

3. ORGANIZACJA POMIARÓW W LABORATORIUM*

3.1. WSTĘP

U podstaw wszelkich nauk przyrodniczych leży zasada, którą można nieledwie uważać za ich definicję: sprawdzianem wszelkiej wiedzy jest doświadczenie. Doświadczenie jest jedyną miarą „prawdy” naukowej.

R. P. Feynman

Pomiar jest narzędziem eksperymentu, dostarcza ilościowej informacji o zjawisku.

Pomiar jest eksperymentalnym określeniem z zadaną dokładnością miary danej wielkości fizycznej otrzymanej z czujników pomiarowych, przetwarzających te wielkości na odwzorowujące je sygnały. Sygnał to funkcja czasowa dowolnej wielkości fizycznej, charakteryzowany przez nośnik i parametr informacyjny [11]. Nośnikiem sygnału może być sygnał mechaniczny, elektryczny (prądowy lub napięciowy) natomiast wielkość mierzona odwzorowana jest za pomocą parametru informacyjnego o określonym charakterze zmiennej czasowej i wartości. Sygnały, w zależności od przebiegu czasowego, możemy podzielić na ciągłe (zmiana w dowolnej chwili) i nieciągłe (zmiana jedynie w chwilach określonych). Dla sygnałów ciągłych (analogowych), parametr informacyjny przyjmuje w określonych granicach dowolne wartości z nieprzeliczalnego zbioru, zaś dla sygnałów nieciągłych (dyskretnych) ma on charakter skwantowany o skończonej liczbie wartości zawartych w określonych granicach.

Organizacja pomiaru wspomaganego komputerowo wymaga przetworzenia sygnału w procesie pomiaru za pomocą urządzeń zwanych przetwornikami pomiarowymi. Sygnały wpływające na jego zachowanie nazywane są sygnałami wejściowymi i są one przetwarzane na sygnały wyjściowe zawierające informacje o stanie przetwornika. Na przetwornik może działać wiele sygnałów wejściowych wśród których mogą się znajdować sygnały zakłócające tzn. przetwornik reaguje na nie wbrew intencjom konstruktora.

Dokonanie pomiarów wymaga zorganizowania toru pomiarowego (*TP*) tj. drogi przebiegu sygnału od źródła, które stanowi badane zjawisko fizyczne – przez człony przetwarzające, porównujące i elementy transmisyjne do urządzeń wyjściowych za pomocą których dokonuje się wizualizacji i archiwizacji wyników pomiaru. W ogólnym przypadku w torze mogą następować przemiany fizycznej natury nośnika sygnału; może zachodzić zmiana postaci sygnału z analogowej na dyskretną i odwrotnie. Na każdy element w torze pomiarowym lub na tor w całości można spojrzeć w sposób blokowy i wyróżnić sygnały wejściowe i sygnały wyjściowe. Takie spojrzenie ułatwia opis matematyczny tzn. budowanie modelu matematycznego toru pomiarowego lub określenie jego charakterystyki.

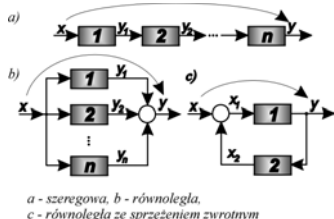
* opracował Zbigniew R. Lis

Pomiar, podczas którego wielkość mierzona praktycznie nie zmienia się, jest nazywany pomiarem statycznym. Celem takiego pomiaru jest ustalenie wartości określonej wielkości fizycznej. Przy takim pomiarze zależność między sygnałem wejściowym x , a sygnałem wyjściowym y jest określona przez statyczną funkcję przetwarzania $y=f(x)$. **Charakterystyką statyczną toru lub dowolnego jego członu nazywa się funkcję, przedstawioną na ogół w postaci wykresu, uzależniającą wartość sygnału wyjściowego y od wartości sygnału wejściowego x w warunkach ustalonych** (stan w którym sygnały te nie zmieniają się) [11]. Charakterystyki statyczne większości przetworników można opisać za pomocą szeregu potęgowego:

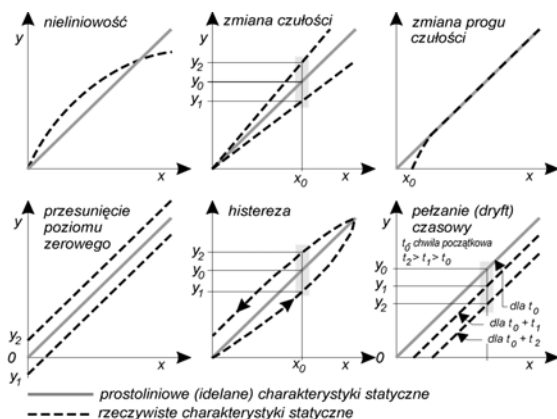
W zależności od postaci poszczególnych składników tego szeregu równanie przedstawia charakterystykę liniową lub nieliniową. Pożądanymi charakterystykami statycznymi liniowymi są linie przechodzące przez początek układu współrzędnych o równaniu $y=a_1x$. Ograniczając zakres przetwarzania sygnału charakterystyki nieliniowe można aproksymować liniami prostymi upraszczając wyrażenie potęgowe przez pominięcie składników o potęgach wyższych od jedności. Parametrem liczbowym opisującym charakterystykę statyczną jest **czułość różniczkowa S** odpowiadająca tangensom kątów nachylenia charakterystyki w rozważanych punktach pracy:

Dla członu o charakterystyce liniowej czułość (**statyczny współczynnik wzmocnienia**) można określić z zależności $S=dy/dx$. Tor pomiarowy można zorganizować w sposób szeregowy, równoległy i równoległy ze sprzężeniem zwrotnym (rys. 3.1). Dalej będziemy rozważać szeregowe toru pomiarowe. Jeśli równania członów składowych torów pomiarowych wyrazi się jako $y_1=f_1(x)$, $y_2=f_2(y_1)$, $y_{n-1}=f_{n-1}(y_{n-2})$ oraz $y_n=f_n(y_{n-1})$, a ich czułości jako $S_1=dy_1/dx$, $S_2=dy_2/dy_1$, ..., $S_n=dy/dy_{n-1}$, to równanie wypadkowej charakterystyki statycznej $y=f(x)$ można wyrazić w postaci $y=f_n[f_{n-1}...f_2[f_1(x)]]$ oraz wypadkową czułość określić wg zależności $S_w=S_1S_2...S_n$. Na rysunku 3.2 pokazano zmiany charakterystyk liniowych na skutek zjawisk powodujących występowanie niedokładności przetwarzania statycznego.

Pomiar, podczas którego wielkość mierzona zmienia się w funkcji czasu jest nazywany pomiarem dynamicznym. Zależność między sygnałem wejściowym $x(t)$ a sygnałem wyjściowym $y(t)$ zachodząca podczas takiego pomiaru może być opisana równaniem różniczkowym. W przypadku, gdy sygnały przekazywane są przez tor lub dowolny jego człon natychmiastowo, bez opóźnień czasowych, wówczas jego właściwości dynamiczne można wyrazić za pomocą równania algebraicznego.



Rys. 3.1. Typowe struktury torów pomiarowych [10]



Rys. 3.2. Odchylenia kształtu i położenia rzeczywistych charakterystyk statycznych [11].

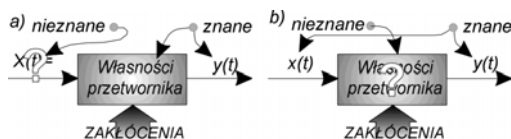
gólne jego składowe i jest proporcjonalna do wartości tych sygnałów. Ze względu na prostotę opisu torów pomiarowych oraz możliwych do przyjęcia uproszczeń często rezygnuje się z analizy i rozwiązywania nieliniowych równań różniczkowych zastępując je liniowymi. Linearyzacja równania różniczkowego opisującego układy nieliniowe możliwa jest przy założeniu, że w stanie nieustalonym odchylenia zmiennych x i y względem punktu pracy odpowiadającemu stanowi ustalonemu są dostatecznie małe, bądź też, że małe są odchylenia od liniowości całej charakterystyki statycznej [11]. Przyjęcie modelu liniowego umożliwia opis dynamiki toru lub dowolnego jego elementu za pomocą równania liniowego o stałych współczynnikach, mającego postać ogólną:

$$\sum_{k=0}^n a_k \frac{d^k y}{dt^k} = \sum_{i=0}^m b_i \frac{d^i x}{dt^i}$$

gdzie a_k , b_i współczynniki stałe, zależne od fizycznych parametrów układu. Można określić dwa zasadnicze cele pomiarów dynamicznych [7]. Pierwszy to klasyczny problem pomiaru, który polega na okre-

śleniu nieznanego sygnału $x(t)$ działającego na przetwornik na podstawie znajomości przebiegu $y(t)$ obserwowanego na wyjściu (rys.3.3a) przetwornika o znanych

własnościach. Znajomość własności przetwornika oznacza, że znana jest zależność (np. równanie różniczkowe), według której sygnał $x(t)$ jest przetwarzany na sygnał $y(t)$. Drugi cel jest związany z identyfikacją nie znanego obiektu i polega on na wyznaczeniu

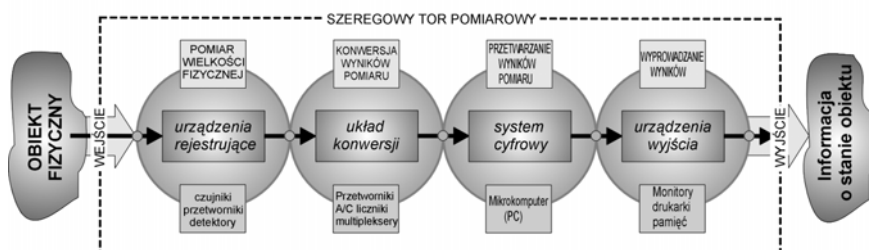


Rys. 3.3. Określenie celu pomiarów [7]

struktury i współczynników równanie różniczkowego, określającego własności obiektu na podstawie znajomości sygnału na wejściu i wyjściu (rys.3.3b).

3.2. PODSTAWOWA STRUKTURA SYSTEMU POMIAROWEGO

Do dalszych rozważań przyjmiemy do analizy szeregową strukturę toru pomiarowego, w skład którego wchodzi komputer klasy *PC*. Wprowadza to nowe jakościowo pojęcia związane z przekształcaniem sygnału pomiarowego do postaci cyfrowej.



Rys. 3.4. Schemat blokowy szeregowego toru pomiarowego

W kolejnych podrozdziałach przedstawimy informacje związane z poszczególnymi elementami pokazanej struktury szeregowego toru pomiarowego.

3.2.1. Pomiar wielkości fizycznej – przetworniki i czujniki pomiarowe

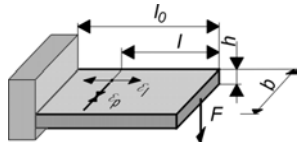
Przetwornikiem pomiarowym nazywa się element lub człon toru pomiarowego, który posiada co najmniej jedno wejście i jedno wyjście i reaguje na wprowadzone do wejścia sygnały fizyczne pojawieniem się na wyjściu sygnału przedstawiającego wielkość fizyczną różniącą się od wielkości wejściowej rodzajem nośnika lub/i wartością parametru informacyjnego, przy czym wartości sygnałów wejściowego i wyjściowego są jednoznacznie związane funkcjonalnie [11]. W grupie przetworników pomiarowych interesują nas przetworniki mechaniczne i elektryczne. Przetwornik mechaniczny jest urządzeniem, które przetwarza wartość wielkości nieelektrycznej fizycznej, jak przemieszczenie liniowe i kątowe, siła, moment siły, ciśnienie, przepływ cieczy i gazu, parametry ruchu drgającego na odpowiednią wartość innej nieelektrycznej wielkości fizycznej, jak przemieszczenie liniowe i kątowe, naprężenia lub odkształcenia elementu sprężystego np. membrana przetwarza ciśnienie na przemieszczenie liniowe jej powierzchni, naprężenie lub odkształcenie względne materiału. Przetwornik elektryczny jest to urządzenie, które przetwarza wartość wejściowej nieelektrycznej wielkości fizycznej na odpowiednią wartość wyjściowej wielkości elektrycznej w postaci napięcia, prądu lub ładunku (tzw. przetwornik generacyjny – czynny), bądź też parametru obwodu elektrycznego, jak rezystancja, indukcyjność lub pojemność (tzw. przetwornik parametryczny – bierny) np. tensometr przetwarza odkształcenie względne materiału sprężystego na odpowiednią zmianę rezystancji drutu oporowego, folii lub półprzewodnika. Wymie-

nione elektryczne przetworniki pomiarowe mogą należeć do grupy generacyjnych (same stanowią źródła energii elektrycznej) lub przetworniki parametryczne (sterują energią elektryczną doprowadzoną z zewnątrz i wymagają zasilania z pomocniczego źródła napięcia).

W dalszych rozważaniach zajmiemy się przetwornikami, które stosowane będą w laboratorium **mechaniki doświadczalnej (LMD)** tzn. przetwornikami sprężystymi, parametrycznymi przetwornikami tensometrycznymi oraz przetwornikami indukcyjnymi.

W przypadku **przetworników mechanicznych sprężystych** ich kształt i sposób obciążenia wyznaczają orientację tzw. płaszczyzn głównych oraz kierunki działania naprężeń głównych i odkształceń. Zajmiemy się dwoma typami tych przetworników: belka zginana (przetwornik wykorzystywany w czujnikach odkształcenia) oraz cylinder ściskany (przetwornik wykorzystywany w czujnikach siły).

Na rys. 3.5 pokazano belkę zginaną, prostokątną, płaską jednostronnie zamocowaną wykorzystywaną jako mechaniczny przetwornik sprężysty. Wielkością wejściową jest siła o zakresie $0,1 \div 100 \text{ N}$ lub przemieszczenie $1 \mu\text{m} \div 10 \text{ mm}$. Poniżej podano użyteczne zależności wykorzystywane w obliczeniach przetwornika:



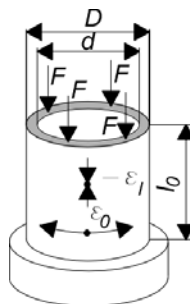
$$\varepsilon_l = \frac{6lF}{2} = \frac{3hl}{3} U, \quad \varepsilon_p = -\nu\varepsilon_l$$

Rys.3.5. Belka zginana jako przetwornik mechaniczny sprężysty [11]

naprężenia maksymalne $[N/m^2]$, U ugięcie końca belki $[m]$, F siła działająca na wolny koniec belki $[N]$, l odległość od wolnego końca belki $[m]$. Wzdłuż belki występuje nierównomierny rozkład naprężeń. Naprężenie σ_{max} występują na linii utwierdzenia belki i maleją liniowo do zera ze wzrostem odległości. Tensometry nakleja się u nasady belki, gdzie również występują maksymalne odkształcenia [11].

Na rysunku 3.6. pokazano cylinder ściskany jako przetwornik mechaniczny sprężysty. Wielkością wejściową jest siła o zakresie $1 \text{ kN} \div 10 \text{ MN}$ i przemieszcze-

gdzie ε_l , ε_p odkształcenia powierzchniowe wzdłużne i poprzeczne, σ_{max} na-



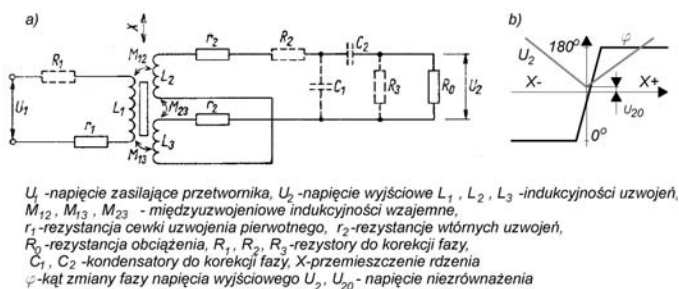
Rys. 3.6. Walec ściskany jako przetwornik mechaniczny sprężysty [11]

nie $1 \mu m \div 1 mm$. Poniżej podano użyteczne zależności określające zależności wyjściowe wykorzystywane w obliczeniach przetwornika:

W celu uniknięcia nierównomiernego rozkładu naprężeń siłę mierzoną przenosi się na element sprężysty poprzez odpowiednie końcówki kuliste a na powierzchni bocznej walca nakleja się co najmniej 8 tensometrów w celu uśredniania sygnałów.

Przetworniki tensometryczne. Tensometry zbudowane w postaci elementów rezystancyjnych (w postaci cienkich drucików, ścieżek lub folii) zmieniają rozmiary geometryczne poddane działaniu zewnętrznych obciążeń. Podstawą stosowania tensometrów jest liniowa zależność pomiędzy względną zmianą rezystancji spowodowaną obciążeniem zewnętrznym a odkształceniem spowodowanym przez to obciążenie. Współczynnik nachylenia tej linii nosi nazwę czułości odkształceniowej (stała tensometru). Prowadzi do podstawowego równania tensometru $\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$ gdzie k jest współczynnikiem czułości odkształceniowej tensometru. Więcej o konfiguracjach tensometrów, sposobach pomiaru $\Delta R/R$ podano w rozdziale 4 tego skryptu.

Przetwornik indukcyjny (transformator różnicowy) jest przetwornikiem, zasilanym z pomocniczego źródła napięcia przemiennego, w którym przesuwający się rdzeń ferromagnetyczny zmienia



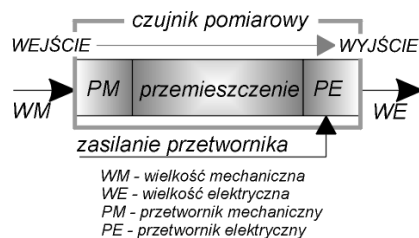
Rys.3.7. Przetwornik indukcyjny (transformator różnicowy)
[11] a-schemat zastępczy transformatora różnicowego, b - zależność

się rdzeń ferromagnetyczny zmienia stopień sprzężenia uzwojenia pierwotnego L₁ z dwoma uzwojeniami wtórnymi L₂ i L₃ połączonymi przeciwnie (rys. 3.7) co powoduje taki rozkład strumienia magnetycznego obejmującego uzwojenia cewek, że uzyskuje

się liniową zależność amplitudy przemiennego napięcia wyjściowego z transformatora od przesunięcia rdzenia. Przejściu rdzenia przez środek symetrii geometrycznej i środek symetrii elektrycznej (punkty odpowiadające położeniu poosiowemu rdzenia dla symetrii geometrycznej w przybliżeniu pokrywają się) towarzyszy odwrócenie fazy napięcia wyjściowego o 180° (rys. 3.7b). Wektor napięcia wyjściowego przesunięty jest w stosunku do wektora napięcia zasilania o kąt φ . Najogólniej kąt ten zależy od konstrukcji transformatora różnicowego, częstotliwości zasilania, rodzaju obciążenia i innych czynników. Wprowadzając dodatkowe elementy

R i C w obwody uzwojeń transformatora (rys. 3.7a, linia przerywana) można uzyskać zmniejszenie kąta fazowego [11]. Istotne parametry metrologiczne to: znamionowa wartość przemieszczeń rdzenia od kilkudziesięciu mikrometrów do kilkudziesięciu centymetrów, błąd liniowości 0,1...1%, zasilanie napięciowe 1..5 V, zasilanie prądowe 1..5 mA, częstotliwość napięcia zasilania (f_0); 50 Hz – urządzenia przemysłowe, 400 Hz - lotnicze mierniki pokładowe, 5 kHz - przyrządy miernictwa laboratoryjnego, 50 kHz - przyrządy laboratoryjnego miernictwa dynamicznego, znamionowa wartość napięcia wyjściowego od kilku miliwoltów do kilku woltów.

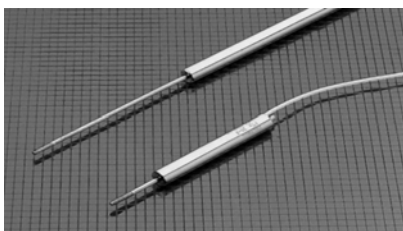
W dalszych rozważaniach przedstawimy rozwiązanie czujników pomiarowych siły, przemieszczenia i odkształcenia tzn. tych czujników z którymi student będzie



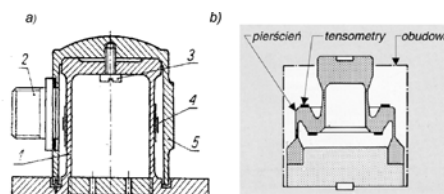
Rys. 3.8. Zasada działania czujnika po-

miął do czynienia w czasie pracy w LMD. Czujnik pomiarowy opisuje się jako przetwornik stanowiący element wejściowy układu elektrycznego, przetwarzający badaną nieelektryczną wielkość fizyczną w sygnał elektryczny dogodny do pomiaru, dalszego przekształcania lub rejestracji[11]. Czujnik pomiarowy może być wykorzystany w obwodach pomiarowych i obwodach sterujących. W rozważanych przykładach występuje zarówno jedno jak

i drugie zastosowanie (rozdz. 2, rys.2.5). Konstrukcja czujnika najczęściej zawiera przetwornik złożony z kilku prostszych przetworników mechanicznych i elektrycznych umieszczonych we wspólnej obudowie i umożliwiającej zamontowanie go na badanym obiekcie.



Rys. 3.9. Widok czujnika przemieszczenia firmy Peltron®Ltd



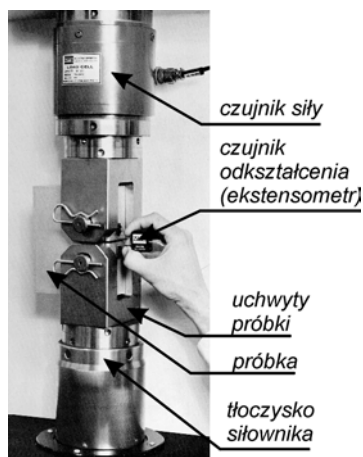
Rys. 3.10. Tensometryczne czujniki siły
a) ST-10 [11], 1 – element sprężysty, 4 – tensometry b) Rozwiązanie stosowane w maszynach wytrzymałościowych

Zmiana nieelektrycznej wielkości fizycznej w elektryczną najczęściej przebiega wg zasady pokazanej na rysunku 3.8. Przemieszczenie uzyskiwane w przetworniku mechanicznym (PM) działa na przetwornik elektryczny (PE). Przemieszczenia, które można zmierzyć niektórymi najczęściej używanymi przetwornikami elek-

trycznymi zawierają się w zakresie od kilku mikrometrów (przetworniki piezoelektryczne) do kilku milimetrów (przetworniki indukcyjne i pojemnościowe). W pewnych przypadkach może zanikać różnica pomiędzy pojęciem przetwornika a czujnika np. termoelementy nie muszą współpracować z przetwornikami mechanicznymi).

Czujnik do pomiaru przemieszczenia to najczęściej transformatorowy czujnik przemieszczeń liniowych względnych (mierzonych względem nieruchomego układu najczęściej związanego z obudową czujnika). Jako przykład rozwiązania pokazemy czujnik przemieszczeń firmy Peltron®Ltd (rys.3.9). W obudowie znajduje się cewka transformatora różnicowego a w osi cewki przemieszcza się ruchomy rdzeń magnetyczny od położenia którego zależy sygnał wyjściowy. Firma wykonuje cały szereg rozwiązań różniących się zakresem pomiarowym przemieszczeń, średnicą zewnętrzną cylindrycznej obudowy, sposobem związania ruchomego rdzenia z badanym obiektem np. docisk przez wewnętrzną sprężynę. Istotne parametry metrologiczne to nieliniowość $\leq 0,75\%$, błąd temperaturowy $0.02\%/^{\circ}\text{C}$.

Czujniki do pomiaru siły. Jako przykład rozwiązania konstrukcyjnego czujnika siły pokazemy rozwiązanie opracowane w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej [11] (rys.3.10a). Elementem sprężystym pracującym w układzie



Rys. 3.11. Przykładowe położenie czujników siły i odkształcenia

ściskania jest tuleja cylindryczna stanowiąca jedną całość konstrukcyjną z kołnierzem podstawy. Cztery czynne oraz cztery kompensacyjne tensometry są naklejone na pobocznicę tulei. Siła przenoszona jest na element sprężysty przez czaszę kulistą znacznie eliminującą wpływ ewentualnego nieosiowego przyłożenia siły. Z danych technicznych zwrócić uwagę należy na: znamionowy zakres siły $0...10\text{kN}$, dopuszczalne przeciążenia 50% , czułość napięciowa odniesiona do napięcia zasilania 1 mV/V , tolerancja czułości $\pm 0,5\%$, błąd liniowości $< 0,25\%$, histereza $0,2\%$, układ pomiarowy - pełny mostek Wheatstonea. W przypadku omówionych w rozdziale 2 maszyn wytrzymałościowych stosuje się czujniki siły ściskająco-rozciągające. Najczęściej sposób naklejenia tensometrów, ich liczba i sposób kompensacji tem-

peraturowej są tajemnicą firmy. Schemat takiego czujnika pomiarowego (*Load Cell*) pokazano na rysunku 3.10b a jego widok na rysunku 3.11.

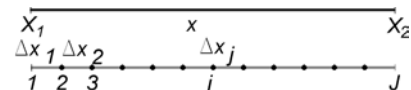
Czujnik do pomiaru odkształcenia. To oryginalne rozwiązanie złożone z dwóch przetworników: mechanicznego sprężystego i elektrycznego tensometrycznego. Schemat czujnika pokazano na rys. 3.12. Czujnik taki zwany ekstensometrem mocowany jest na obiekcie badanym i najczęściej przystosowany poprzez

uksztalowanie beleczek sprężystych do określonego sposobu zamocowania. Czułość ekstensometru można odpowiednio kształtować konstrukcyjnie przez dobór parametrów przetwornika sprężystego (wspomniano o tym wcześniej). Na rysunku 3.13 pokazano zastosowanie ekstensometru do pomiaru odkształcenia rozciąganej próbki (rys. 3.13.a) i rozwarcia szczeliny w próbce tynu „Compact” (rys. 3.13b).



3.2.2. Konwersja wyników pomiaru – przetwarzanie analogowo-cyfrowe

Każda wielkość fizyczna zmieniająca się w czasie, aby mogła być zarejestrowana i przetworzona przez system komputerowy, musi najpierw zostać przekształcona na formę dyskretną tj. kodowane zapisy cyfrowe. Oznacza to, że przebieg będący ciągłą funkcją czasu, musi zostać poddany procesowi dyskretyzacji w dziedzinie czasu i wartości sygnału fizycznego.



Rozważmy ciągłą zmienną niezależną x , leżącą w obszarze $X=[X_1, X_2]$. Kontinuum zmiennej niezależnej zastępujemy siatką punktów, dzieląc obszar X na zbiór $J-1$ elementów Δx_j . Można skonstruować wektor $\{x_j\}$, o skończonym wymiarze J , definiując zmienną ciągłą x jedynie w punktach j , $1 \leq j \leq J$. Wówczas mamy:

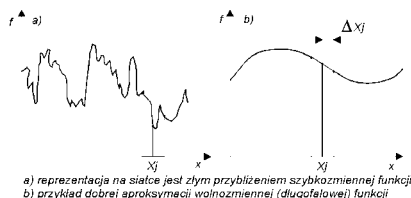
Mając daną ciągłą funkcję $f(x)$, możemy ją przybliżyć, definiując odpowiadający jej wektor $\{f_j\}$ w punktach wyznaczonych przez wektor $\{x_j\}$ stąd $f_j=f(x_j)$. Reprezentacja $\{f_j\}$ jest nieciągłym opisem funkcji ciągłej $f(x)$. Jeżeli funkcja ciągła będzie gładka w elementarnym przedziale Δx_j to powiemy wówczas o „długofalowym” przybliżeniu jej przez wektor $\{f_j\}$. Funkcję f można przybliżyć przez $\{f_j\}$ w dowolnym punkcie x' : $x_j \leq x' \leq x_{j+1}$ dokonując interpolacji. Jeśli oznaczymy:

to w pierwszym rzędzie interpolacji $f^* = \varepsilon f_{i+1} + (1-\varepsilon) f_j$ gdzie f^* jest przybliżeniem f . Istotą tej aproksymacji jest fakt, że opisujemy jedynie „długofalowe” (funkcje gładkie) własności funkcji f (funk-

$$\varepsilon = \frac{x' - x_j}{x_{j+1} - x_j}$$

to w pierwszym rzędzie interpolacji $f^* = \varepsilon f_{i+1} + (1-\varepsilon) f_j$ gdzie f^* jest przybliżeniem f . Istotą tej aproksymacji jest fakt, że opisujemy jedynie „długofalowe” (funkcje gładkie) własności funkcji f (funk-

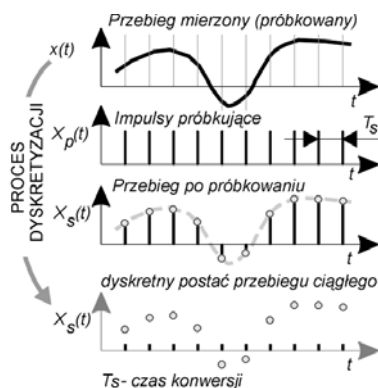
cja f zmienia się wolno w przedziale Δx_j) co oznacza, że jeśli f zmienia się istotnie wewnątrz przedziału to f^* jest w pewnym sensie „uboga” aproksymacją. Nie możemy również opisać długości fal mniejszych od Δx_j . Na rysunku 3.15 pokazano



funkcje f zmiennej x w postaci wektora o składowych f_i w węzłach siatki f . Istotą pokazanej tu metody różnicowej jest stosowalność w zjawiskach „długofalowych”. Im więcej jest punktów zmiennej zależnej, które leżą w obszarze X (im większe jest J), tym lepsza jest reprezentacja $\{f_i\}$ funkcji f [9].

Konwersji sygnałów analogowych na postać dyskretną dokonuje się w przetwornikach analogowo-cyfrowych zwanych dalej A/C. Ponieważ w technice laboratoryjnej większość mierzonych wielkości jest bezpośrednio rejestrowana jako analogowy sygnał napięciowy zajmujemy się dalej przetwornikami przetwarzającymi sygnał napięciowy reprezentujący mierzony sygnał na postać dyskretną możliwą do pamiętania w układach cyfrowych systemu komputerowego. Proces konwersji A/C składa się z trzech faz:

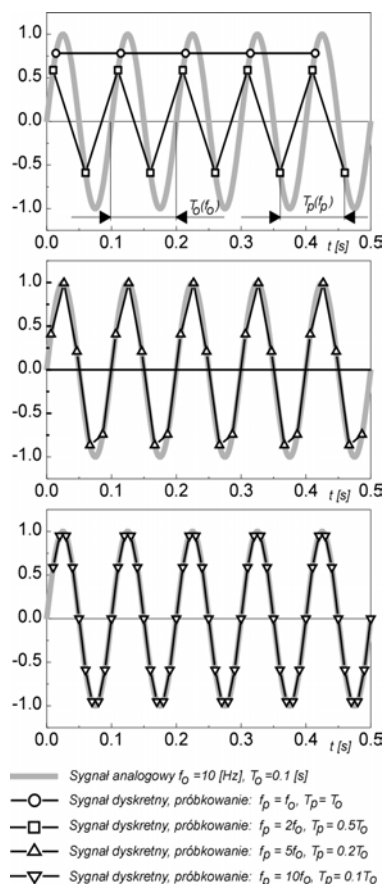
- dyskretyzacji czasu (próbkowanie),
- porównania wielkości mierzonej z wewnętrzną wielkością referencyjną przetwornika A/C - jest to dyskretyzacja wartości sygnału nazywana kwantyzacją wielkości mierzonej,
- kodowaniem wyznaczonej wartości w słowo możliwe do przetwarzania w systemie mikrokomputerowym.



Kwantowanie jest więc porównaniem wartości sygnału ciągłego analogowego z podzieloną na przedziały wartością napięcia wzorcowego, kodowanie jest przyporządkowaniem liczbie wynikającej z kwantowania odpowiedniego kodu cyfrowego. Wyjaśnimy poniżej te zjawiska biorąc pod uwagę tylko takie sygnały analogowe dla których możemy stosować „długofalowe” przybliżenie (funkcje gładkie).

Próbkowanie. Rozważmy ciągłą funkcję pokazaną na rysunku 3.16. Jeżeli funkcja ta reprezentuje ciągłą zmianę sygnału analogowego to dla celów przetwarzania

cyfrowego konieczne jest ograniczenie nieskończonego zbioru wartości sygnału analogowego do skończonego zbioru wartości sygnału w ustalonych chwilach. Próbkowanie funkcji polega na przekształceniu jej na ciąg złożony z wartości chwilowych sygnału analogowego odczytanych w pewnych chwilach czasu.

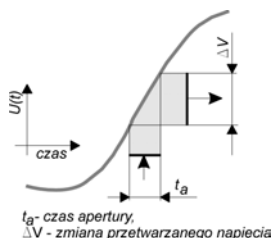


Rys.3.17. Próbkowanie sinusoidy

odtworzenie sygnału na podstawie znajomości ciągu próbek. Rozważmy wpływ kroku próbkowania na rekonstrukcję sygnału ciągłego, obserwując informacje jakie uzyskamy o ciągłym sygnale harmonicznym przy różnym czasie próbkowania (rys.3.17). Próbkowanie z krokiem T_p równym okresowi sinusoidy powoduje, że otrzymany ciąg nie różni się od ciągu otrzymanego po próbkowaniu sygnału stałego. Takie zjawisko nazywamy maskowaniem częstotliwości. Dobór czasów próbkowania spełniających warunek $T_p < T_0$ daje lepsze efekty i widać, że do prawidłowego określania sinusoidy należy dobierać próbkowanie z mniejszym krokiem. Przy sygnale o ograniczonym widmie częstotliwościowym próbkowanie powinno być na tyle częste, aby umożliwić prawidłowe określenie składowych o najwyższych częstotliwościach. Podstawowym twierdzeniem precyzującym wymagane warunki jest twierdzenie o próbkowaniu sformułowane niezależnie przez Kotielnikowa w 1933r, Shannona w 1949 r a także Nyquista w 1928 r [5]. Twierdzenie to mówi, że **sygnał $f(t)$ o widmie częstotliwościowym nie zawierającym składo-**

Przyjmujemy, że odległość T między chwilami próbkowania, zwana okresem lub krokiem próbkowania jest stała (mówimy o próbkowaniu równomiernym). Przy takim próbkowaniu tracimy wiele informacji o wartości sygnału np. po próbkowaniu nie jest znana wartość $f(0,5T)$. Z drugiej strony, o ile funkcja jest gładka (przybliżenie „*dlugofalowe*”) i krok próbkowania jest dostatecznie mały, to można interpolować wartość funkcji między chwilami próbkowania z dostateczną dokładnością. Ograniczenie nieskończonego zbioru wartości sygnału do skończonego zbioru wartości tego sygnału w chwilach $T, 2T$ jaki otrzymamy przed próbkowaniem, (rys.3.16) może nasuwać wątpliwości, czy otrzymany zbiór wartości chwilowych można uznać za wiarygodną reprezentację pierwotnego sygnału analogowego. W ogólnym przypadku ilość informacji niesiona przez ciąg próbek jest mniejsza od informacji zawartej w pierwotnym sygnale i na podstawie wartości chwilowych nie można jednoznacznie odtworzyć przebiegu sygnału pomiędzy chwilami próbkowania. Jeżeli ograniczy się szybkość zmian sygnału analogowego oraz będzie się próbkować z dostatecznie dużą częstotliwością, to jest możliwe jednoznaczne

wych o częstotliwościach wyższej niż f_{max} [Hz] jest w pełni określony wartościami chwilowymi otrzymanymi przez próbkowanie sygnału $f(t)$ z krokiem

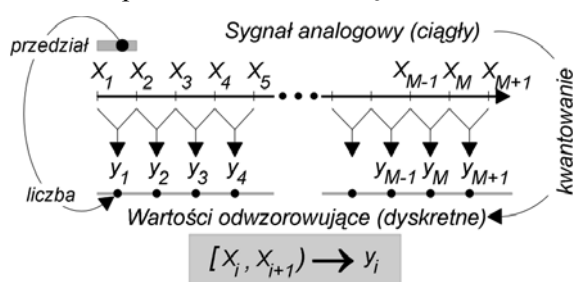


Rys. 3.18. Czas apertury i niepewności amplitudy[1]

$T=0.5 f_{max}$ [s]. Inaczej mówiąc, każdy sygnał ciągły o ograniczonym widmie częstotliwościowym f_{max} można całkowicie odtworzyć przez pobieranie próbek z częstotliwością większą niż $2f_{max}$. Dowód twierdzenia podano w [5]. W praktyce, trudno jest spełnić warunki konieczne twierdzenia. Próbkowanie idealne zakłada, że występuje punktowe pobieranie informacji, co oznacza, że impulsy próbkujące powinny mieć nieskończenie małą szerokość. W rzeczywistości przedział czasu przetwarzania (nazywany czasem apertury [1]; rys.3.18) ma wartość niezerową. Powinien on mieć wartość dopasowaną do szybkości zmian przetwarzanego sygnału oraz

wymaganej dokładności. Na jego wartość ma wpływ metoda przetwarzania sygnału, szybkość działania elementów składowych przetwornika i jego rozdzielczości. Dlatego też stosuje się szybkie układy próbkująco-pamiętające (mowa o nich w dalszej części rozdziału).

Wybór szybkości konwersji (czasu próbkowania) jest ściśle związany z relacją, jaka zachodzi pomiędzy mierzonym przebiegiem a jego liczbową reprezentacją. Szybsze zmiany sygnału mierzonego implikują wzrost szybkości konwersji (skracania czasu próbkowania). Szczególnie w systemach czasu rzeczywistego może wzrastać obciążenie procesora systemu komputerowego. Wynika z tego, że zbyt częste próbkowanie, nieuzasadnione dynamiką mierzonego sygnału, nadmiernie absorbuje procesor. Nierzadko zdarzają się przypadki obciążania procesora przetwarzaniem wielu redundancyjnych (nadmiarowych) informacji, w wyniku ustalenia „na wszelki wypadek” bardzo krótkiego okresu próbkowania. W miernictwie laboratoryjnym uzasadniona technicznie częstość próbkowania mieści się w przedziale 1...50 pomiarów na sekundę.

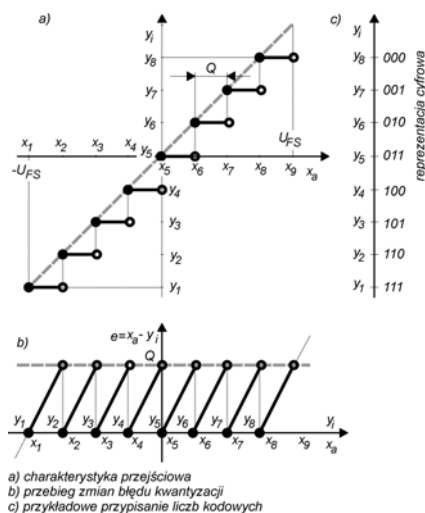


Rys. 3.19. Proces kwantowania sygnału analogowego

Kwantowanie. Przy przedstawieniu wielkości analogowych np. napięcia, które mogą przyjmować nieskończenie wiele wartości pojawia się potrzeba odwzorowania nieskończonego zbioru różnych wartości (mierzony sygnał) do zbioru skończonego (skończony wektor dyskretnych

wartości). Dokonujemy tego za pomocą operacji kwantyzacji, która polega na tym, że w nieskończonym zbiorze wartości analogowych wyróżnia się skończony zbiór

$m+1$ wartości x_i oraz zbiór m wartości y_i , takich że $x_i \leq y_i < x_{i+1}$, $i=1,2,\dots,m$, $m+1$ a następnie przyjmuje się, że wartość y_i będzie reprezentowała wszystkie wartości z przedziału $[x_i, x_{i+1})$ [4] (rys.3.19). Na rysunku 3.20 przedstawiono charakterystykę przejściową kwantyzatora (równomiernego), dla którego przedział zmian napięcia wejściowego jest ograniczony wartościami $-U_{FS}$ i U_{FS} .



Rys. 3.20. Charakterystyka przejściowa kwantyzatora równomiernego [4]

nego przedziału kwantowania (najmniejsza wartość zmiennej rozróżnialna przez układ kwantujący, czyli rozdzielczość układu. Na rys. 3.20c pokazano przebieg zmian błędu kwantyzacji.

Wartości x_i określone są w wyniku podziału tego przedziału na 2^N równych przedziałów o szerokości Q (na rys. 3.20. $N=3$) [4]. Kwantowanie polega na przyporządkowaniu każdej próbce zmierzonego napięcia skończonej liczby poziomów amplitudy, odpowiadającym dyskretnym wartościom od zera do pełnego zakresu. W procesie kwantowania nieuniknione jest powstanie błędu kwantyzacji (e) wynikającego z faktu przypisania jednej wartości y_i wszystkim wartościom $x_a \in [x_i, x_{i+1})$. Błąd ten określa różnicę między rzeczywistą wartością napięcia $x_a \in [x_i, x_{i+1})$ a wynikającą z procesu kwantyzacji wartością y_i tzn. $e = x_a - y_i$. W przypadku kwantowania równomiernego (z przesunięciem) błąd ten zawiera się w granicach $\pm e/2$, gdzie e – wartość elementar-

Przykład: Poddamy kwantyzacji przedział napięcia $[0,12V]$ stosując kwantyzator 3 bitowy ($N=3$) co oznacza $2^N=2^3=8$ poziomów dyskretnych kwantyzatora.

Przedział napięcia x_i [V]	$[0,1)$	$[1,2)$	$[2,3)$	$[3,4)$	$[4,5)$	$[5,6)$	$[6,7)$	$[7,8)$
Dyskretny poziom kwantyzatora y_i	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
Przypisane kody cyfrowe (przykład)	000	001	010	011	100	101	110	111

Kodowanie pozwala na wyrażenie uzyskanej wartości dyskretnej (w procesie kwantyzacji) za pomocą odpowiedniego kodu liczbowego. Jeżeli zbiór wartości dyskretnych y_i zawiera nie więcej niż 2^N elementów, to z każdą wartością y_i może być związane inna liczba binarna N -bitowa. Liczba ta (zapisana w układzie dwójkowym) jest na ogół przedstawiana w postaci ciągu N elementów z przedziału $\{0,1\}$. Bitem nazywamy elementarną ilość informacji, która przy reprezentacji dwuwartościowej przybiera wartości z przedziału $\{0,1\}$.

Oznaczmy dalej liczbę ze zbioru wartości kwantowych y_i przez A . Możemy ją zapisać jako $A=a_1a_2...a_N$ tzn. zawiera ona N elementów przy czym $a_n=\{0,1\}$, $n=1,2,...,N$. Poszczególnym bitom binarnej liczby A przypisane są wagi. Bit, któremu w tej liczbie przypisujemy największą wagę, jest określany jako bit najbardziej znaczący (**MSB - Most Significant Bit**); jest to najczęściej bit a_1 . Bit, któremu jest przypisywana waga najmniejsza, jest określany jako bit najmniej znaczący (**LSB - Least Significant Bit**); jest to najczęściej bit oznaczony przez a_N . Jeżeli największą wartość napięcia, jaką może przyjąć sygnał analogowy, oznaczmy U_{FS} , to wartość napięcia reprezentowaną przez liczbę A można określić z zależności $U(A)=U_{FS} L(A)$, gdzie $L(A)$ określa wartość liczbową reprezentowaną przez liczbę binarną A . Jeżeli wagi poszczególnych bitów a_n mają wartości $1/2^n$, to $L(A)$ jest liczbą ułamkową. Ogólnie, dokładność n -bitowego przetwornika wynosi $1/2^n$ pełnego zakresu.

Przykład: Rozważmy przetwornik A/C z którym będziemy pracować w laboratorium:

- rozdzielczość 12 bitów
- możliwa liczba stanów przetwornika $2^{12}=4096$
- liczba binarna określająca stany kwantowe:

najmniejsza	000000000001
największa	111111111111
przykładowa	110101101010
- wagi poszczególnych bitów $1/2^n$ (n oznaczono wyżej)
- waga najmniej znaczącego bitu $LSB=1/2^{12}=0,000244140625$
- waga najbardziej znaczącego bitu $MSB=1/2^1=0,5$

Przetworniki analogowo-cyfrowe. Konwersji wartości napięcia na postać cyfrową można dokonać na wiele różnych sposobów. Wymienimy tutaj dwie z nich: metodę konwersji bezpośredniej i metodę prób i błędów. Pierwsza z nich polega na bezpośredniej klasyfikacji napięcia wejściowego do jednego z 2^N przedziałów napięć, przy czym każdemu przedziałowi jest przypisana odpowiednia N -bitowa liczba binarna. Metoda ta wymaga do swej realizacji dużej liczby dokładnych komparatorów napięcia (układów porównujących dwa sygnały i pozwalających stwierdzić ich zgodność lub niezgodność), co ogranicza możliwość uzyskania przetworników o dużej rozdzielczości. W drugiej grupie metod konwersji analogowo-cyfrowej w zasadzie również wykorzystuje się ideę porównania nieznanego napięcia z 2^N poziomami napięcia, jednak porównanie to odbywa się metodą prób i błędów. Wydłuża to co prawda czas konwersacji, ale możliwa jest realizacja układów o więk-

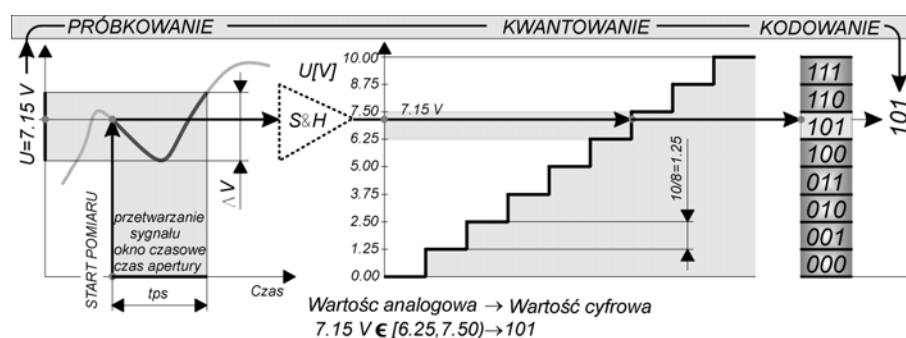
szej rozdzielczości. Więcej o metodach tego typu przetwarzania może czytelnik znaleźć w pracy [4].

Układy próbkująco-pamiętające. Ze względu na skończony czas potrzebny na wykonanie konwersji A/C (czas apertury) przetwarzana wartość analogowa nie powinna w czasie konwersji ulegać zmianom większym, niż to wynika z wymaganej dokładności przetwarzania – w idealnym przypadku wartość analogowa powinna być stała w czasie przetwarzania.

Przykład: Przyjmując, że maksymalny błąd wynikający z czasu apertury powinien być mniejszy od błędu wynikającego z kwantowania (liczba bitów przetwornika A/C) można obliczyć, że dla przebiegu sinusoidalnie zmiennego o częstotliwości 1 kHz i dla rozdzielczości 10 bitów wymagany czas apertury wynosi 320 ns, a dla rozdzielczości 12 bitów 80 ns. Sygnał o częstotliwości 1 kHz jest stosunkowo wolnozmiennym sygnałem a mimo to trudno znaleźć przetwornik o takiej rozdzielczości i tak krótkim czasie przetwarzania. Stąd potrzeba stosowania układów próbkująco-pamiętających [1].

W wielu zastosowaniach szybkość zmian przetwarzanego sygnału analogowego jest na tyle duża, że spełnienie powyższego warunku jest niemożliwe bez zastosowania układów pomocniczych, które zapewniają zapamiętanie chwilowej wartości sygnału analogowego na czas przetwarzania. Funkcję tę spełniają układy próbkująco-pamiętające oznaczone dalej *SH* (*Sample and Hold*). W działaniu układu próbkująco-pamiętającego wyróżnia się dwie fazy: fazę próbkowania (*Sample*) i fazę pamiętania (*Hold*). W fazie próbkowania układ zapewnia śledzenie sygnału analogowego tak, by w chwili przejścia do fazy pamiętania możliwe było zapamiętanie chwilowej wartości napięcia przetwarzanego sygnału analogowego. Chwilowe przejścia od fazy próbkowania do fazy pamiętania i odwrotnie określone są przez układ sterujący.

Na rys. 3.21 pokazano pełny schemat przetwarzania analogowo-cyfrowego.



Rys. 3.21. Proces przetwarzania analogowo-cyfrowego

Organizując tor pomiarowy, w którym realizowane będzie przetwarzanie analogowo-cyfrowe inżynier powinien uwzględnić:

- parametry mierzonego sygnału: pasmo sygnału, amplitudę, liczbę sygnałów (dla pomiarów wielokanałowych),
- wymagany czas pomiaru i konwersji tj. liczb pomiarów na sekundę,
- błąd pomiaru, rozdzielczość i czułość (najmniejsze napięcie, które można zmierzyć).

3.2.3. Przetwarzanie wyników pomiaru – wspomaganie komputerowe pomiaru

Wartości pomiarów uporządkowane w postaci szeregu pozostają w stosunku czasowym do mierzonego sygnału (zależnym od wybranego okresu próbkowania) oraz jako ciąg liczb mają właściwości numeryczne. Jedynie druga możliwość jest wykorzystywana przez komputer. Oznacza to, że mikrokomputer traktuje czasowy szereg wartości jako uporządkowany ciąg liczb i przetwarza go według zadanego algorytmu. Oprogramowanie komputera nie uwzględnia faktu, że przetwarzany

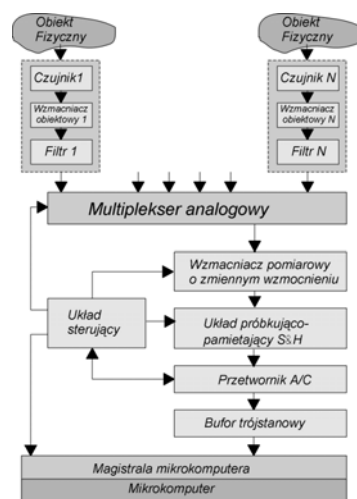
ciąg liczb jest odwzorowaniem fizycznego procesu, odzwierciedlającym jego przebieg co do czasu i wartości. Fakt istnienia takiej zależności może być czasami pośrednio zauważalny przez restrykcje czasowe nakładane na wykonanie pewnych obliczeń. Stąd wynika podział przetwarzania wyników pomiarów na:

- Przetwarzanie wsadowe.
- Przetwarzanie w czasie rzeczywistym (nadażne).

W pierwszym przypadku, wyniki pomiarów są po konwersji *A/C* zapamiętane w pamięci komputera w formie uporządkowanego czasowo ciągu liczb. Ich przetwarzanie według stosowanych algorytmów nastąpi w późniejszym czasie. W drugim przypadku wynik każdego kolejnego pomiaru jest przetwarzany natychmiast. Oprócz logicznej poprawności wykonywanego algorytmu, przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym istotną rolę spełnia dopasowanie czasowe wykonywanych obliczeń do realizowanego okresu próbkowania. To zagadnienie jest często jednym z najistotniejszych kryteriów doboru metody konwersacji analogowo-cyfrowej, decydującej o tym, jaki przetwornik *A/C* należy zastosować w konkretnym przypadku.

Jako uzupełnienie informacji dotyczącej organizacji pomiarów pokażemy sytuację operatora wieży wiertniczej. W sterowni na platformie wiertniczej operator może mieć do czynienia z 500 sygnałami analogowymi i 2500 sygnałami cyfrowymi, a na projektowanych w przyszłości platformach wiertniczych dwóch lub trzech operatorów może mieć do czynienia z monitorowaniem 20000 sygnałów. W urządzeniach pokładowych pojazdów kosmicznych np. *Hubble Space Telescope* występuje ponad 6000 czujników, które muszą być monitorowane w czasie rzeczywistym [6]. Ta złożoność pomiarowa zmusza konstruktorów do budowy tzw. systemów ekspertowych czasu rzeczywistego. Więcej o takich systemach można przeczytać w [6].

Na rysunku 3.22 pokazano schemat blokowy toru pomiarowego sterowanego komputerem. W czujniku wartość parametru fizycznego jest przekształcana na proporcjonalny do niej sygnał elektryczny, wzmacniany następnie do poziomu wymaganego w dalszej części systemu. Sygnał elektryczny jest poddawany filtracji w filtrze dolnoprzepustowym eliminującym jego wyższe harmoniczne czyli tzw. szумы i zakłócenia szybkoszienne. Tak przetworzony sygnał analogowy jest doprowadzony do jednego z wejść multipleksa analogowego. Zastosowanie multipleksa umożliwia obsługę wielu czujników przez ich kolejne dołączanie do dalszej części systemu. Po ustawieniu wybranego kanału multipleksa sygnał elektryczny, odpowiadający danej wielkości fizycznej, zostaje zapamiętany w układzie prób-



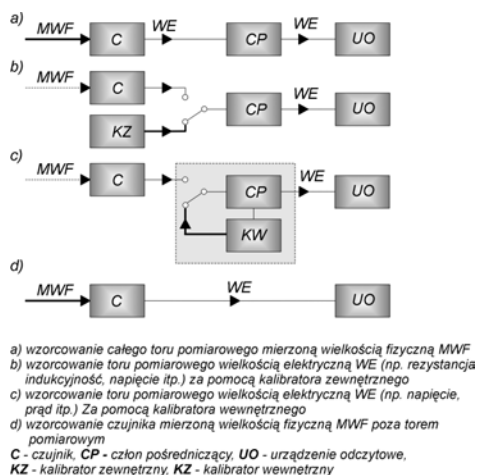
Rys. 3.22. Schemat sterowanego komputerowo systemu zbierania danych [1].

kującym z pamięcią (*SH*), w którym jest utrzymywany w ciągu czasu niezbędny do jego całkowitego przetworzenia na wartość cyfrową w przetworniku *A/C*. Wynik przetwarzania jest przekazywany przez magistralę do mikrokomputera. W tym, systemie czas pracy przetwornika analogowo-cyfrowego, w wyniku zastosowania multipleksera i układu próbkującego z pamięcią, zostaje podzielony na odcinki czasowe, w których odbywa się obsługa kolejnych torów pomiarowych. Przełączaniem multipleksera steruje specjalny układ synchronizujący, sprzężony z komputerem. W takim rozwiązaniu wystąpi błąd przesunięcia związanym z czasem obsługi jednego kanału przy pracy wielokanałowej. W przypadku, gdy jest istotne dokonanie pomiaru kilku parametrów jednocześnie, można zastosować inne rozwiązanie np. umieszczając układy *SH* przed multiplekserem. Potrzeba wtedy tyle układów *SH* ile jest kanałów wejściowych. Jeszcze innym rozwiązaniem jest zastosowanie tylu przetworników *A/C*, ile jest kanałów analogowych [1].

Komputery standardu PC mają otwartą architekturę i możliwość rozbudowy i dostosowania struktury do potrzeb użytkownika. Ten typ komputerów posiada pewne ograniczenia szczególnie związane z prędkością z jaką komputer może komunikować się z otoczeniem przez układy kontrolno-pomiarowe połączone bezpośrednio z magistralą. Moduł z przetwornikiem *A/C* i układami sterującymi montowany jest w specjalnych gniazdach płyty głównej, które jest wejściem-wyjściem magistrali systemowej. Przetworniki *A/C* stanowią dla procesora zewnętrzne urządzenie wejściowo-wyjściowe, z których odczytuje lub zapisuje dane. Urządzenia wejściowo-wyjściowe, łącząc się bezpośrednio z magistralą procesora tj. z jego szynami danych, adresową i sterującą, muszą spełniać określone warunki dopasowania. Więcej na ten temat w pracach [1,2,3,12]. Współpraca przetwornika *A/C* z systemem komputerowym wymaga zorganizowania czasu i sposobu transmisji danych do pamięci systemu. Wśród znanych metod (przeglądania zgłoszeń, przerw, oczekiwania na zgłoszenie, bezpośredniego dostępu do pamięci DMA) najczęściej stosowanymi są metoda przerwań procesora i metoda bezpośredniego dostępu do pamięci.

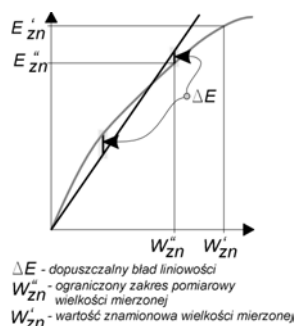
3.3. WZORCOWANIE TORÓW POMIAROWYCH

Wzorcowanie urządzeń pomiarowych jest realizowane w określonym torze pomiarowym. Na rysunku 3.23 przedstawiono najczęściej stosowane układy wzorcowania urządzeń do pomiaru wielkości fizycznych. Wzorcowanie całego toru pomiarowego przez doprowadzenie do czujnika **mierzonej wielkości fizycznej** (*MWF*) uznanej za wzorcową pokazano na rysunku 3.23a. Układ ten w praktyce pomiarowej jest najkorzystniejszy, ponieważ umożliwia oszacowanie błędu całego toru pomiarowego (łącznie z czujnikiem i urządzeniem odczytowym). Wadą jest konieczność każdorazowego stosowania (często na stanowisku pomiarowym) wzorca wielkości mierzonej – co nie zawsze jest możliwe. O wzorcowaniu toru pomiarowego z wyłączeniem czujnika, które realizuje się za pomocą kalibratora



Rys. 3.23. Układy wzorcowania urządzeń do pomiaru nieelektrycznych wielkości fizycznych [11]

nym sygnału wyjściowego $E_0, E_1, \dots, E_{zn}$ odpowiadający wartościom wzorcowej wielkości mierzonej $W_0, W_1, \dots, W_{zn}$. Na podstawie par (W_i, E_i) sporządza się charakterystykę roboczą, ujmującą zależność $E=f(W_m)$ wykreślaną najczęściej w prostokątnym układzie współrzędnych. W najogólniejszym przypadku charakterystyka robocza może nie być linią prostą, jak również może nie przechodzić przez początek układu współrzędnych – istotne jest natomiast, aby była ona powtarzalna.



Rys. 3.24. Ograniczenia pracy czujnika w celu zmniejszenia błędów liniowości [11]

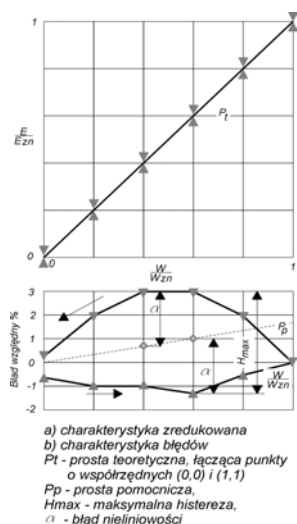
zewnętrznego (rys. 3.23b) lub wewnętrznego układu kalibracji (rys. 3.23c) można przeczytać w [11].

Charakterystyki statyczne czujników otrzymuje się metodą statycznego obciążania czujnika (w zakresie od zera do wartości znamionowej) znanymi wartościami wielkości mierzonej, przy równoczesnym odczycie elektrycznego sygnału wyjściowego. Urządzenia do zadawania wielkości mierzonej oraz do odczytu elektrycznego sygnału wyjściowego powinny mieć dokładność większą co najmniej o jedną klasę od oczekiwanej dokładności wzorowanego czujnika. W wyniku wzorowania odczytuje się uporządkowany ciąg wartości elektrycz-

nych sygnału wyjściowego $E_0, E_1, \dots, E_{zn}$ odpowiadający wartościom wzorcowej wielkości mierzonej $W_0, W_1, \dots, W_{zn}$. Na podstawie par (W_i, E_i) sporządza się charakterystykę roboczą, ujmującą zależność $E=f(W_m)$ wykreślaną najczęściej w prostokątnym układzie współrzędnych. W najogólniejszym przypadku charakterystyka robocza może nie być linią prostą, jak również może nie przechodzić przez początek układu współrzędnych – istotne jest natomiast, aby była ona powtarzalna.

W praktyce pomiarowej dąży się jednak, by charakterystyka była liniowa tzn. proporcjonalnym przyrostom wielkości mierzonej odpowiadały proporcjonalne przyrosty elektrycznego sygnału wyjściowego, a zerowemu sygnałowi wielkości mierzonej – zerowy sygnał wyjściowy. Większość czujników ma charakterystyki nieliniowe. Zakładając pewien dopuszczalny błąd nieliniowości ΔE , można je zastąpić charakterystykami prostoliniowymi np. ograniczając zakres pomiarowy. (rys.3.24). Charakterystyka robocza czujnika, prócz swego głównego zadania, którym jest identyfikacja wartości mierzonej na podstawie mierzonej wartości sygnału elektrycznego, spełnia również dodatkową funkcję – umożliwia ocenę błędu zera oraz histerezy czujnika.

Podczas wzorcowania czujników, w celu określenia ich błędów, wykonuje się z reguły tzw. charakterystykę błędów. Sposób jej uzyskania jest następujący [11]:



Rys. 3.25 Pomocnicze charakterystyki czujnika[11]

oraz prostej odniesienia nie jest niezbędne. Korzystając z faktu, że prosta odniesienia, wychodząca z początku układu pod kątem $\pi/4$, odcina jednakowe miary odcinków na obydwu osiach, można dla każdej wartości W/W_{zn} określić analitycznie różnicę $(E/E_{zn})_{rz} - (E/E_{zn})_{teor}$. Ciąg tych różnic (pomnożony przez 100) daje wielkość błędu względnego w poszczególnych punktach i umożliwia wykreślenie charakterystyki błędów. Charakterystyka ta (w dogodnym układzie współrzędnych: błąd względny w funkcji względnej wielkości mierzonej) umożliwia łatwe określenie:

- błędu zera czujnika, jako miary odchylenia punktów przy $(W_0/W_{zn})=0$,
- błędu liniowości czujnika, jako miary odległości dwóch punktów maksymalnie oddalonych od prostej pomocniczej
- histerezy czujnika, jako miary odcinka maksymalnej różnicy błędów przy obciążaniu i odciążaniu.

Współczesne czujniki pomiarowe produkowane przez firmy wyspecjalizowane są z reguły dostarczane bez charakterystyki roboczej – natomiast ich metryki zawierają takie dane jak czułość, błąd liniowości, błąd zera, histereza. Dane te są na ogół wystarczające do oceny roboczej charakterystyki czujnika.

Wzorcowanie statyczne można przeprowadzić metodą bezpośrednią lub pośrednią. W metodzie bezpośredniej wielkość wzorowana jest tego samego rodzaju co wielkość mierzona np. wzorcowanie czujników ciśnienia za pomocą manometrów obciążnikowo-tłokowych. W metodzie pośredniej zadajemy wielkość funkcyjnie związaną z innymi wielkościami mierzalnymi bezpośrednio. np. określenie współczynnika czułości odkształceniowej tensometrów rezystancyjnych. Metody bezpośrednie zapewniają znacznie większą dokładność wzorcowania niż metody

1. Dysponując zbiorem wyników wzorcowania (osobno dla obciążeń rosnących i malejących) w postaci par liczb $(W_0, E_0), \dots, (W_{zn}, E_{zn})$, oblicza się ich wartości względne, odniesione do parametrów znamionowych: $(W_0/W_{zn}, E_0/E_{zn}), \dots, (W_k/W_{zn}, E_k/E_{zn}), \dots, (1, 1)$.

2. Uzyskane wyniki wykreśla się w nowym układzie współrzędnych $E/E_{zn} = \varphi(W/W_{zn})$, otrzymując tzw. charakterystykę zredukowaną.

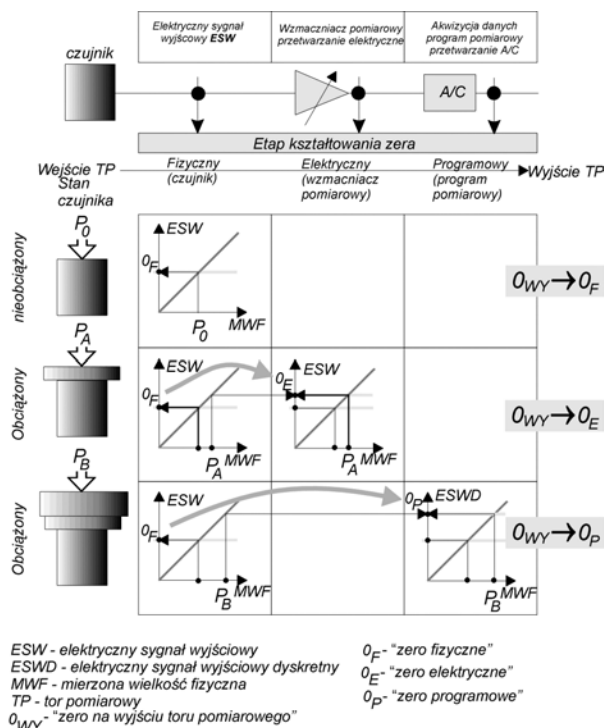
3. Na ten sam wykres nanosi się tzw. prostą odniesienia, tj. prostą obrazującą teoretyczną charakterystykę czujnika, łączącą punkty o współrzędnych (0,0) i (1,1).

4. Różnice w poszczególnych punktach osi rzędnych między rzeczywistymi a teoretycznymi wartościami względnego sygnału wyjściowego pomnożone przez sto dają wartość błędu względnego i umożliwiają wykreślenie charakterystyki błędów (rys. 3.25). Wykreślenie charakterystyki zredukowanej $E/E_{zn} = \varphi(W/W_{zn})$

Wzorcowanie dynamiczne polega na określeniu ich amplitudowych i fazowych charakterystyk częstotliwościowych.

Można to zrealizować w sposób pośredni, badając sygnał odpowiedzi czujnika na pobudzenie go przebiegiem harmonicznym określonej wielkości fizycznej, bądź też w sposób pośredni, badając sygnał odpowiedzi czujnika na pobudzenie go skokiem jednostkowym określonej wielkości fizycznej.

Praktycznym zagadnieniem w czasie pomiaru jest ustawienie stanu zerowego czujnika lub całego toru pomiarowego. To zagadnienie sprawia pewien kłopot w pomiarach i dlatego dla jego wyja-



Rys. 3.26. Schemat kształtowania „zera” toru pomiarowego

śnienia przygotowano rysunek 3.26. Jeżeli czujnik np. siły jest nieobciążony tzn. na jego wejściu panuje stan zerowy to i na jego wyjściu jest stan zera (napięcia wyjściowego) - nazwiemy ten stan „zerem fizycznym”. Jeżeli czujnik zostanie obciążony pewnym obciążeniem np. uchwytami szczęk próbek to stan na wyjściu tego czujnika ulegnie zmianie i nie będzie to już zero. Możemy jednak uznając, że będzie to trwała zmiana, skompensować to wskazanie we wzmacniaczu pomiarowym doprowadzając do stanu zerowego na wyjściu wzmacniacza. W ten sposób kształtujemy zero nie w czujniku fizycznie a pośrednio w elemencie toru pomiarowego - nazwiemy ten stan „zerem elektrycznym”. Możemy wreszcie uzyskiwać zmiany stanu zerowego naszego czujnika np. przez obciążenie go masą próbki itp., które nie mają charakteru zmiany trwałej. Wygodniej jest także uwzględniać poprzez przesunięcie zera toru pomiarowego do nowego położenia w programie komputerowym, w którym tworzymy ostatecznie charakterystykę toru pomiarowego. Wówczas powiemy o zmianach zerowego stanu w programie i nazwiemy to „zerem programowym”. Z tych trzech operacji jedynie pierwsza jest faktycznie osiągnięta poprzez fizyczną zmianę stanu czujnika. Pozostałe są zmianami stanu wyjściowego, który nazywamy stanem zerowym pomimo, że czujnik jest w innym stanie niż zerowy. Oczywiście te zmiany są możliwe tylko dla torów pomiarowych, które opisuje charakterystyka liniowa.

3.4. ZNIEKSZTAŁCENIA SYGNAŁÓW POMIAROWYCH

Przez **zniekształcenie** sygnału rozumie się wszelkie zaburzenie sygnału odpowiedzi w stosunku do pobudzenia zachodzące w całym torze pomiarowym. Przyczynami występowania zniekształceń są:

- Bezładność realnych układów fizycznych, związana z przepływami i przemianami energii.
- Nieliniowy przebieg charakterystyk statycznych i dynamicznych układów związany z faktem, że ich fizyczne parametry w mniejszym lub większym stopniu zależą od amplitud sygnałów.
- Wpływ energii zakłócających.

Zniekształcenia sygnałów powodują występowanie błędów pomiarowych, które mogą mieć charakter zarówno systematyczny jak i przypadkowy. Do znanych metod eliminacji lub zniekształcenia błędów pomiaru, spowodowanych zniekształceniami sygnałów, zalicza się m.in.: uczulenie przyrządu wyłącznie na sygnał pożądaną, filtrację oraz kompensację sygnałów zakłócających. Zniekształceniom powodowanym przez czynniki subiektywne (np. niewłaściwy dobór rodzaju czujników i aparatury do wymagań zadania pomiarowego, błędy konstrukcyjne czujników, nieracjonalne montowanie czujników lub wykonanie połączeń kablowych itp.) w większości przypadków można zapobiec. Ze zniekształceń spowodowanych przez czynniki obiektywne (np. niedoskonałość charakterystyk rzeczywistych, wynikająca z fizycznych zasad pracy czujników i innych członów toru pomiarowego,

istnienie niemożliwych do usunięcia zakłóceń pól fizycznych itp.) należy zdawać sobie sprawę [11].

Zniekształcenia sygnałów występujące w procesie pomiaru należy rozważać indywidualnie w odniesieniu do założonego celu pomiaru, określonego obiektu pomiaru, rodzaju zastosowanych czujników i aparatury wybranej metody pomiarowej oraz warunków pomiaru.

Zakłóceniami sygnałów pomiarowych nazywa się szkodliwe oddziaływanie sygnałów niepożądanych. Zakłócenia można podzielić ze względu na ich umiejscowienie w stosunku do aparatury pomiarowej na wewnętrzne i zewnętrzne. Sygnały zakłócające zewnętrzne powstają w elementach toru pomiarowego. Powodują je szумы własne rezystorów i elementów półprzewodnikowych, sygnały przenikające z kanałów sąsiednich, przebiegi impulsowe nieokresowe i okresowe spowodowane skokowymi zmianami stanu pracy układów. Na sygnały zakłócające wewnętrzne składają się napięcia o częstotliwości sieci zasilającej, prądy spowodowane indukowaniem się ładunków w ekranach kabli, blachach zewnętrznych obudów na skutek występowania zewnętrznych pól elektrycznych, siły elektromotoryczne indukowane pod wpływem pól magnetycznych w przewodach sygnałowych kabli, ekranach oraz cewkach i przewodach stanowiących elementy obwodu sprzężenia magnetycznego, napięcia o charakterze impulsowym i szumowym o bardzo szerokim widmie częstotliwości, spowodowane pracą komutatorowych silników elektrycznych, układów zapłonowych silników spalinowych, wyłączników itp. przenikających do aparatury pomiarowej przez przewody sieci zasilającej.

Praktycznie zapobieganie występowania zakłóceń to ekranowanie od pól zakłócających, racjonalne uziemianie układów pomiarowych, stosowanie niskoszumowych i odpornych na zakłócenia układów wzmacniających, separacja galwaniczna obwodów, filtracja przebiegów w obwodach sygnałowych i zasilających, kompensacja okresowo-przemiennych sygnałów zakłócających.

Całkowita eliminacja zakłóceń jest praktycznie niemożliwa co prowadzi do wniosku, że pożądana jest znajomość poziomu zakłóceń organizowanych torów pomiarowych i ich wpływu na uzyskane wyniki pomiarowe.

3.5. WSTĘPNE PRZETWARZANIE DANYCH

Pomiary zebrane z rzeczywistych obiektów zawierają często składowe oscylacyjne, składowe szybkozmienne o charakterze szumu. Składowe te pochodzą z ubocznych zjawisk towarzyszących działaniu obiektu i pomiarom. W ramach wstępnego przetwarzania danych omówimy ich filtrowanie i wygładzanie.

Filtrowanie sygnałów dyskretnych (po przetworzeniu A/C) jest narzędziem analizy pozwalającym eliminować z przebiegów dyskretnych składowych zawartych w pewnym paśmie częstotliwości. Można kształtować odpowiednio transmitancję filtru cyfrowego tak, by ustalić pasmo przepustowości filtru. Najczęściej stosować będziemy filtr dolnoprzepustowy. W idealnym filtrze dolnoprzepustowym charak-

terystyka amplitudowa równa jest 1 w paśmie przepuszczania $0 \leq f \leq f_c$ oraz zero w paśmie zaporowym $f_c < f \leq 1/2T$ [5,8,10]. Rzeczywiste filtry mają charakterystykę zbliżoną do idealnej.

Na rys. 3.27 pokazano przykład filtracji dolnoprzepustowej filtrem Czebyszewa czwartego rzędu sygnału użytecznego zakłóconego szumem białym o wariancji 0.4 ($f_c = 0,025/T$, T okres próbkowania).

Wyglądane przebiegu polega na usunięciu z niego składowych o wyższych częstotliwościach. W odróżnieniu od filtracji przy wygładzaniu dopuszcza się, aby algorytm korzystał zarówno z pomiarów przeszłych jak i przyszłych w stosunku do wygładzanego punktu.

Zaletą wygładzania jest możliwość uzyskania algorytmów bez opóźnień fazowych. Prostą metodą wygładzania jest metoda wygładzania wielomianami aproksymującymi. Jest ona uogólnieniem często stosowanych metod wygładzania ruchomą średnią. Metoda wygładzania wielomianami aproksymującymi (rys. 3.28) polega na aproksymacjach wielomianami K -tego stopnia pomiarów leżących w pewnym przedziale o szerokości $(2L+1)T$ (T -okres próbkowania), położonym symetrycznie względem wygładzanego punktu. Wartość wielomianu w środku przedziału daje jeden punkt wygładzanego przebiegu. Przesunięcie przedziału o jeden punkt i powtórzenie obliczeń daje następny punkt wygładzonego przebiegu. Postępowanie to powtarza się dla wszystkich punktów prócz punktów krańcowych, dla których postępowanie ulega modyfikacji. Pełny algorytm tej metody pokazano w [5].

Przykłady zastosowań powyższej metody przedstawiono na rys. 3.29. zawierającym wyniki wygładzania wielomianami aproksymującymi pomiarów natężenia promieniowania z serca i nerek substancji radioaktywnej wprowadzonej do krwi. Zastosowano wygładzania wielomianem stopnia $K=12$, szerokość przedziału wynosiła $2L+1=15$, wygładzanie powtarzano 12 razy.

3.6. REALIZACJA ĆWICZENIA

3.6.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie organizacji pomiarów w laboratorium, zasad przetwarzania analogowo-cyfrowego oraz wzorcowania czujników i torów pomiarowych.

3.6.2. Przebieg ćwiczenia

W ramach ćwiczenia wykonane zostaną wzorcowanie trzech czujników: siły, przemieszczenia i odkształcenia (ekstensometr).

- Dla każdego czujnika należy wykonać następujące czynności:
 1. Opisać sygnał wejściowy, wyjściowego czujnika, oraz zastosowany przetwornik pomiarowy.
 2. Dokonać wzorcowania toru pomiarowego czujnika za pomocą MWF dla rosnącej i malejącej wartości MWF (co najmniej 10 punktów w każdym kierunku).
 3. Wykonać charakterystykę roboczą czujnika $E=f(W_m)$ i metodą regresji liniowej aproksymować otrzymane wyniki.
 4. Wykonać charakterystykę błędów (w postaci pomocniczej charakterystyki czujnika).
 5. Wyznaczyć maksymalną histerezę i maksymalny błąd liniowości.Czynności od 1 do 5 wykonać dla każdego czujnika.
- Zapoznać się z organizacją programu komputerowego organizacji pomiarów KPKM-LAB.
- Przygotować pomiar przemieszczenia w czasie z przetwarzaniem analogowo-cyfrowym (określić czas próbkowania, czas pomiaru, parametry przetwornika analogowo-cyfrowego).
- Wykonać pomiar przemieszczenia tłoczyska maszyny wytrzymałościowej wg założonego programu (zasady tworzenia programu sterującego podano w rozdziale 2).
- Wykonać wygładzanie otrzymanego wykresu w jednym z programów analizy inżynierskiej.

3.6.3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy umieścić:

W części opisowej:

- Opis stosowanego czujnika siły, przemieszczenia i odkształcenia (podać przytoczone dane z charakterystyki producenta danego czujnika).
- Procedurę wzorcowania statycznego używanych czujników.
- Zasady przetwarzania analogowo-cyfrowego w torze pomiarowym.

W części obliczeniowej:

- Wyniki wzorcowania wymienionych czujników (tabela poniżej).
- Charakterystykę roboczą czujników $E=f(W_m)$ wraz z wynikiem aproksymacji otrzymanych rezultatów metodą regresji liniowej.
- Charakterystykę błędów (pomocnicza charakterystyka czujnika).
- Uzupełnić tabelę wyników do poniższej postaci i wyznaczyć błąd liniowości (maksymalna nieliniowość) i maksymalnej histerezy.

Wnioski.

Wzorcowanie czujnika				
<i>Nr czujnika..... data.....</i>				
<i>Charakterystyka statyczna czujnika (równanie):</i>				
<i>Statyczny współczynnik wzmocnienia:</i>				
Lp.	MWF [jF]	U [mV]	U _{obliczone} [mV]	Błąd liniowości B[%]
<i>Kierunek rosnącego sygnału wzorcowego</i>				
1				
...				
10				
<i>Kierunek malejącego sygnału wzorcowego</i>				
11				
...				
20				
Maksymalny błąd liniowości (nieliniowość) _____ Maksymalny histereza _____				

3.7. ZAGADNIENIA KONTROLNE

- Rodzaje sygnałów pomiarowych.
- Tor pomiarowy; charakterystyki statyczne i dynamiczne.
- Przetworniki i czujniki pomiarowe; różnice, rodzaje i przykłady zastosowań.
- Czujniki pomiarowe siły, przemieszczenia i odkształcenia.
- Organizacja toru pomiarowego wspomagane komputerowo.
- Przetwarzania analogowo-cyfrowe.
- Przetwarzania wsadowe, przetwarzanie w czasie rzeczywistym.
- Wzorcowanie czujników pomiarowych; charakterystyka błędów.
- Filtrowanie i wygładzanie wyników pomiaru.

Literatura

1. IWANIENKO Z., OHNSORGE P.: Pomiarzy szybkozmiennych sygnałów z zastosowaniem komputerów osobistych klasy IBM PC XT/AT. *Pomiary Automatyka Kontrola* 6 1990 s. 109-113
2. KULIKOWSKI J., L.: Komputery w badaniach doświadczalnych. Warszawa: WN PWN 1993
3. LÖBER CH., WILL G.: Mikrokomputer w technice pomiarowej. Warszawa: WKiŁ 1989
4. ŁAKOMY M., ZABRODZKI J.: Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe. Warszawa: WN PWN 1992
5. MAŃCZAK K., NAHORSKI Z.: Komputerowa identyfikacja obiektów dynamicznych. Warszawa: PWN 1983
6. MULAŁKA J.J.: Systemy ekspertowe. Warszawa: WNT 1996
7. MORECKI A., NAZARCZUK K.: Zarys miernictwa dynamicznego wielkości mechanicznych, cz.I, Podstawy teoretyczne. Warszawa: Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej 1984
8. OPPENHEIM A. V., SCHAFER R. W.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Warszawa: WKiŁ, 1979
9. POTTER D.: Metody obliczeniowe fizyki. Warszawa: PWN 1977
10. SZABATIN J.: Podstawy teorii sygnałów. Warszawa: WKiŁ 1982
11. SZUMIELEWICZ B., SŁOMSKI B.: STYBURSKI W.: Pomiary elektroniczne w technice. Warszawa: WNT 1982
12. WINICKI W.: Organizacja Komputerowych Systemów Pomiarowych. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1997