

Dla każdego z typów układu można eksperymentalnie ustalić dopuszczalne zmiany w obrazach testu, co może być podstawą oceny prawidłowości jego montażu.

Do badania jakości montażu można więc zastosować dowolny test, gdyż i tak kryterium jakości ustalone jest eksperymentalnie. Np. polska norma BN-65/5524-02 zaleca badanie obiektów fotograficznych i powiększalnikowych za pomocą testu pierścieniowego (rys. 7.17), kiedy ustalana jest zdolność rozróżniania tylko dwóch linii. W teście rozmieszczonych jest współosiowo kilka grup tych linii ze zmiennymi stopniowo odległościami między nimi. Zaletą tego testu w porównaniu z testem *Foucaulta* są jego mniejsze wymiary, a tym samym zmniejszenie wpływu zmiany położenia grupy testowej na wyznaczenie jakości układu w danym punkcie pola oraz możliwość ustalenia właściwości obrazu w dowolnym przekroju, a nie tylko w kierunkach danych przez położenie linii testu *Foucaulta*.

7.4. Pomiar optycznej funkcji przenoszenia dla oświetlenia niekoherentnego

Na podstawie przekształcenia *Fouriera* (rozdz. 8) wiadomo, że każdy rozkład intensywności można rozłożyć na zbiór rozkładów harmonicznym o różnych częstościach. Wynika stąd, że badanie właściwości układu tylko dla rozkładów harmonicznym w paśmie częstości przenoszonym przez układ pozwala ustalić odwzorowanie układu dla dowolnego rozkładu intensywności. Pomiar optycznej funkcji przenoszenia daje więc najbardziej ogólną i wszechstronną ocenę jakości układu i dlatego znalazł szczególne zastosowanie do badań obiektów fotograficznych.

Niech w płaszczyźnie przedmiotu będzie sinusoidalny rozkład intensywności o częstości \tilde{x} w danym kierunku x . Ponieważ układ optyczny jest elementem liniowym (p. 3.3.6), to w płaszczyźnie obrazu również będzie rozkład sinusoidalny ale o częstości $\tilde{x}' = \tilde{x}/\beta$, gdzie β jest powiększeniem poprzecznym między płaszczyzną przedmiotu i obrazu. Jeżeli przez $p(\tilde{x})$ oznaczona będzie amplituda rozkładu sinusoidalnego w płaszczyźnie przedmiotu, to amplitudę w płaszczyźnie obrazu można znaleźć z zależności

$$p'(\tilde{x}') = d(\tilde{x}) p(\tilde{x}) \quad (7.1)$$

gdzie $d(\tilde{x})$ — optyczna funkcja przenoszenia dla częstości \tilde{x} ; $p(\tilde{x})$ oraz $d(\tilde{x})$, a więc w konsekwencji i $p'(\tilde{x}')$ są wielkościami zespolonymi. Przykładowo będzie $p(\tilde{x}) = |p(\tilde{x})| \exp(i\Theta_p)$. Parametr Θ_p — będący argumentem $p(\tilde{x})$ — uwzględnia początkową fazę zależną od przyjętego punktu odniesienia w płaszczyźnie przedmiotu. Argument $d(\tilde{x})$ opisuje wpływ układu na przesunięcie fazy rozkładu sinusoidalnego w płaszczyźnie obrazu dla danej częstości \tilde{x} . Rozpisując zależność (7.1) dla modułów otrzymuje się wyrażenie

$$|p'(\tilde{x}')| = |d(\tilde{x})| |p(\tilde{x})| \quad (7.2)$$

z którego wynika, że amplituda rzeczywista $|p'(\tilde{x}')|$ harmonicznego rozkładu intensywności w płaszczyźnie obrazu jest równa iloczynowi amplitudy rzeczywistej w płaszczyźnie przedmiotu przez moduł funkcji przenoszenia. Zgodnie z wzorem (3.140) najwygodniej jest funkcję przenoszenia przedstawić w postaci znormowanej przez $d_n(0) = 1$ i wtedy

$$d_n(\tilde{x}) = \frac{d(\tilde{x})}{d(0)}$$

a więc zgodnie z (7.1)

$$d_n(\tilde{x}) = \frac{p'(\tilde{x})}{p'(0)} \frac{p(0)}{p(\tilde{x})} \quad (7.3)$$

Zależność (7.3) może już być podstawą pomiaru funkcji $d_n(\tilde{x})$. Do wyznaczenia znormowanej funkcji przenoszenia dla danej częstości \tilde{x} wystarczy przyjąć w płaszczyźnie przedmiotu stałą intensywność $p(0)$ i sinusoidalny rozkład intensywności o amplitudzie $p(\tilde{x})$, a następnie wyznaczyć dla nich w płaszczyźnie obrazu intensywność $p'(0)$ oraz amplitudę $p'(\tilde{x})$. Zwraca się uwagę, że pod pojęciem zadania i wyznaczenia amplitudy (zespólonej) rozumie się zadanie i wyznaczenie zarówno amplitudy rzeczywistej, jak i fazy. Funkcję przenoszenia $d_n(\tilde{x})$ zgodnie z wyrażeniem (3.145) można przedstawić jako

$$d_n(\tilde{x}) = |d_n(\tilde{x})| \exp[-i\Theta(\tilde{x})] \quad (7.4)$$

a więc z zależności (7.3) może być znaleziony jednocześnie moduł $|d_n(\tilde{x})|$ nazywany również *funkcją przenoszenia kontrastu*, oraz argument $\Theta(\tilde{x})$ — będący fazą optycznej funkcji przenoszenia.

Z uwagi na trudności techniczne w wyznaczeniu wartości Θ , często badanie układów ogranicza się tylko do wyznaczenia funkcji przenoszenia kontrastu i dlatego zagadnienie to zostanie omówione nieco szerzej.

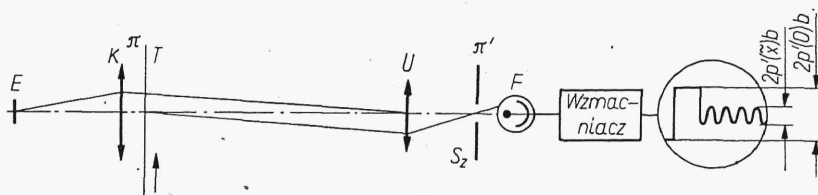
7.4.1. Pomiar funkcji przenoszenia kontrastu

Zgodnie z zależnością (7.3) dla funkcji przenoszenia kontrastu można napisać

$$|d_n(\tilde{x})| = \frac{|p'(\tilde{x}')|}{p'(0)} \frac{p(0)}{|p(\tilde{x})|} \quad (7.5)$$

W porównaniu z optyczną funkcją przenoszenia przy wyznaczaniu funkcji przenoszenia kontrastu występują również te same dwa przedmioty (stała intensywność i rozkład sinusoidalny), z tym że brane są tu pod uwagę tylko stosunki rzeczywistych amplitud: z jednej strony przedmiotów $\frac{|p(\tilde{x})|}{p(0)}$, a z drugiej ich obrazów $\frac{|p'(\tilde{x}')|}{p'(0)}$, natomiast pomijana jest ich faza.

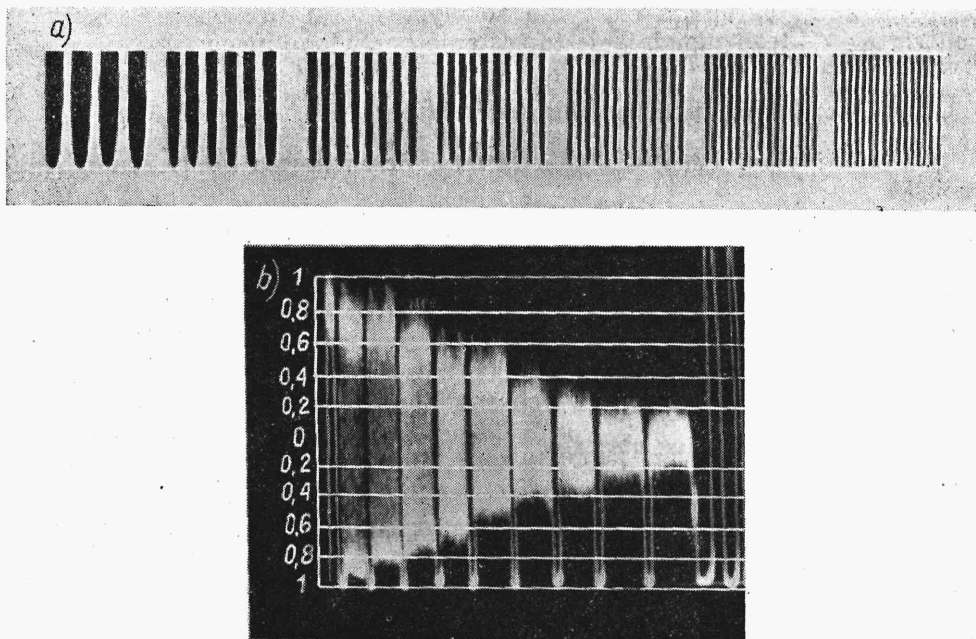
Schemat pomiaru realizujący powyższą zasadę pokazano na rys. 7.18. Badany układ U odwzorowuje w płaszczyźnie szczeliny π' płaszczyznę



Rys. 7.18

przedmiotową π , która przez kondensor K jest oświetlona za pomocą rozciągniętego źródła światła E . Z uwagi na to, że każdy punkt przedmiotu powinien dawać równomierne oświetlenie w płaszczyźnie żręnicy wejściowej układu U , obraz źródła E powinien całkowicie wypełnić żręnicę i po-

nadto mieć stałą luminancję w swoim obszarze. Jeżeli w płaszczyźnie π przesuwany będzie test o sinusoidalnym rozkładzie współczynnika przepuszczania, to za pomocą dostatecznie wąskiej szczeliny S_z i fotoodbiornika F zostanie przeanalizowany rozkład intensywności w płaszczyźnie obrazu tego testu. Reakcja fotoodbiornika, rejestrowana po wzmocnieniu na ekranie oscyloskopu, daje ilościowe informacje o zmianie intensywności. Aby można było wyznaczyć bezpośrednio z ekranu oscyloskopu stosunek amplitud $\frac{|p'(x')|}{p'(0)}$ w obrazie, test oprócz rozkładu sinusoidalnego, zawiera zwykle również obszar o stałej intensywności (rys. 7.18). Jeżeli układ elektroniczny będzie miał stałe wzmocnienie w rozpatrywanym przedziale częstotliwości, wówczas amplitudy składowych harmoniczných na ekranie oscyloskopu będą proporcjonalne do amplitud w płaszczyźnie obrazu, przy czym b — jest współczynnikiem proporcjonalności zależnym od wzmocnienia (rys. 7.18). Znajomość stosunku amplitud $\frac{|p(\tilde{x})|}{p(0)}$ tych rozkładów w teście (przedmiocie) wystarcza, zgodnie z równaniem (7.5), do obliczenia wartości $|d_n(\tilde{x})|$.



Rys. 7.19

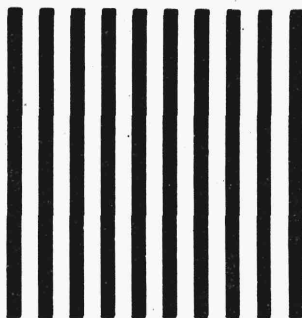
Wygodnie jest budować test składający się z rozkładów sinusoidalnych o różnych częstotliwościach (rys. 7.19a), gdyż wtedy jednocześnie można wyznaczyć wartości funkcji przenoszenia kontrastu dla różnych częstotliwości \tilde{x} . Szczególnie prosty jest pomiar, jeżeli amplitudy harmoniczných w teście są stałe dla wszystkich częstotliwości tzn. $|p(\tilde{x})| = p(0)$ dla każdego \tilde{x} , gdyż wtedy z równania (7.5) pozostaje

$$|d_n(\tilde{x})| = \frac{|p'(\tilde{x})|}{p'(0)} \quad (7.6)$$

co pozwala odczytać wartości $|d_n(\tilde{x})|$ bezpośrednio z oscyloskopu przez przyjęcie sygnału $p'(0)$ za 1 (rys. 7.19b).

Z uwagi na trudności w budowie testu sinusoidalnego częściej stosowane są testy o złożonym widmie częstości, ale prostsze technologicznie, z których na drodze elektrycznej odfiltrowywana jest interesująca nas częstość.

Przykładowo niech testem będzie prostokątny rozkład intensywności (rys. 7.20) z jednakową szerokością czarnych i białych linii, wówczas jeżeli ma on dostateczną długość, zgodnie z przekształceniem *Fouriera* (wzór

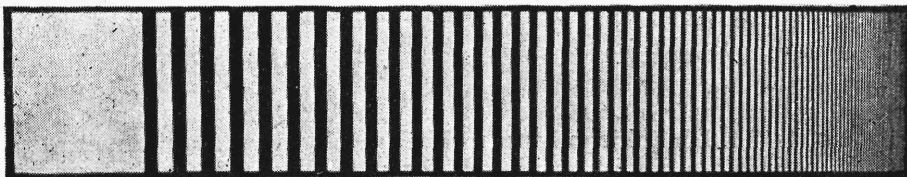


Rys. 7.20

8.15) można go w przybliżeniu uważać za dyskretny zbiór harmoniczných o podanych w nawiasach częstościach i odpowiadającym im amplitudach $[\tilde{x} = m\tilde{x}_0 = m 1/X_0; p(m\tilde{x}_0) = 4/\pi m; m = 0, 1, 3, 5 \dots, \text{ przy czym dla } m = 0 \text{ } p(0) = 1]$.

Jeżeli badany będzie układ U zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 7.18, to w jego płaszczyźnie obrazowej powstanie również dyskretne widmo harmoniczných, przy czym ich amplitudy będą zależały od modułu funkcji przenoszenia układu różnego dla różnych częstości. Składowe harmoniczne o częstościach wyższych niż częstość graniczna będą przez układ U obcinane, gdyż moduł funkcji przenoszenia jest wtedy równy zeru.

Przy przesuwie testu T w płaszczyźnie π ze stałą prędkością v , w torze elektrycznym powstaną harmoniczne o częstotliwościach $f = mv\tilde{x}_0$ ($m = 0, 1, 3, 5 \dots$) i amplitudach proporcjonalnych do amplitud harmoniczných płaszczyzny obrazu. Przez wstawienie za wzmacniaczem filtru elektrycznego o tak wąskim paśmie przenoszenia, że przenoszona będzie przez niego tylko częstotliwość $f_0 = v\tilde{x}_0$, na ekranie oscyloskopu otrzyma się informację tylko o podstawowej harmonicznej testu prostokątnego o częstości \tilde{x}_0 .



Rys. 7.21

Jeżeli kolejno będzie zmniejszana prędkość przesuwania testu do $1/3$, $1/5$ itd. prędkości podstawowej v , to otrzymuje się informacje o funkcji przenoszenia układu dla częstości $3\tilde{x}_0$, $5\tilde{x}_0$ itd. Metoda ta jest jednak niewygodna, gdyż amplitudy harmoniczných przedmiotu dla różnych częstości nie są sobie równe i wartości wyznaczone z oscyloskopu wymagają przełiczenia zgodnie z równaniem (7.5), w którym $p(0) \neq |p(\tilde{x})|$, np. $|p(\tilde{x}_0)| = 3|p(3\tilde{x}_0)|$. Dlatego stosowany jest zwykle test prostokątny o zmiennej częstości \tilde{x} (rys. 7.21) i filtrowana tylko pierwsza harmoniczna na drodze przesuwania testu ze zmienną prędkością v , np. za pomocą krzywki. Aby filtr elektryczny przeniósł tylko żadaną informację wystarcza spełnić warunek

$$v\tilde{x} = \text{const} = f_0 \quad (7.7)$$

gdzie f_0 — częstotliwość przenoszona przez filtr elektryczny.

Z uwagi na to, że w tym przypadku częstości zerowe nie są przenoszone przez filtr, funkcja przenoszenia kontrastu normowana jest do 1 dla częstości bliskich zeru, zależnie od zastosowanego rozkładu częstości w teście.

Istnieje wiele różnych sposobów pomiaru funkcji przenoszenia kontrastu [3], lecz przytoczone tu metody, oparte na porównaniu amplitud harmoniczných przedmiotu i obrazu są najbardziej typowe i najlepiej uwy-puklają fizyczny sens funkcji przenoszenia.

Zwraca się uwagę, że w ogólnym przypadku test może być dowolny. Warunkiem koniecznym jest znajomość jego widma częstości, a więc wartości amplitud harmoniczných dla poszczególnych częstości. Wyznaczając widmo obrazu tego testu danego przez układ na podstawie zmian amplitud między obrazem a przedmiotem ustalona jest funkcja przenoszenia kontrastu. Dobór określonego testu wynika ze sposobu wyodrębniania wartości mierzonej funkcji dla poszczególnych częstości i ewentualnie prostoty pomiaru. W przypadku testu o sinusoidalnym rozkładzie intensywności zmiana częstości przenoszonej przez układ optyczno-elektryczny odbywała się na drodze zmiany testu. A więc elementem filtrującym był sam przedmiot, a układ elektroniczny przenosił odpowiednio szerokie pasmo częstotliwości ze stałym wzmocnieniem. Dla testu prostokątnego widmo częstości przedmiotu jest szerokie, przy czym pożądane jest, aby było o stałej amplitudzie, natomiast dla układu elektronicznego znaczące wartości wzmocnienia zachodzą tylko dla odpowiednio wąskiego przedziału częstotliwości. Zmiana częstości przy wyznaczaniu funkcji przenoszenia kontrastu odbywa się na drodze zmiany „przełożenia” między częstością testu a odpowiadającą mu częstotliwością sygnału w torze elektrycznym.

Pomiar funkcji przenoszenia można również dokonać metodą wielofiltrową, otrzymując przy stałej prędkości testu o złożonym widmie częstości szerokie pasmo częstotliwości w torze elektrycznym, którego widmo badane jest na drodze elektrycznej za pomocą analizatora częstotliwości. Testem np. może być wtedy linia, dla której rozkład amplitud harmoniczných w widmie określony jest równaniem (8.14), gdzie s jest szerokością linii. Jeżeli s jest dostatecznie małe wówczas zgodnie z tym równaniem można przyjąć, że w pewnym przedziale częstości amplituda jest stała. Np. dopuszczając zmianę 1% amplitudy, przedział częstości określony będzie przez $\tilde{x} \leq 1/12 s$. Dla takiego testu rozkład amplitud harmoniczných w płaszczyźnie obrazu, a więc i torze elektrycznym wyznacza funkcję przenoszenia kontrastu. Można zresztą obraz linii analizować również z filtrem

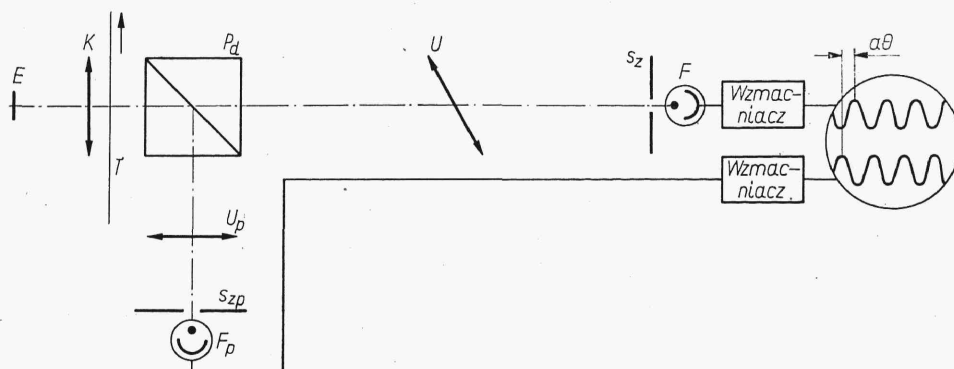
elektrycznym przenoszącym ustaloną częstotliwość f_0 , z tym tylko, że prędkość przesuwania linii w polu widzenia powinna być wtedy zmienna zgodnie z zależnością (7.7).

7.4.2. Pomiar fazy optycznej funkcji przenoszenia

Jeżeli składowe harmoniczne danego testu — przedmiotu są zgodne w fazie dla ustalonego punktu płaszczyzny przedmiotu, to wówczas faza optycznej funkcji przenoszenia wskazuje na różnice faz harmonicznych w obrazie względem punktu sprzężonego z punktem przedmiotu dla układu bezaberracyjnego. Z uwagi na trudności w eksperymentalnym ustaleniu położenia takiego punktu zwykle wyznaczana jest różnica faz w stosunku do punktu, dla którego harmoniczne o niskich częstotliwościach mają fazę zerową. Jest to więc względny pomiar przesunięcia fazowego harmonicznych o wyższych częstotliwościach w stosunku do ustalonej harmonicznej o niskiej częstotliwości.

Przesunięcie fazowe harmonicznych jest wynikiem asymetrycznej budowy plamki aberracyjnej i w związku z tym mierzone jest dla punktów przedmiotu leżących poza osią układu i tylko w przekroju południkowym. Jest to więc w pewnym sensie dystorsja widma przedmiotu. Na środku pola z uwagi na symetryczną budowę obrazu punktu faza może przyjąć tylko dwie wartości 0 i π (odwrócenie kontrastu p. 3.3.6) i wygodniej ją zarejestrować przez ujemne wartości funkcji przenoszenia kontrastu.

Na rys. 7.22 przedstawiony jest jeden ze sposobów bezpośredniego pomiaru fazy. Niech T będzie testem typu sinusoidalnego przedstawionego np. na rys. 7.19, U — układem badanym, S_Z — szczeliną analizującą obraz testu. W biegu promieni znajduje się pryzmat światłodzielnący P_d , dzięki czemu obraz testu jest odwzorowany również w płaszczyźnie szczeliny S_{zp} .



Rys. 7.22

układu pomocniczego U_p . Parametry układu U_p są tak dobrane, aby jego częstota graniczna była znacznie większa od maksymalnej częstoty harmonicznej testu T . Przy przesuwie testu na ekranie oscyloskopu rejestrowane są jednocześnie obydwa przebiegi. Dla pomocniczego układu U_p faza harmonicznych jest stała dla wszystkich częstoty, stąd przez porównanie faz obydwu przebiegów wyznaczana jest zmiana fazy optycznej funkcji przenoszenia układu U .