

Aplikace matematiky

Bohumil Nábělek

Diferenciální přechodové koeficienty a jejich použití při korigování optických soustav. I

Aplikace matematiky, Vol. 5 (1960), No. 3, 225–237

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/102709>

Terms of use:

© Institute of Mathematics AS CR, 1960

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

DIFERENCIÁLNÍ PŘECHODOVÉ KOEFICIENTY A JEJICH POUŽITÍ
PŘI KORIGOVÁNÍ OPTICKÝCH SOUSTAV I

BOHUMIL NÁBĚLEK

(Došlo dne 12. listopadu 1958.)

V předložené práci jde o určitou metodu korigování optických soustav, která je v praxi velmi výhodná. Je založena na moderních metodách a opřena o Cruickshankovu teoretickou práci.

Během válečných let byla na universitě v Tasmanii odvozena metoda sloužící k usnadnění práce při korigování optických soustav. Pomocí této metody může korigovat i nezpracovaný konstruktér a je možné zavést do práce určitý systém. Podle F. D. CRUICKSHANKA vyžaduje vykorigování optické soustavy touto metodou jen čtvrtinu času, který je zapotřebí při použití samotné trigonometrické metody. Cruickshankovy práce byly pro tisk uvolněny Departmentem obrany až po ukončení války. V otisknutých pracích nebyly podány pokyny k výpočtu, a ani konečné výsledky výpočtu, uvedené v textu, nedávají možnost učinit si představu o tom, jak je nutno postupovat při výpočtu.

Proto se autor tohoto článku zabýval problémem praktického využití metody. Získané výsledky jsou jistě totožné s neotisknutými Cruickshankovými závěry. Autor sestavil potřebné výpočtové formuláře a ověřil teorii na několika příkladech. Protože citovaná literatura je těžko dostupná, podává první část práce přehled teorie převzaté od Cruickshanka a teprve v další části je uveden návod k výpočtu s příklady.

Princip metody je založen na zkoumání vlivu změny konstrukčního parametru na veličiny obrazového prostoru (sečná vzdálenost a úhel paprsku s optickou osou). Pomocí jistých veličin z trigonometrického výpočtu¹⁾ vypočteme tzv. aberační koeficienty. Seřadíme-li je do tabulky, vidíme ihned, jak se mění jednotlivé vady, provedeme-li změnu libovolného konstrukčního parametru (n , r , d). Tyto koeficienty vypočteme pro určitou sestavu objektivu a kombinujeme změny konstrukčních parametrů, až je dosaženo uspokoji-

¹⁾ Označení veličin a znaménkové konvence jsou převzaty z [3]. Pokud je použito jiného symbolu, je to vždy na místě poznamenáno. Způsob provádění trigonometrických výpočtů je naznačen v [3].

vého korekčního stavu. Pak provedeme s novými hodnotami trigonometrický výpočet, abychom získali přesné hodnoty vad. Tím odpadne celá řada výpočtů, kterými jsme se postupně přibližovali žádoucím hodnotám vad. Není možné ovšem tvrdit, že metoda dává naprosto přesné výsledky. Vždy vznikne odchylka, která závisí na velikosti změny. Nepřesnost je zaviněna zanedbáním malého úhlu $d\sigma'$ při odvození rovnice (25) (QM'). Na základě několika vypočtených příkladů nebylo možno stanovit míru přesnosti této metody.

Účelem tohoto článku je seznámit optické konstruktéry s moderní korekční metodou a ukázat, že korigovat je možno rychleji než dosud a že k tomu není zapotřebí mnoho zkušeností.

1. ZÁKLADNÍ VELIČINY A JEDNODUCHÉ KOEFICIENTY

Mějme centrovanou soustavu o k lámavých kulových plochách. Provedeme-li trigonometrický výpočet dráhy paprsku, je vidět, že paprsek na každé ploše soustavy je popsán veličinami x a σ resp. x' a σ' . Změníme-li nyní na libovolné i -té ploše některý z konstrukčních parametrů (d_i, n_i, r_i), pak po lomu na této ploše se změní dráha paprsku na následujících plochách. Dojde k přemístění dopadových bodů paprsku a ke změnám směru. Po provedení změny je paprsek za i -tou plochou určen veličinami $\sigma'_i + d\sigma'_i$ a $x'_i + dx'_i$. Dopadový bod paprsku se posune z J do J_1 (viz obr. 1) při konstantním úhlu σ a paprsek projde po dráze $B_1J_1B'_1$. Posunutí vyjádříme veličinou dp_i , což je kolmá (orientovaná) vzdálenost paprsku původního (BJ) od paprsku nového (B_1J_1). Tato veličina je kladná, když paprsek jdoucí novým dopadovým bodem leží nad paprskem původním. Při přemístění dopadového bodu dojde za i -tou plochou ke změně směru $d\sigma'_i$.

Po provedení změny protne paprsek osu ve vzdálenosti $x + dx$ a obrazová sečná vzdálenost se změní na $x' + dx'$. Vyjádříme-li nyní dp na i -té ploše, máme

$$(1) \quad dp_i = dx_i \sin \sigma_i.$$

Podobný vztah dostaneme pro dp'_i (viz obr. 1). Pro malá přemístění dopadového bodu můžeme oblouk JJ_1 považovat za úsečku. Souvislost mezi oběma veličinami, za předpokladu velmi malých změn, je vyjádřena vztahem

$$(2.1) \quad JJ_1 = \frac{dp'}{\cos \varepsilon'} = \frac{dp}{\cos \varepsilon}$$

nebo

$$(2) \quad \frac{\partial p'}{\partial p} = \frac{\cos \varepsilon'}{\cos \varepsilon},$$

neboť dp' je vedle dp ještě funkcí úhlu σ .

Chceme-li vystihnout změny směru $d\sigma$, které nastanou při změně konstrukčních parametrů, použijeme k tomu základních zobrazovacích rovnic¹⁾

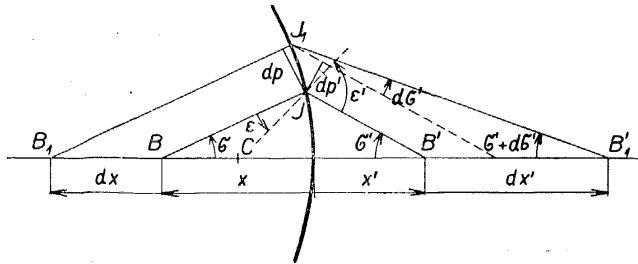
$$(3) \quad (x - r) \sin \sigma = r \sin \varepsilon ,$$

$$(4) \quad N \sin \varepsilon = N' \sin \varepsilon' ,$$

$$(5) \quad \sigma' + \varepsilon' = \sigma + \varepsilon .$$

V rovnici (4) položíme $\frac{N}{N'} = n$, ε' považujeme za funkci ε a n a diferencujeme

$$(6) \quad \cos \varepsilon' d\varepsilon' = n \cos \varepsilon d\varepsilon + \sin \varepsilon dn .$$



Obr. 1.

Z rovnice (5) dostaneme

$$(7) \quad d\sigma' = d\sigma + d\varepsilon - d\varepsilon' .$$

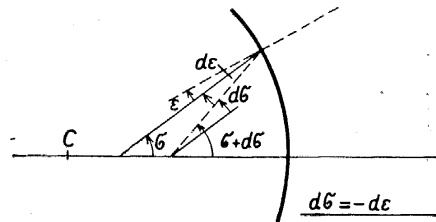
Dosazením za $d\varepsilon'$ z rovnice (6) dostaneme

$$(8) \quad d\sigma' = d\sigma - \left(n \frac{\cos \varepsilon}{\cos \varepsilon'} - 1 \right) d\varepsilon - \frac{\sin \varepsilon}{\cos \varepsilon'} dn .$$

Provedeme-li změnu směru σ o hodnotu $d\sigma$, změní se dopadový úhel paprsku podle obr. 2 o $d\varepsilon = -d\sigma$. Je-li n konstantní, rovnice (8) přejde v

$$(9.1) \quad d\sigma' = n \frac{\cos \varepsilon}{\cos \varepsilon'} d\sigma ,$$

$$(9) \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma} = n \frac{\cos \varepsilon}{\cos \varepsilon'} .$$



Obr. 2.

Změníme-li polohu dopadového bodu při konstantním n , σ a r o hodnotu dp , můžeme určit $d\varepsilon$ diferenciací rovnice (3) a použitím rovnice (1)

$$(10.1) \quad d\varepsilon = \frac{dp}{r \cos \varepsilon} .$$

¹⁾ Viz [3], I. díl, str. 49, rovnice (2.12). Zde je možno určit předpoklady, potřebné k naznačenému odvození dalších vztahů.

Dosazením do rovnice (8) obdržíme

$$(10) \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial p} = \left(1 - \frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma}\right) \frac{1}{r \cos \varepsilon}.$$

Pro malé změny n rovnice (8) přejde v (σ a ε jsou konstantní)

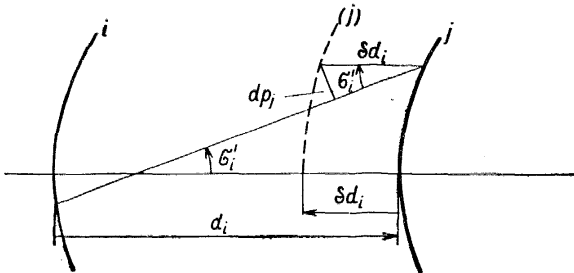
$$(11) \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial n} = - \frac{\sin \varepsilon}{\cos \varepsilon'}.$$

Provedeme-li malou změnu křivosti $c \left(= \frac{1}{r}\right)$, obdržíme změny ε diferenciací rovnice (3) při konstantním σ

$$(12.1) \quad d\varepsilon = \frac{x \sin \sigma}{\cos \varepsilon} dc.$$

Protože n je konstantní, přejde rovnice (8) po dosazení za $d\varepsilon$ v

$$(12) \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial c} = \left(1 - \frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma}\right) \frac{x \sin \sigma}{\cos \varepsilon}.$$



Obr. 3.

V případě malých změn tloušťky je nutno postupovat

jiným způsobem. Změníme-li tloušťku d_i mezi plochami i a $i + 1$ posune se na $j (= i + 1)$ -té ploše dopadový bod podle obr. 3 o

$$(13.1) \quad dp_i = - d(d_i) \sin \sigma'_i,$$

odtud

$$(13) \quad \frac{\partial p_j}{\partial d_i} = - \sin \sigma'_i.$$

Veličiny na levých stranách rovnic (2), (9), (10), (11), (12) a (13), které určují, jak se mění základní veličiny dp' a $d\sigma'$ při provádění změn dp , $d\sigma$, dc , dn a $d(d)$, nazveme jednoduchými koeficienty. Jejich hodnoty určíme pomocí veličin, získaných z trigonometrického výpočtu.

2. ZÁKLADNÍ KOEFICIENTY

Po lomu na i -té ploše je paprsek procházející soustavou určen veličinami x'_i a σ'_i . Provedeme-li malou změnu, potom se změni směr na $\sigma'_i + d\sigma'_i$; paprsek přitom vystupuje na i -té ploše z téhož bodu. Odchýlením paprsku přemístí se dopadové body na následujících plochách a dochází ke změnám směru. Paprsek pak projde zbývající částí soustavy po nové dráze. Z poslední plochy vystoupí v novém dopadovém bodě, který je proti původnímu posunut o dp'_i . Směr

paprsku za poslední plochou je změněn o $d\sigma'_k$. Závislost dp'_k a $d\sigma'_k$ na $d\sigma'_i$ je vystižena vztahem

$$(14) \quad d\sigma'_k = \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i} d\sigma'_i,$$

$$(15) \quad dp'_k = \frac{\partial p'_k}{\partial \sigma'_i} d\sigma'_i.$$

Přemístíme-li dopadový bod na i -té ploše o hodnotu dp_i , pak výsledné změny za poslední plochou vyjádříme takto:

$$(16) \quad dp'_k = \frac{\partial p'_k}{\partial p_i} dp_i,$$

$$(17) \quad d\sigma'_k = \frac{\partial \sigma'_k}{\partial p_i} dp_i.$$

Tím jsou definovány čtyři základní koeficienty. Na poslední ploše nabývají předepsaných hodnot $\frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_k} = 1$, $\frac{\partial p'_k}{\partial \sigma'_k} = 0$, a zbývající dva určíme ze vztahů (2) a (10).

Tyto vzorce ovšem nestačí k tomu, abychom určili hodnoty základních koeficientů na všech plochách soustavy. Podle uvedené podmínky určíme snadno jejich hodnoty jen na poslední ploše. K dalšímu výpočtu je nutné odvodit vzorce, naznačující postup výpočtu koeficientů na jednotlivých plochách soustavy.

Provedeme-li změnu směru $d\sigma_i$ na i -té ploše, dopadne paprsek na j -tou plochu v novém dopadovém bodě, který je proti původnímu posunut podle obr. 4 o

$$(18) \quad dp_j = -'d_i d\sigma'_i,$$

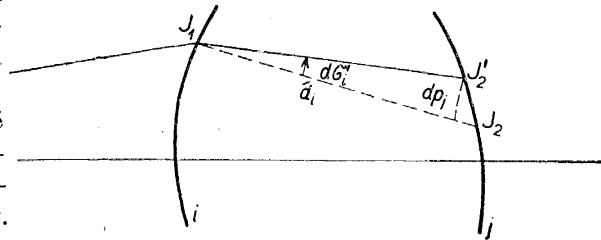
kde $'d_i$ je „šikmá“ tloušťka. Dále pak vidíme, že

$$(19) \quad d\sigma'_i = d\sigma_j.$$

Změníme-li směr o malou hodnotu $d\sigma'_i = d\sigma_j$, dojde ke změně

$$(20.1) \quad d\sigma'_j = \frac{d\sigma'_j}{d\sigma_j} d\sigma_j = \frac{\partial \sigma'_j}{\partial \sigma_j} d\sigma'_i.$$

Změna směru $d\sigma'_i$, která způsobuje i přemístění dopadových bodů, je tedy ekvivalentní změně dp_j . Použitím dříve uvedených vztahů vyjádříme $d\sigma'_k$ a dp'_k



Obr. 4.

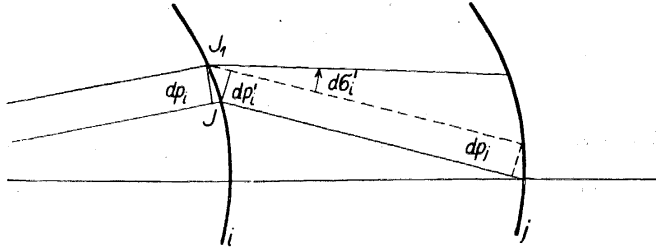
$$(20.2) \quad \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i} d\sigma'_i = d\sigma'_k = \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_j} d\sigma'_j + \frac{\partial \sigma'_k}{\partial p_j} dp_j = \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_j} \cdot \frac{\partial \sigma'_j}{\partial \sigma'_i} \cdot d\sigma'_i - \frac{\partial \sigma'_k}{\partial p_j} d_i d\sigma'_i.$$

Odtud pak máme

$$(20) \quad \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i} = \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_j} \frac{\partial \sigma'_j}{\partial \sigma'_i} - \frac{\partial \sigma'_k}{\partial p_j} d_i,$$

Stejně dostaneme pro dp'_k

$$(21) \quad \frac{\partial p'_k}{\partial \sigma'_i} = \frac{\partial p'_k}{\partial \sigma'_j} \frac{\partial \sigma'_j}{\partial \sigma'_i} - \frac{\partial p'_k}{\partial p_j} d_i.$$



Obr. 5.

Měníme-li nyní polohu dopadového bodu, nastane za i -tou plochou odehýlení paprsku

$$d\sigma'_i = \frac{\partial \sigma'_i}{\partial p_i} dp_i,$$

dopadový bod se přemístí o

$$(22) \quad dp'_i = \frac{\partial p'_i}{\partial p_i} dp_i$$

a dále platí, jak vyčteme z obr. 5,

$$dp'_i = dp_j.$$

Vyjádříme-li nyní výsledné dp'_k a $d\sigma'_k$ pomocí dp_i , dostaneme

$$(23) \quad \frac{\partial \sigma'_k}{\partial p_i} = \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i} \cdot \frac{\partial \sigma'_i}{\partial p_i} + \frac{\partial \sigma'_k}{\partial p_j} \cdot \frac{\partial p'_j}{\partial p_i},$$

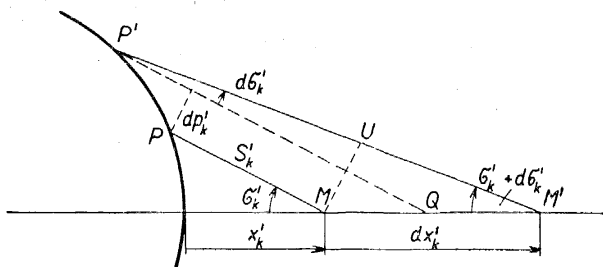
$$(24) \quad \frac{\partial p'_k}{\partial p_i} = \frac{\partial p'_k}{\partial \sigma'_i} \cdot \frac{\partial \sigma'_i}{\partial p_i} + \frac{\partial p'_k}{\partial p_j} \cdot \frac{\partial p'_j}{\partial p_i}.$$

Několikerými úpravami jsme získali nový tvar základních koeficientů, jejichž hodnoty můžeme počítat na všech plochách. Výpočet začínáme vždy na poslední ploše, protože zde dva koeficienty nabývají předepsaných hodnot ($\frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_k} = 1$, $\frac{\partial p'_k}{\partial \sigma'_k} = 0$) a dva zbývající mají tutéž hodnotu jako jednoduchý koeficient poslední plochy. Formulář pro výpočet těchto 4 základních koefi-

cientů získáme rozepsáním rovnic (20), (21), (23) a (24) pro všechny plochy soustavy. Dosazujeme-li za i pořadová čísla jednotlivých ploch ($i = 1, 2, \dots, k$), vidíme jasně, že výpočet se provádí od poslední plochy, protože ve vzorcích (20) a (21) pro i -tou plochu vystupuje vždy součinitel plochy j -té ($i + 1$). Ve výpočtu pak pokračujeme, až dosáhneme první plochy.

3. PŘECHODOVÉ KOEFICIENTY PRO ZMĚNY SEČNÝCH VZDÁLENOSTÍ

Chceme-li vědět, jak se změní sečná vzdálenost paprsku při změně konstrukčních parametrů, musíme odvodit příslušné vztahy. Za účelem zkrácení výkladu provedeme odvození jen pro krajový paprsek osového svazku.



Obr. 6.

Sledujme vliv změny $d\sigma'_i$ na polohu průsečíku paprsku s optickou osou. Dráha paprsku za poslední plochou před resp. po provedení změny je PM resp. $P'M'$ (podle obr. 6). Změna dráhy je způsobena přemístěním výstupního bodu podle (15) a změnou směru podle (14). Účinek těchto změn je zřejmý z obr. 6. Při změně dp se přemístí M do Q a změna $d\sigma$ má za následek další přemístění do M' . Pro velmi malé změny vyplývá z obrázku

$$(25) \quad MQ = dp'_k \frac{1}{\sin \sigma'_k}, \quad QM' = -S'_k d\sigma'_k \frac{1}{\sin \sigma'_k},$$

kde S'_k je vzdálenost PM , měřená ve směru chodu paprsků.

Změna sečné vzdálenosti je v obrázku dána vzdáleností MM' . S ohledem na znaménko úhlu $d\sigma'_k$ (< 0) píšeme po omezení se na první řád

$$(26) \quad dx'_k = MM' = \frac{dp'_k}{\sin \sigma'_k} - S'_k \frac{d\sigma'_k}{\sin \sigma'_k}.$$

Použitím (14) a (15) dostáváme odtud

$$(27) \quad \frac{\partial x'_k}{\partial \sigma'_i} = \left(\frac{\partial p'_k}{\partial \sigma'_i} - S'_k \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i} \right) \frac{1}{\sin \sigma'_k}.$$

Podobně, uvažujeme-li vliv změny dp_i , dostaneme

$$(28) \quad \frac{\partial x'_k}{\partial p_i} = \left(\frac{\partial p'_k}{\partial p_i} - S'_k \frac{\partial \sigma'_k}{\partial p_i} \right) \frac{1}{\sin \sigma'_k}.$$

Pro zkrácení položíme výraz v závorce na pravé straně rovnice (27) resp. (28) roven $C(\sigma'_i)$ resp. $C(p_i)$. Odvozené vzorce lze použít též na všechny paprsky, které leží mezi paprskem paraxiálním a krajovým, uijeme-li při výpočtu hodnoty z trigonometrického výpočtu těchto paprsků.

4. PŘECHODOVÉ KOEFICIENTY PRO ZMĚNY KONSTRUKČNÍCH PARAMETRŮ

Změna křivosti je provedena na i -té ploše soustavy. Budeme uvažovat malou hodnotu dc_i ($= -\frac{1}{r_i^2} dr_i$). Následkem toho se po lomu na i -té ploše odchýlí paprsek od původního směru o

$$(29) \quad d\sigma'_i = \left(\frac{\partial \sigma'_i}{\partial c_i} \right) dc_i.$$

Použitím rovnice (27) pak dostaneme pro změnu sečné vzdálenosti

$$(30) \quad \frac{\partial x'_k}{\partial c_i} = \frac{\partial x'_k}{\partial \sigma'_i} \frac{\partial \sigma'_i}{\partial c_i} = \frac{\partial \sigma'_i}{\partial c_i} C(\sigma'_i) \frac{1}{\sin \sigma'_k}.$$

Změna tloušťky mezi i -tou a j -tou ($j = i + 1$) plochou má za následek přemístění dopadového bodu na ploše j -té o hodnotu

$$(31) \quad dp_j = -d(d_i) \sin \sigma_j.$$

Pro změnu sečné vzdálenosti pak dostaneme

$$(32) \quad \frac{\partial x'_k}{\partial d_i} = C(p_j) \frac{1}{\sin \sigma'_k} \frac{\partial p_j}{\partial d_i} = -C(p_j) \frac{1}{\sin \sigma'_k} \sin \sigma_j.$$

Zde je zaveden symbol $d(d_i)$ ve významu přírůstku veličiny d_i .

Změna indexu lomu $n_i = \frac{N_i}{N'_i}$ na i -té ploše o hodnotu dn_i odchýlí paprsek o

$$(33) \quad d\sigma'_i = \left(\frac{\partial \sigma'_i}{\partial n_i} \right) dn_i.$$

Vztah pro změnu sečné vzdálenosti pak je ve tvaru

$$(34) \quad \frac{\partial x'_k}{\partial n_i} = C(\sigma'_i) \frac{1}{\sin \sigma'_k} \frac{\partial \sigma'_i}{\partial n_i}.$$

Ve skutečnosti změnou indexu lomu ovlivníme dvě lámavé plochy. Uvažujeme h -tou složku v soustavě o k plochách. První plochu h -té složky označme symbolem 1 a druhou 2. Index lomu h -té složky je N_h , index prostoru před-

mětového resp. obrazového N_{h-1} resp. N_{h+1} . Změníme-li nyní N_h na $N_h + dN_h$, pak se změní n na první ploše složky o

$$(35) \quad dn_1 = \frac{\partial}{\partial N_h} \left(\frac{N_{h-1}}{N_1} \right) dN_h = - \frac{N_{h-1}}{N_h^2} dN_h,$$

na druhé ploše pak o

$$(36) \quad dn_2 = \frac{\partial}{\partial N_h} \left(\frac{N_h}{N_{h+1}} \right) dN_h = \frac{1}{N_{h+1}} dN_h.$$

Změna sečné vzdálenosti je pak

$$(37) \quad \frac{\partial x'_k}{\partial N_h} = - \left(\frac{\partial x'_k}{\partial n_1} \cdot \frac{N_{h-1}}{N_h^2} - \frac{\partial x'_k}{\partial n_2} \cdot \frac{1}{N_{h+1}} \right).$$

Tím byl podán přehled výrazů, potřebných ke stanovení vlivu změny konstrukčního parametru na sečnou vzdálenost za poslední plochou.

5. JEDNODUCHÉ A ZÁKLADNÍ PŘECHODOVÉ KOEFICIENTY PRO PARAXIÁLNÍ PAPERSEK

Potřebné koeficienty pro paraxiální paprsek odvodíme stejným postupem jako u okrajového paprsku. Protože tento odstavec bude pojednávat jen o paraxiálním paprsku, bude vynechán obvyklý index o .

Základní zobrazovací rovnice napíšeme ve tvaru

$$(38) \quad (x-r) \sigma = r\varepsilon,$$

$$(39) \quad N'\varepsilon' = N\varepsilon,$$

$$(40) \quad \sigma' + \varepsilon' = \sigma + \varepsilon.$$

Po úpravách podobných jako v případě krajového paprsku dostaneme

$$(41) \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma} = n,$$

$$(42) \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial h} = (1-n)c,$$

$$(43) \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial c} = (1-n)h,$$

$$(44) \quad \frac{\partial \sigma'}{\partial n} = -\varepsilon,$$

$$(45) \quad \frac{\partial h_j}{\partial d_i} = -\sigma_j.$$

Tyto výrazy určují hodnoty jednoduchých koeficientů. Při studiu paraxiálního paprsku jsou změny velmi malé a proto místo veličiny dp budeme užívat

změnu dopadové výšky dh . Základní přechodové koeficienty dostaneme ve tvaru

$$(46) \quad \frac{\partial h_k}{\partial \sigma'_i} = \frac{\partial h_k}{\partial \sigma_j} - \frac{\partial h_k}{\partial h_j} d_i;$$

$$(45) \quad \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i} = \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma_j} - \frac{\partial \sigma'_k}{\partial h_j} d_i;$$

$$(48) \quad \frac{\partial h_k}{\partial h_i} = \frac{\partial h_k}{\partial \sigma'_i} \cdot \frac{\partial \sigma'_i}{\partial h_i} + \frac{\partial h_k}{\partial h_j};$$

$$(49) \quad \frac{\partial \sigma'_k}{\partial h_i} = \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i} \cdot \frac{\partial \sigma'_i}{\partial h_i} + \frac{\partial \sigma'_k}{\partial h_j}.$$

Další vztahy potřebné při výpočtech jsou

$$(50) \quad \frac{\partial h_k}{\partial \sigma_i} = n_i \frac{\partial h_k}{\partial \sigma'_i}; \quad \frac{\partial \sigma'_i}{\partial \sigma_i} = n_i;$$

$$\frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma_i} = n_i \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i}; \quad \frac{\partial \sigma'_i}{\partial h_i} = \frac{1 - n_i}{r_i}.$$

Na poslední ploše mají tyto koeficienty velmi jednoduchý tvar

$$(51) \quad \frac{\partial h_k}{\partial \sigma'_k} = 0; \quad \frac{\partial h_k}{\partial \sigma_k} = 0; \quad \frac{\partial h_k}{\partial h_k} = 1;$$

$$\frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_k} = 1; \quad \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma_k} = n_k; \quad \frac{\partial \sigma'_k}{\partial h_k} = \left(\frac{1 - n_k}{r_k} \right).$$

Výpočet opět provádíme od poslední plochy směrem k první.

6. PŘECHODOVÉ KOEFICIENTY PRO ZMĚNY SEČNÝCH VZDÁLENOSTÍ

Pro změnu sečné vzdálenosti paraxiálního paprsku dostaneme po provedení aproximací a úprav v rovnici (27)

$$(52) \quad \frac{\partial x'_k}{\partial c_i} = \left(\frac{\partial h_k}{\partial \sigma'_i} - x'_k \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i} \right) \frac{1}{\sigma'_k} \frac{\partial \sigma'_i}{\partial c_i}.$$

Místo délky paprsku S'_k bereme zde přímo paraxiální sečnou vzdálenost, protože $S'_{0k} \approx x'_{0k}$.

Vzorce pro ostatní změny jsou podobné

$$(53) \quad \frac{\partial x'_k}{\partial d_i} = \left(\frac{\partial h_k}{\partial h_j} - x'_k \frac{\partial \sigma'_k}{\partial h_j} \right) \frac{1}{\sigma'_k} \frac{\partial h_j}{\partial d_i},$$

přičemž výrazy v závorkách na pravých stranách (52) resp. (53) označíme $C(\sigma'_i)$ resp. $C(h_i)$.

Pro změny indexu lomu pak máme

$$(54) \quad \frac{\partial x'_k}{\partial n_i} = C(\sigma'_i) \frac{1}{\sigma'_k} \frac{\partial \sigma'_i}{\partial h_i}.$$

Vzmemme-li v úvahu změnu skla celé složky, pak změna sečné vzdálenosti je dána stejně jako v rovnici (37). Zavedeme zde jen x'_{0k} místo x'_k (aby nenastala záměna s formulí (37))

$$(55) \quad \frac{\partial x'_{0k}}{\partial N_h} = - \left(\frac{\partial x'_{0k}}{\partial n_1} \frac{N_{h-1}}{N_h^2} - \frac{\partial x'_{0k}}{\partial n_2} \frac{1}{N_{h+1}} \right).$$

7. PŘECHODOVÉ KOEFICIENTY PRO ZMĚNY PARAXIÁLNÍHO OHNISKA A OTVOROVÉ VADY

Ohnisko paraxiálních paprsků je dáno vztahem

$$(56) \quad f'_k = \frac{h_1}{\sigma'_k}.$$

Uvažujeme-li změnu křivosti, máme pak

$$(57) \quad \frac{\partial f'_k}{\partial c_i} = - \left(\frac{h_1}{\sigma_k'^2} \right) \frac{\partial \sigma'_k}{\partial c_i} = - \left(\frac{f'_k}{\sigma'_k} \right) \frac{\partial \sigma'_k}{\partial c_i},$$

kde

$$(58) \quad \frac{\partial \sigma'_k}{\partial c_i} = \frac{\partial \sigma'_k}{\partial \sigma'_i} \cdot \frac{\partial \sigma'_i}{\partial c_i};$$

obě veličiny na pravé straně (58) máme ve výpočtu koeficientů z odst. 5.

Při změně tloušťky plyne

$$(59) \quad \frac{\partial f'_k}{\partial d_i} = - \left(\frac{f'_k}{\sigma'_k} \right) \frac{\partial \sigma'_k}{\partial h_j} \frac{\partial h_j}{\partial d_i}$$

a při změně indexu na jedné ploše

$$(60) \quad \frac{\partial f'_k}{\partial n_i} = - \left(\frac{f'_k}{\sigma'_k} \right) \frac{\partial \sigma'_k}{\partial n_i}.$$

Při trigonometrickém výpočtu obvykle volíme $h_1 = 1$; pak je

$$(56') \quad f'_k = \frac{1}{\sigma'_k}$$

a ve vzorcích (57), (59) a (60) píšeme místo výrazu v závorce jen $f_k'^2$.

Např. vzorec (57) má po této úpravě tvar

$$(57') \quad \frac{\partial f'_k}{\partial c_i} = - f_k'^2 \frac{\partial \sigma'_k}{\partial c_i},$$

atd. Zde byl opět vynechán index o .

Otvorová vada krajového paprsku je dána vztahem

$$(61) \quad \Delta x'_k = x'_{mk} - x'_{0k},$$

kde pro krajový paprsek je použito indexu m .

Změní-li se libovolný konstrukční parametr a_i , dojde pak ke změně otvorové vady

$$(62) \quad \frac{\partial \Delta x'_k}{\partial a_i} = \frac{\partial x'_{mk}}{\partial a_i} - \frac{\partial x'_{0k}}{\partial a_i}.$$

Tento vztah dostaneme buď diferenciací (61) nebo na př. při změně křivosti odečtením rovnic (30) a (52).

8. ZÁVĚR

Tím byl podán stručný přehled teorie převzaté od Cruickshanka. Všechny vzorce byly odvozeny a ověřeny na praktickém příkladě. Výsledky získané koeficientů byly porovnány s trigonometrickým výpočtem a bylo konstatováno, že přesnost metody je postačující.

Dosud zpracovaná teorie umožňuje po velmi krátkých výpočtech zjistit vliv změn konstrukčních parametrů na změnu sečných vzdáleností, vzdálenosti ohniska a otvorové vady. Metody lze užít i tak, že můžeme stanovit potřebnou změnu parametru při požadované změně např. otvorové vady.

Výpočet základních koeficientů a přechodových koeficientů $\frac{\partial x_k}{\partial a_i}$ (a_i — konstrukční parametr) zabere méně času než trigonometrický výpočet krajového paprsku. Odtud pak dvěma početními úkony můžeme dosáhnout libovolné hodnoty otvorové vady.

Postup celého výpočtu a dosud známé možnosti použití metody, doplněné příkladem, budou uvedeny v částech II. a III. této práce.

Literatura

- [1] *F. D. Cruickshank a A. L. Aulay*: Proc. Phys. Soc. 57 (1945), 302.
F. D. Cruickshank: Proc. Phys. Soc. 57 (1945), 350, 428.
F. D. Cruickshank: JOSA 36 (1946), 13.
- [2] *B. Nábělek*: Diferenciální přechodové koeficienty; diplomová práce — Přírodovědecká fakulta MU, Brno 1957.
- [3] *B. Havelka*: Geometrická optika I., II.

Резюме

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ КОРРЕКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ I.

БОГУМИЛ НАБЕЛЕК (Bohumil Nábělek)

В работе дается обзор теории Круикшенка (Cruickshank) дифференциальных переходных коэффициентов, относящейся к осевому пучку лучей. Где речь идет о формулах для краевых лучей, везде дается их вывод или намечается путь вывода. Большинство формул для параксиального луча можно получить посредством удобной аппроксимации из формул для краевых лучей; поэтому эти формулы приводятся вольшей частью без доказательства. При помощи приведенных в работе формул можно определять изменения расстояний сечений отдельных лучей. Объединением формул для краевого и параксиального луча получается соотношение, по которому можно определить приращение дефекта отверстия в зависимости от изменения конструкционного параметра. Кроме того приводится формула для изменения положения параксиального фокуса.

Zusammenfassung

DIFFERENTIAL-ÜBERGANGSKOEFFIZIENTEN UND IHRE ANWENDUNG FÜR DIE KORREKTUR OPTISCHER SYSTEME I.

BOHUMIL NÁBĚLEK

In der vorliegenden Arbeit wird eine Übersicht der Cruickshank'schen Theorie der differentialen Übergangskoeffizienten, welche sich auf ein axiales Strahlenbündel bezieht, gegeben. Die Formeln für den Randstrahl sind abgeleitet oder wenigstens ihre Ableitung angedeutet. Die Formeln für den paraxialen Strahl lassen sich gewöhnlich durch geeignete Approximation aus den Ausdrücken für den Randstrahl ableiten. Aus diesem Grunde ist der grösste Teil der Formeln ohne Beweise angegeben. Mit Hilfe der in dieser Arbeit abgeleiteten Formeln lassen sich die Veränderungen der Schnittdistanzen der einzelnen Strahlen bestimmen. Durch Vereinigung dieser Formeln für den Randstrahl und den paraxialen Strahl erhält man die Beziehung zur Bestimmung des Zuwachses des Öffnungsfehlers mit Rücksicht auf die durchgeführte Änderung des Konstruktionsparameters. Ausserdem ist die Formel für die Veränderung der Lage des paraxialen Brennpunktes gegeben.