\xi$$

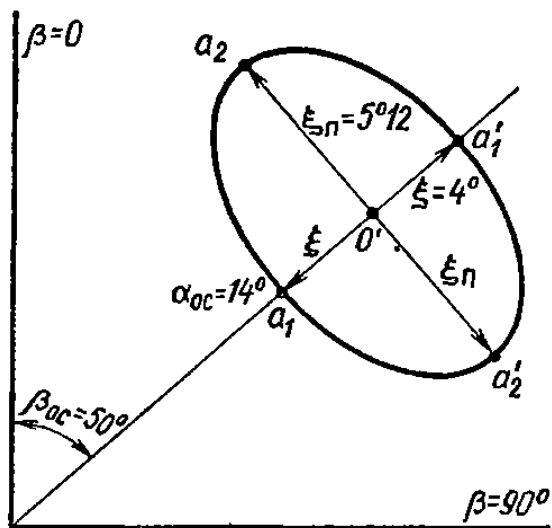
Область слідів осьових променів (ОСОП) – відображення на площину (α, β) поверхні дзеркальної зони. ОСОП утворюється в результаті з'єднання плавними кривими краї відрізків $\Delta\alpha$ на графіку полярних координат.

9.1. Зображення ЕВ на ГПК

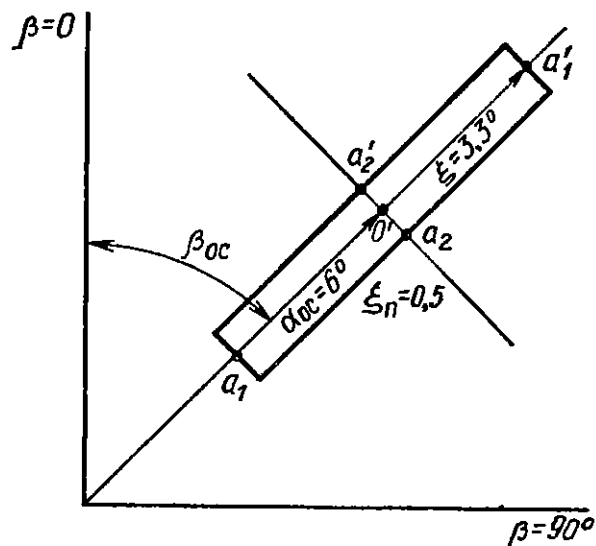
Порядок побудови ОСОП:

1. На ГПК нанести слід осьового променя $O'(\alpha_{oc}, \beta_{oc})$.
2. Через т. O' провести пучок прямих, що є слідами площин, в яких лежать відповідні промені ЕВ.
3. В меридіональній площині промені β_{oc} лежать в межах $|(\alpha_{oc} - \xi); (\alpha_{oc} + \xi)|$, тобто їх сліди утворюють відрізок 2ξ на прямій β_{oc} .
4. На прямій перпендикулярній β_{oc} сліди променів утворюють відрізок $2\xi_n$.
5. Побудови зробити для всіх прямих, що проходять через т. O' .
6. Сполучити точки слідів крайових променів.

Слід ЕВ – область, що зображає ЕВ на площині (α, β) .



Слід ЕВ для дискового світлого тіла і дзеркального елемента
 $a_1 a_1' = 2\xi$, $a_2 a_2' = 2\xi_n$



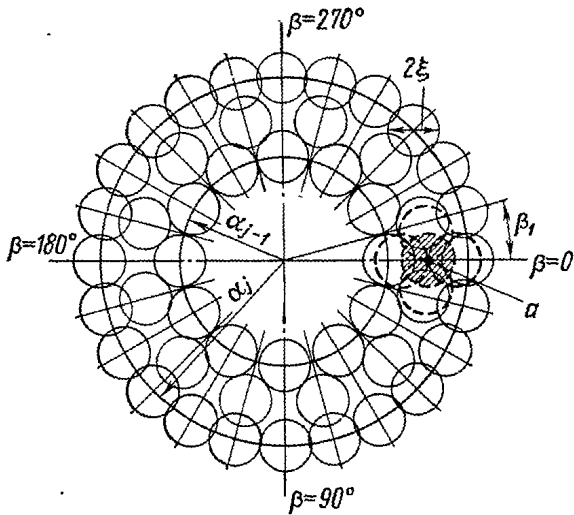
Слід ЕВ для циліндричного світлого тіла

9.2. Відображення світлового пучка світлої частини поверхні оптичного пристрою

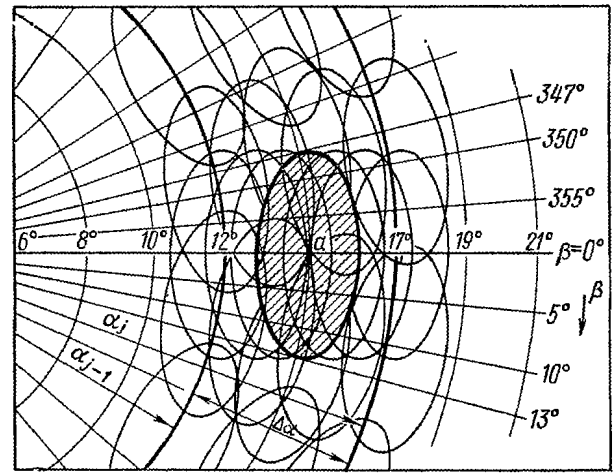
Зональне відображення – множина ЕВ разом з областю слідів осьових променів – відображення світлового пучка зони на площину (α, β) .

Фігура відображень світних точок (ФВСТ) – геометричне місце точок слідів осьових променів, що перекривають даний напрямок, на ГПК.

Загальне правило побудови ФВСТ: Слід ЕВ (розміри для всієї зони постійні) віссю ξ суміщається із слідом меридіональної площини (прямою β) і переміщується вздовж неї в межах ОСОП до тих пір, поки контурна лінія слідів не торкнеться т.а (напрямок спостереження $\alpha, \beta = 0$). Потім на прямій β відмічається т.О' сліда осьового променя ЕВ. Сукупність точок О' – контур ФВСТ.



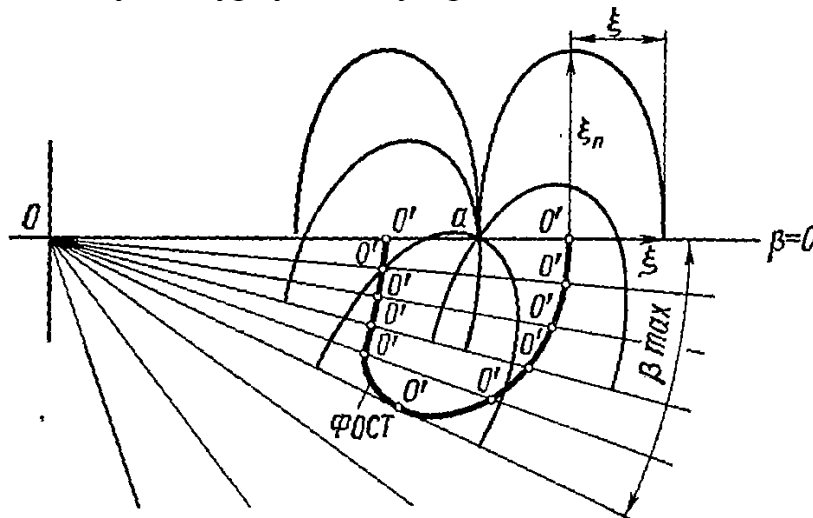
Зональне відображення і ФВСТ
кульового світного тіла



Зональне відображення і ФВСТ
дискового світного тіла

Для круглосиметричного світного тіла $\xi = const$ для всіх кутів, тому можна користуватися одним слідом ЕВ.

Для некруглосиметричного світного тіла ОСОП ділять на ряд ділянок $\Delta\beta$ так, щоб для відповідних їм ділянкам $\Delta\psi$ розміри ЕВ можна вважати постійними. Побудова ФВСТ в межах кутів $\Delta\beta$ проводять з одним слідом ЕВ, а отриману ступінчасту контурну лінію усереднюють плавною лінією.



Графічна побудова ФВСТ

Форма і розміри ФВСТ залежать від напрямку α , форми і розмірів сліда ЕВ, від розмірів ОСОП.

Для повних ФВСТ ($\zeta \geq 1$) її форма визначається тільки кутовою віддалю α і слідом ЕВ. Якщо зона має розміри $\Delta\alpha, \Delta\beta$, то для напрямку α, β ФВСТ буде складати частину від повної, яка ввійде всередину даної області.

Якщо для зони ОСОП вироджується в коло ($\Delta\alpha = 0$) то ФВСТ буде частиною кола.

Якщо для зони ОСОП вироджується в точку ($\xi = 0, \alpha = 0$), то ФВСТ також є точкою.

Загальні властивості ФВСТ:

1. В діапазоні $0 < \alpha < 6\xi_n$ ФВСТ різко змінює форму. Напрямки $\alpha = 0$ і $\alpha = \xi_n$ є екстремальними. В діапазоні $6\xi_n < 90^\circ$ ФВСТ майже не змінюється.
2. Форма ФВСТ і її зміна залежать від ступеня несиметричності сліда ЕВ відносно його центра. Міра відмінності залежать від максимального кута повороту сліда ЕВ β_{\max} . β_{\max} залежить від форми сліду ЕВ і кута α (положення т. a).
Для $\alpha = 0^\circ$ $\beta_{\max} = 180^\circ$. При збільшенні α β_{\max} різко зменшується, що сильно змінює форму ФВСТ.
Для $\beta_{\max} \leq 10^\circ$ ФВСТ і слід ЕВ для всіх світних тіл практично тотожні.
Для цього кута $\alpha = \frac{\xi_n}{\sin 10^\circ} \approx 6\xi_n$.
3. ФВСТ круглосиметричних світних тіл і зон оптичного пристрою для напрямку $\alpha = 0^\circ$ є круг з радіусом ξ або кільце чи кільця (для несучільного світного тіла) товщиною $\Delta\xi$.
Для некруглосиметричних відносно осі зон їх ділять на ділянки $\Delta\psi$ з $\xi = \text{const}$, $\xi_n = \text{const}$; знаходять відповідні їм $\Delta\beta$, в межах яких ФВСТ буде зображатися секторами з радіусом ξ . Вся ФВСТ несиметричної зони для $\alpha = 0^\circ$ представляється ламаною кривою або усередненою кривою.
4. Геометрично подібні сліди ЕВ утворюють подібні ФВСТ.

Аналitична побудова ФВСТ

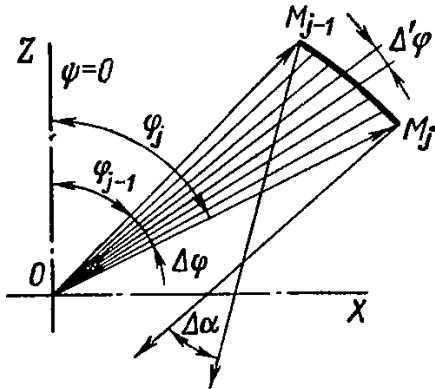
ФВСТ є розв'язком системи рівнянь:

- 1) рівняння контурної лінії слідів ЕВ;
- 2) рівняння прямої в т. $a(\alpha, \beta)$, дотичної до сліда ЕВ.

Лекція 10

КОЕФІЦІЄНТ ЗАПОВНЕННЯ СВІТЛОЮ ЧАСТИНОЮ ПОВЕРХНІ ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ

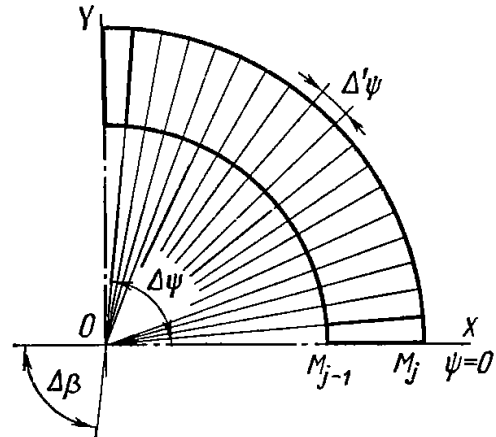
10.1. Фізичний зміст коефіцієнта заповнення



Поділ зони $\Delta\varphi$ на ряд ділянок $\Delta'\varphi$

Кількість ділянок
$$N = \frac{\Delta\varphi\Delta\psi}{\Delta'\varphi\Delta'\psi},$$

$\Delta\psi$ – кут обхвату зони в поперечній площині (для круглосиметричної зони $\Delta\psi=360^\circ$)



Поділ зони на ряд елементів $\Delta'\varphi\Delta'\psi$

Площа елемента зони дзеркального відбивача:
$$\Delta A_{\varphi\psi} = \frac{\Delta'\varphi\Delta'\psi \sin \varphi_{cp}}{\cos i'_{cp} \cos i''_{cp}} r_{cp}^2,$$

i'_{cp}, i''_{cp} – проекції кута падіння променя в середню точку елемента на меридіальну та екваторіальну площини.

Для $\Delta\varphi < 10^\circ$, то $\Delta A_{\varphi\psi} = const$ для всієї зони:

$$A_{\varphi\psi} = \sum_{k=1}^N \Delta A_{\varphi\psi k} \approx N \Delta A_{\varphi\psi k}$$

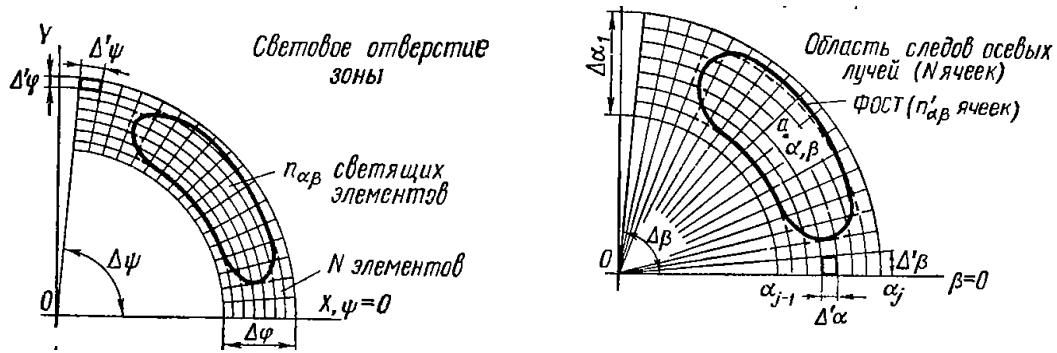
При поділі зони на N елементів її світла частина ділиться на $n_{\alpha\beta}$ елементів.

Площа світлої частини зони

$$A_{\alpha\beta} = n_{\alpha\beta} \Delta A_{\varphi\psi}$$

Коефіцієнт заповнення поверхні оптичного пристрою світлою частиною:

$$K_{\alpha\beta} = \frac{A_{\alpha\beta}}{A_{\varphi\psi}} = \frac{n_{\alpha\beta}}{N}$$



Розміри ділянок визначають так:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta'\varphi} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta'\alpha}, \quad \Delta'\alpha = \frac{\Delta'\varphi}{\Delta\varphi} \Delta\alpha,$$

$$\frac{\Delta\psi}{\Delta'\psi} = \frac{\Delta\beta}{\Delta'\beta}, \quad \Delta'\beta = \frac{\Delta'\psi}{\Delta\psi} \Delta\beta,$$

звідки
$$N = \frac{\Delta\alpha\Delta\beta}{\Delta'\alpha\Delta'\beta}.$$

Площа світної частини площі поверхні для напрямку α :

$$A_\alpha = K_{\alpha\beta} A_\varphi,$$

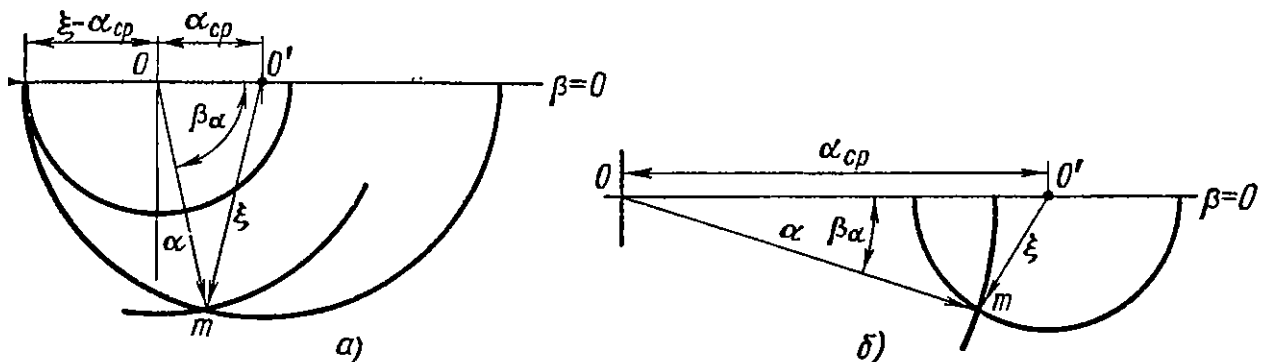
A_φ – площа поверхні зони.

10.2. Графічне визначення коефіцієнта заповнення

Нехай світне тіло і оптичний пристрій – круглосиметричні.

10.2.1. Випадок $\Delta\alpha = 0$ ($0 \leq \zeta < 0,05$ – велика концентрація світлового потоку)

ОСОП вироджується в коло з радіусом α . Використовуючи принцип взаємозамінності користуються одним слідом ЕВ зони. Слід ЕВ центром суміщається з напрямом α_{cp} на прямій $\beta = 0$. Точка, яка відображає напрямок α , береться в багатьох площинах β , тому вона утворює коло з радіусом α .



$$\alpha_{cp} < \xi, \quad 2\beta_\alpha = 360^\circ$$

$\alpha_{cp} > \xi$, ФВСТ вироджується в дугу з кутом обхвату $2\beta_\alpha$

При $\Delta\alpha = 0$ ОСОП вимірюється тільки по куту β , тому світлі ділянки області також вимірюються тільки по куту β . Тобто, ФВСТ ділиться на ділянки по куту β з розмірами $\Delta'\beta$. Якщо $\Delta'\beta = 1^\circ$, то кількість світлин ділянок у ФВСТ дорівнює $\frac{2\beta_\alpha \alpha}{\sin \alpha}$.

Знаючи кількість світлих ділянок $n = 2\beta_\alpha$ коефіцієнт заповнення:

$$K_\alpha = \frac{n'_\alpha}{N'} = \frac{\beta_\alpha \alpha}{180^\circ \sin \alpha}.$$

10.2.2. Випадок $0,1 < \Delta\alpha \leq 2\xi$ ($0,05 < \xi < 1$ – середня концентрація світлового потоку)

Коефіцієнт заповнення визначають двома методами:

- 1) графічною побудовою ФВСТ;
- 2) графічним визначенням, як для випадку $\Delta\alpha = 0$, але зону $\Delta\varphi$ ділять на ряд малих зон з розмірами $\Delta'\varphi$ так, щоб розгортки осьових променів цих зон $\Delta'\alpha \leq 0,1\xi$. Вважаючи, що $\Delta'\alpha \approx 0$, її світлу частину можна характеризувати кутами $2\beta_\alpha$. Кількість малих зон 1...20. Середина розгортки α'_{cp} для кожної зони змінюється через інтервали $\Delta'\alpha$:

$$\alpha'_{cp} = \left(\alpha_{j-1} + \frac{\Delta'\alpha}{2} \right) + \Delta'\alpha(k-1),$$

α_{j-1} – початок розгортки осьових променів зони,

k – номер зони.

10.2.3. Випадок $\Delta\alpha > 2\xi$ ($\xi > 1$ – мала концентрація світлового потоку).

Коефіцієнт заповнення знаходять за допомогою графічної побудови ФВСТ. Число напрямків, які виявляють характерні зміни значень K_α може бути не більше 7. Один або два напрямки мають $K_\alpha = 0$.

10.3. Аналітичне визначення коефіцієнта заповнення

Поверхню оптичного пристрою ділять на таку кількість зон, щоб кожна з них мала $0 \leq \xi < 0,1$ і можна вважати, що $\Delta\alpha = 0$.

Значення β_α знаходять розв'язком системи рівнянь кіл з радіусами α і ξ .

Лекція 11

РОЗРАХУНОК СИЛИ СВІТЛА ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ

Сила світла оптичного пристрою в деякому напрямку (α, β) :

$$I_{\alpha\beta} = \int_A L(\alpha, \beta) dA(\alpha, \beta) \cos \sigma(\alpha, \beta),$$

$L(\alpha, \beta)$ – яскравість елемента dA в напрямку (α, β) ;

$dA(\alpha, \beta)$ – елемент поверхні, що світить в напрямку (α, β) ;

$\sigma(\alpha, \beta)$ – кут між нормаллю до dA та напрямом (α, β) .

Якщо в межах площі A розміри всіх ЕВ є однаковими, світлу частину поверхні визначають за допомогою коефіцієнта заповнення $K_{\alpha\beta}$.

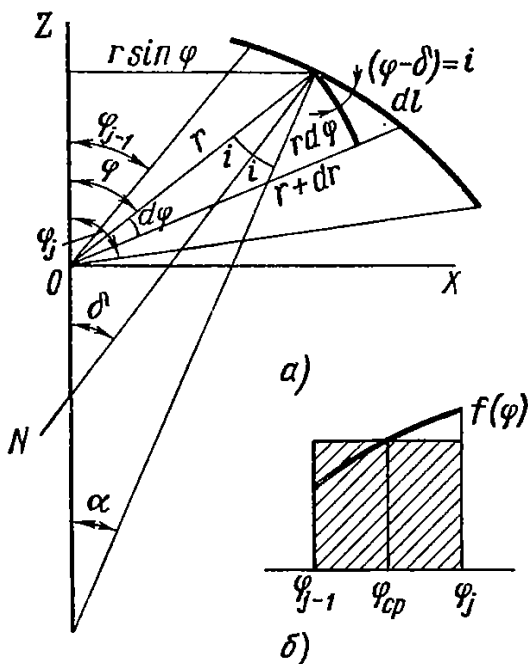
Оскільки розміри і форма ЕВ змінюються для різних ділянок, то поверхню оптичного пристрою ділять на ряд зон, де їх можна вважати однаковими. Тоді:

$$I_{\alpha\beta} = \sum_{j=1}^n I_j(\alpha, \beta) = \sum_{j=1}^n L(\alpha, \beta) A_j(\alpha, \beta) \cos \sigma_j(\alpha, \beta)$$

Для визначення сили світла зони необхідно розрахувати:

- площу зони A_φ ;
- коефіцієнт заповнення $K_{\alpha\beta}$;
- проекцію площі світної частини зони;
- яскравість зони.

11.1. Розрахунок площі зони відбивача



Нехай зона утворена обертанням навколо осі OZ відрізка деякої кривої $r(\varphi)$ між кутами φ_{j-1} і φ_j . Виділимо на поверхні нескінченно вузьку ділянку dA з кутовою шириною $d\varphi$:

$$dl = r \frac{d\varphi}{\cos i}$$

Приймаємо, що цей елемент конічний, його площа:

$$dA = 2\pi r \sin \varphi dl = 2\pi r^2 \sin \varphi \frac{d\varphi}{\cos i}$$

Площа круглосиметричної зони:

$$A_\varphi = 2\pi \int_{\varphi_{j-1}}^{\varphi_j} r^2 \sin \varphi \frac{d\varphi}{\cos i} = 2\pi \int_{\varphi_{j-1}}^{\varphi_j} f(\varphi) d\varphi$$

Наближено:

$$A_\varphi = \frac{\pi^2 \Delta\varphi \sin\varphi_{cp}}{90 \cos i_{cp}} r_{cp}^2.$$

Для розрахунку площі поверхні несиметричної зони її ділять на ряд ділянок з кутовими розмірами $\Delta\varphi, \Delta\psi$, в межах яких функція $f(\varphi, \psi)$ є постійною і дорівнює її середньому значенню $f(\varphi_{cp}, \psi_{cp})$. Тоді:

$$\Delta A_{\varphi\psi} = \frac{\sin\varphi_{cp} \Delta\varphi \Delta\psi}{\cos i_{\varphi_{cp}} \cos i_{\psi_{cp}}} r_{cp}^2,$$

r_{cp} – радіус-вектор середньої точки ділянки зони;

φ_{cp}, ψ_{cp} – кутові координати цієї точки;

$i_{\varphi_{cp}}, i_{\psi_{cp}}$ – проекції кута падіння променя середньої точки зони на меридіональну і екваторіальну площини.

Площа поверхні зони:

$$A_{\varphi\psi} = \sum_0^{2\pi} \Delta A_{\varphi\psi}.$$

Площа відбивача (несиметричного):

$$A = \sum_{\varphi_0}^{\varphi_{\max}} \sum_0^{2\pi} \Delta A_{\varphi\psi}.$$

11.2. Площа проекції світлої частини зони

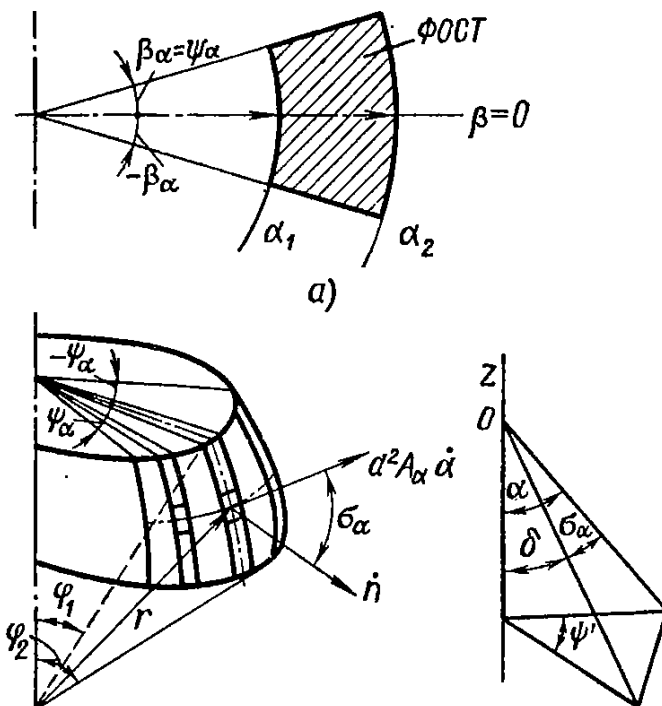
Нехай зона – круглосиметрична, яка має світлу частину в межах кутів φ_1, φ_2 .

Середина світлої частини співпадає з площиною спостереження $\psi = \beta = 0$.

$d^2 A_\alpha$ – нескінченно малий елемент поверхні зони, що світить в напрямку $\alpha, \beta = 0$. Проекція площі цього елемента на площину, перпендикулярну напрямку $\alpha, \beta = 0$:

$$dA_{np\alpha} = d^2 A_\alpha \left| \vec{n} \cdot \vec{\alpha} \right| = dA_\alpha \cos \sigma_\alpha,$$

- \vec{n} – одиничний вектор нормалі;
- $\vec{\alpha}$ – одиничний вектор напрямку α ;
- σ_α – кут між цими векторами.



Для елемента $d^2 A_\alpha$ $\sigma_\alpha = \delta - \alpha$.

Для будь-якого елемента, віддаленого від площини $\psi = 0$ на деякий кут ψ' :
 $\cos \sigma_\alpha = \cos \delta \cos \alpha + \sin \alpha \sin \delta \cos \psi'$.

Для таких елементів площа проекції:

$$A_{np\alpha} = 2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_0^{\psi_\alpha} d^2 A_\alpha \cos \sigma_\alpha$$

або

$$A_{np\alpha} = 2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \varphi_\alpha f(\varphi) \left[\cos \delta \cos \alpha + \sin \delta \sin \alpha \frac{\sin \varphi_\alpha}{\psi_\alpha} \right] d\varphi,$$

$$d^2 A = f(\varphi) d\varphi d\psi, \quad d^2 A_\alpha = \sin \varphi \cdot r^2 \frac{\Delta\varphi \Delta\psi}{\cos i}.$$

На основі теореми про середнє:

$$A_{np\alpha} = [\cos \sigma_\alpha^*] \cdot 2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} f(\varphi) d\varphi = |\cos \sigma_\alpha^*| A_\alpha.$$

Тоді

$$\cos \sigma_\alpha^* = \cos \alpha \cos \delta + \sin \alpha \sin \delta \frac{\sin \psi_\alpha}{\psi_\alpha},$$

$$\text{де } \delta = \frac{\varphi \pm \alpha}{2};$$

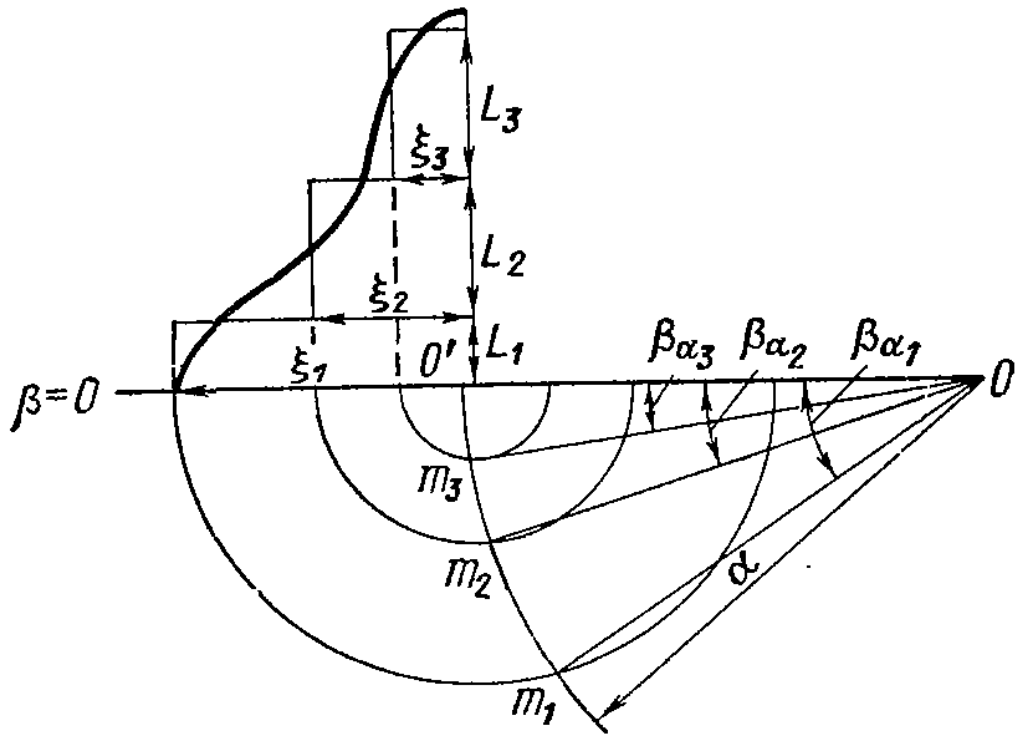
$\psi_\alpha = \beta_\alpha$ – кут між площиною спостереження і меридіональною площиною.

11.3. Яскравість поверхні світлої частини оптичного пристрою

Визначення яскравості світних тіл складної форми має похибки, які викликані такими факторами:

- розподіл яскравості є нестабільним у часі (особливо для ламп ДРИ) і відрізняється для різних ламп у вибірці;
- для розрахунків використовують яскравісні характеристики розрахункового світного тіла. Якщо нерівномірність яскравості складає 1,3...1,6, то використовують усереднення для кожного напрямку і користуються габаритною яскравістю;
- якщо нерівномірність яскравості >1,6, то використовують криві розподілу яскравості по поверхні світного тіла для різних напрямків φ, ψ . Усереднення яскравості робиться тільки на певних ділянках світного тіла, які можна розглядати як слід ЕВ рівнояскравого світного тіла з яскравістю L_m і кутовим розміром ξ_m . Сила світла при ступінчатому розподілі яскравості дорівнює сумі сил світла від окремих рівнояскравих ділянок світлі частини зони:

$$I_\alpha = \rho A_\varphi (L_1 K_{\alpha 1} \cos \sigma_{\alpha 1}^* + \dots + L_m K_{\alpha m} \cos \sigma_{\alpha m}^* + \dots).$$



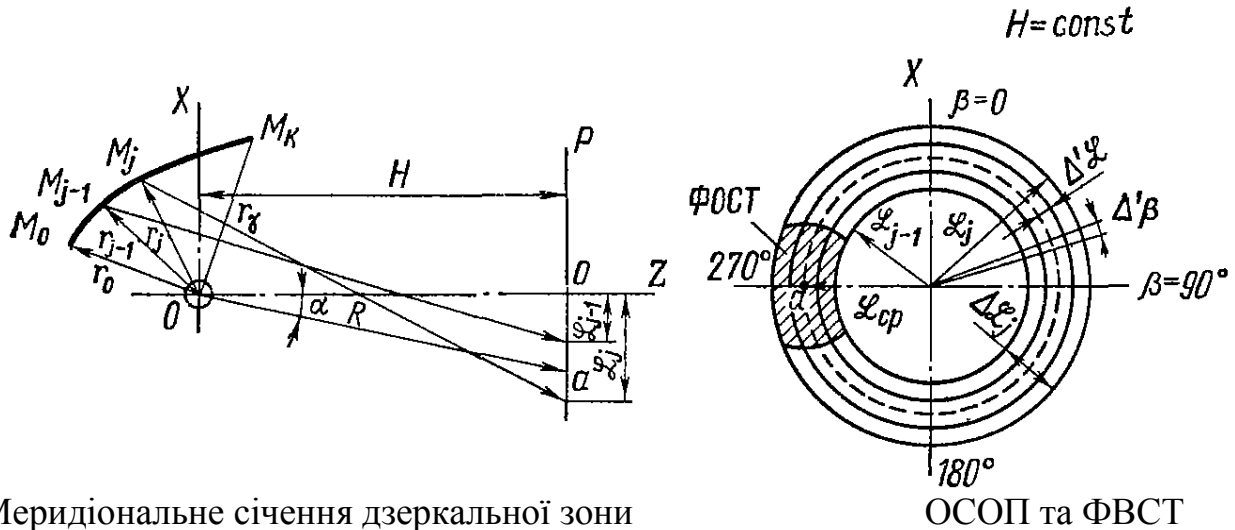
До розрахунку сили світла при ступінчатому розподілі яскравості промені EB

Лекція 12

РОЗРАХУНОК ОСВІТЛЕНOSTI НА БЛИЗЬКІЙ ВІДСТАНІ ВІД ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ

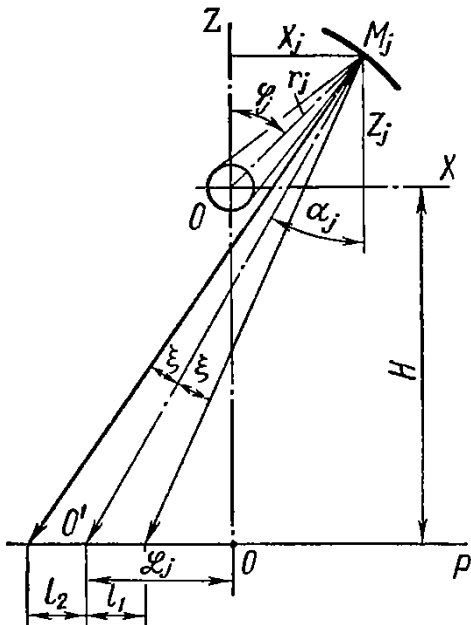
Світла частина оптичного пристрою для одного напрямку буде змінюватися залежно від відстані, оскільки розміри ЕВ для різних точок неоднакові і вершини ЕВ лежать на різних відстанях відносно спостерігача.

Нехай $t.a$ – точка спостереження по напрямку α , яка належить площині P , перпендикулярній до осі приладу.



Меридіональне січення дзеркальної зони

ОСОП та ФВСТ



Площина P знаходиться на відстані $H = R \cos \alpha$ від світлового центру. На площині P побудована система відображень, в якій всі побудови виконуються в лінійній мірі.

Лінійні розміри сліда ЕВ в меридіональній площині $\beta = 0$ дорівнюють:

$$l_1 = (H + z_j) \left[\operatorname{tg} \alpha_j - \operatorname{tg} (\alpha_j - \xi_j) \right],$$

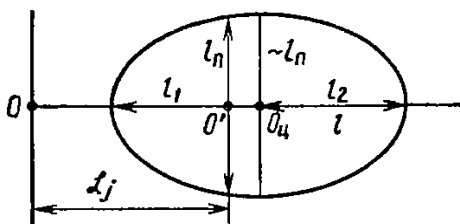
$$l_2 = (H + z_j) \left[\operatorname{tg} (\alpha_j - \xi_j) - \operatorname{tg} \alpha_j \right],$$

ξ_j – кутовий розмір ЕВ в меридіональній площині.

Лінійні розміри сліда ЕВ в екваторіальній площині ($\beta = 90^\circ$) дорівнюють:

$$l_n = 2(H + z_j) \frac{\operatorname{tg} \xi_n}{\cos \alpha_j},$$

ξ_n – кутовий розмір ЕВ в саггітальній площині.



Слід ЕВ – еліпс з півосями $l = \frac{l_1 + l_2}{2}$ і l_n . Центр еліпса не співпадає з т. O' .

Для великих значень кутів α_j і ξ_j сліди ЕВ на площині P зобразити складно, оскільки із збільшенням $tg\alpha_j$ і $tg\xi_j$ лінійні розміри ЕВ стають дуже великими (особливо l_2), а еліпс перетворюється на параболу або гіперболу. Тому визначення світлої частини за допомогою слідів ЕВ проводять для $(\alpha_j + \xi_j) < 45^\circ$ і малих H . Ширину зони вибирають такою, щоб змінами l і l_n в межах φ_{j-1} і φ_j можна знехтувати.

Лінійна координата т. O' , яка відраховується від сліда оптичної осі т. O визначається за формулою:

$$z_j = (H + r \cos \varphi_j) tg \alpha_j - r_j \sin \varphi_j.$$

Область слідів для круглосиметричної зони:

$$\Delta z_j = z_i - z_{j-1}.$$

Відповідність кутів ψ і β – така ж, як і для великих відстаней.

Для одного оптичного елемента кожній відстані H , що орієнтує площини P полярних координат \mathcal{L}, β , буде відповідати своя область слідів осьових променів.

Порядок побудови зонального відображення:

- 1) розділити зону на ділянки $\Delta'\varphi$ і $\Delta'\psi$;
- 2) розрахувати ділянки області осьових променів $\Delta'\mathcal{L}$ і $\Delta'\beta$;
- 3) для ділянок з однаковими l , l_n і $\Delta\mathcal{L}$ ФВСТ будується графічним способом (для $\Delta\mathcal{L}_j = 0, \mathcal{L}_{cp} = 0$ ФВСТ вироджується в точку, для $\Delta\mathcal{L}_j = 0, \mathcal{L}_{cp} > 0$ – в коло);
- 4) обчислити загальну кількість ділянок світлої зони в ОСОП:

$$N_j = \frac{\Delta\mathcal{L}_j \cdot 360}{\Delta'\mathcal{L}\Delta'\beta};$$

- 5) на графіку \mathcal{L}, β підраховують число ділянок ФВСТ $n_{\mathcal{L}}$;
- 6) розраховують коефіцієнт заповнення:

$$K_{\mathcal{L}} = \frac{n_{\mathcal{L}}}{N_j};$$

- 7) визначають площу і кутовий розмір світної частини оптичного пристрою для т. $a(\mathcal{L}, \beta)$;
- 8) оскільки освітленість залежить також від тілесного кута, що охоплює світлу частину з освітлюваної точки, від орієнтації поверхні, на якій знаходиться розрахункова точка, то

$$E = \rho L_c \omega_{\mathcal{L}} \cos \nu,$$

$\omega_{\mathcal{L}}$ – проекція тілесного кута, що охоплює світну частину, на площину, перпендикулярну осі тілесного кута.

Лекція 13

ПРОЖЕКТОРИ З ДЗЕРКАЛЬНИМИ ВІДБИВАЧАМИ

13.1. Типи прожекторів

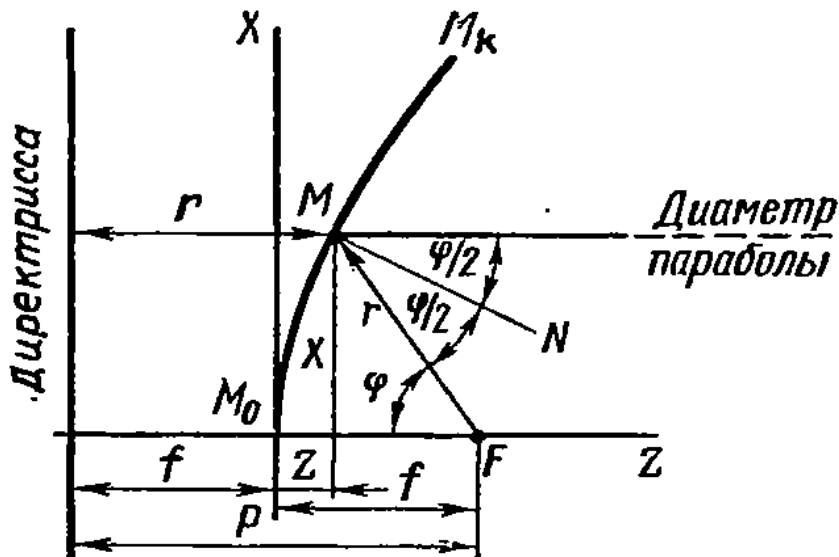
Прожектори дальньої дії: світловий пучок – конічний, осьова сила світла I_0 велика, кут випромінювання $2\varphi_{\max}$ малий.

Прожектори заливаючого світла: світловий пучок – віялоподібний, осьова сила світла I_0 невелика, кут випромінювання $2\varphi_{\max}$ невеликий, кут випромінювання $2\psi_{\max}$ великий.

Транспортні прожектори (фари): світловий пучок – спеціальний, осьова сила світла I_0 невелика, кути випромінювання великі.

Сигнальні прожектори (а – світлові маяки, б – світлосигнальні прилади, в – світлофори): світловий пучок – конічний, осьова сила світла I_0 велика, кут випромінювання $2\varphi_{\max}$ малий.

13.2. Оптичний розрахунок дзеркального параболоїда



т.М координується:

полярна система координат:
$$r = \frac{P}{1 + \cos \varphi} = \frac{2f}{1 + \cos \varphi} = \frac{f}{\cos^2 \frac{\varphi}{2}}$$

прямокутна система координат:
$$X^2 = 2PZ = 4fZ$$

$$X = r \sin \varphi = \frac{2f \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2}}{\cos^2 \frac{\varphi}{2}} = 2f \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$$

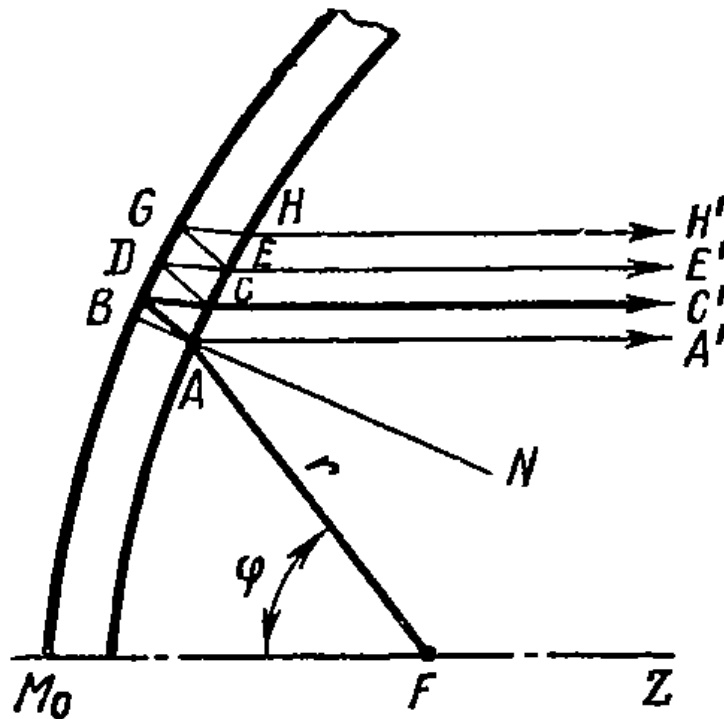
Діаметр світлового отвору відбивача:

$$D = 2X_{\max} = 4f \operatorname{tg} \frac{\varphi_{\max}}{2}$$

Площа світлового отвору відбивача:

$$A_{co} = 4\pi f^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_{\max}}{2}$$

13.3. Копараболоїд



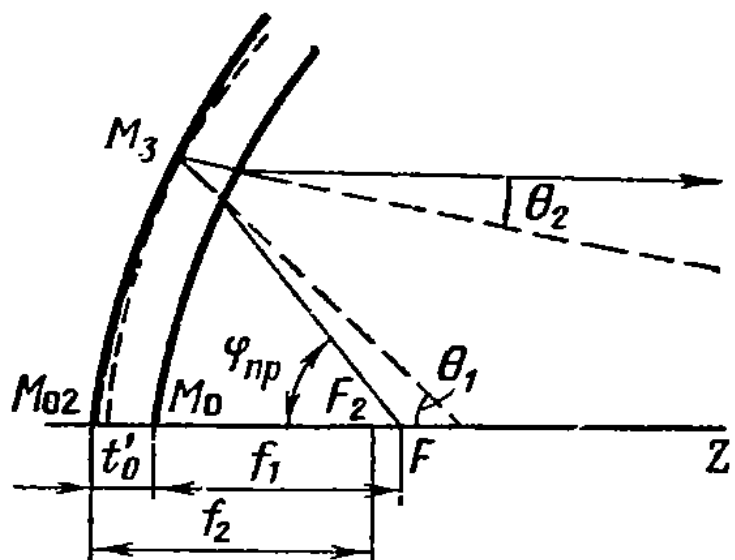
1 компонента – промені AA' , $\rho_1 = 4,4\%$ (при $n = 1,53$)

2 компонента – промені CC' , $\rho_2 = 72,9\%$ (при $\tau = 0,97$, $\rho_i = 0,92$)

3 компонента – промені EE' , HH' ... $\rho_3 = 3,1\%$.

$$\rho_{\Sigma} = 86,7\%$$

13.4. Подвійний параболоїд



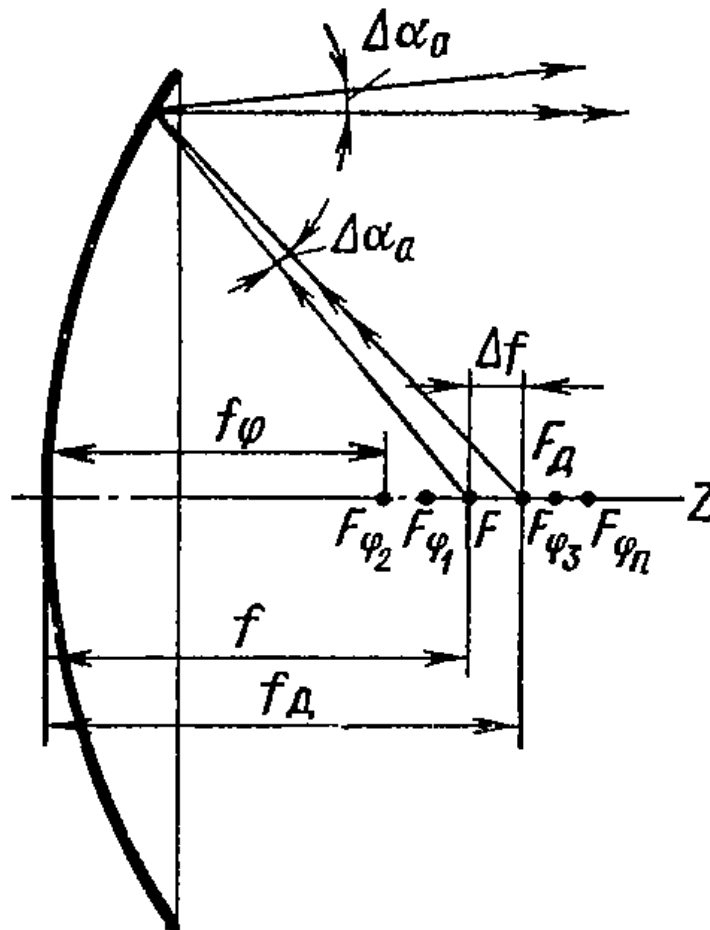
f_1 - фокусна відстань лицьової поверхні

f_2 - фокусна відстань тилової поверхні, $f_2 = \frac{X_3}{2 \operatorname{tg} \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}}$

$$t'_0 = \frac{X_3^2}{4f_2} - Z_3$$

Лекція 14

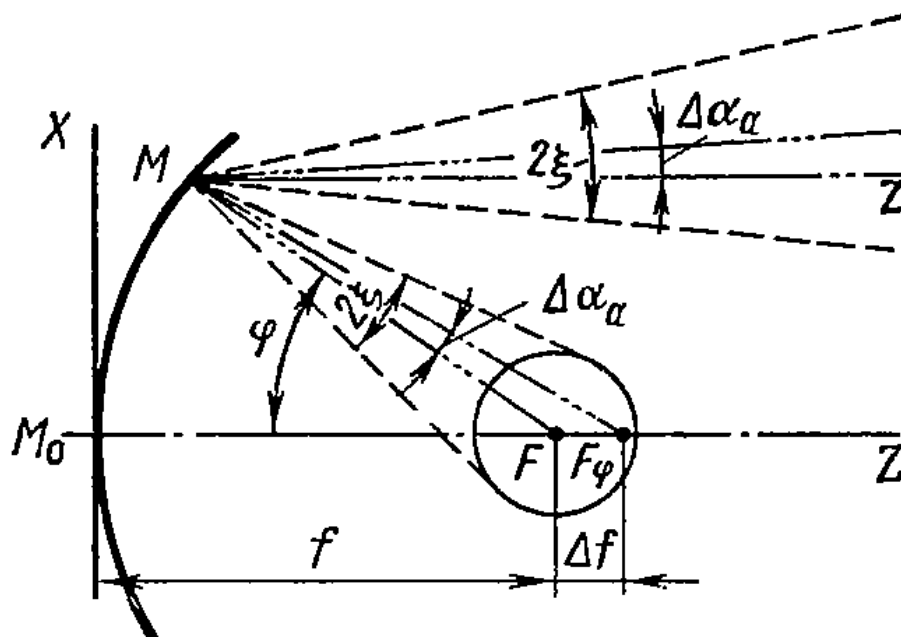
АБЕРАЦІЯ ПАРАБОЛОЇДНОГО ВІДБИВАЧА



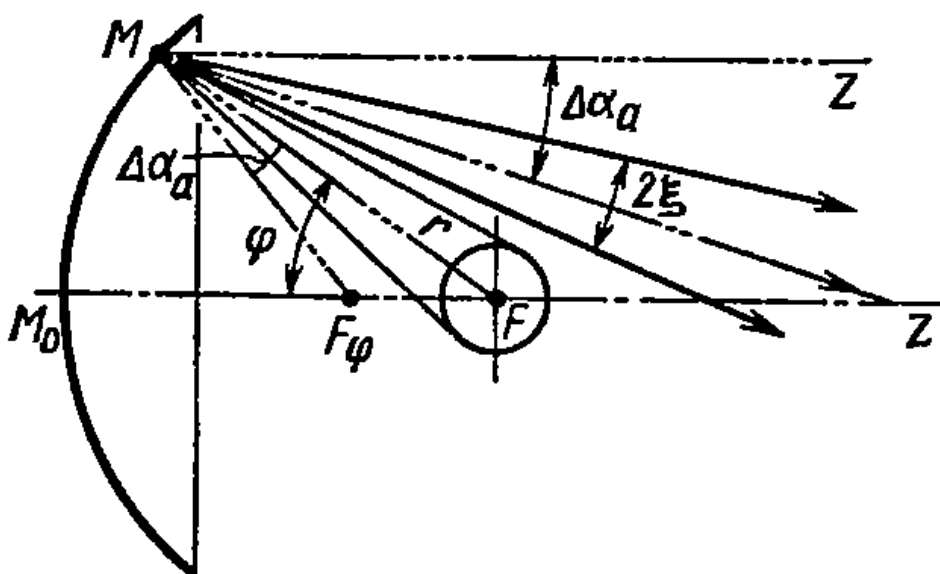
Реальний відбивач має неминучу виробничу аберацію, тому виникає питання, де помістити світне тіло джерела світла: в точці теоретичного фокусу, чи в будь-якій іншій точці на оптичній осі прожектора. Шукана точка повинна бути розміщена так, щоб при суміщенні з нею центра світлого тіла світловий пучок абераційного відбивача відрізнявся б на мінімальну величину від світлового пучка безабераційного відбивача. Цю точку називають дійсним фокусом відбивача.

Аберація – це неспівпадання фокусів окремих ділянок відбивача

14.1. Вплив поздовжньої аберції на елементарне відображення (ЕВ)



Додатна аберція ($+\alpha_a$)

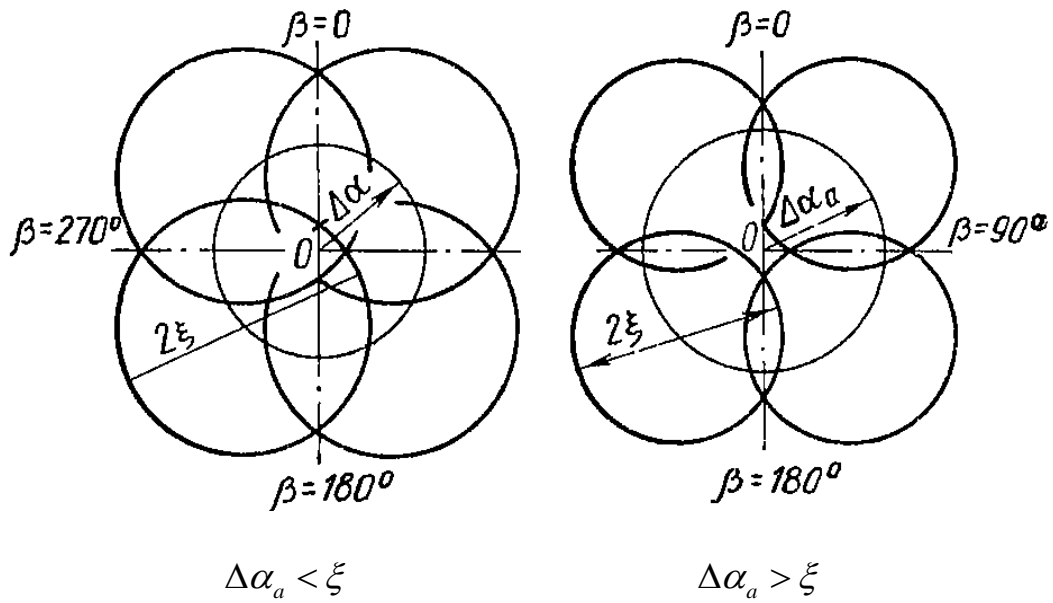


Від'ємна аберція ($-\alpha_a$)

Оскільки $\Delta f \ll r$, то $MF \approx MF_\varphi$, тобто розмір і форма ЕВ не залежать від аберції.

$$\alpha_a = \Delta f \frac{\sin(\varphi \pm \Delta\alpha_a)}{r} \approx \Delta f \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{\Delta f}{f} \cos^2 \frac{\varphi}{2} \sin \varphi$$

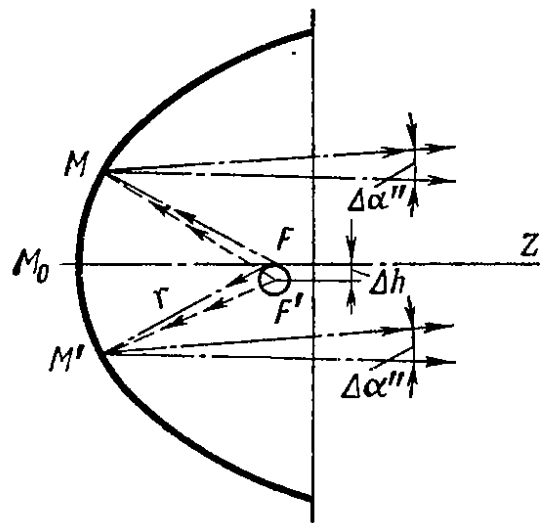
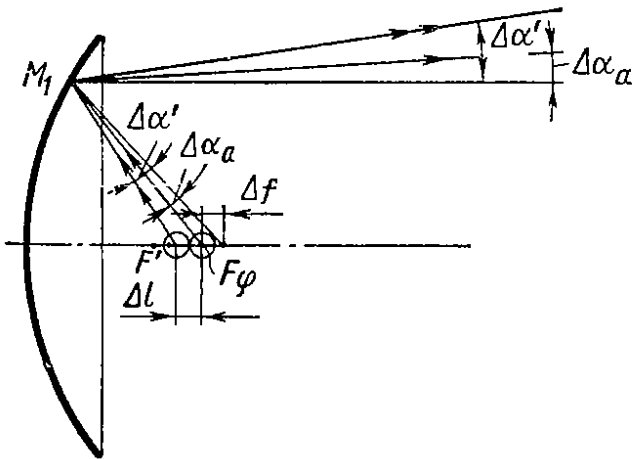
14.2. Сліди ЕВ в напрямку оптичної осі



14.3. Розфокусування параболоїдного відбивача

Поздовжнє розфокусування Δl

Поперечне розфокусування Δh



Умовна кутова аберція

$$\Delta\alpha'_a = \frac{\Delta f'}{r'} \sin \varphi$$

$$\Delta f' = \Delta f \pm \Delta l,$$

$$r' = \sqrt{r^2 - 2r \cos \varphi + (\Delta f')^2}$$

Кутове поперечне розфокусування

$$\Delta\alpha''_a = \frac{\Delta h}{r} \cos \varphi$$

Дійсний фокус параболоїдного відбивача $F_{\ddot{a}}$

Коефіцієнт світлової цінності зон:

$$G_{\varphi} = \frac{I_{\varphi}}{I_0} = \frac{\rho L_{\varphi} A_{\varphi co}}{\rho \sum L_{\varphi} A_{\varphi co}}$$

Для рівнояскравого світлого тіла

$$G_{\varphi} = \frac{A_{\varphi co}}{A_{co}}$$

Коефіцієнт аберації:

$$G_{\alpha} = \frac{\Delta \alpha_a}{\xi}$$

Дійсна фокусна віддаль:

$$f_{\ddot{a}} = \frac{\sum G_{\alpha} G_{\varphi} f_{\varphi}}{\sum G_{\alpha} G_{\varphi}}$$

Лекція 15

РОЗРАХУНОК КСС ПАРАБОЛОЇДНОГО ДЗЕРКАЛЬНОГО ВІДБИВАЧА

15.1. Закон Манжена

Закон Манжена є справедливим тільки для для осьової сили світла):

$$I_0 = kL_c A_{co}$$

Доведення закону Манжена:

Сила світла джерела:

$$I = \frac{\pi d^2}{4} L_c$$

Світловий потік, що падає на зону відбивача:

$$d\hat{O} = Id\omega = \frac{\pi d^2}{4} L_c \cdot 2\pi \sin \varphi d\varphi$$

Світловий потік, відбитий зоною $d\varphi$:

$$d\hat{O}_0 = \rho d\hat{O}$$

Тілесний кут:

$$\omega_\varphi = \pi \xi_\varphi^2, \quad \text{де} \quad \xi_\varphi = \frac{d}{2f} \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

Сила світла зони:

$$dI_0 = \frac{d\hat{O}_0}{\omega_\varphi} = \frac{4\pi \rho L_c f^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}{\cos \frac{\varphi}{2}} d\varphi$$

Осьова сила світла відбивача:

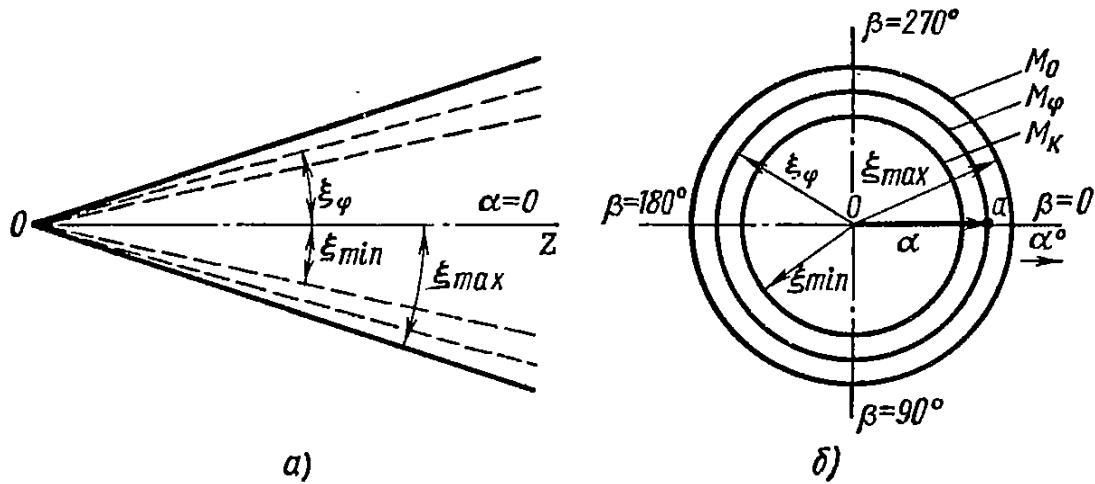
$$I_0 = \int_0^{\varphi_{\max}} dI_0 = \rho L_c \cdot 4\pi f^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_{\max}}{2}.$$

Враховуючи, що

$$R = 2f \operatorname{tg} \frac{\varphi_{\max}}{2} \quad \text{і} \quad A_{co} = \pi R^2,$$

$$I_0 = \rho L_c A_{co}.$$

15.2. Аналітичний розрахунок КСС



Січення світлового пучка меридіональною (а) та екваторіальною (б) площинами

Для т. M_0
$$\xi_{\max} = \frac{d}{2f},$$

для т. M_k
$$\xi_{\min} = \frac{d \cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2}}{2f}$$

Для $0 \leq \alpha < \xi_{\min}$ вся активна поверхня відбивача світиться.
 $I_0 = I_{\max} = \text{const},$

для $\alpha > \xi_{\min}$ світиться тільки частина відбивача від вершини до т. M_φ з
 $\xi_\varphi = \alpha,$

для $\alpha = \xi_{\max}$ поверхня відбивача не світиться.

Приймаючи
$$\alpha = \frac{d}{2f} \cos^2 \frac{\varphi_\alpha}{2} = \xi_{\max} \cos^2 \frac{\varphi_\alpha}{2}, \quad \frac{\varphi_\alpha}{2} = \arccos \sqrt{\frac{\alpha}{\xi_{\max}}}$$

Сила світла в напрямку α :
$$I_\alpha = \rho L_c \cdot 4\pi f^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_\alpha}{2}.$$

15.3. Зональний метод розрахунку КСС

Розрахунок КСС проводиться при умові, що джерело світла розміщене у фокальній площині, а центра світлого тіла – у фокусі відбивача.

Для розрахунку КСС використовують зональний метод. Згідно цього методу поверхня відбивача ділиться на ряд зон (як правило, десятиградусних) таким чином, щоб в межах кожної зони розміри елементарного відображення можна було б вважати постійними. Із зонального відображення виходить, що у напрямку оптичної OZ вся зона буде світлою, оскільки цей напрям знаходиться у межах елементарного відображення будь-якої зони.

Розрахунок КСС проводять в такій послідовності:

1. Умовно ділять поверхню відбивача на зони з допомогою зональних тілесних кутів, вершини яких суміщені з фокусом відбивача. Ці кути ніби вирізають на поверхні круглосиметричного відбивача кільцеві зони, кутова ширина яких в будь-якій меридіональній площині дорівнює плоскому куту розкриття зонального тілесного кута $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}$.

2. Розраховують площу світлового отвору і осьову силу світла зон. Якщо відомі границі зон φ_i, φ_{i-1} , то їх площа розраховується за формулою:

$$A_{co} = 4\pi f^2 \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_i}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_{i-1}}{2} \right).$$

Для першої зони $\varphi_0 = 0$, тому що її світловий отвір має форму круга площею

$$A_1 = 4\pi f^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_1}{2}.$$

Сила світла кожної зони в напрямку її оптичної осі дорівнює:

$$I_{0\varphi} = \rho L_\varphi 4\pi f^2 \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_i}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_{i-1}}{2} \right) \quad \text{або} \quad I_{0\varphi} = \rho L_\varphi A_{co\varphi},$$

де L_φ – габаритна яскравість світлого тіла в напрямі до зони φ . Для рівнояскравого світлого тіла $L_\varphi = L$.

3. Розраховують кутові розміри елементарного відображення зони. Кутові розміри половини ЕВ визначаються для середніх точок зон.

– для кульового світлого тіла:

$$\xi_i = \xi_{ni} = \arcsin \left(\frac{d}{2f} \cos^2 \frac{\varphi_{i\delta}}{2} \right) \approx \frac{d}{2f} \cos^2 \frac{\varphi_{i\delta}}{2},$$

де $\varphi_{cp} = \frac{\varphi_i + \varphi_{i-1}}{2}$;

– для циліндричного світлого тіла:

$$\xi_i = \frac{l}{2f} \sin \varphi \cos^2 \frac{\varphi}{2}, \quad \xi_{ni} = \frac{d}{2f} \cos^2 \frac{\varphi}{2}.$$

4. Визначають коефіцієнт заповнення K_α і силу світла I_α :

$$K_\alpha = \frac{\beta_\alpha}{90}; \quad I_\alpha = K_\alpha I_{0\varphi}.$$

У світлових приладах прожекторного класу зона може бути світлою (коли напрям α перекривається зональним відображенням) або темною (коли напрям α не перекривається зональним відображенням).

5. Сумують зональні криві графічно. По осі ординат до суми значень $I_{оф}$ додають значення середньосферичної сили світла джерела світла:

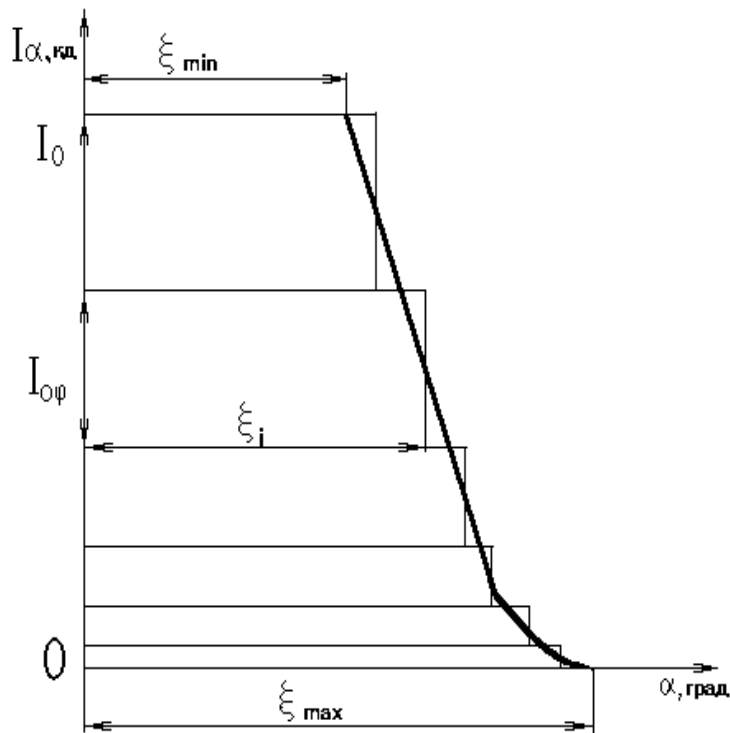
$$I_{сф} = \frac{\hat{O}}{4\pi},$$

де \hat{O} – світловий потік джерела світла, лм.

По осі абсцис відкладають кути $\alpha = \xi \frac{180}{\pi}$.

Точку з максимальною силою світла I_0 на осі ординат з'єднують плавною кривою з точками, що знаходяться на середині боковин зональних КСС. Результуюча плавна крива буде шуканою КСС безабераційного відбивача.

Для циліндричного світлого тіла КСС тільки першої зони без абераційного відбивача буде мати вигляд прямокутника. Інші зональні КСС будуються з врахуванням коефіцієнта заповнення.



Сумарна КСС відбивача з рівнояскравим кульовим тілом

15.4. Розрахунок КСС абераційного відбивача

Послідовність розрахунку КСС абераційного параболоїдного відбивача подібна як і для безабераційного відбивача: спочатку вибирають кутові величини зон, визначають площу і осьову силу світла кожної зони, розміри елементарних відображень кожної зони.

Розраховують величину кутової аберації $\Delta\alpha_a$ для кожної зони за формулою:

$$\Delta\alpha_a = \frac{\Delta f}{f} \cos^2 \frac{\varphi}{2} \sin \varphi,$$

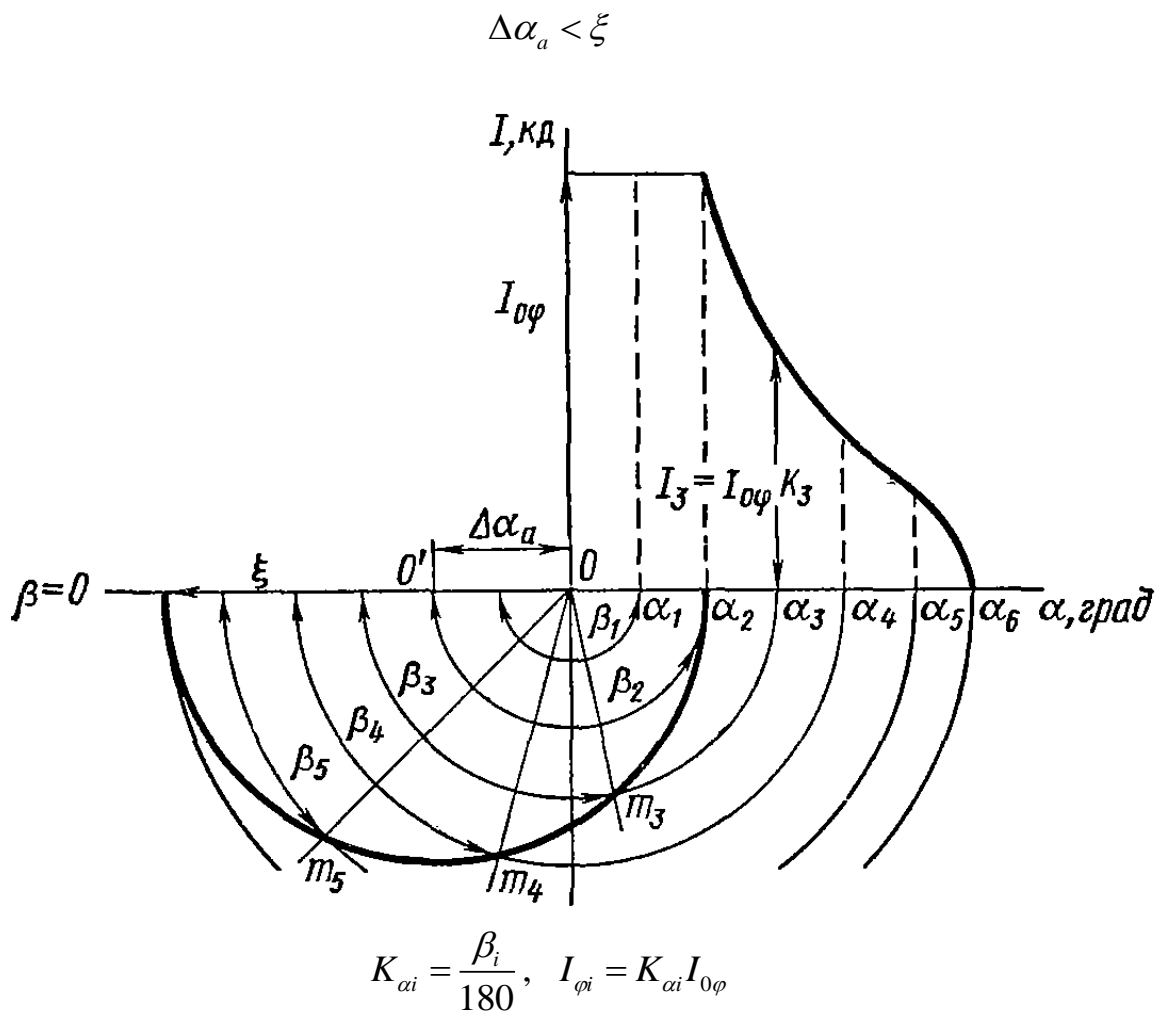
де Δf – поздовжня лінійна аберація, мм;

f – фокусна відстань, мм.

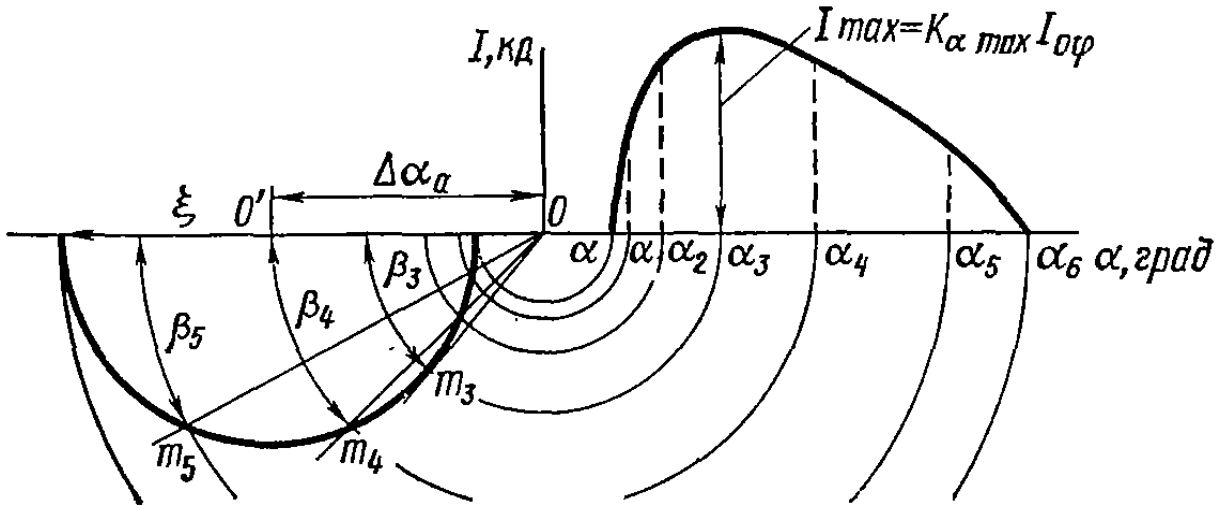
Визначають коефіцієнт заповнення K_α для абераційної зони.

$$K_\alpha = \frac{\beta'_\alpha + \beta''_\alpha}{180}.$$

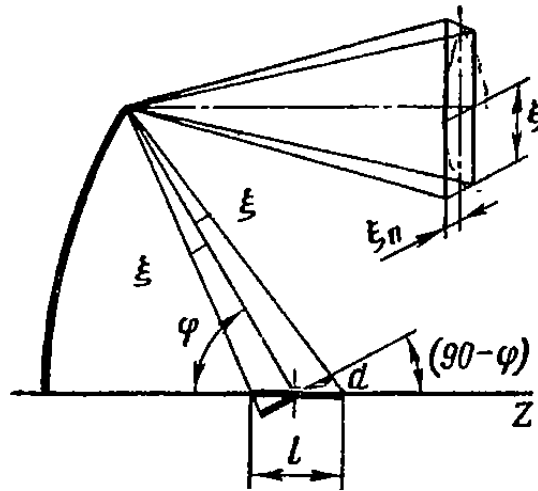
15.4.1. Кульове світне тіло



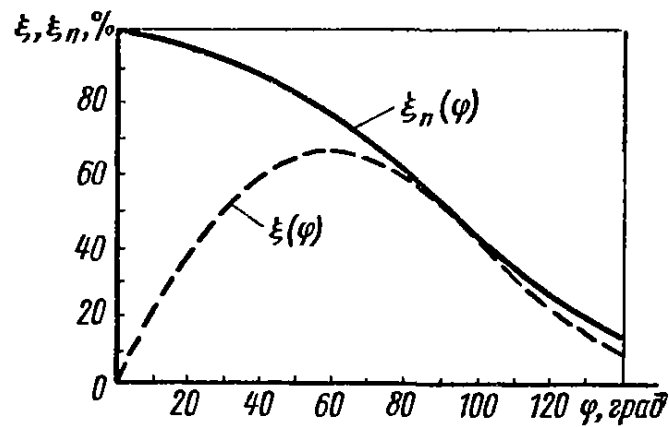
$$\Delta\alpha_a > \xi$$



15.4.2. Циліндричне світне тіло

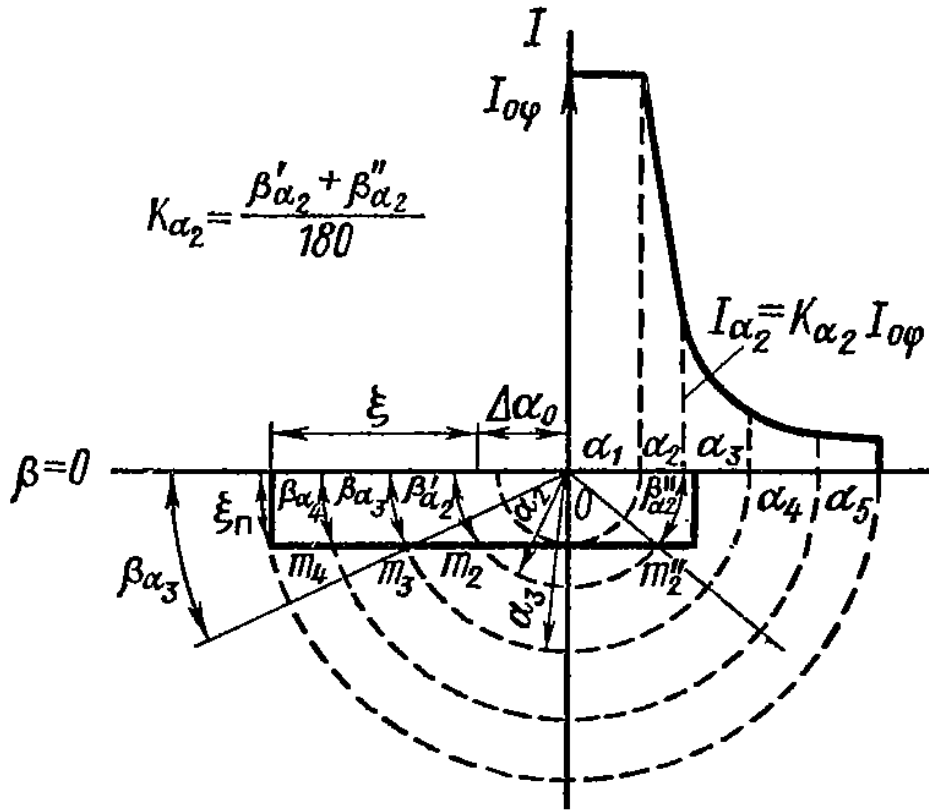


Елементарне відображення циліндричного світного тіла у падаючому та відбитому світлі

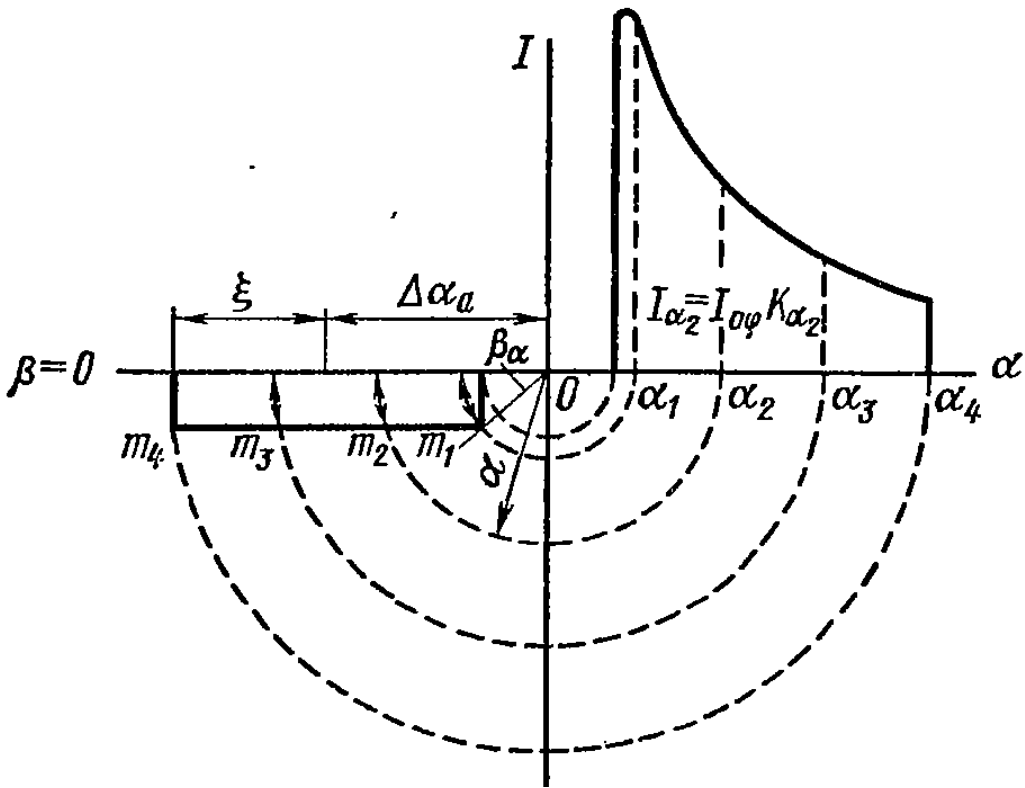


співвідношення розмірів елементарного відображення циліндричного світного тіла в меридіональній та екваторіальній площині

$$\Delta\alpha_a < \xi$$



$$\Delta\alpha_a > \xi$$



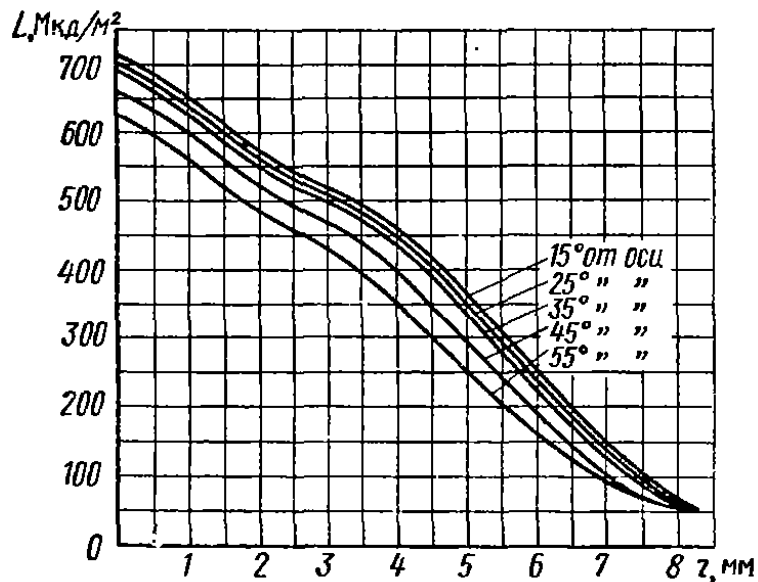
Сила світла зони: для $\alpha > \xi_n$ зменшується різко, для $\alpha > \frac{\xi}{2}$ зменшується плавно, для $\alpha \in \left(\xi; \sqrt{\xi^2 + \xi_n^2} \right)$ різко зменшується до нуля.

15.4.3. Розрахунок сили світла відбивача з нерівнояскравим світним тілом

Розрахунок сили світла безабераційного відбивача з нерівнояскравим світним тілом

Для нерівнояскравого світного тіла зміна сили світла світлового приладу буде тотожна зміні яскравості світного тіла: $L(\xi_j) \equiv I(\alpha)$. Масштаб кривої

$L(\xi_j)$ визначається з формули $L_{\max} = \frac{I_{0\varphi}}{\rho A_{\text{соф}}}$.



Кутовий розмір частини світного тіла з однаковою яскравістю

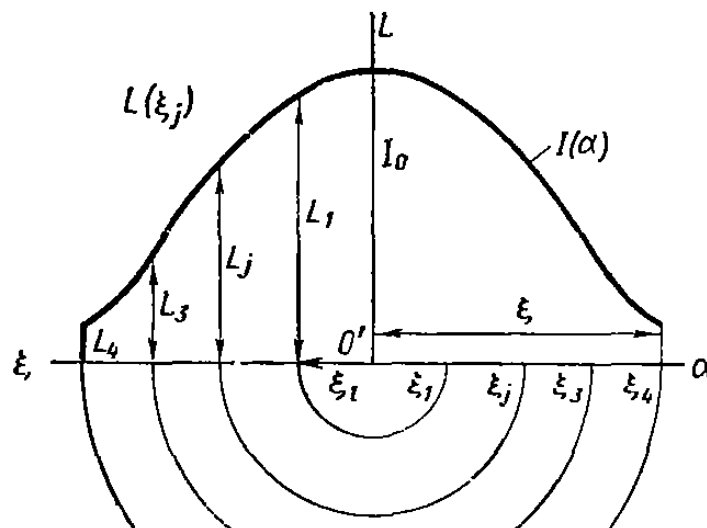
$$\xi_i = \frac{d_i}{2f} \cos^2 \frac{\varphi_i}{2}$$

За формулою і графіками знаходять $L_i(\xi_i)$

Для $\alpha = 0$ зона має максимальну яскравість,

Для $0 \leq \alpha < \xi$ зона світла, але з різною яскравістю,

Для $\alpha = \xi$ зона має мінімальну яскравість.



Розрахунок сили світла абераційного відбивача з нерівнояскравим світним тілом

Для абераційного відбивача сила світла знаходиться в такому порядку:

1. Нерівнояскраве тіло замінюють 3-5 рівнояскравими тілами. Умови заміни: сумарна яскравість замінних світних тіл повинна бути не менше $0,9L_c$; розміри найбільшого рівнояскравого світного тіла повинні приблизно дорівнювати розмірам початкового світного тіла; сила світла реального світного тіла повинна дорівнювати сумі сил світла замінюючих світних тіл.

2. Для зони береться крива $L(r)$ і розраховується у кутовій мірі $L(\xi)$.

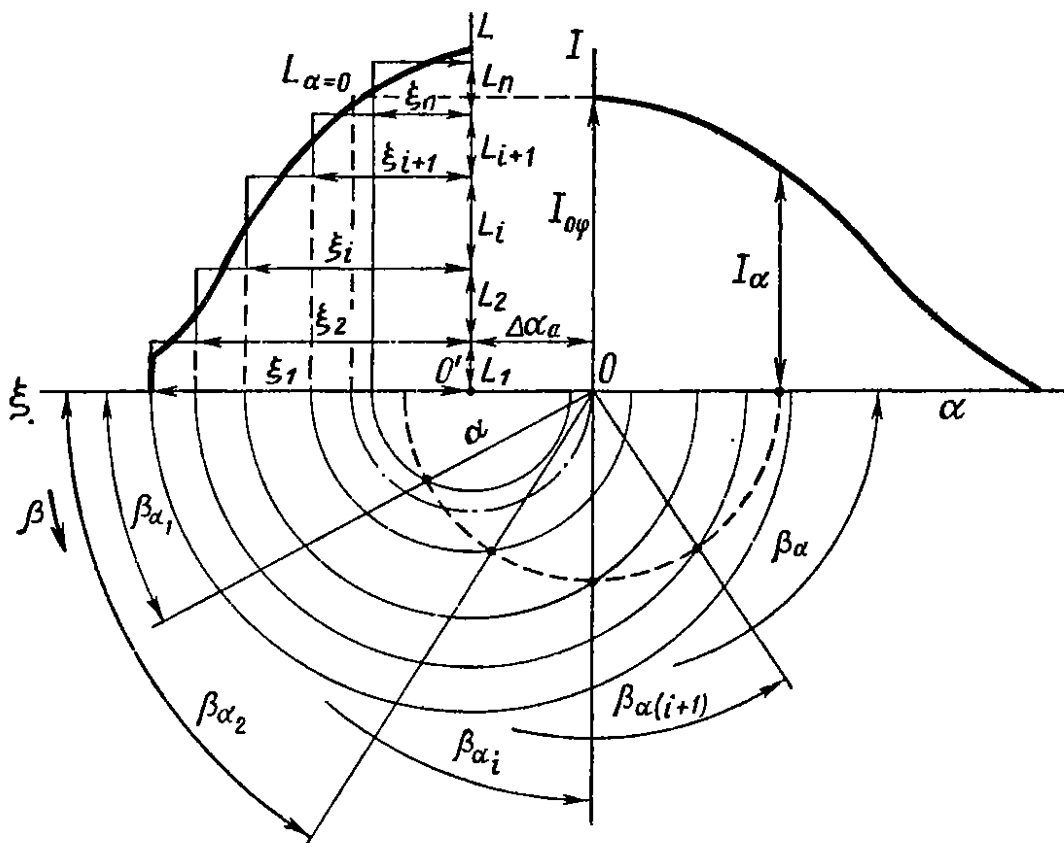
3. $L(\xi)$ будують у лівому верхньому квадранті системи L, ξ . Т. O' зміщена від т. O на величину $\Delta\alpha_a$. $L(\xi)$ апроксимується ступінчастою кривою.

4. Слід ЕВ зони ділиться на n рівнояскравих елементів радіусом ξ_j .

5. Знаходять кути β_α і коефіцієнти заповнення $K_{ai} = \frac{\beta_{ai}}{180}$.

6. Обчислюють силу світла зони в напрямку α : $I_\alpha = \rho A_{co} \sum_{i=1}^n L_i K_{ai}$.

7. Осьова сила світла зони визначається яскравістю $L_{\alpha=0}$, яка відраховується по кутовій аберації, $L_{\alpha=0} < L_{\max}$.



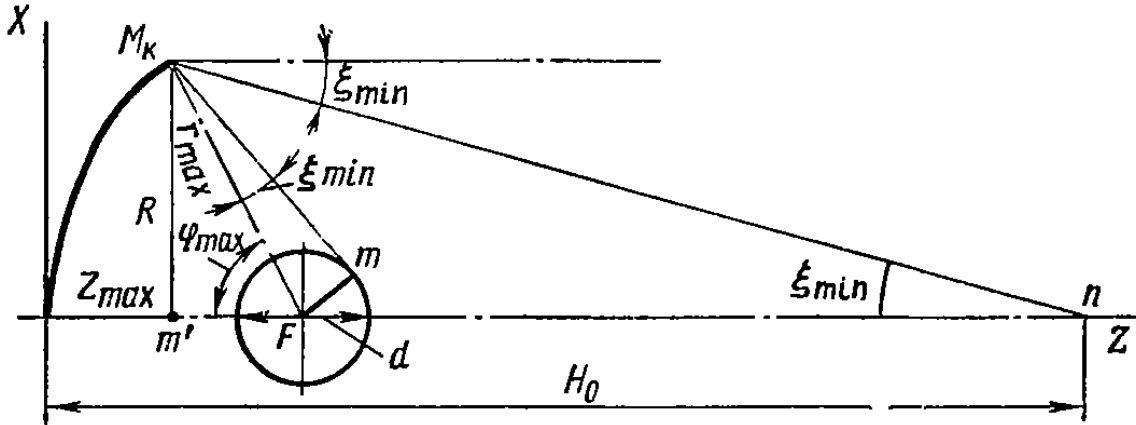
Після побудови абераційних зональних КСС проводять їх графічне сумування, додають середньо сферичну силу світла і визначають сумарну КСС, аналогічно як для безабераційного відбивача.

Лекція 16

ФОРМУВАННЯ СВІТЛОВОГО ПУЧКА ПАРАБОЛОЇДНОГО ВІДБИВАЧА

16.1. Відстань повного свічення

Кульове рівнояскраве світне тіло



Для т. M_e відстань повного свічення:

$$H_0 = R \operatorname{ctg} \xi_{\min} + Z_{\max}$$

З трикутника $M_e F m$:

$$\operatorname{ctg} \xi_{\min} = \frac{\overline{M_e m}}{Fm} = 2 \frac{\sqrt{r_{\max}^2 - \frac{d^2}{4}}}{d}.$$

Оскільки

$$r_{\max} = f + Z_{\max}, \quad Z_{\max} = \frac{R^2}{4f},$$

$$H_0 = \frac{D \sqrt{\left(f + \frac{D^2}{16f}\right)^2 - \frac{d^2}{4}}}{d} + \frac{D^2}{16f}.$$

Якщо $d \ll r$, то $\overline{M_e m} = r$, то
$$H_0 = \frac{D \left(f + \frac{D^2}{16f}\right)}{d} + \frac{D^2}{16f}.$$

Оскільки
$$r_{\max} = \frac{D}{2 \sin \varphi_{\max}}, \quad \text{то} \quad H_0 = \frac{D^2}{2d \sin \varphi_{\max}}.$$

Кульове нерівнояскраве світне тіло

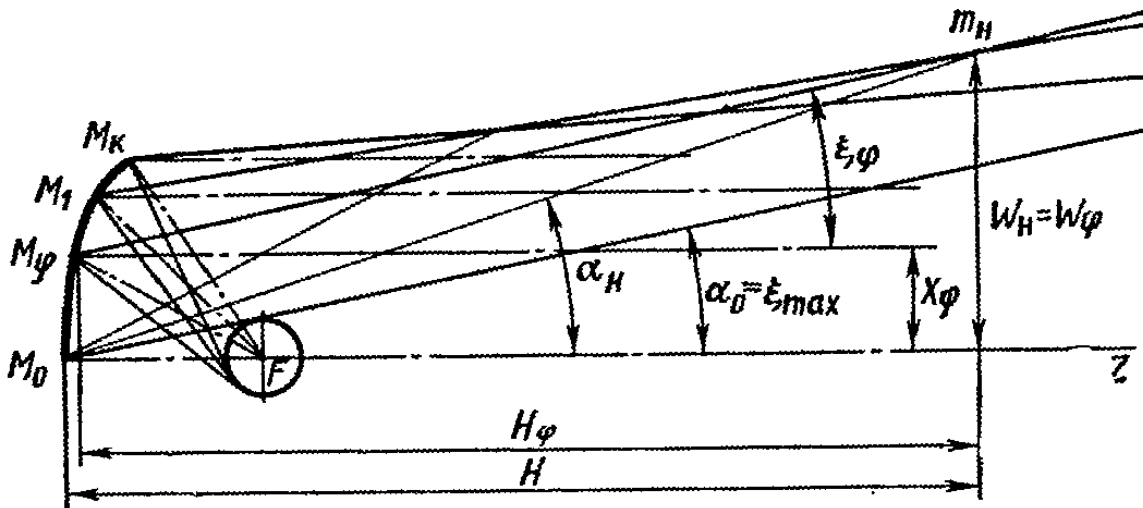
Якщо яскравість зменшується з центра світного тіла до його краю, то

$$\begin{array}{l} \text{яскравість осьового променя} \\ \text{яскравість крайових променів} \end{array} \quad \begin{array}{l} L_{\max} \\ L_{\min} \end{array}$$

H_0 визначається точкою, в якій крайові промені ЕВ т. M_2 перетнуть оптичну вісь.

$$\text{Для } H > H_0 \quad L \uparrow \quad \text{і} \quad H_0 \Rightarrow \infty$$

16.2. Ширина світлового пучка



$2W_H$ – лінійна ширина світлового пучка

$2\alpha_H$ – кутова ширина світлового пучка

$2\alpha_0 = 2\xi_{\max}$ – істинна кутова ширина світлового пучка

$$\operatorname{tg} \alpha_H = \frac{X_\varphi + H_\varphi \operatorname{tg} \xi_\varphi}{H_\varphi} = \frac{X_\varphi}{H_\varphi} + \operatorname{tg} \xi_\varphi,$$

X_φ – координата точки відбивача, крайовий промінь ЕВ якої виходить на край світлового пучка на відстані H_φ .

ЛІТЕРАТУРА

1. Трѣмбач В.В. Световые приборы: Учебник для студентов вузов .-2-е изд., перераб. и доп.-М.: Высшая школа, 1990 .-463 с.
2. Айзенберг Ю.Б. Световые приборы: Учебник для электромеханических техникумов .-М.: Энергия, 1980 .-464 с.
3. Трѣмбач В.В. Световые приборы (теория и расчет): Учебное пособие для вузов .-М.: Высшая школа, 1972 .-496 с.
4. Карякин Н.А. Световые приборы: Учебник для вузов .-М.: Высшая школа, 1975 .-335 с.
5. Карякин Н.А. Световые приборы прожекторного и проекторного типов (теория и расчет): Учебное пособие .-М.: Высшая школа, 1966 .-412.
6. Басов Ю.Г. Светосигнальные устройства .-М.: Транспорт, 1993 .-309 с.

ЗМІСТ

Лекція 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СВІТЛОВІ ПРИЛАДИ	3
Лекція 2 ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ	11
Лекція 3 ТИПИ СВІТЛОРОЗПОДІЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ	17
Лекція 4 ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ СВІТЛОРОЗПОДІЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ	20
Лекція 5 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ	23
Лекція 6 МЕТОДИ СВІТЛОТЕХНІЧНОГО РОЗРАХУНКУ СВІТЛОВИХ ПРИЛАДІВ.....	31
Лекція 7 ФОРМА І РОЗМІРИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ.....	34
Лекція 8 СВІТЛОВИЙ ПОТІК ПРОМЕНІВ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ	38
Лекція 9 СИСТЕМА ВІДОБРАЖЕНЬ СВІТЛОВОГО ПУЧКА І ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ НА ПЛОЩИНУ	45
Лекція 10 КОЕФІЦІЄНТ ЗАПОВНЕННЯ СВІТЛОЮ ЧАСТИНОЮ ПОВЕРХНІ ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ.....	51
Лекція 11 РОЗРАХУНОК СИЛИ СВІТЛА ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ	54
Лекція 12 РОЗРАХУНОК ОСВІТЛЕНОСТІ НА БЛИЗЬКІЙ ВІДСТАНІ ВІД ОПТИЧНОГО ПРИСТРОЮ.....	58
Лекція 13 ПРОЖЕКТОРИ З ДЗЕРКАЛЬНИМИ ВІДБИВАЧАМИ.....	60
Лекція 14 АБЕРАЦІЯ ПАРАБОЛОЇДНОГО ВІДБИВАЧА	63
Лекція 15 РОЗРАХУНОК КСС ПАРАБОЛОЇДНОГО ДЗЕРКАЛЬНОГО ВІДБИВАЧА.....	67
Лекція 16 ФОРМУВАННЯ СВІТЛОВОГО ПУЧКА ПАРАБОЛОЇДНОГО ВІДБИВАЧА	76
ЛІТЕРАТУРА.....	78