

Przedstawiona tu szczegółowa analiza jakości odwzorowania układu na drodze wyznaczenia rozkładu intensywności w płaszczyźnie aberracyjnej, bądź, o czym mowa będzie w następnym punkcie, drogą obliczenia optycznej funkcji przenoszenia, jest pracochłonna i nie zawsze ekonomicznie uzasadniona. Na przykład dla układów typowych o niezbyt wysokich wymaganiach i względnie prostej budowie taniej jest poprzestać na przybliżonej ocenie i przeprowadzić badania nad dokładnie wykonanym prototypem.

#### 6.4.2. Optyczna funkcja przenoszenia

Optyczna funkcja przenoszenia, mimo że wyznaczana jest za pomocą obrazu punktu, daje bardziej uniwersalną od niego charakterystykę, gdyż pozwala wnioskować o sposobie odwzorowania w płaszczyźnie obrazu dla złożonych rozkładów intensywności płaszczyzny przedmiotu. Pracochłonność obliczeń jest jednak znaczna i technika ta stosowana jest wyłącznie przy układach o wysokich wymaganiach do subtelnej optymalizacji korekcji i ostatecznej oceny jakości. Zwraca się uwagę, że nie wystarczy wyznaczyć funkcji przenoszenia w określonej płaszczyźnie obrazu. Podobnie jak i przy jej pomiarach (p. 7.4) konieczna jest znajomość funkcji dla różnych wartości przeogniskowania, dla światła białego i monochromatycznego, dla różnych otworów (w obiektywach zdjęciowych gdzie istnieje możliwość zmiany otworu) i kątów pola oraz przynajmniej dwóch azymutów.

W tym ostatnim przypadku, jeżeli rozpatruje się punkty przedmiotu leżące poza osią optyczną, z uwagi na brak symetrii w jego obrazie, funkcja przenoszenia będzie zależała od kierunku zmian intensywności w płaszczyźnie przedmiotu. Zwykle rozważane są zmiany zachodzące w płaszczyźnie południkowej i równoleżnikowej.

Jeżeli nawet wyznaczone zostaną wartości funkcji dla przytoczonych wyżej warunków, to z uwagi na dużą ilość informacji o układzie powstaje zagadnienie ustalenia syntetycznego wskaźnika, który by jednoznacznie charakteryzował jakość układu. Za miarę tej ostatniej przyjmowane jest często pole między krzywą  $d_{na}(\tilde{x})$  wyznaczoną z obliczeń i teoretyczną  $d_{nt}(\tilde{x})$  dla układu bezaberracyjnego (rys. 6.36 — pole wyróżnione przez zakreskowanie). Im mniejsze jest pole procentowo w stosunku do pola zawartego pod krzywą teoretyczną, tym układ ma wyższą jakość. Układu nie można jednak rozpatrywać w oderwaniu od przedmiotu i odbiornika. Przykładowo jeżeli przedmiotem byłby test sinusoidalny o ustalonej częstotliwości, wtedy wystarczy rozważać spadek modułu funkcji przenoszenia w stosunku do wartości teoretycznej dla jednej częstotliwości odpowiadającej częstotliwości testu. Na ogół jednak rozkład intensywności przedmiotu, np. w przypadku obiektywu fotograficznego, nie jest ustalony i w tym przypadku z punktu widzenia przedmiotu należy rozważać szeroki przedział widma, a jakość układu rozpatrywać tylko w aspekcie jego współpracy z odbiornikiem.

Niech przez  $d_0(\tilde{x})$  oznaczona będzie funkcja przenoszenia odbiornika. Jeżeli założymy, że w rozpatrywanym przedziale widma dany odbiornik jest układem liniowym<sup>1)</sup>, to funkcję przenoszenia  $d_z(\tilde{x})$  zespołu układ op-

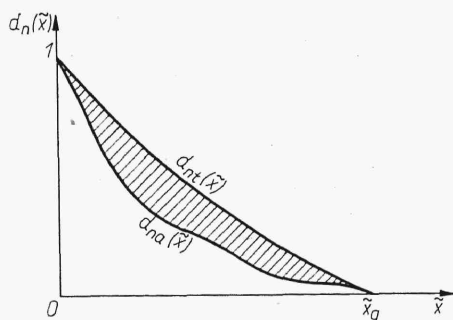
<sup>1)</sup> Układ nazywa się liniowym, jeżeli sygnał wejściowy harmoniczny  $p(\tilde{x})$  daje wyjście harmoniczne  $p'(\tilde{x}) = C p(\tilde{x})$ , gdzie  $C$  jest stałą. W układzie nieliniowym wzbudzone są wtórne harmoniczne, co między innymi występuje w emulsji fotograficznej. Zgodnie z wyrażeniem (3.138) układ optyczny jest układem liniowym.

tyczny-odbiornik można wyznaczyć z zależności

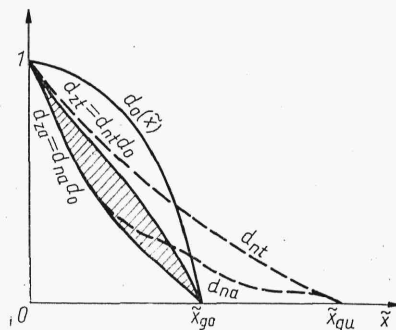
$$d_z(\tilde{x}) = d_n(\tilde{x}) d_0(\tilde{x}) \quad (6.41)$$

gdzie  $d_n(\tilde{x})$  jest funkcją przenoszenia dla układu optycznego.

Dla danego odbiornika z równania (6.41) można kolejno ustalić funkcje przenoszenia zespołu  $d_{za}(\tilde{x})$  i  $d_{zt}(\tilde{x})$  odpowiednio dla układu optycznego aberracyjnego i teoretycznego. Pole zawarte między wspomnianymi funkcjami (rys. 6.37) będzie lepiej charakteryzowało straty w jakości obrazu



Rys. 6.36



Rys. 6.37

spowodowane aberracjami układu przy współpracy z danym odbiornikiem. Różnica w stosunku do rozważań prowadzonych tylko dla wyizolowanego układu jest szczególnie istotna, kiedy częstość graniczna  $\tilde{x}_{go}$  odbiornika jest znacznie niższa od częstości  $\tilde{x}_{gu}$  układu optycznego.

Za pomocą tego samego aparatu pojęć można zresztą również charakteryzować jakość odbiornika, jeżeli następuje zmiana jego parametrów lub ogólniej rozważać problem dopasowania układu optycznego do odbiornika i odbiornika do układu.

Przedstawiona niżej metoda wyznaczania optycznej funkcji przenoszenia z uwagi na jej geometryczny punkt widzenia jest poprawna tylko dla układów o dużych aberracjach. Zagadnienie to jest przedstawione szerzej wraz z omówieniem tolerancji oraz uwzględnieniem metod biorących pod uwagę wpływ dyfrakcji w [8], [9] i [10].

Dla struktury jednokierunkowej zmieniającej się na przykład w kierunku osi  $x'$ , zgodnie z p. 3.3.6, przez optyczną funkcję przenoszenia rozumie się przekształcenie Fouriera rozkładu intensywności w obrazie linii, tzn.

$$d(\tilde{x}, 0) = F[P'_l(x')] = \int_{-\infty}^{\infty} P'_l(x') \exp(-2\pi i \tilde{x} x') dx' \quad (6.42)$$

gdzie przez  $P'_l(x')$  zgodnie ze wzorem (3.148) oznaczono rozkład intensywności w obrazie linii;  $\tilde{x}$  — częstość przestrzenna harmonicznej rozkładu intensywności w płaszczyźnie obrazu.

Wartość znormowana funkcji przenoszenia

$$d_n(\tilde{x}) = \frac{d(\tilde{x}, 0)}{d(0, 0)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P'_l(x') \exp(-2\pi i \tilde{x} x') dx'}{\int_{-\infty}^{\infty} P'_l(x') dx'} \quad (6.43)$$

Ale ponieważ  $\exp(ix) = \cos x + i \sin x$ , stąd

$$d_n(\tilde{x}) = d_{nc}(\tilde{x}) - i d_{ns}(\tilde{x}) \quad (6.44)$$

gdzie

$$d_{nc}(\tilde{x}) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P_l(x') \cos(2\pi \tilde{x}x') dx'}{\int_{-\infty}^{\infty} P_l(x') dx'} \quad (6.45a)$$

$$d_{ns}(\tilde{x}) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P_l(x') \sin(2\pi \tilde{x}x') dx'}{\int_{-\infty}^{\infty} P_l(x') dx'} \quad (6.45b)$$

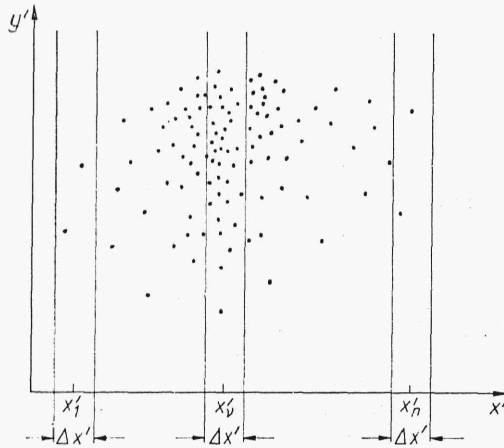
Jeżeli znane będą wartości  $d_{nc}(\tilde{x})$  i  $d_{ns}(\tilde{x})$ , wówczas zgodnie z wyrażeniem (3.145) moduł funkcji przenoszenia zwany *funkcją przenoszenia kontrastu* można obliczyć z zależności

$$|d_n(\tilde{x})| = \sqrt{d_{nc}^2 + d_{ns}^2} \quad (6.46)$$

natomiast fazę optycznej funkcji przenoszenia

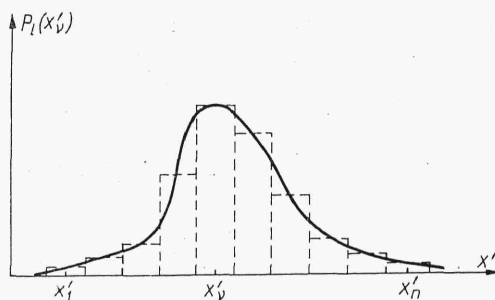
$$\Theta = \arctg\left(\frac{d_{ns}}{d_{nc}}\right) \quad (6.47)$$

Wartości  $d_{nc}$  i  $d_{ns}$  można wyznaczyć w sposób przybliżony za pomocą diagramu śladów w obrazie punktu (rys. 6.38). Ponieważ rozkład inten-



Rys. 6.38

sywności w obrazie linii zgodnie z wzorem (3.148) jest sumą rozkładu intensywności w obrazie punktu w kierunku prostopadłym do rozpatrywanego kierunku zmian, wówczas dzieląc diagram śladów na  $n$  odpowiednio wąskich pasków o szerokości  $\Delta x'$  i zliczając kolejno liczbę śladów  $N_v$  w każdym pasku ( $v = 1, 2, \dots, n$ ) otrzymuje się rozkład intensywności w obrazie linii (rys. 6.39), ponieważ wtedy  $P_l(x'_v) = N_v$ . Zastępując całkę przez sumę



Rys. 6.39

przy założeniu, że  $\Delta x'$  jest stałe, zamiast równań (6.45) można napisać

$$d_{nc}(\tilde{x}) = \frac{\sum_{v=1}^n P'_l(x'_v) \cos(2\pi \tilde{x} x'_v) \Delta x'}{\sum_{v=1}^n P'_l(x'_v) \Delta x'} = \frac{\sum_{v=1}^n P'_l(x'_v) \cos(2\pi \tilde{x} x'_v)}{\sum_{v=1}^n P'_l(x'_v)} \quad (6.48a)$$

$$d_{ns}(\tilde{x}) = \frac{\sum_{v=1}^n P'_l(x'_v) \sin(2\pi \tilde{x} x'_v)}{\sum_{v=1}^n P'_l(x'_v)} \quad (6.48b)$$

Wartości  $d_{nc}(\tilde{x})$  i  $d_{ns}(\tilde{x})$  wyznaczone są sukcesywnie z równań (6.48) dla różnych wartości  $\tilde{x}$ , co pozwala z wzorów (6.46) i (6.47) znaleźć optyczną funkcję przenoszenia (jej fazę i funkcję przenoszenia kontrastu) jako funkcję częstotliwości  $\tilde{x}$ .

#### Literatura

1. Bartkowska J. i inni: Podstawy optyki instrumentalnej. Rozdz. 6. Warszawa 1957. PWT.
2. Кругер М. Я.: Справочник конструктора оптико-механических приборов. Москва 1963. Гос. Науч. Техн. Изд. Маш. Лит.
3. Чуриловский В. Н.: Теория оптических приборов. Москва 1966. Изд. „Машиностроение”.
4. Туригин И. А.: Прикладная оптика. Москва 1965, 1966. Изд. „Машиностроение”.
5. Русинов М. М.: Габаритный расчет оптических систем. 1959. Изд. Геод. Литер.
6. Слюсарев Г. Г.: Методы расчета оптических систем. Ленинград 1969. ОНТИ.
7. Smith Warren J.: Modern Optical Engineering. New York 1966. McGraw-Hill Book Company.
8. Cox A.: A System of Optical Design. London 1964. The Focal Press.
9. Maréchal A., Françon M.: Diffraction. Structures des Images. Paris 1960. Edit. de la Revue d'Optique (tłum. na ros.).
10. Linfoot E. H.: Qualitätsbewertung optischer Bilder. Braunschweig 1960. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (tłum. na ang.).