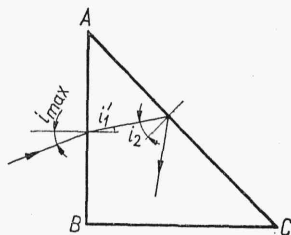


W przeciwnym przypadku płaszczyzna odbijająca pryzmatu powinna być metalizowana i wtedy wpływ wartości współczynnika załamania na konstrukcję pryzmatu ma znaczenie drugorzędne. Przy wyborze materiału bierze się wówczas pod uwagę takie jego cechy jak absorpcję, zawartość pęcherzy, łatwość obróbki, cenę itp.



Rys. 6.15

Po ostatecznym ustaleniu kształtów poszczególnych elementów optycznych projektowanego układu, a więc szczegółowych parametrów obiektywów, okularów, pryzmatów, płytek itp. następuje odwrotny proces do opisanego na wstępie obliczeń gabarytowych. Z układu złożonego z elementów cienkich, którego przykładem jest rys. 6.3 drogą rozsuwania elementów następuje przejście do układu rozwiniętego, ale złożonego już z elementów o zdefiniowanych kształtach.

Rozsuniecie to ma swe źródło w uwzględnieniu odległości płaszczyzn głównych pominiętych w układach cienkich oraz wzięciu pod uwagę wpływu pryzmatów jako płytek płasko-równoległych na przemieszczenie obrazu. Obie poprawki poprzednio zostały oznaczone przez $\Sigma HH'$ i $\Sigma d(n-1)/n$. Powstaje wtedy schemat optyczny układu w rozwinięciu, analogiczny do przykładu podanego na rys. 6.2, z tym, że każdy z elementów ma ściśle określoną postać, wymiary oraz położenie. Końcowym rezultatem projektowania układu optycznego jest jego zestawienie zawierające informacje o wzajemnym położeniu w przestrzeni poszczególnych elementów, a więc odległościach, kątach między osiami, grubościach itp. Odpowiednikiem wspomnianego zestawienia jest rys. 6.1 uzupełniony wymiarami. Zestawienie optyczne i rysunki wykonawcze poszczególnych elementów są podstawą do realizowania konstrukcji mechanicznej.

Przedstawiony tu ogólny sposób postępowania przy konstrukcji układu optycznego zilustrowany dość prostym i typowym przykładem, wskazuje tylko na podstawowe zasady posługiwania się rachunkiem przy obliczeniach gabarytowych i nie wyczerpuje całości zagadnienia. Z uwagi na trudności przy sformułowaniu ogólnych warunków i toku postępowania adekwatnego do każdego przyrządu i każdej sytuacji, najczęściej w literaturze technicznej konstrukcję układów optycznych omawia się na przykładach przez rozwiązywanie konkretnych zagadnień. Szczegółowe rozważania na ten temat można znaleźć w [3], [4], [5].

6.2. Korekcja układów optycznych

Zadaniem korekcji aberracji układu optycznego jest nadanie odpowiedniego kształtu elementom optycznym, aby jego prawa przekształcenia przestrzeni przedmiotowej w obrazową z żądaną dokładnością zbliżały się do

praw układu doskonałego. Osiągane to jest przez takie komplikowanie budowy układu, aby aberracje poszczególnych powierzchni w odpowiednim stopniu wzajemnie się kompensowały. Im układ jest bardziej złożony, tym na ogół lepiej można skorygować aberracje, lecz jednocześnie tym wyższe są jego koszty wykonania.

A więc proces korygowania aberracji układów z jednej strony decyduje o jakości odwzorowania, a z drugiej o kosztach produkcji przyrządu. Jest więc on kluczowym zagadnieniem w konstrukcji przyrządów optycznych. Z uwagi jednak na swą pracochłonność i specyfikę obliczeń wymaga bardzo wąsko pojętej specjalizacji i szczegółowa problematyka z nim związana nie mieści się w profilu niniejszej książki. Rozważania zostaną tu ograniczone tylko do ogólnego opisu sposobu postępowania.

Przyrząd optyczny jest najczęściej zbiorem wielu elementów mających swe własne przekształcenia, które się na siebie nakładają, lecz z punktu widzenia użytkownika najistotniejszy jest rezultat końcowy, przekształcenie dawane przez cały układ. Kompleksowa korekcja jednak, polegająca na wzajemnym kompensowaniu aberracji przez poszczególne elementy, zmniejsza elastyczność konstrukcji. Elementy mogą wtedy pracować tylko w ustalonym układzie, a więc przy danych odległościach i elementach współpracujących oraz danym ustawieniu przysłon. Ten brak swobody jest poważną wadą i prawie zawsze dąży się do niezależnego korygowania węzłowych elementów, a więc obiektywów, okularów, układów odwracających itp. Operując zbiorem niezależnie skorygowanych zespołów można w prosty sposób drogą ich odpowiedniego doboru budować układy o różnych właściwościach. Dla odpowiedzialnych przyrządów, kiedy stawiane są szczególnie wysokie wymagania dotyczące jakości obrazu, można po zestawieniu układu przeprowadzić korekcję aberracji szczątkowych, powstałych z nakładania się wpływu poszczególnych skorygowanych elementów. Z podanych wyżej powodów dalsze rozważania ograniczone będą do korekcji elementów niezależnych.

W wyniku obliczeń gabarytowych zostały wyznaczone wstępne parametry konstruowanych elementów, takie jak położenie przedmiotu, źrenicy, pole widzenia, otwór względny, moc itp. Na podstawie tych danych i wymagań stawianych jakości odwzorowania, najpierw analizuje się układy o znanej korekcji zbliżone parametrami do elementu poszukiwanego. Analiza prowadzona jest pod kątem możliwości ich bezpośredniego zastosowania, bądź wykorzystania jako wariantów wyjściowych do optymalizacji korekcji, która musi być przystosowana do nowych warunków.

Jeżeli istnieje potrzeba konstruowania układu od podstaw, to biorąc pod uwagę dotychczasowe osiągnięcia w tej dziedzinie, na podstawie literatury, patentów i własnego doświadczenia, należy wybrać typ układu, który najprawdopodobniej w dostatecznym stopniu spełni stawiane wymagania. A więc należy ocenić, czy wystarczy zastosować pojedynczą soczewkę lub układ achromatyczny, czy też dublet *Petzvala*, tryplet *Taylor* itp.

Dalszy sposób postępowania zależy już od poziomu technicznego danego ośrodka i jego doświadczenia oraz rodzaju korygowania elementu.

Najbardziej tradycyjną metodą jest dwustopniowa korekcja aberracji łącząca wstępną korekcję algebraiczną z końcową trygonometryczną opartą o analizę przebiegu rzeczywistych promieni przez układ.

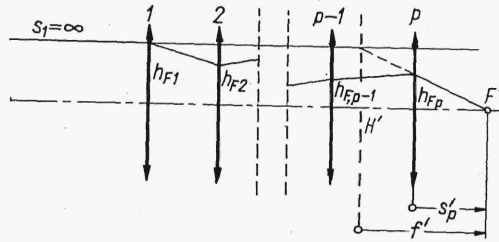
W pierwszym etapie tej metody przy upraszczającym założeniu, że korygowany układ optyczny składa się z ustalonej poprzednio pewnej liczby

soczewek cienkich, korygowane są aberracje I-szego (chromatyczne) i III-go rzędu (monochromatyczne). Najpierw wyznaczane są moce soczewek i ich położenie. Podstawą do tego są warunki korekcyjne dla aberracji, które zależą od mocy soczewek, a nie zależą od ich kształtu. Odnosi się to do chromatyzmu położenia (2.97), chromatyzmu wielkości (2.10) oraz krzywizny pola. W tym ostatnim przypadku bierze się pod uwagę tzw. *warunek Petzvala*. Ze szczegółowych rozważań nad aberracjami III-ciego rzędu wynika, że jeżeli skorygowany jest astygmatyzm układu (zgodnie ze wzorem (2.79) $C = D$) to średnia krzywizna pola zgodnie z zależnościami (2.77) i (2.76) równa krzywiznie południkowej i równoleżnikowej wyraża się wzorem

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^p \frac{D_i}{n_i} \quad (6.18)$$

gdzie D_i i n_i — odpowiednio moc i współczynnik załamania i -tej soczewki cienkiej.

Wynika stąd, że krzywizna układu p soczewek cienkich również nie zależy od kształtu soczewek i stąd konieczność jej uwzględnienia w pierwszej fazie obliczeń.



Rys. 6.16

Uzupełnieniem warunków (2.97), (2.101) i (6.18) jest zależność wiążąca moc całego układu z mocami poszczególnych soczewek. W celu jej wyprowadzenia, niech będzie dany układ (rys. 6.16) p soczewek cienkich znajdujących się w powietrzu, dla którego F' jest ogniskiem obrazowym a H' płaszczyzną główną obrazową. Wielkość h_{Fi} jest wysokością padania promienia przechodzącego przez ognisko obrazowe na soczewkę i .

Zgodnie z rysunkiem moc układu

$$D = \frac{1}{f'} = \frac{1}{s'_p} \frac{h_{Fp}}{h_{F1}} \quad (6.19)$$

Uwzględniając zależności (2.89) i (2.91) można napisać

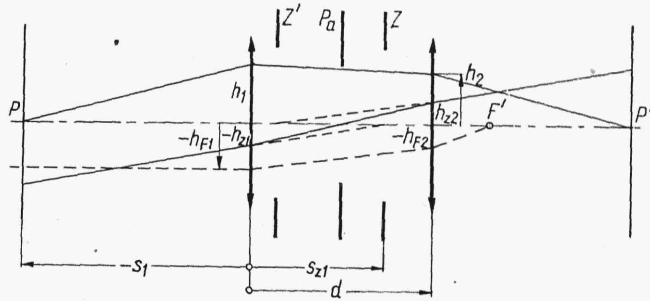
$$\frac{1}{s'_p} \frac{h_{Fp}}{h_{F1}} = \frac{1}{s_p} \frac{h_{Fp}}{h_{F1}} + D_p \frac{h_{Fp}}{h_{F1}} = \frac{h_{F,p-1}}{h_{F1}} \frac{1}{s'_{p-1}} + D_p \frac{h_{Fp}}{h_{F1}}$$

Powtarzając to przekształcenie jeszcze $p-1$ razy dla soczewek 1, 2, ..., $p-1$ ponieważ $1/s_1 = 0$ ostatecznie wyrażenie (6.19) można napisać w postaci

$$D = \sum_{i=1}^p \frac{h_{Fi}}{h_{F1}} D_i \quad (6.20)$$

W celu lepszego wyjaśnienia wyżej wymienione warunki (2.97), (2.101), (6.18) i (6.20) zostaną rozpisane dla dubletu (rys. 6.17) gdzie P_a jest przysłoną aperturową, Z i Z' — źrenicami, P i P' — płaszczyznami przedmiotu i obrazu. Wtedy dla chromatyzmu położenia z (2.97)

$$-\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 \frac{\Delta s_2'}{s_2'^2} = \frac{D_1}{\nu_1} + \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 \frac{D_2}{\nu_2}$$



Rys. 6.17.

dla chromatyzmu wielkości z (2.101)

$$\frac{\Delta L'}{L'} = \frac{s_1 s_{z1}}{s_1 - s_{1z}} \left(\frac{D_1}{\nu_1} + \frac{h_2}{h_1} \frac{h_{z2}}{h_{z1}} \frac{D_2}{\nu_2} \right)$$

dla krzywizny pola z (6.18)

$$\frac{1}{R} = \frac{D_1}{n_1} + \frac{D_2}{n_2}$$

oraz na moc układu z (6.20)

$$D = D_1 + \frac{h_{F2}}{h_{F1}} D_2$$

przy czym zgodnie z zależnościami (2.89) — (2.91)

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{s_2}{s_1'} = 1 - \frac{d}{s_1'} = 1 - d \left(\frac{1}{s_1'} + D_1 \right)$$

a więc przez analogię

$$\frac{h_{z2}}{h_{z1}} = 1 - d \left(\frac{1}{s_{z1}} + D_1 \right)$$

i

$$\frac{h_{F2}}{h_{F1}} = 1 - d D_1$$

Moc układu po podstawieniu ostatniej zależności wyraża się wzorem

$$D = D_1 + D_2 - d D_1 D_2$$

co jest zgodne z wyrażeniem (2.38), ponieważ $n = 1$.

W zależności od tego, która z wymienionych tu aberracji ma istotny wpływ na pracę przyrządu, odpowiadające jej równanie przyrównywane jest do zera i w ten sposób ustalany jest warunek korekcji danej aberracji.

Rozwiązanie zespołu równań odpowiadających korygowanym aberracjom wraz z zależnością ustalającą moc układu pozwala wyznaczyć moce i położenie poszczególnych soczewek w układzie. Naturalnie warunek skorygowania wszystkich aberracji wiąże się z odpowiednim skomplikowaniem budowy układu. Łatwo wykazać, że np. dla dubletu zależnie od rodzaju układu, pewne warunki będą się wykluczały. Dopiero konstrukcja trypletu pozwala uzyskać korekcję uniwersalną.

Po ustaleniu mocy i położen soczewek następuje korekcja pozostałych aberracji monochromatycznych III-ciego rzędu, a więc aberracji sferycznej, komy, astygmatyzmu i dystorsji. Każda z tych aberracji opisana jest przez pewne współczynniki $A, B, C-D, E$ zgodnie z rozwinięciem aberracji promienia w szereg (2.69). W przypadku układu soczewek cienkich współczynniki te są określonymi funkcjami ich mocy, kształtu, położenia przedmiotu i źrenicy oraz współczynników załamania materiałów, z których zbudowane są soczewki. Ponieważ wszystkie te parametry, oprócz kształtu, zostały wyznaczone przy korekcji aberracji chromatycznych i krzywizny pola i ponadto sam kształt soczewki cienkiej przy znanej jej mocy i współczynniku załamania jest zdefiniowany przez jeden z promieni powierzchni sferycznych stąd współczynniki aberracji ostatecznie są tylko funkcjami np. pierwszych promieni wszystkich soczewek.

W zależności od parametrów układu, a więc kąta pola, otworu oraz wymagań stawianych jakości odwzorowania ustalone są warunki korekcji dla poszczególnych aberracji przez przyrównanie odpowiadających im współczynników do zera i stąd wyznaczane są promienie poszczególnych soczewek.

Przykładowo aberracja sferyczna A_s pojedynczej soczewki cienkiej opisana jest zależnością (2.86). Warunek korekcji aberracji sferycznej dla dubletu pokazanego na rys. 6.17 przyjmie postać

$$A_{s1} + \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^4 A_{s2} = 0$$

gdzie A_{s1} i A_{s2} odpowiednio aberracje sferyczne pierwszej i drugiej soczewki wyrażone wzorem (2.86).

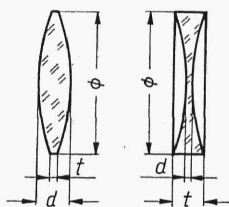
Powyższy warunek ustala związek między promieniami krzywizny pierwszych powierzchni obydwu soczewek, spełnienie którego gwarantuje skorygowanie aberracji sferycznej III rzędu dla układu. Oznacza to, że istnieje pewna swoboda w doborze jednego z promieni i prawdopodobne jest spełnienie dodatkowego warunku wynikającego z korekcji innej aberracji. Brak pewności wynika stąd, że dla powstających tu równań drugiego stopnia wykluczane są rozwiązania nierzeczywiste.

W rezultacie dotychczasowych rozważań powstał układ soczewek cienkich o znanych mocach, kształtach i rozmieszczeniu oraz ze wstępnie skorygowanymi aberracjami.

Z kolei soczewkom nadawane są grubości d (rys. 6.18) ustalane w zależności od ich średnicy Φ , i mocy. Dla soczewek o mocy dodatniej (rys. 6.18a) warunkiem koniecznym jest zachowanie minimalnej grubości t na brzegu, natomiast dla soczewek ujemnych d — w środku. Konstrukcja zbyt cienkich soczewek stwarza trudności przy ich wykonywaniu, stąd zaleca się spełnienie niżej wymienionych warunków sprawdzonych doświadczalnie.

Warunki są różne, zależne od tego czy bezwzględna wartość stosunku średnicy soczewki Φ do jej ogniskowej f' jest mniejsza lub większa od 0,5

$$\begin{array}{ll} \text{dla } \left| \frac{\Phi}{f'} \right| < 0,5 & \text{dla soczewki dodatniej } d \geq 0,1 \Phi \left(1 - \left| \frac{\Phi}{f'} \right| \right) + 0,3 \text{ mm} \\ & \text{dla soczewki ujemnej } t \geq 0,1 \Phi \left(1 - \left| \frac{\Phi}{f'} \right| \right) + 0,3 \text{ mm} \\ \text{dla } \left| \frac{\Phi}{f'} \right| \geq 0,5 & \text{dla soczewki dodatniej } d \geq 0,05 D + 0,3 \text{ mm} \\ & \text{dla soczewki ujemnej } t \geq 0,05 D + 0,3 \text{ mm} \end{array}$$



Rys. 6.18

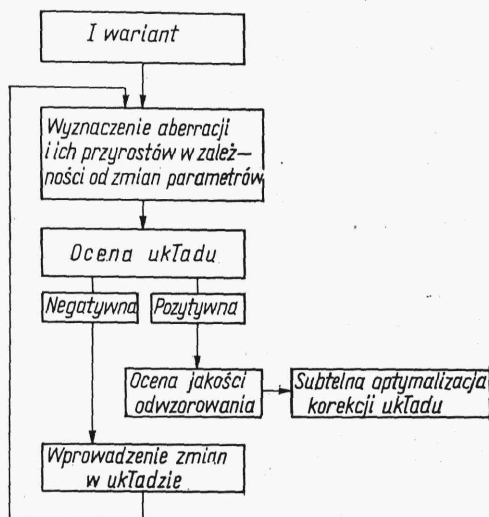
Wraz z uwzględnieniem grubości należałoby wprowadzić takie zmiany w układzie, które pozwoliłyby zachować ustalone poprzednio właściwości dla układu soczewek cienkich. Najczęściej utrzymywane są tylko ogniskowe poszczególnych soczewek drogą odpowiedniego doboru promienia krzywizny ich drugich powierzchni oraz tak zmieniane odstępów między soczewkami, aby odległości między ich płaszczyznami głównymi były takie same, jak dla soczewek cienkich. Spełnienie tych warunków pozwala utrzymać moc całego układu, lecz wprowadza pewną zmianę stanu korekcji. Z jednej strony można ją skompensować przez wyznaczenie aberracji III-ciego rzędu dla nowoustalonego układu i drogą zmian pewnych parametrów powrócić do stanu przyjętego dla soczewek cienkich, lub z drugiej strony, zaniedbać przechodząc do drugiego etapu korekcji tj. do obliczeń rzeczywistych aberracji. Pominiecie wpływu grubości soczewek na korekcję w pierwszym etapie może być o tyle usprawiedliwione, że ustalony wstępnie układ, ogólnie musi i tak podlegać dalszej korekcji, niezależnie od tego w jakim stopniu aberracje III-ciego rzędu zostały skompensowane. Wstępna ich korekcja wskazuje na obszar rozwiązania i zmniejsza tylko pracochłonność drugiego etapu, gdyż punktem wyjścia staje się układ w przybliżeniu skorygowany.

W drugim etapie, już dla ustalonego układu, korekcja polega na wyznaczaniu aberracji promieni oraz ich zmian w zależności od określonych zmian poszczególnych parametrów układu, a więc zmian promieni krzywizn soczewek, ich grubości, materiałów (szkieł) oraz odległości między soczewkami. Analizując wpływ tych zmian na aberracje można w sposób programowany tak zmieniać kształt układu, aby otrzymać optymalny stan korekcji. Schemat blokowy postępowania w tym przypadku pokazano na rys. 6.19.

W celu obliczenia aberracji geometrycznych należy wyznaczyć rzeczywiste przebiegi promieni przez układ dla ustalonego punktu przedmiotu i porównać ich położenie z punktem, w którym powinien powstać obraz, gdyby układ był bez aberracji.

Najpierw więc obliczone są parametry przestrzeni przyosiowej układu, a więc położenie ognisk, płaszczyzn głównych, ogniskowych, położenie płaszczyzny Gaussa dla danej płaszczyzny przedmiotu, powiększenia itp. Stąd dla danego położenia punktu przedmiotu, wychodząc z praw przestrzeni przyosiowej, można obliczyć już położenie jego obrazu doskonałego.

Wyznaczenie rzeczywistego przebiegu promienia przez układ odbywa się na drodze sukcesywnego stosowania prawa załamania na poszczególnych powierzchniach układu. Jeżeli ustalone są parametry promienia w przestrzeni przedmiotowej, można znaleźć jego ślad na pierwszej powierzchni układu, oraz kąt padania zawarty między promieniem a normalną wystawioną do powierzchni w punkcie przebicia. Z prawa załama-

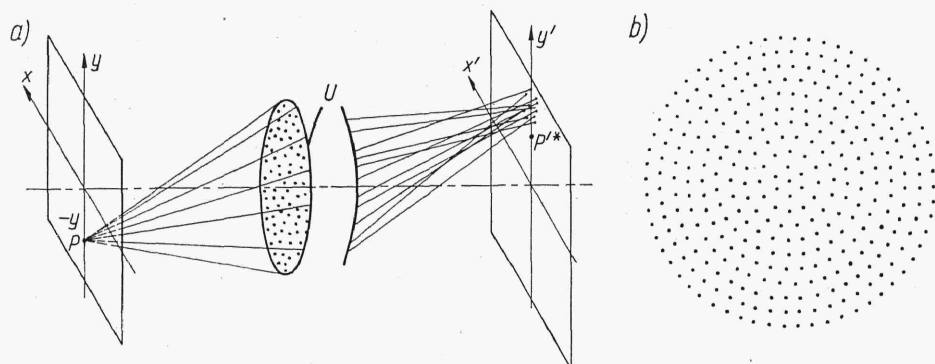


Rys. 6.19

nia określana jest płaszczyzna, w której leży promień załamany przez pierwszą powierzchnię i ponadto ustalony kąt załamania utworzony między promieniem a wspomnianą poprzednio normalną. W ten sposób dla danych parametrów promienia w przestrzeni przedmiotowej pierwszej powierzchni mogą być ustalone jego parametry w przestrzeni obrazowej tej powierzchni. Ponieważ przestrzeń ta jest równocześnie przestrzenią przedmiotową dla drugiej powierzchni, to kolejno powtarzając rozumowanie dla każdej z powierzchni układu można obliczyć parametry promienia w przestrzeni obrazowej całego układu.

Proces wyznaczania przebiegu promienia, z uwagi na wysoką dokładność obliczeń sięgającą zależnie od rodzaju układu nawet dziesięciu miejsc znaczących, jest niezwykle pracochłonny i ponadto z powodu wielokrotnego powtarzania tych samych operacji bardzo uciążliwy. Przykładowo dla promienia leżącego w płaszczyźnie południkowej zgodnie z (2.25) wyznaczenie przejścia przez jedną powierzchnię wymaga kilkunastu operacji obliczeniowych łącznie z korzystaniem z tablic funkcji trygonometrycznych. Dla promienia nie przecinającego się z osią optyczną (promień skośny), potrzeba już ich kilkudziesięciu. Dopiero zastosowanie elektronicznych maszyn cyfrowych praktycznie umożliwiło pełną analizę aberracji geometrycznych układu.

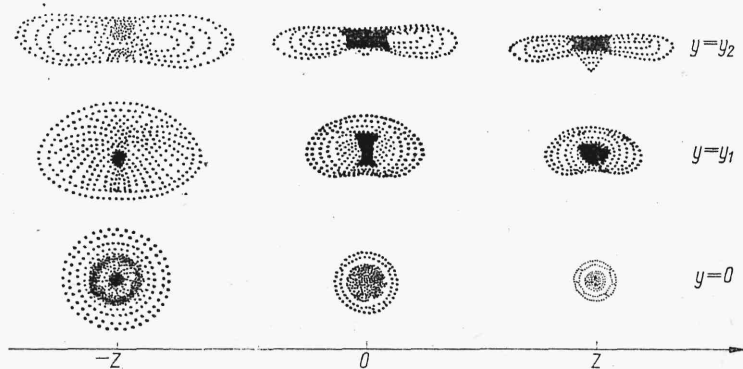
Najbardziej naturalnym sposobem ustalenia aberracji geometrycznych układu jest obliczenie parametrów promieni w jego przestrzeni obrazowej wychodzących z ustalonego punktu przedmiotu i przechodzących przez różne punkty źrenicy (rys. 6.20a). Na rysunku 6.20b przedstawiono przykładowe rozmieszczenia tych punktów w źrenicy.



Rys. 6.20

Promienie te utworzą pewien zbiór śladów (diagram śladów) w płaszczyźnie Gaussa układu, dający geometryczny kształt obrazu.

Na rys. 6.21 w środkowej kolumnie pokazany jest przykład diagramów pewnego układu dla punktów leżących na różnych odległościach y od osi optycznej. Można tu zaobserwować charakterystyczny wpływ różnych aberracji układu. Dla punktu leżącego na osi układu ($y = 0$) istnieje tylko aberracja sferyczna i stąd diagram ma obrotową oś symetrii. Wraz ze wzrostem kąta pola oprócz aberracji sferycznej, zaznacza swój wpływ koma i stąd diagram dla $y = y_1$ ma asymetryczną budowę. Dla dużego kąta pola ($y = y_2$) kształt diagramu jest narzucony głównie przez astygmatyzm i krzywiznę pola.



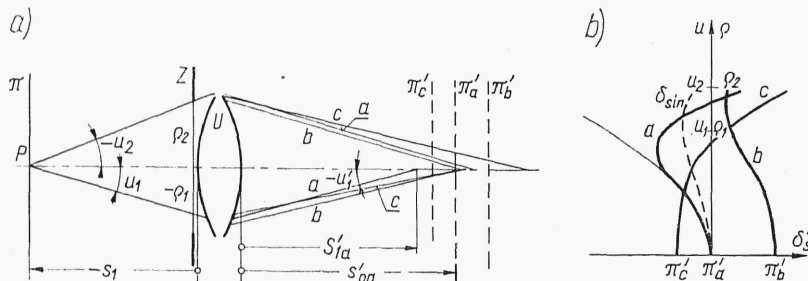
Rys. 6.21

Znając geometryczną budowę plamek rozproszenia dla różnych kątów pola można szacować już jakość odwzorowania i w ten sposób oceniać stan korekcji układu. W konsekwencji pozwala to również w drugim etapie analizować wpływ zmian poszczególnych parametrów układu na plamkę i tym samym ustalić pożądany kierunek zmian jego kształtu.

Sterowanie jednak korekcji aberracji za pomocą śledzenia zmian w plamkach aberracyjnych, jak to wynika z rozważań p. 6.4.1, nawet przy zastosowaniu elektronicznych maszyn cyfrowych jest czasochłonne. A ponieważ i tak metoda wyznaczania śladów w płaszczyźnie odbiornika nie uwzględnia zjawisk dyfrakcji i pozwala tylko w przybliżony sposób oce-

niać jakość odwzorowania, wygodniej jest, w momencie, gdy aberracje są jeszcze dość znaczne, opierać się na kryteriach jeszcze bardziej przybliżonych, ale prowadzących szybciej do celu. Dopiero przy końcowym kształtowaniu układu i ostatecznej ocenie jakości szczególnie w układach o wyższych wymaganiach powinny być brane pod uwagę odpowiednio dokładne metody analizy jakości obrazu.

Do powszechnie stosowanych przybliżonych metod oceny korekcji należy wyznaczenie przebiegu tylko tych promieni przez układ, które charakteryzują poszczególne aberracje chromatyczne I rzędu i monochromatycznego III-ciego rzędu.



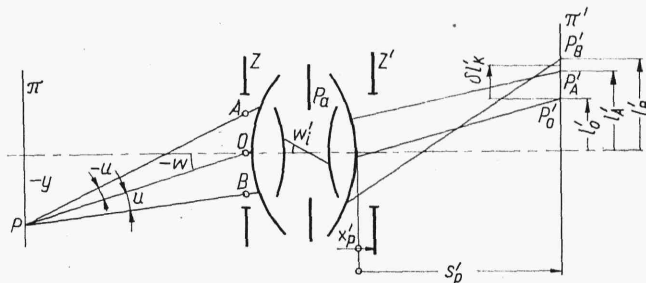
Rys. 6.22

I tak ponieważ aberracja sferyczna i chromatyzm położenia nie zależą od rozpatrywanego punktu w polu widzenia, stąd wyznaczone są tylko dla ośrodka pola (rys. 6.22). Płaszczyzny π i π'_a są sprzężone w przestrzeni przysioiowej dla ustalonej długości fali a . Z uwagi na obrotową oś symetrii układu wystarczy rozważyć tylko kilka promieni idących pod różnymi kątami aperturowymi u do osi lub, co na jedno wychodzi, przecinającymi źrenicę wejściową na różnych wysokościach ρ . W przestrzeni obrazowej promienie te będą przecinały się z osią na różnych odległościach od płaszczyzny Gaussa π'_a . Odległość $\delta s'_a = -S'_a - s'_{oa}$ nazywana jest zgodnie z p. 2.6.1 podłużną aberracją sferyczną dla długości fali a . Aberracja ta zwyczajowo przedstawiana jest na wykresie (rys. 6.22b), przy czym wartości na nim naniesione odpowiadają przykładowej sytuacji pokazanej na rys. 6.22a. Wyznaczając przebieg tych samych promieni dla różnych długości fal b, c otrzymuje się łącznie aberrację sferochromatyczną. Dla przejrzystości rysunku promienie w przestrzeni obrazowej doprowadzone zostały tylko do osi optycznej i narysowane po obydwu jej stronach.

Mimo, że o jakości odwzorowania układu decyduje wielkość plamki rozproszenia, a więc aberracja chromatyczna, czy sferyczna poprzeczna, układ charakteryzowany jest wielkościami podłużnymi. Wynika to po pierwsze z niezależności tych aberracji od znaku kąta aperturowego u , i co ważniejsze, od wyboru płaszczyzny odniesienia π' , gdyż przesuwając się wtedy tylko zero na wykresie. Plamkę natomiast można odtworzyć na podstawie danych z wykresu korzystając z zależności (2.72).

Na marginesie omawianego zagadnienia warto tu dodać, że przedstawiony wykres aberracji układu wskazuje na pewne cechy korekcji. Wiadomo z p. 2.6.1 że poprzeczna aberracja sferyczna trzeciego rzędu jest proporcjonalna do trzeciej potęgi otworu (e^3). Uwzględniając zależność (2.72) oznacza to, że podłużna aberracja sferyczna III-ciego rzędu jest proporcjonalna do kwadratu otworu (e^2), a więc wartość jej rośnie wraz ze wzrostem kąta u . Dość złożony wykres aberracji sferycznej dla długości fali a

(rys. 6.22b) jest wynikiem kompensacji aberracji trzeciego rzędu, przez aberrację wyższych rzędów. Przebieg samej aberracji sferycznej trzeciego rzędu zaznaczono na wykresie cienką linią. Układ ponadto nie ma skorygowanej całkowicie aberracji chromatycznej położenia opisanej zależnością (2.97), ponieważ płaszczyzny *Gausa* dla różnych długości fal nie pokrywają się ze sobą. Wspólny punkt przecięcia na osi natomiast dla różnych długości fal mają promienie idące poza przestrzenią przyosiową, przykładowo dla długości fal *b* i *c* idące pod kątem $u = u_1$. Jest to pewna prawidłowość w korekcji aberracji, ponieważ łatwo wykazać, że wtedy plamka rozproszenia pochodząca od aberracji chromatycznej położenia jest mniejsza, niż w przypadku ścisłego zachowania warunku korekcji w przestrzeni przyosiowej.



Rys. 6.23

W celu wyznaczenia wpływu komy w układzie dla każdego z rozważanych punktów *P* pola widzenia prowadzone są trzy promienie (rys. 6.23), promień główny *PO* oraz dwa symetryczne względem niego promienie *PA* i *PB* leżące we wspólnej płaszczyźnie południkowej. Zmiany kąta *u* pozwalają wyznaczyć wartości aberracji dla różnych kątów aperturowych. Jeżeli nie ma w układzie winietowania geometrycznego, promień główny będzie przechodził przez środek źrenicy wejściowej.

Gdyby układ obciążony był tylko czystą aberracją komy III-ciego rzędu, wówczas zgodnie z p. 2.6.1 ślad P'_0 promienia *PO* w płaszczyźnie *Gausa* π' wyznaczałby położenie obrazu doskonałego, natomiast ślady P'_A i P'_B promieni *PA* i *PB* powinny pokrywać się ze sobą. Brak ich rzeczywistego pokrycia wynika z obecności równocześnie aberracji sferycznej, krzywizny pola i aberracji wyższych rzędów. Zgodnie z rysunkiem (2.60) i (6.23) miarą komy południkowej $\delta l'_k$ układu będzie

$$\delta l'_k = \frac{l'_A + l'_B}{2} - l'_0 \quad (6.21)$$

Zagadnienie wyznaczenia wpływu komy wygląda tak prosto, jeżeli przysłona aperturowa P_a układu leży w przestrzeni przedmiotowej, a więc jest równocześnie źrenicą wejściową. Ogólnie biorąc może się ona znajdować w dowolnym miejscu układu (rys. 6.23) i wtedy, z uwagi na aberracje w źrenicach, położenie źrenicy jest funkcją położenia punktu *P* w polu widzenia, a więc zależy od współrzędnej *y* lub, co na jedno wychodzi, od kąta pola widzenia *w*.

Ponieważ promień główny musi przejść przez środek przysłony aperturowej, to najwygodniej obliczenia jest rozpoczynać od przestrzeni, w której umieszczona jest rzeczywista przysłona i prowadzić je w dwóch kierunkach: 1) w stronę przestrzeni przedmiotowej i ustalić w ten sposób

położenie punktu P odpowiadającego kątowi w'_i , jaki tworzy promień główny z osią w przestrzeni przysłony aperturowej; 2) w stronę przestrzeni obrazowej i znaleźć punkt P'_0 . Pozostałe dwa promienie PA i PB wyprowadzone są z punktu P symetrycznie względem promienia głównego.

Dla małych kątów pola koma południkowa może być również oceniana na podstawie przebiegów promieni dla środka pola widzenia. Wiadomo z p. 2.6.3, że jeżeli zachowane jest stygmatyczne odwzorowanie przez układ dla punktu na osi układu, to warunkiem zachowania podobnego odwzorowania dla innego punktu leżącego w bezpośrednim sąsiedztwie w płaszczyźnie prostopadłej do osi jest spełnienie warunku sinusów (2.115). Odstępstwo od wymienionego warunku będzie miarą aberracji w tym punkcie.

Ogólnie układ ma również aberracje dla środka pola i wtedy można wykazać [6], że miarą południkowej komy układu, zgodnie z oznaczeniami rys. 6.23, będzie

$$\delta l'_k = -3l'_0 \left(\frac{\delta s'}{s'_p - x'_p} + \delta_{sin} \right) \quad (6.22)$$

gdzie:

$\delta s'$ — podłużna aberracja sferyczna na osi układu wyznaczona dla określonego kąta aperturowego u (rys. 6.22a),

δ_{sin} — odstępstwo układu od warunku sinusów
przy czym

$$\delta_{sin} = \beta \frac{n' \sin u'}{n \sin u} - 1 \quad (6.23a)$$

gdzie:

u' — kąt aperturowy przestrzeni obrazowej dla rzeczywistego promienia idącego pod kątem u w przestrzeni przedmiotowej,

β — powiększenie poprzeczne układu między płaszczyznami π i π' (wyznaczone dla przestrzeni przysioowej).

Zależność (6.22) jest słuszna dla aberracji III-ego rzędu.

Dla przedmiotu nieskończenie odległego z uwagi na nieoznaczoność warunku (6.23a) ($u = 0$ i $\beta = 0$) konieczne jest jego przekształcenie. Ponieważ $\beta\gamma = n/n'$ i $\gamma = u'_0/u_0$, gdzie u'_0 i u_0 określane są w przestrzeni przysioowej, to

$$\beta \frac{n'}{n} \frac{\sin u'_0}{\sin u} = \frac{1}{\gamma} \frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{u_0}{u'_0} \frac{\sin u'}{\sin u}$$

Mnożąc licznik i mianownik przez s_1 , ponieważ dla $s_1 \rightarrow \infty$ w granicy zgodnie z oznaczeniami na rys. 6.24 będzie $s_1 \sin u = h$, $u_0 s_1 = h_0$ i $h_0 = f'u'_0$, ostatecznie

$$\delta_{sin} = f' \frac{\sin u'}{h} - 1 \quad (6.23b)$$

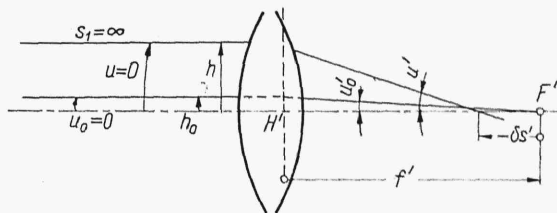
gdzie:

h i u' — wartości określane dla promienia rzeczywistego,

f' — ogniskowa wyznaczona zgodnie z definicją w przestrzeni przysioowej.

Wartości δ_{sin} obliczane są na podstawie przebiegów promieni wychodzących ze środka pola widzenia i nanoszone również na wykresie aberracji sferochromatycznej (rys. 6.22b). Znając odległość płaszczyzny obra-

zu od źrenicy wyjściowej, na podstawie danych wykresu można odtworzyć z (rys. 6.22) wartości komy południkowej dla punktów przedmiotu leżących pod małymi kątami pola.



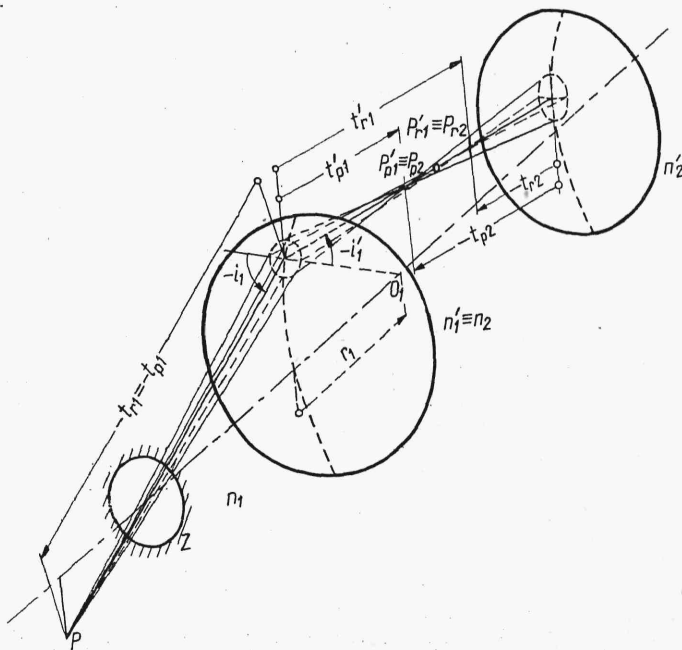
Rys. 6.24

Z warunku (6.22), aby układ dla małych kątów pola i apertury nie wno-
sił komy wystarcza

$$\frac{\delta s'}{s'_p - x'_p} + \delta_{sin} = 0$$

Jest to tzw. *warunek izoplanatyzmu*, który jest uogólnieniem warunku sinusów. Jeżeli jest on spełniony dla każdego kąta aperturowego, wówczas aberracje układu dla punktów bliskich leżących w płaszczyźnie prostopadłej do niej są takie same, jak dla punktu leżącego na osi.

Astygmatyzm i krzywizna pola są aberracjami, które zależą od drugiej potęgi kąta pola i pierwszej potęgi otworu. W celu uwypuklenia ich



Rys. 6.25

wpływu należy więc rozpatrywać promienie idące pod małymi kątami względem promienia głównego (małe wartości φ), gdyż w przeciwnym przypadku nałożył się jednocześnie wpływ komy i aberracji sferycznej.

Niech PO (rys. 6.25) będzie promieniem głównym dla przedmiotowego punktu P , zaś Z — żrenicą wejściową układu. Rozważmy najpierw jedną powierzchnię sferyczną układu przekształcającą nieskończenie wąski pęk promieni wychodzący z punktu P i obejmujący promień główny. Odległość punktu P po promieniu od śladu promienia głównego na powierzchni sfery oznaczona została przez t . Promienie pęku biegnące w przekroju południkowym i równoleżnikowym zostaną załamane w różny sposób i niech P'_p będzie punktem przecięcia się promieni pęku dla przekroju południkowego (astygmatyczne ognisko południkowe p. 2.6.1) i P'_r — dla przekroju równoleżnikowego (astygmatyczne ognisko równoleżnikowe). Można udowodnić [6], że dla obydwu przekrojów zgodnie z oznaczeniami na rysunku jest spełnione

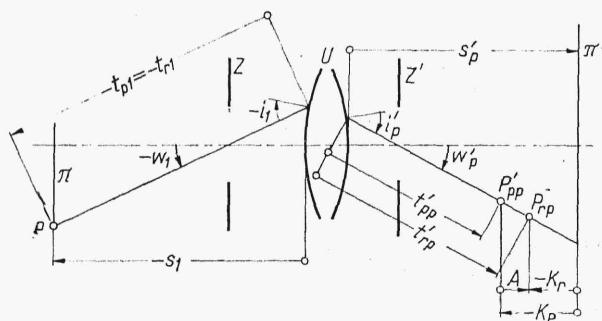
$$\frac{n' \cos^2 i'}{t'_p} - \frac{n^2 \cos^2 i}{t_p} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \quad (6.24a)$$

$$\frac{n'}{t'_r} - \frac{n}{t_r} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \quad (6.24b)$$

Oznacza to, że jeżeli znane są parametry powierzchni sferycznej (n , n' , r) oraz kąta padania i załamania (i , i') dla promienia głównego, to dla danego t_p , czy t_r , można znaleźć t'_p lub t'_r . W ten sposób można wyznaczyć przekształcenia nieskończenie wąskich pęków niezależnie w obu przekrojach.

Dla pierwszej powierzchni sferycznej układu, zgodnie z rys. 6.25, $t_{r1} = t_{p1}$, a więc z równania (6.24) dla $i_1 \neq 0$ $t'_{r1} \neq t'_{p1}$. Zamiast pęku promieni otrzymuje się wiązkę astygmatyczną, której kształt opisany został w p. 2.6.1.

Jeżeli rozpatrywany jest układ optyczny złożony z pewnej liczby powierzchni sferycznej, to dla każdej z nich można wyznaczyć za pomocą wzorów (6.24) niezależnie przebiegi promieni w płaszczyźnie południkowej i równoleżnikowej, uważając astygmatyczne ognisko dane przez pierwszą sferę za przedmiot dla drugiej ($P'_{p1} \equiv P_{p2}$, $P'_{r1} \equiv P_{r2}$). Ten sam zabieg należy powtórzyć dla powierzchni trzeciej, czwartej itd., aż otrzymane zostaną odległości t'_{pp} i t'_{rp} (rys. 6.26) ognisk astygmatycznych całego



Rys. 6.26

układu od śladu promienia głównego na ostatniej powierzchni p . Z prostych zależności geometrycznych można wtedy wyznaczyć wartości krzywizny pola (K_p i K_r) oraz astygmatyzmu A . π' — jest płaszczyzną Gaussa.

Gdyby układ był obciążony tylko dystorsją, to obraz punktu byłby stygmatyczny i powstawałby w płaszczyźnie Gaussa. Oznacza to, że dla

wyznaczenia wpływu dystorsji wystarczy rozważyć tylko jeden z promieni, który z założenia nie będzie wносił innych aberracji. Zgodnie z wyrażeniem (2.69) takim promieniem jest promień polowy, dla którego $\varrho = 0$, lub ogólniej promień główny, kiedy brane są pod uwagę również układy z winietowaniem geometrycznym.

Zgodnie z wyrażeniem (2.82) i oznaczeniami na rys. 6.23, ponieważ $\beta_w = l'_0/y$, to

$$Dyst = \frac{1}{\beta} \frac{l'_0}{y} - 1$$

gdzie β — jest powiększeniem wyznaczonym w przestrzeni przyosiowej.

Pozostaje jeszcze do oceny chromatyzm wielkości. Zgodnie z ustaleniem punktu 2.6.2 jest to odległość śladów promienia głównego w płaszczyźnie *Gaussa* wyznaczonych dla różnych długości fali. Jeżeli przysłona aperturowa znajduje się w przestrzeni przedmiotowej, wówczas dla danego punktu P , a więc i promienia głównego przestrzeni przedmiotowej otrzymywany jest zbiór punktów P'_0 dla różnych długości fal i odpowiadających mu odległości l'_0 . Dla długości fal a i b względna wartość chromatyzmu wielkości wyniesie

$$\frac{\Delta L'}{l'_0} = \frac{l'_{0a} - l'_{0b}}{l'_{0b}} = \frac{l'_{0a}}{l'_{0b}} - 1$$

Zagadnienie to jest trudniejsze, jeżeli przysłona aperturowa jest w środku układu, gdyż z uwagi na chromatyzm w źrenicach różne będą położenia źrenicy wejściowej dla różnych długości fal. Najczęściej wystarczy wtedy, podobnie jak przy obliczaniu komy, wyznaczyć położenie promieni w dwóch kierunkach układu zaczynając od środka przysłony aperturowej. Zakładając ten sam kąt w'_i (rys. 6.23) dla długości fali a i b otrzymane zostaną odpowiednio odległości od osi y_a , y_b i l'_{0a} , l'_{0b} śladów promieni głównych z płaszczyzną przedmiotową i obrazową. Najczęściej różnica $y_a - y_b$ w porównaniu z y jest mała i można jej wpływ pominąć przyjmując, że miarą chromatyzmu wielkości będzie wyrażenie

$$\frac{\Delta L'}{l'_0} = \frac{\frac{l'_{0a}}{y_a} - \frac{l'_{0b}}{y_b}}{\frac{l'_{0b}}{y_b}} = \frac{l'_{0a}}{l'_{0b}} \frac{y_b}{y_a} - 1$$

Jak już wspomniano wyznaczenie wpływu poszczególnych aberracji metodami wyżej podanymi na kształt plamki aberracyjnej jest przybliżoną oceną jakości odwzorowania. Poza środkiem pola widzenia, gdzie aberracja sferochromatyczna pod względem geometrycznym całkowicie charakteryzuje obraz, dla kątów pola różnych od zera wszystkie aberracje w dość złożony sposób na siebie się nakładają. Przykładem może tu być koma i dystorsja. Ta ostatnia oceniana jest za pomocą przebiegu promienia głównego. W rzeczywistości, z uwagi na obecność komy i innych aberracji asymetrycznych wyższych rzędów, obraz punktu będący plamką rozproszona nie ma budowy symetrycznej względem śladu promienia głównego. „Środek” plamki definiujący dla danego odbiornika położenie obrazu punktu w jego płaszczyźnie, jest przesunięty względem wspomnianego śladu, a więc na przemieszczenie aberracyjne obrazu w płaszczyźnie odbiornika wpływa również koma.

Przy ocenie stanu korekcji układu zaletą ustalania roli poszczególnych aberracji w tworzeniu się struktury plamki aberracyjnej, w porównaniu z wyznaczeniem samego kształtu plamki, jest znacznie mniejsza pracochłonność. Mniejsza jest liczba rozważanych promieni, a co istotniejsze poza astygmatyzmem rozpatrywane są tylko promienie leżące w płaszczyźnie południkowej. Praktycznie tylko ten sposób obliczeń jest możliwy przy prowadzeniu korekcji układów za pomocą kalkulacyjnych maszyn ręcznych lub elektrycznych.

Po wyznaczeniu aberracji zgodnie ze schematem 6.19 następuje wstępna ocena układu. Opiera się ona najczęściej na porównaniu wyników obliczeń z rezultatami uzyskanymi dla wcześniej projektowanych układów, lub na wyznaczaniu wpływu poszczególnych aberracji układu na wymiar plamki aberracyjnej. Dopuszczalna jej wartość będzie zależała od zastosowanego odbiornika i wymagań stawianych odwzorowaniu.

Jeżeli ocena korekcji jest negatywna, wówczas na podstawie wpływu poszczególnych parametrów na aberracje, wprowadzone są takie ich zmiany w układzie, które będą poprawiały ogólny stopień korekcji.

Najbardziej pożądany jest wybór zmiany tych parametrów, które wpływają silnie na pojedyncze aberracje, szczególnie podlegające dalszej korekcji, natomiast wprowadzają niewielkie zmiany w pozostałych.

Na ogół jednak zmiana jednego z parametrów powoduje równoczesną zmianę kilku aberracji i nie dla wszystkich jednocześnie w pożądanym kierunku. Stąd istnieje konieczność wprowadzenia grupowych zmian parametrów dobieranych w ten sposób, aby wpływ ich nawzajem odpowiednio się kompensował. Problem rozwiązywany jest najczęściej przez interpolację lub ekstrapolację przy założeniu liniowej zależności między zmianami aberracji i parametrów.

Ponieważ funkcja opisująca zmiany aberracji jest nieliniowa, to po wprowadzeniu zmian proces obliczeniowy należy rozpoczynać od początku przez wyznaczenie aberracji i ich zmian dla nowego układu. Zabiegi iteracyjne kontynuowane są do momentu, gdy dalsze zmiany nie prowadzą do poprawy stanu korekcji układu. Otrzymane rozwiązanie nie musi spełniać stawianych mu na początku wymagań. Oznaczać to będzie, że z jednej strony dla wybieranego typu układu postawione zostały zbyt wygórowane żądania lub z drugiej strony, gdy istnieje możliwość porównań ze znanymi konstrukcjami, że niezbyt szczęśliwie wybrany został we wstępnych obliczeniach obszar rozwiązania.

Przy pozytywnej ocenie korygowanego układu przeprowadzana jest analityczna ocena jakości odwzorowania za pomocą metod bardziej dokładnych (p. 6.4). Dla układów o wyższych wymaganiach mogą one być podstawą do subtelnej optymalizacji korekcji. Przy typowych rozwiązaniach ze względnie niskimi wymaganiami można poprzestać na przybliżonej ocenie układów sprawdzając poprawność konstrukcji przy badaniu prototypu.

6.3. Zastosowanie cyfrowych maszyn elektronicznych w obliczeniach układów optycznych

Niezwykła pracochłonność procesu oraz typowość i powtarzalność pewnych operacji, są to wszystko elementy, które w szczególny sposób wiążą korekcję układów optycznych z cyfrowymi maszynami elektronicznymi.