

chu papieru z rozpoczęciem przebiegu badanego. Silnik napędowy oscylografu włączany jest (ze względu na czas rozruchu) przed rozpoczęciem rejestracji, synchronizację osiąga się natomiast za pośrednictwem specjalnego sprzęgła elektromagnetycznego łączącego wałek silnika z wałkami napędzającymi papier. Sprzęgło włączane jest zdalnie za pomocą impulsu zwierającego (lub rozwierającego) odpowiednie zaciski, co umożliwia rozpoczęcie rejestracji w dowolnie wybranym momencie i pozwala na zsynchronizowanie pomiaru z przebiegiem badanym.

Nowoczesne oscylografy posiadają urządzenia pomocnicze, pozwalające na ustalenie (przed próbą) określonej długości oscylogramu, bez względu na czas trwania impulsu włączającego sprzęgło. Posiadają one również styki pomocnicze umożliwiające wysyłanie impulsów do urządzeń zewnętrznych, w odpowiednio wybranym momencie czasowym odniesionym do chwili włączenia sprzęgła oscylografu.

W celu uzyskania skali czasowej oscylografy wyposażone są zwykle w tzw. znaczniki czasu, tj. specjalne pętlice zasilane z obwodów generatorów częstotliwości (najczęściej 500 Hz). Przebieg ruchu takiej pętlicy zapisany na oscylogramie umożliwia dokładne skalowanie osi czasu. W niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych bezpośrednio w oscylografy wbudowane są oporniki umożliwiające nastawianie prądu płynącego przez pętlice pomiarowe.

2.2.4. Analiza błędów występujących przy pomiarach oscylografem pętlicowym

Jest rzeczą istotną, aby przy pomiarach wielkości fizycznych dokonywanych za pomocą oscylografu pętlicowego zdawać sobie sprawę z dokładności pomiaru oraz umieć wyznaczyć błąd popełniany przy pomiarze. Błędy pomiaru dokonywanego oscylografem pętlicowym można podzielić na 4 grupy:

- błąd spowodowany przez pętlicę pomiarową,
- błąd spowodowany przez układ optyczny,
- błąd spowodowany przez układ rejestrujący,
- błąd odczytu oscylogramu.

1. Błąd pętlicy pomiarowej

Pętlica pomiarowa stanowiąc układ o określonej bezwładności mechanicznej nie jest w stanie przekazać wielkości mierzonej w sposób bezbłędny. Z mechaniki teoretycznej wiadomo, że dla ciał sztywnych obracających się wokół osi symetrii obowiązuje równanie

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \sum M_{ob} , \quad (18)$$

gdzie φ - kąt wychylenia pętlicy z położenia zerowego,

J - moment bezwładności układu ruchomego,

$\sum M_{ob}$ - suma momentów obrotowych działających na układ ruchomy.

Na ruchomą część pętlicy będą działały następujące momenty obrotowe

a) moment od przepływającego przez pętlicę prądu - $M(t)$,

b) przeciwdziałający ruchowi i proporcjonalny do wychylenia moment wywołany sprężystością zawieszenia pętlicy

$$M_1 = - W \cdot \varphi .$$

W - stała charakteryzująca sprężystość zawieszenia układu ruchomego pętlicy;

c) moment tłumiący, wynikający z tarcia układu ruchomego o ośrodek, w którym odbywa się ruch oraz moment tłumienia elektromagnetycznego

$$M_2 = - P \frac{d\varphi}{dt} ,$$

gdzie $P = P' + P''$;

P' - współczynnik tłumienia elektromagnetycznego, powstającego w wyniku wzbudzenia w części ruchomej pętlicy SEM, powodującej płynięcie prądu przeciwdziałającego ruchowi, który go wywołuje. Współczynnik ten jest wprost proporcjonalny do liczby zwojów układu ruchomego, stąd też taki system tłumienia stosowany jest w pętlicach wielozwojowych. W celu zapewnienia określonego współczynnika tłumienia konieczny jest odpowiedni dobór oporności, na którą zamknięty jest obwód pętlicy;

P'' - współczynnik hamowania występującego w wyniku tarcia układu o ośrodek, w którym układ się porusza. W przypadku pętlic jednozwojowych dla uzyskaniażądanego tłumienia stosuje się specjalne gatunki oleju.

Po podstawieniu wprowadzonych wyżej zależności do wzoru (18) otrzymamy

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{P}{J} - \frac{d\varphi}{dt} + \frac{W}{J}\varphi = M(t). \quad (19)$$

Przechodząc ze zmiennej φ na y dla małych wychyleń φ (wg rys. 49) oraz wprowadzając nową zmienną proporcjonalną do czasu $\tau = \omega_0 t$ otrzymamy następującą postać równania (19)

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} + 2\alpha \frac{dy}{d\tau} + y = y_p(\omega_0 t), \quad (20)$$

gdzie $\alpha = \frac{P}{2J\omega_0}$ - współczynnik tłumienia,

$y_p(\omega_0 t) = \frac{2lM(t)}{W}$ - nowa funkcja wymuszenia,

l - odległość lusterka pętlicy od papieru.

Rozpatrzmy jak zostanie odtworzony przez pętlę przebieg



Rys. 49. Rysunek wyjaśniający zależność między kątem obrotu lusterka φ , a wychyleniem promienia świetlnego na oscylogramie

przy wymuszeniu sinusoidalnym. Jest to bowiem najczęstszy przebiegów spotykanych w technice badań aparatów. Jeżeli przebieg jest odkształcony od sinusoidy, to daje się rozłożyć na składowe harmoniczne, co pozwala na sprowadzenie całej analizy do rozpatrzenia przenoszenia funkcji sinusoidalnych.

Niech A będzie wartością amplitudy a $f = \frac{\omega}{2\pi}$ częstotliwością wymuszenia. Wówczas

$$y_p(t) = A \sin \omega t,$$

lub

$$y_p(\tau) = A \sin \frac{\omega}{\omega_0} \tau = A \sin q \tau, \quad (21)$$

gdzie $q = \frac{\omega}{\omega_0}$.

Podstawiając to wyrażenie do wzoru (20) otrzymamy

$$y'' + 2\alpha y' + y = A \sin q\tau. \quad (22)$$

Rozwiązanie tego równania ma postać następującą

$$y = B \sin q (\tau - \tau^*), \quad (23)$$

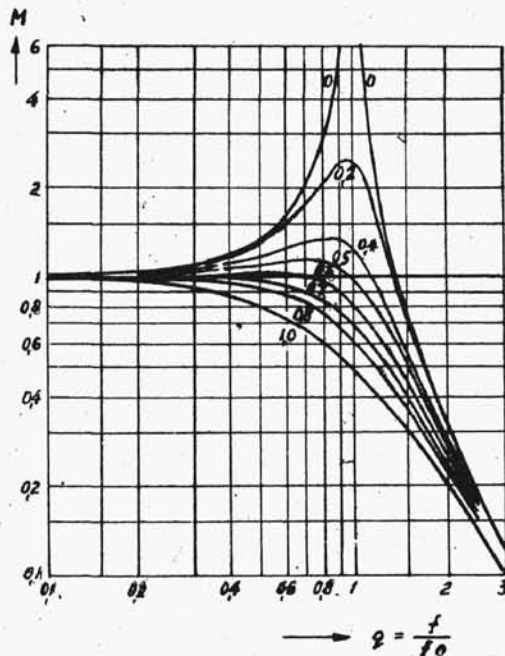
gdzie $M = \frac{B}{A} = \frac{1}{\sqrt{(1 - q^2)^2 + (2\alpha q)^2}}$

oraz $\tau^* = \frac{1}{q} \arctg \frac{2\alpha q}{1 - q^2}$.

Równanie (23) wskazuje, że przy wymuszeniu sinusoidalnym, powstały w wyniku przeniesienia przez pętlicę obraz jest również sinusoidalny, jednakże amplituda jego różni się od amplitudy wymuszenia, a faza różni się o kąt $q\tau^*$.

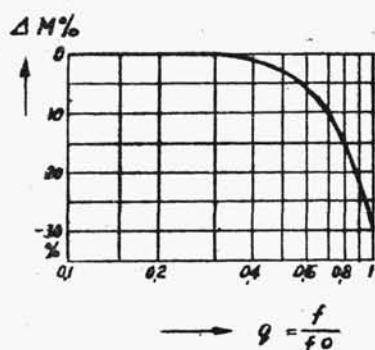
Zależność współczynnika M charakteryzującego uchyb amplitudy od α i q przedstawiona jest na rys.50. Z rysunku tego wynika, że w przypadku braku tłumienia ($\alpha=0$) dla częstotliwości rezonansowej $f = f_0$; $M \rightarrow \infty$; optymalne warunki tłumienia wypadają natomiast dla $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

Jest to przypadek tłumienia krytycznego, dla którego osiągnięcie wymaganej wartości odbywa się aperiodycznie tzn. $M \leq 1$, Zależność $\Delta M = F\left(\frac{f}{f_0}\right)$ dla przypadku tłumienia krytycznego przedstawiono na rys.51.



Rys.50. Zależność uchybu amplitudy $M = f\left(q = \frac{f}{f_0}\right)$ dla różnych wartości α

Zależność uchybu kąowego od $q = \frac{f}{f_0}$ dla różnych wartości α przedstawiono na rys.52. Z przebiegów przedstawionych na



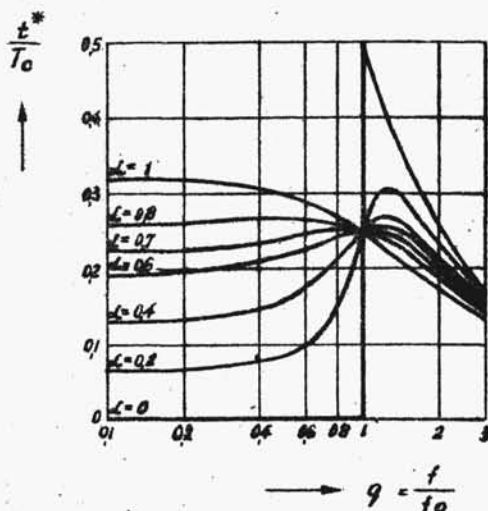
Rys.51. Zależność uchybu amplitudy $\Delta M = f(q)$ dla wartości tłumienia optymalnego ($\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$).

tym rysunku wynika, że dla $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$ tzn. optymalnego

z punktu widzenia uchybu amplitudy, wartość $\frac{t^*}{T_0} = 0,25$ ($\gamma^* = \omega_0 t^*$) i pozostaje w

przybliżeniu stała w przedziale $f = 0 \dots f_0$. Występujący w tym przypadku uchyb kątowy jest nieznaczny i zawiera się w granicach dokładności odczytu oscylogramu. Biorąc przykładowo: przy stosowaniu pętlicy o $f_0 = 5000$ Hz i prędkości rejestracji 10 m/sek (co jest dla oscylografów pętlicowych prędkością bardzo dużą) otrzymuje się uchyb kątowy wynoszący około 0,5 mm. Tak więc, przy rejestracji przebiegów sinusoidalnych, współczynnik tłumienia $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$ jest optymalny, zarówno z uwagi na uchyb amplitudy, jak również zapewnia pomijalnie mały uchyb kątowy.

W przypadku pętlicy jednozwojowej warunki optymalnego współczynnika tłumienia zapewnia się przez umieszczenie układu ruchomego w korpusie wypełnionym specjalnym gatunkiem oleju. Dla pętlic wielozwojowych wymagane warunki tłumienia ustala się



Rys.52. Zależność uchybu kątowego $\frac{t^*}{T_0} = f(q = \frac{f}{f_0})$ dla różnych wartości $t^* = \frac{\gamma^*}{\omega_0}$.

przez odpowiedni dobór obwodu elektrycznego (tłumienie elektromagnetyczne).

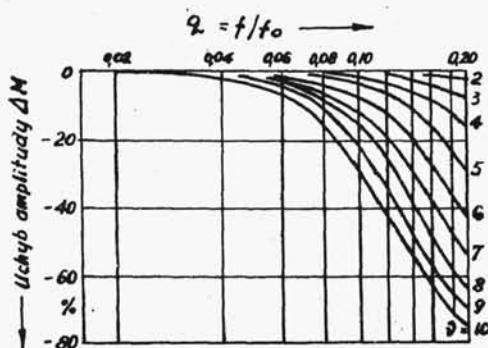
W przypadku analizy uchybu rejestracji przebiegu odkształconego od sinusoidy stosuje się metodę superpozycji dla poszczególnych harmoniczych, korzystając z uprzednio podanych wzorów. Najistotniejsza jest znajomość uchybów amplitudy. Na rys.53 przedstawiono przykładowo zależność uchybu amplitudy, dla kolejnych harmoniczych w funkcji $q = \frac{f}{f_0}$,

dla warunków tłumienia krytycznego ($\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$). Analizując te przebiegi należy pamiętać, że jakkolwiek uchyby dla wyższych harmoniczych rosną, to amplitudy tych harmoniczych maleją tak, że błąd sumaryczny pozostaje niewielki.

Dokładne wyznaczenie błędu pomiarowego pętlicy przy stosowaniu jej do pomiaru przebiegów o innych kształtach (fala prostokątna, funkcje wykładnicze, przebiegi liniowe bądź w kształcie impulsów trójkątowych) wymagają każdorazowo przeprowadzenia dość żmudnej analizy matematycznej. W każdym z tych przypadków optymalne warunki tłumienia różnią się nieco. Ponieważ szczególnie w przypadku pętlic jednozwojowych niemożliwe jest doraźne regulowanie współczynnika tłumienia, konieczne jest kompromisowe dobranie jego wartości. Taką średnią optymalną wartością współczynnika tłumienia, stosowaną w przeważającej liczbie produkowanych pętlic jest $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$, czyli optymalna wartość tłumienia dla przebiegu sinusoidalnego.

Dla impulsów trójkątowych pętlicę dobiera się na częstotliwość odpowiadającą 10-krotnej wartości podstawowej harmoniczej przebiegu.

W przypadkach pomiarów przebiegów, dla których istnieje obawa znacznych błędów, możliwe jest skorygowanie otrzymanego

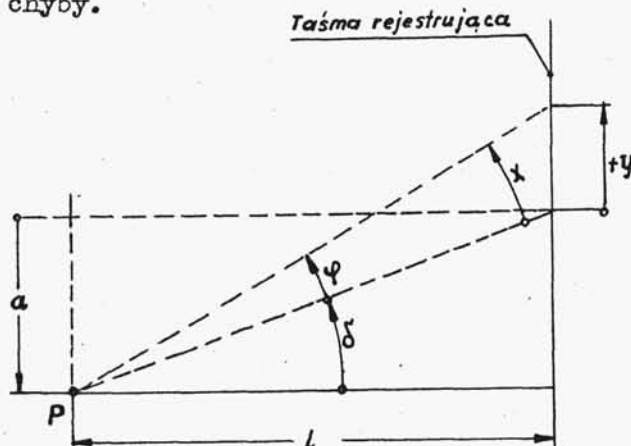


Rys.53. Zależność uchybu amplitudy $\Delta M = f(\frac{f}{f_0})$ dla wyższych harmoniczych (przy stałym tłumieniu $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$)

przebiegu na podstawie wzoru (23), przy danych wielkościach charakterystycznych pętlicy (α , f_0). Dochodzenie tą drogą do właściwego przebiegu jest jednak bardzo żmudne i technicznie nieuzasadnione. W tych przypadkach kiedy pętlica daje zbyt duże uchyby należy stosować do pomiaru oscylograf elektroniczny.

2. Uchyby układu optycznego oscylografu pętlicowego

Na całkowity uchyb układu optycznego (uchyb drogi promienia świetlnego) składają się następujące pokrótce omówione uchyby.



Rys.54. Schemat drogi promienia od pętlicy do taśmy rejestrującej

a. Uchyb odwzorowania na płaszczyźnie wychylenia kąтового pętlicy.

Rys.54 pokazuje schemat drogi promienia świetlnego od pętlicy P do taśmy rejestrującej (papieru światłoczułego, filmu). Pętlica skrajna w oscylografie jest odległa od płaszczyzny symetrii

o a , przy długości odcinka pętlica - taśma rejestrująca - równej l . Wychyleniu pętlicy o kąt φ odpowiada teraz droga łukowa x zanotowana na taśmie rejestrującej jako odcinek y .

Względny uchyb pomiaru tego wychylenia wyniesie (po rozwinięciu na szereg prostej zależności wyjściowej)

$$\Delta x = \frac{y - x}{x} \approx \delta^2 + \delta \varphi + \frac{\varphi^2}{3} . \quad (24)$$

Przebieg powyższego uchybu $\Delta x = f(\varphi)$ dla różnych wartości δ pokazany jest na rys.55.

Przykładowo dla oscylografu o $l = 80$ cm i $a = 14$ cm (oddalenie skrajnej pętlicy od płaszczyzny symetrii) mamy $\delta = 10^\circ$.

Przy wychyleniu pętlicy $\varphi = 4^\circ$ w kierunku dodatnim osi y , $\Delta x = 4,4\%$, w kierunku ujemnym osi y - $\Delta x = 2\%$. W obydwu

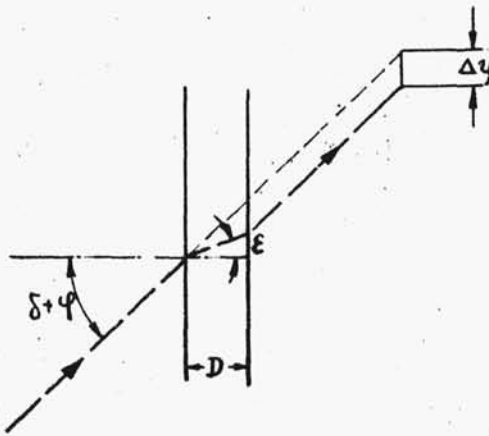
przypadkach występuje powiększenie wartości rzeczywistego wychylenia pętlicy.

Dla pętlicy znajdującej się w osi oscylografu $\delta = 0$ i uchyb $\Delta x = 0,17\%$ przy $\varphi = 4^\circ$ dla obydwu kierunków wychylenia.

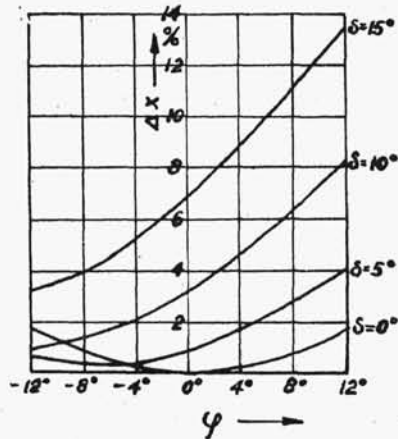
W celu zmniejszenia zatem rozpatrywanego uchybu należy pamiętać, aby linie zerowe pętlic w oscylografie rozłożone były równomiernie na szerokości taśmy rejestrującej oraz aby zachowywać stałą, ustaloną przez wytwórcę kolejność wzajemnego usytuowania pętlic.

b. Uchyb przesunięcia obrazu na grubości soczewki skupiającej (pokazano na rys.48 oznaczenie 6).

Powstawanie uchybu przesunięcia ilustruje rys.56.



Rys.56. Powstawanie uchybu przesunięcia, kąty δ i φ jak na rys.54



Rys.55. Wykres wartości uchybu odwzorowywania $\Delta x = f(\varphi)$ dla różnych δ

Przesunięcie promienia świetlnego

$$y = D \left[\operatorname{tg}(\delta + \varphi) - \operatorname{tg} \epsilon \right] \quad (25)$$

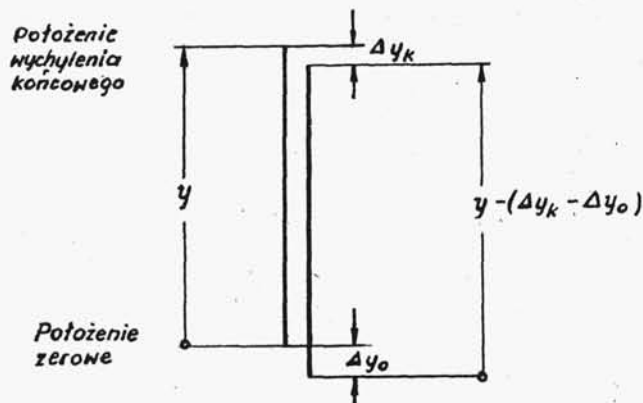
zmniejsza wychylenie rzeczywiste promienia, przeciwdziałając w ten sposób omawianemu wcześniej uchybowi odwzorowywania. Ponieważ uchyb ten występuje również przy zapisie położenia zerowego pętlicy (rys.57), zatem uchyb wypadkowy wyniesie

$$y = \Delta y_k - \Delta y_o. \quad (26)$$

Dla danych z poprzedniego przykładu ($\delta = 10^\circ$, $\varphi = 4^\circ$)

$\frac{\Delta y}{y} = 2,35\%$ dla wychylenia dodatniego i $0,97\%$ dla wychylenia

ujemnego. Natomiast przy $\delta = 0^\circ$ i $\varphi = 4^\circ$, $\frac{\Delta y}{y} = 0,64\%$ przekraczając wartość 0,17% uchybu odwzorowania.



Rys.57. Objaśnienie wartości wypadkowej uchybu przesunięcia

c. Uchyb od załamania promienia na okienku pętlicy w nowoczesnych oscylografach pętlicowych nie przekracza wartości 0,5%. Uchyb ten powoduje powiększanie wychylenia względem wartości rzeczywistej.

d. Uchyb powodowany odbiegającym od prostopadłego

przebiegiem promienia wychodzącego z soczewki skupiającej (6 na rys.48) względem płaszczyzny zapisu. Następstwem tego uchybu jest rozmazywanie linii zapisywanej przez oscylograf. Uchyb ten zależy tylko od parametrów elementów optyki oscylografu i jest sprowadzany do możliwie najmniejszej wartości przez twórcę.

e. Uchyb od mechanicznych uszkodzeń optyki. Uchyb ten może wystąpić przy naruszeniu fabrycznego mocowania elementów optyki ewentualnie uszkodzenia ich powierzchni. Stąd przy czyszczeniu lusterek i soczewek należy zachowywać jak największą ostrożność i stosować odpowiednie przybory do czyszczenia. Uszkodzone elementy optyki należy wymieniać na fabrycznie nowe.

3. Uchyby układu rejestracji oscylografu pętlicowego

Na całkowity uchyb układu rejestracji składają się następujące, omówione niżej uchyby.

a. Uchyb przesuwu taśmy rejestrującej.

Uchyb ten zależy od równomierności i dokładności prędkości przesuwu taśmy rejestrującej (papieru światłoczułego, filmu). Przy stosowaniu w oscylografie silnika napędowego prądu zmiennego musimy się liczyć ze znacznym wpływem na pracę silnika

napięcia sieci. W sieci o niestabilnym napięciu zasilac trzeba wtedy oscylograf przez stabilizator napięcia.

Stosując silniki napędowe prądu stałego zapewnić można większą dokładność nastawiania obrotów (0,5 - 1%).

We wszystkich układach napędowych zagadnienie to jest tym trudniej opanować, im większe chcemy uzyskać prędkości przesuwu taśmy rejestrującej z uwagi na rosnącą rolę sił i momentów bezwładności układu napędowego. Dlatego najogólniej zaleca się, aby w celu wyeliminowania wpływu tego typu zjawisk na dokładność odczytów wzdłuż osi czasowych oscylogramu - stosować dodatkowe skalowanie osi czasowej ze źródła o znanej częstotliwości np. generatora wzorcowego. Uzyskane tą drogą skalowanie obarczone będzie uchybem częstotliwości źródła napięcia skalowania.

b. Uchyb prowadzenia taśmy rejestracyjnej

Uchyb prowadzenia taśmy rejestracyjnej wynika z braku idealnej współosiowości wzajemnej poszczególnych walców prowadzących taśmę i z braku idealnej prostopadłości ich ustawienia względem kierunku przesuwania taśmy. Uchyb ten, zwykle pomijalnie mały, można ocenić ze stopnia liniowości przebiegu linii zerowych zapisanych na oscylogramie.

c. Uchyb powodowany obróbką fotochemiczną taśmy rejestracyjnej

Tu odnotujemy, że na przykład oscylograficzny papier światłoczuły kurczy się po wysuszeniu o ok. 0,3 - 0,4%. Powodowane tym uchyby wyeliminujemy, zapisując na takim samym papierze przebiegi skalujące dla poszczególnych przebiegów mierzonych.

4. Uchyby odczytywania oscylogramów

Uzyskany przy użyciu oscylografu pętlicowego oscylogram przedstawia sobą odpowiednią liczbę wykresów wielkości elektrycznych we współrzędnych prostokątnych, gdzie oś odciętych stanowi oś czasu.

Odczytanie oscylogramu może mieć na celu wyznaczenie:

- wartości największej lub chwilowej zapisywanego przebiegu napięcia, prądu lub mocy,
- przesunięć fazowych poszczególnych przebiegów lub odcinków czasowych,

- częstotliwości podstawowej przebiegu lub w przypadku przebiegu odkształconego częstotliwości wyższych harmoniczych.

Dla odczytania zatem oscylogramu odczytujemy współrzędne poszczególnych interesujących nas punktów zapisanych na nim przebiegów.

a. Przy pomiarze na oscylogramie przy użyciu miarki z podziałką milimetrową należy liczyć się z szacunkowym uchybem bezwzględnym odczytania gołym okiem pomierzonej długości odcinka $f_y = \pm 0,2$ mm (po $\pm 0,1$ mm dla końca i początku odcinka). Przy oku uzbrojonym w lupę uchyb ten można zmniejszyć dwukrotnie do $\pm 0,1$ mm. Należy tu jednak podkreślić, że powyżej oszacowana wartość uchybu odczytu długości odcinka może być odnoszona jedynie do oscylogramów odczytywanych bez powiększania, przy stosunkowo ostrej linii zapisu i bardzo czytelnie opisanej miarce. W wielu jednak przypadkach, zwłaszcza przy oscylogramach zapisanych na małoobrazkowej taśmie filmowej, przy skokowo zmiennym przebiegu krzywej należy się liczyć z wartością szacunkową uchybu $f_y = \pm (1 \div 2)$ mm.

b. Dla odczytania wartości największej lub chwilowej zapisanego oscylograficznie przebiegu musimy odmierzać wartości rzędnych poczynając od linii zerowej przebiegu. Linie zerową przebiegu zapisywać możemy w niektórych oscylografach wraz z przebiegiem, w innych wyznaczamy ją na wykonanym już oscylogramie. W obydwu tych przypadkach musimy liczyć się z pewną niedokładnością usytuowania lub wyznaczania tej linii. Niedokładność tę możemy dla konkretnego przypadku oszacować - na ogół nie przekracza ona 1 mm (f_1).

c. W założeniu idealnej linii zapisu (co do jej grubości, ostrości i zaczerwienia) uchyb odmierzenia odciętej $\pm \Delta x$ punktu P na krzywej powoduje uchyb w odczycie rzędnej $\pm f_x$ (rys.58).

Przy dostatecznie małym Δx możemy zapisać

$$f_x = \frac{dy}{dx} \cdot \Delta x. \quad (27)$$

d. W założeniu jw. idealnej linii zapisu ocenić możemy dodatkowy uchyb w odczycie rzędnej punktu P (rys.59) w wyniku od-

mierzenia tej rzędnej wzdłuż prostej, niedokładnie prostopadłej do linii zerowej przebiegu.

Wtedy w założeniu bardzo małej wartości kąta ε

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\Delta x}{y + \frac{dy}{dx} \Delta x} \approx \varepsilon,$$

albo

$$\Delta x_{\varepsilon} = y \frac{\varepsilon}{1 - \frac{dy}{dx} \varepsilon}, \quad (28)$$

zatem

$$f_{\varepsilon} = \frac{dy}{dx} \Delta x_{\varepsilon} = y \frac{\frac{dy}{dx}}{\varepsilon - \frac{dy}{dx}}. \quad (29)$$

W wyniku powyższych rozważań oszacować możemy maksymalny uchyb bezwzględny f odczytania chwilowej wartości przebiegu z oscylogramu, dla którego założyliśmy wstępnie idealny przebieg linii zapisu.

Zatem

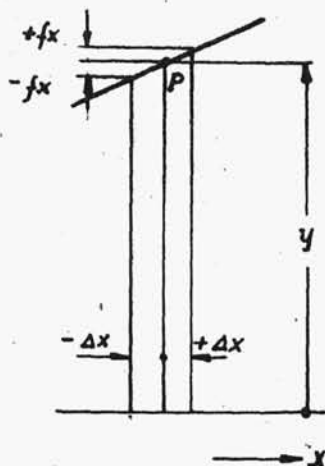
$$f = f_y + f_0 + f_x + f_{\varepsilon}. \quad (30)$$

Procentowy uchyb względny odczytu

$$F = \frac{f}{y} 100 = \left[\frac{f_y + f_0}{y} + \frac{dy}{dx} \left(\frac{\Delta x}{y} + \frac{1}{\varepsilon - \frac{dy}{dx}} \right) \right] 100. \quad (31)$$

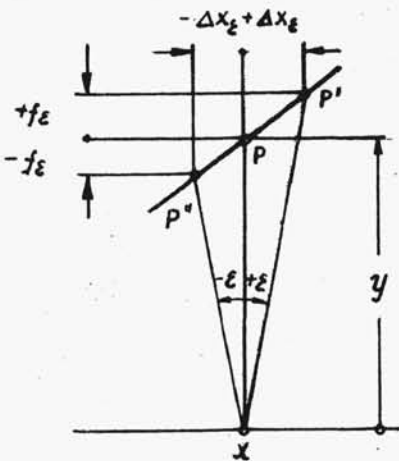
Pierwszy człon powyższego wyrażenia jest odwrotnie proporcjonalny do wartości rzędnej y . Jest on tym mniejszy, im y jest większe, czyli w im większej skali dla osi rzędnych wykonany jest oscylogram. Drugi człon równania zależy natomiast od nachylenia w rozpatrywanym punkcie krzywej do osi czasu, dla wartości ekstremalnych (min, max) człon ten równa się zeru. Stąd wnioskujemy, że najdokładniej odczytać możemy współrzędne punktów krzywych na odcinkach możliwie płaskich. Obraz taki z kolei możemy uzyskać przy dużych prędkościach zapisu.

Szczegółowa analiza wykazuje, (L.3), że równanie (31) jest również w zasadzie słuszne dla oscylogramów rzeczywistych przy



Rys.58. Uchyb pomiaru rzędnej f_x powodowany uchybem odczytu odciętej Δx

zastrzeżeniu, że linie wykresu będą wyraźnie ostre, a przebiegi odczytywanych krzywych nie będą wykazywać zbyt gwałtownych zmian wartości chwilowych. Z uwagi



Rys.59. Uchyb pomiaru rzędnej f_ϵ powodowany odchyleniem ϵ od prostopadłej do osi czasu odcinka rzędnej

Przykład. Dla punktu pomiarowego oscylogramu $y = 40$ mm, nachylenie krzywej wynosi $\alpha = 60^\circ$. Przy idealnie dokładnym ustaleniu osi zerowej ($f_0 = 0$) otrzymujemy

$$F_1 = 0,5 \%$$

$$F_2 \approx 0,8 \%$$

$$F \approx 1,3 \%$$

Przy $f_1 = 0,2$ mm $F_1 = 1\%$

$$F_2 = 0,8\%$$

i dodatkowo

$$F_3 = 4,8\%$$

$$\epsilon = 1,5^\circ$$

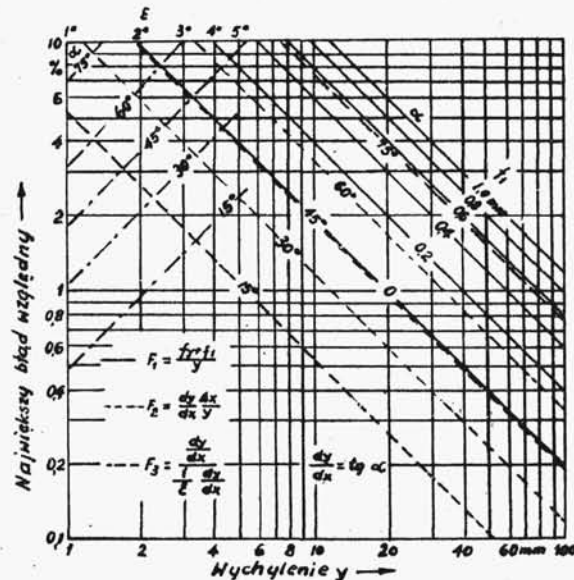
$$F = 6,6\%$$

na to przytaczamy na rys.60 przebiegi składowych równania (31) w zakresie wartości $F = 0,1 \div 10\%$ przy $y = 1 \div 100$ mm. Względny uchyb całkowity F składa się tutaj z 3 składników:

F_1 - powodowanego uchybem pomiaru odcinka rzędnej $f_y = 0,2$ mm i uchybem ustalenia osi zerowej f_1 ,

F_2 - powodowanego uchybem pomiaru odciętej $\Delta x = 0,2$ mm,

F_3 - powodowanego nachyleniem odcinka rzędnej do osi czasu.



Rys.60. Maksymalny błąd względny przy idealnej linii zapisu; α - nachylenie krzywej z oscylogramu względem osi czasu, ϵ - odchylenie mierzonego odcinka rzędnej punktu pomiarowego krzywej od prostopadłej do osi czasu