

DIMENSIONAREA INSTALAȚIILOR DE ILUMINAT

1. PROBLEME GENERALE

Calitatea unei instalații de iluminat este determinată de nivelele de luminanță și repartiția acestora în câmpul vizual. Întrucât calculele de dimensionare bazate pe luminanțe sunt laborioase, normele în vigoare prescriu nivelele de iluminare și fac referiri calitative asupra luminanțelor și contrastelor de luminanță.

Valoarea minimă a iluminării medii sau *nivelul de iluminare* E_m este o mărime normată și se referă la *planul de lucru (util)* – suprafață de-a lungul căreia se desfășoară o activitate vizuală – situat în general, la distanța $h_p=0.8..1m$ față de pardoseală.

Nivelul de iluminare realizat pe planul util este dat de suma dintre *iluminarea directă* E_d și cea *reflectată* E_r adică:

$$E_{med} = E_d + E_r$$

Componenta E_d este generată de cota parte a fluxului luminos al *cdi* ce ajunge direct pe planul util, fără a suferi reflexii pe suprafețele adiacente acestuia. Uniformitatea componentei directe în planul util este condiționată, în mare măsură, de *geometria instalației* de iluminat. Amplasarea de referință este o amplasare regulată și simetrică, realizată cu un număr minim de corpuri de iluminat care asigură, la limită, un grad acceptabil de uniformitate a iluminării directe pe planul de lucru.

Componenta E_r se datorează fluxului luminos al *cdi* ce suferă o serie de reflexii între suprafețele încăperii și ajunge ca valoare stabilizată pe planul util. Ea este mult mai uniformă decât componenta directă, ca urmare a reflexiilor multiple ce au loc între pereții încăperii (în calcule aceste suprafețe se consideră perfect difuzante). Printr-o amplasare corespunzătoare a *cdi* se poate asigura o repartiție foarte apropiată de cea uniformă a celor două componente, ceea ce permite estimarea valorii medii E_m a iluminării totale a suprafeței.

Dimensionarea instalațiilor electrice de iluminat interior constă în: adoptarea sistemului de iluminat, alegerea surselor de lumină și a *cdi*, stabilirea geometriei și calculul fotometric al instalației de iluminat.

Referitor la calculul fotometric acesta se poate face folosind:

- **metode de calcul globale** (metoda coeficienților de utilizare, metoda reflexiilor multiple) ce iau în considerare, în valori medii, componentele directă și reflectată ale iluminării;
- **metode de calcul singulare** în cadrul cărora se determină separat componentele E_d și E_r . În general, mărimea E_d într-un punct al planului util se evaluează prin metoda punct cu punct, iar mărimea E_r – ca valoare medie – se estimează prin metoda reflexiilor multiple.

Calculele fotometrice efective implică următoarea succesiune:

- ✓ predimensionarea instalațiilor de iluminat prin metoda coeficienților de utilizare;
- ✓ verificarea cantitativă (nivelul de iluminare, uniformitatea iluminării) a instalației de iluminat prin metoda punct cu punct;
- ✓ verificarea calitativă (distribuția luminanțelor în câmpul vizual și la periferia sa) a instalației de iluminat prin metoda indicelui final de orbire sau prin alte procedee de apreciere a disconfortului vizual.

Conform metodei britanice BZ (British Zone), *gradul de disconfort prin orbire directă* G poate fi calculat cu o relație de forma:

$$G = \frac{L_s^m \Omega_s^n}{L_a^q p^r}$$

în care: L_s este luminanța sursei, Ω_s este unghiul solid sub care se vede sursa din punctul de observare, L_a - luminanța de fond (luminanța de adaptare), p – factor care ține cont de poziția sursei în câmpul vizual, iar m, n, q, r sunt exponenți de calcul. Se observă că, la condiții egale de dispunere în instalație, orbirea supărătoare poate fi provocată atât de o sursă cu luminanță ridicată, dar și de o sursă cu luminanță moderată, dar de dimensiuni mari (cum ar fi lămpile fluorescente tubulare sau panourile luminoase de mari dimensiuni).

De regulă, un sistem de iluminat se verifică pentru poziția observatorului cel mai dezavantajat din sistem. Fabricanții de *cdi* indică distribuția luminanței în spațiu (dacă nu, aceasta se poate calcula). Comisia Internațională de Iluminat (CIE) a stabilit cinci clase de calitate pentru sistemele de iluminat, care sunt date funcție de valoarea indicelui de orbire G în tabelul următor:

Indicele de orbire, G	Clasa de calitate
1,15	A – foarte înaltă calitate
1,50	B – înaltă calitate
1,85	C – calitate medie
2,20	D – calitate scăzută
2,55	E – calitate foarte scăzută

În prezent, pentru evaluarea orbirii a apărut o variantă a metodei BZ, bazată pe indicele global de orbire *UGR* (Unified Glare Rate) care se calculează cu:

$$UGR = 8 \cdot \lg_{10} \frac{1}{4L_f} \sum_i \frac{L_i^2 \Omega_i}{p_i^2}$$

Metoda *UGR* are avantajul că poate fi inclusă în programe de calcul automat. Echivalența față de clasele de calitate CIE este dată de tabelul:

Clasa de calitate CIE	A	B	C	D	E
<i>UGR</i>	16..19	19..22	22..25	25..28	>28

2. METODA COEFICIENȚILOR DE UTILIZARE

Metoda coeficienților de utilizare permite stabilirea iluminării realizate pe planul util având în vedere atât componenta directă, cât și cea reflectată a iluminării. Rezultatele calculelor sunt conforme cu realitatea pentru o amplasare simetrică a *cdi*. Acestea trebuie să fie de același tip, amplasate la aceeași înălțime față de planul util și cu axa optică normală pe acesta, echipate cu surse identice ca număr, natură și putere. Metoda se recomandă pentru calculul fotometric al suprafețelor orizontale la care iluminarea medie caracterizează suficient de bine instalația de iluminat.

Coeficientul de utilizare *u* al unei instalații de iluminat este dat de raportul dintre fluxul util Φ_u pe planul de lucru și fluxul tuturor izvoarelor de lumina Φ_t montate în încăperea considerată

$$u = \frac{\Phi_u}{\Phi_t} = \eta_c \cdot \frac{\Phi_u}{\Phi_{ct}} = \eta_c \cdot \eta_u$$

în care: $\eta_u = \Phi_u / \Phi_{ct}$ - utilitatea instalației;

$\Phi_{ct} = \eta_c \Phi_t = \eta_c N n \Phi_e$ - fluxul total emis de cele *N cdi* ce au randamentul η_c și sunt echipate cu *n* surse de lumină, de flux normalizat Φ_e .

Parametrii de care depinde valoarea coeficientului de utilizare

Valoarea coeficientului de utilizare depinde de o multitudine de parametri, dintre care mai importanți sunt:

- ✓ randamentul *cdi* η_c de care depinde direct proporțional;
- ✓ repartitia spațială a intensităților luminoase a *cdi*;

Coeficientul de utilizare are valori mai ridicate în cazul *cdi* cu lumină concentrată deoarece cota parte a fluxului ce ajunge direct pe suprafața utilă este mai mare (fig.7.2).

- ✓ forma și dimensiunile încăperii.

La aceeași secțiune orizontală *S* a încăperii coeficientul de utilizare variază invers proporțional cu înălțimea de suspendare *h*, a *cdi* față de planul util. Dacă *h* crește, scade unghiul solid sub care se vede din centrul *cdi* planul util, deci și componenta directă a fluxului luminos. La aceeași înălțime *h*, coeficientul de utilizare crește când aria suprafeței utile se majorează, deoarece sporește componenta directă a fluxului luminos. Pentru o încăpere pătrată de latura *A* (fig.7.2) coeficientul de utilizare variază în același sens cu tangenta unghiului φ și, cum aceasta depinde de dimensiunile încăperii, s-a definit *indicele de local i* prin expresia:

$$i = \operatorname{tg} \varphi = \frac{A}{2h} = \frac{A^2}{2hA} = \frac{S}{0.5S_p} \quad \text{unde: } h = H - (h_p + h_t)$$

cu: h_p , h_t - distanțe plan util-pardoseală și tavan-plan deschidere *cdi*;

$S = A^2$, $S_p = 2hA$ - suprafața încăperii, respectiv aria pereților laterali delimitată de planul util și planul deschiderii *cdi*.

Pentru încăperi dreptunghiulare de lungime *A* și lățime *B*, indicele local va fi:

$$i = \frac{AB}{h \cdot (A + B)}$$

- ✓ amplasarea *cdi* în încăpere.
Coeficientul de utilizare se reduce prin apropierea *cdi* de perete, întrucât scade componenta directă a fluxului luminos.
- ✓ factorii de reflexie ai pereților $\rho_p=0,1;0,3;0,5$, tavanului $\rho_t=0,3;0,5;0,7$ și dușumelei $\rho_d=0,1;0,3$ influențează direct proporțional coeficientul de utilizare.

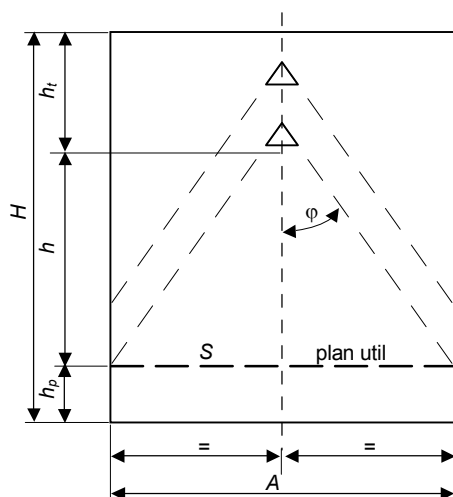


Fig.7.2 Explicativă la indicele de local

Rezultă că factorul de utilizare este o funcție complexă de forma

$$u = f(\text{tip } cdi; \eta_c, \eta_u, \rho_p, \rho_t, \rho_d, i)$$

ale cărei valori sunt tabelate pentru diverse *cdi*.

Dacă pe suprafața utilă $S = AB$ este necesar să se realizeze o anumită valoare a iluminării medii E_m , atunci fluxul tuturor izvoarelor de lumină Φ_t va fi;

$$\Phi_t = E_m \cdot \frac{S \cdot k}{u}$$

unde k – factorul de depreciere normalizat al *cdi* utilizat (valoare >1).

Indicele de local se calculează cu relația recomandată de autorul tabelelor coeficienților de utilizare. De asemenea, în relația lui Φ_t mărimea lui k se introduce sau nu după cum în valoarea lui u s-a exclus sau nu factorul de depreciere. Dacă se utilizează *cdi* pentru care parametrii η_c^* , k^* diferă de cei normalizați η_c și k , atunci coeficientul de utilizare u^* pentru noua situație trebuie

determinat cu $u^* = \eta_c^* k^* u / (\eta_c k)$, unde u este factorul de utilizare al unui *cdi* existent ce are o curbă fotometrică similară cu a *cdi* utilizat.

3. Aplicarea practică a metodei coeficienților de utilizare

Aplicarea metodei coeficienților de utilizare presupune parcurgerea succesivă a următoarelor etape de calcul:

- precizarea destinației încăperii și a caracteristicilor geometrice A, B, H, h_p, h_t, h și fotometrice ρ_p, ρ_t, ρ_d ale acesteia;
- stabilirea valorii normate E_m a iluminării;
- alegerea tipului corpului de iluminat, a sursei de lumină normalizate Φ_l și a numărului n de surse pe corpul de iluminat;
- calculul indicelui de local i , adoptarea factorului de depreciere k și stabilirea valorii tabelare a coeficientului de utilizare u ;

- determinarea numărului total de *cdi* din încăpere:

$$N = \frac{E_m \cdot S \cdot k}{n \cdot \Phi_l \cdot u} \quad \text{sau} \quad N = \frac{E_m \cdot S}{n \cdot \Phi_l \cdot u}$$

- stabilirea geometriei instalației de iluminat prin precizarea numărului N_A de *cdi* pe rând și a numărului N_B de rânduri cu $N_A \cdot N_B \approx N$. Cotele de montaj în cazul amplasării simetrice a *cdi* (fig.7.3) vor fi:

o distanța dintre corpurile de iluminat de pe un rând: $L_c = A/N_A$ [m];

o distanța corp de iluminat - perete:
 $L_{cp} = 0.5 \cdot [A - (N_A - 1) \cdot L_c]$ [m];

o distanța dintre rânduri: $L_r = B/N_B$ [m];

o distanța rând-perete:

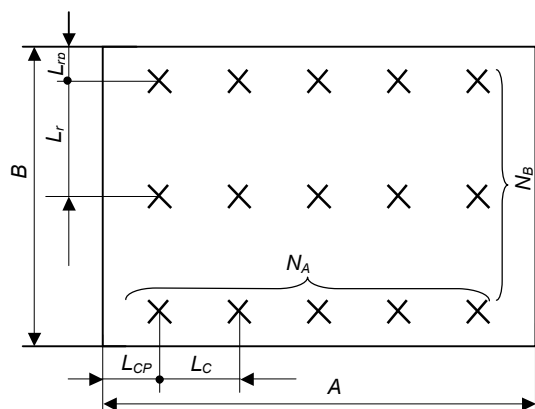


Fig.7.3 Geometria instalației de iluminat

$$L_{rp} = 0.5 \cdot [B - (N_B - 1) \cdot L_r] \text{ [m];}$$

- determinarea valorii reale a iluminării medii E_{mr} și a erorii de calcul $\Delta E\%$:

$$E_{mr} = \frac{N_A \cdot N_B \cdot n \cdot u \cdot \Phi_l}{S \cdot k} \text{ sau } E_{mr} = \frac{N_A \cdot N_B \cdot n \cdot u \cdot \Phi_l}{S};$$

$$\Delta E\% = \frac{E_{mr} - E_m}{E_m} \cdot 100 \leq 10\%$$

- se stabilește puterea instalată pe încăperea:

$$P_i = N_A \cdot N_B \cdot n \cdot (P_l + \Delta P_b)$$

unde: P_l – puterea standardizată a unei surse de lumină [W]; ΔP_b – pierderi de putere pe elementele de circuit auxiliare [W];

Metoda de calcul prezentată nu este unică. Există o serie de variante ce rezultă ca urmare a predeterminării sau impunerii numărului cdi , impunerea tipului, numărului sau puterii surselor de lumină pe corpul de iluminat etc.

În cazul pereților la care nu se poate aprecia un factor de reflexie global (interven suprafețe de culori diferite, vitrine sau ferestre mari, mobilier voluminos, panouri, utilaje înalte etc.) este necesară stabilirea factorului de reflexie mediu ponderat în raport cu aria suprafeței considerate.

$$\rho_{pp} = \frac{\sum \rho_{pj} \cdot S_{pj}}{\sum S_{pj}} = \frac{\sum \rho_{pj} \cdot S_{pj}}{S_{pt}}$$

unde: ρ_{pj} - factorul de reflexie al suprafeței S_{pj} a peretelui, $S_{pt} = \sum S_{pj}$ - aria totală a peretelui [m²].

Corpurile de iluminat echipate cu lămpi fluorescente cu vapori de mercur de joasă presiune, fiind ușor asimetrice, se vor monta astfel încât planul longitudinal de simetrie să fie paralel cu latura lungă a încăperii. În încăperi cu suprafețe mai mari ($S \approx 150..200 \text{ m}^2$) sau în hale de înălțime redusă ($H \approx 3..6 \text{ m}$) se recomandă lămpi LFA 65, iar pentru hale înalte ($H \geq 7..8 \text{ m}$) se vor utiliza lămpi fluorescente cu vapori de mercur de înalta presiune sau alte tipuri de surse în funcție de condițiile calitative ale microclimatului luminos.

2. METODA PUNCT CU PUNCT

Metoda punct cu punct de calcul a componentei directe a iluminării permite fie aprecierea cantitativă a instalațiilor predimensionate prin metode globale, fie proiectarea efectivă a acestora, când metodele globale conduc la rezultate eronate. În ultima categorie se include dimensionarea iluminatului local, a celui general uniform al spațiilor închise mari, precum și a celui exterior.

În cazul ariilor utile vaste, mărginite de suprafețe cu factori de reflexie reduși, componenta reflectată a fluxului luminos este neglijabilă, motiv pentru care se poate considera cu suficientă aproximație că $E_m = E_d$. O astfel de situație se întâlnește în halele industriale mari și înalte, cu pereți din beton turnat, tablă sau sticlă, la care acoperișul este prevăzut cu luminatoare sau tavane închise la culoare, iar degajările de praf sau fum sunt neglijabile.

Metoda punct cu punct dă rezultate foarte bune în cazul instalațiilor de iluminat prevăzute cu corpuri de iluminat cu lumină directă. Acestea pot fi de același tip sau nu, echipate cu surse identice sau nu, amplasate la înălțimi și sub unghiuri diferite față de planul util, geometria instalației fiind oarecare.

Aplicarea efectivă a metodei conduce la relații de calcul distincte, după cum cdi (respectiv sursa de lumină) se consideră punctiforme sau nu. Dacă l este dimensiunea maximă în plan a unui corp de iluminat și h distanța la care se calculează efectul, atunci acesta se consideră punctiform când

$$h/l \geq 2,25.$$

În caz contrar se consideră sursă luminoasă de mari dimensiuni. Dacă la iluminarea unui punct participă mai multe surse, iluminarea totală este dată de suma iluminărilor parțiale, acestea din urmă fiind funcție de curba fotometrică a cdi .

Iluminarea punctului P ce aparține (fig.8.1) dreptei de intersecție a planelor (Q) – orientat arbitrar – și (H) – normal pe axa optică a sursei – va fi:

$$e_Q = \frac{I_\alpha \cdot \cos \theta}{MP^2} \quad \text{și} \quad e_H = e = \frac{I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{\varepsilon_r}{h^2}$$

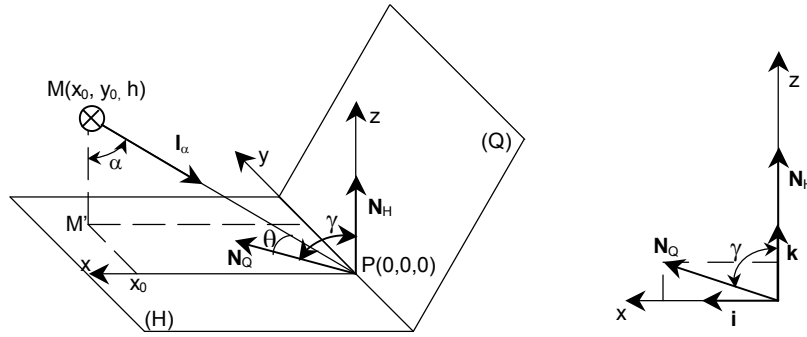


Fig.8.1 Explicativă la metoda punct cu punct

$$[Py] = (Q) \cap (H); [Px] \subset (H); [Pz] \perp (H); |N_Q| \perp (Q); |N_H| \perp (H);$$

$$|N_Q| = |N_H| = N_Q = N_H = 1; N_Q = \sin \gamma \cdot i + \cos \gamma \cdot k; |MP| = MP = h / \cos \alpha;$$

unde mărimile ε_r sau e se citesc din curbele izolux relative $\varepsilon_r = f(d^*)$, sau spațiale $d=f(h)_{e=ct}$ ale cdi echipat cu lampa convențională de 1000 lm.

Dacă se consideră sistemul triortogonal de referință Pxyz atunci:

$$\cos \theta = -\frac{MP \cdot N_Q}{MP \cdot N_Q} = \frac{x_0 \cdot \sin \gamma + h \cdot \cos \gamma}{h} \cos \alpha = \psi \cdot \cos \alpha$$

ceea ce conduce la:

$$e_Q = \psi \cdot e$$

cu: $\psi = (\cos \gamma + \frac{x_0}{h} \cdot \sin \gamma)$ - coeficientul de iluminare suplimentară.

Dacă la iluminarea punctului considerat participă mai multe cdi a căror surse au fluxul $\Phi \neq 1000$ lm, având în vedere proporționalitatea directă dintre flux și intensitatea luminoasă, iluminarea directă totală va fi:

$$E_Q = \sum_{j=1}^n \frac{\Phi_j}{1000} \cdot e_{Qj} = \frac{1}{1000} \cdot \sum_{j=1}^n \Phi_j \cdot e_j \cdot \psi_j = \frac{1}{1000} \cdot \sum_{j=1}^n \Phi_j \cdot \varepsilon_{rj} \cdot \psi_j \cdot \frac{1}{h_j^2}$$

În majoritatea cazurilor cdi sunt identice, echipate cu surse identice ca natura și putere, cu $\Phi=ct.$, amplasate la aceeași înălțime $h_j=h=ct.$ față de planul util care este orizontal și normal pe axa cdi . În aceste condiții, iluminările directe în plan orizontal E_{dh} la $\gamma=0$ și în plan vertical E_{dv} la $\gamma=\pi/2$ sunt:

$$E_{dh} = \frac{\Phi}{1000} \cdot \sum_{j=1}^9 e_j = \frac{\Phi}{1000 \cdot h^2} \cdot \sum_{j=1}^9 \varepsilon_{rj} \quad E_{dv} = \frac{\Phi}{1000} \cdot \sum_{j=1}^9 \frac{x_{oj}}{h} \cdot e_j = \frac{\Phi}{1000 \cdot h^3} \cdot \sum_{j=1}^9 x_{oj} \cdot \varepsilon_{rj}$$

În calcule considerându-se numai aportul a nouă cdi din imediata vecinătate a punctului de calcul.

La proiectare, prin adoptarea factorului de depreciere k , rezultă fluxul total Φ_{lc} al surselor de lumina ce trebuie montate în corpurile de iluminat pentru a avea o iluminare directă orizontală egală cu valoarea normată a iluminării $E_{dh}=E_m$, adică:

$$\Phi_{lc} = \frac{1000 \cdot E_m \cdot k}{\sum_{j=1}^9 e_j} = \frac{1000 \cdot h^2 \cdot E_m \cdot k}{\sum_{j=1}^9 \varepsilon_{rj}}$$

Punctul de calcul P (fig.8.2) se alege în centrul unui câmp luminos de colț, dacă geometria instalației de iluminat este prestabilită. Dispunerea cdi trebuie făcută de așa manieră încât să se respecte criteriile de uniformitate ale iluminării cu un număr minim de surse de lumină. Corelarea cotelor de montaj h cu distanța L dintre centrele cdi se face cu ajutorul distanței relative:

$$L^* = L / h$$

în care:

- L [m] - latura pătratului fictiv pe vârfurile căruia se presupune că sunt amplasate centrele cdi ;
- $h=H-(h_p+h_t)$ [m] - distanța de la planul util la planul deschiderii cdi ;

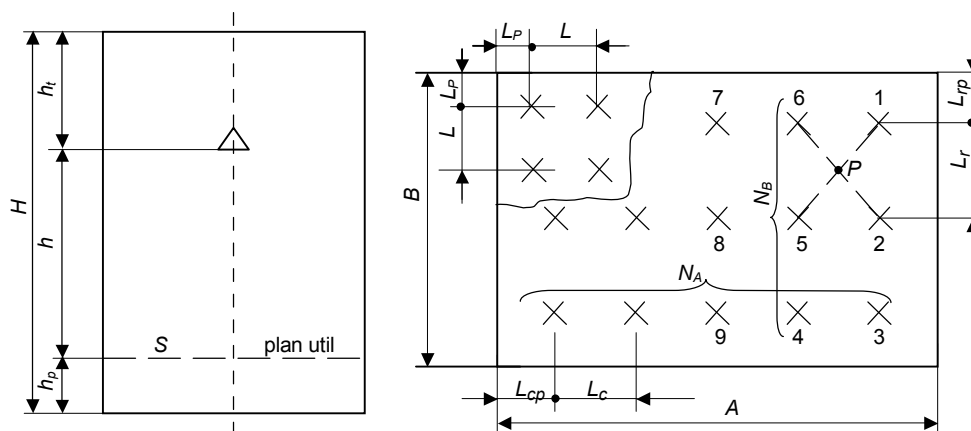


Fig.8.2 Explicativă la geometria instalației de iluminat

- $h_p=0,8..1$ [m] – înălțimea planului util față de pardoseală;
- h_t [m] – distanța de la tavan la planul deschiderii *cdi* ;
- H [m] – înălțimea încăperii;

Distanțele relative depind de repartitia spațială a fluxului luminos și pentru sursele punctiforme uzuale literatura recomandă următoarele valori:

- $L^*=0.5..1$ – iluminat direct cu lămpi fluorescente cu vapori de mercur de înaltă presiune;
- $L^*=0.5..0.7$ - iluminat direct cu lămpi cu incandescență ;
- $L^*=1..1.2$ - iluminat mixt;

La un factor de uniformitate dat, soluția optim-economică de amplasare corespunde dispunerii *cdi* pe vârfurile unui pătrat sau triunghi echilateral de latură L . Distanța relativă: $L_p^* = L_p / L$ dintre *cdi* și perete se adoptă constructiv, și anume:

- $L_p^* = 0.25..0.3$ – dacă sunt locuri de muncă lângă pereți;
- $L_p^* = 0.4..0.5$ - dacă nu sunt locuri de muncă lângă pereți;

Astfel, dacă A și B sunt lungimea și lățimea încăperii, atunci numărul corpurilor de iluminat pe rând N_A și numărul de rânduri N_B vor fi :

$$N_A = 1 + \frac{A - 2 \cdot L_p}{L} \quad N_B = 1 + \frac{B - 2 \cdot L_p}{L} \quad (N_A, N_B - \text{numere întregi});$$

Cotele de montaj (fig.8.2) în cazul amplasării simetrice a *cdi* vor fi:

- distanța dintre corpurile de iluminat de pe un rând: $L_c = A/N_A$ [m];
- distanța corp de iluminat - perete: $L_{cp} = 0.5 \cdot [A - (N_A - 1) \cdot L_c]$ [m];
- distanța dintre rânduri: $L_r = B/N_B$ [m];
- distanța rând-perete: $L_{rp} = 0.5 \cdot [B - (N_B - 1) \cdot L_r]$ [m];