KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Książka/publikacja jest współfinansowana przez
Unię Europejską w ramach
Europejskiego Funduszu Społecznego

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Tomasz W. Wojtatowicz

Badania doświadczalne wspomagane komputerowo

Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń
- zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej zarządzanie Uczelnią,
nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacniania zdolności do zatrudniania,
także osób niepełnosprawnych.

Politechnika Łódzka

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Skrypt przeznaczony dla studentów studiów stacjonarnych II stopnia na kierunku Fizyka Techniczna.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi lub towarowymi ich właścicieli.

Autor dołożył wszelkich starań, aby zawarte w tym skrypcie informacje były kompletne i rzetelne, nie bierze jednak odpowiedzialności za ich wykorzystanie, ani za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w tym skrypcie.

Wersja 1.0 z dnia 30.11.2010 r.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Spis treści

1. Wstęp 5
2. Systemy pomiarowe 8
2.1. Komputerowe systemy pomiarowe 12
2.2. Elementy składowe systemu pomiarowego 15
2.3. Graficzny interfejs użytkownika 16
2.4. Projektowanie systemu pomiarowego 18
2.5. Literatura 19
3. Przetworniki analogowo-cyfrowe 20
3.1. Próbkowanie i kwantowanie sygnału analogowego 20
3.2. Sposoby kodowania danych 23
3.2.1. Naturalny binarny kod pozycyjny 24
3.2.2. Binarny kod uzupełnieniowy 24
3.2.3. Kod binarny z przesunięciem 26
3.2.4. Kod znak-moduł 27
3.2.5. Dziesiętno-binarny kod pozycyjny (kod BCD) 27
3.2.6. Kod Graya 28
3.3. Parametry charakterystyczne przetwornika 29
3.4. Błędy rzeczywistego przetwornika 30
3.5. Metody przetwarzania 33
3.6. Literatura 36
4. Przetworniki cyfrowo-analogowe 37
4.1. Parametry charakterystyczne przetwornika 38
4.2. Konstrukcje przetworników 39
4.3. Literatura 42
5. Interfejsy 43
5.1. Parametry charakterystyczne 43
5.2. Interfejsy szeregowe 44
5.2.1. Interfejs RS-232C 45
5.2.2. Interfejs RS-422A i RS-423A 56
5.2.3. Interfejs RS-485 58
5.2.4. Interfejs USB 60
5.2.5. Interfejs IEEE1394 63
5.3. Interfejsy równoległe 63
5.3.1. Programowalny sterownik równoległego wejścia/wyjścia 64
5.3.2. Interfejs IEEE1284 66
5.2.3. Interfejs GP-IB 66
5.3.4. Interfejs VME 70
5.3.5. Interfejs VXI 71
5.3.6. Interfejs FASTBUS 71
5.4. System CAMAC 72

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

5.4.1. Organizacja magistrali kasetowej 75
5.4.2. Organizacja magistrali równoległej 76
5.4.3. Organizacja magistrali szeregowej 77
5.5. Literatura 77
6. Wirtualne przyrządy pomiarowe 79
6.1. Komputerowe karty pomiarowe 80
6.2. Oprogramowanie 81
6.3. Literatura 83
7. Analiza obrazu 84
7.1. Źródła obrazów 85
7.1.1. Mikroskopy optyczne 85
7.1.2. Skaningowy mikroskop elektronowy 86
7.1.3. Mikroskop sił atomowych 88
7.1.4. Karta akwizycji obrazu 89
7.1.4. Kamera CCD 90
7.2. Przekształcenia obrazów 92
7.2.1.Przekształcenia geometryczne 92
7.2.2. Przekształcenia punktowe 93
7.2.3. Filtry 94
7.2.4. Przekształcenia morfologiczne 95
7.3. Metody analizy obrazów 96
7.4. Kompresja obrazów 97
7.5. Literatura 98
8. Filtracja cyfrowa 100
8.1. Sygnały cyfrowe 100
8.2. Szumy i zakłócenia 101
8.3. Filtry cyfrowe 103
8.4. Kryteria oceny filtrów 104
8.5. Typy filtrów 107
8.5.1. Filtr Butterwortha 108
8.5.2. Filtr Czebyszewa 108
8.5.3. Filtr eliptyczny 109
8.5.4. Filtr Bessela 109
8.6. Literatura 110
Indeks alfabetyczny 111

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

1. Wstęp

W obecnych czasach komputery stały się powszechnie dostępne i towarzyszą nam we wszystkich sytuacjach życiowych. Również inżynierowie i naukowcy korzystają z nich na co dzień. W laboratoriach naukowych komputery pełnią najrozmaitsze role: służą do przygotowywania raportów z badań i prezentacji, gromadzenia i opracowywania wyników pomiarów, czy do sterowania układami badawczo-pomiarowymi. Stopień zaawansowania i złożoność budowy takich komputerów jest różna, począwszy od mikrokontrolerów jednoukładowych czy kalkulatorów programowalnych aż po superkomputery.

System pomiarowy określany jest jako odpowiednio sprzężony zbiór elementów, stanowiących całość organizacyjną i objętych wspólnym sterowaniem, mający umożliwić jakościową i ilościową ocenę właściwości obiektu badanego, systemom tym poświęcony jest rozdział 2 niniejszego opracowania. Natomiast autonomiczne przyrządy pomiarowe to najbardziej powszechne elementy tego zbioru. Ostatnie stadium w ich rozwoju stanowi tzw. inteligentny przyrząd pomiarowy.

Konfiguracja inteligentnego przyrządu pomiarowego miała racjonalne uzasadnienie dopóki na biurku każdego inżyniera nie pojawił się komputer osobisty, a we wnętrzu każdego z tych przyrządów nie zaczęły pojawiać się mniej lub bardziej wyspecjalizowane procesory. Wtedy to okazało się, że powielanie standardowych bloków komputera wewnątrz obudowy każdego inteligentnego przyrządu, jest wysoce nieracjonalne ze względów finansowych, lepiej jest tworzyć elastyczne systemy pomiarowe z wykorzystaniem tzw. kart pomiarowych. Sprawą nierozstrzygniętą jest w jaki sposób będzie się rozwijać technika eksperymentu i aparatura pomiarowa, techniki sprzęgania przyrządów pomiarowych w system, jednak pewne jest że komputerowe systemy pomiarowe już na dobre zagościły w laboratoriach fizycznych i w przemyśle.

Jednymi z pierwszych kontrolerów systemów pomiarowych były kalkulatory programowalne firmy Hewlett-Packard (HP9820 i HP9830) wykorzystujące własny standard interfejsu HP-IB, który później stał się standardem dla dużych systemów aparatury kontrolno-pomiarowej, znanym jako interfejs GPIB. W toku studiów I stopnia studenci Fizyki Technicznej w ramach przedmiotu Fizyka Doświadczalna mogli się już zaznajomić z podobnymi, ale nowocześniejszymi systemami zbudowanymi w oparciu o kalkulatory graficzne TI-86 czy TI-89 produkcji firmy Texas Instruments. Podobne systemy pomiarowe są nadal wykorzystywane zarówno w laboratoriach naukowych jak i przemyśle, gdy nie ma potrzeby stosowania bardziej złożonych systemów.

W ramach przedmiotu „Badania Doświadczalne Wspomagane Komputerowo" studenci poznają teoretyczne zasady konstruowania aparatury badawczo-pomiarowej i przygotowywania systemów pomiarowych wykorzystujących komputer jako urządzenie sterujące pomiarem, gromadzące jego wyniki i dokonujące analizy tych wyników. Komputerowe systemy są obecnie bardzo często wykorzystywane do pomiarów zarówno w laboratoriach studenckich z zakresu fizyki klasycznej jak i współczesnej, w pracowniach naukowych, jak również w laboratoriach przemysłowych i procesach technologicznych. Szczególny nacisk w ramach tych zajęć położony zostanie na komputerowe metody wspomagania eksperymentu (akwizycji i gromadzenia danych) oraz zaawansowane metody analizy danych z wykorzystaniem programów komputerowych.

Komputery przestały już być narzędziem dostępnym tylko dla „wtajemniczonych", korzystają z nich wszyscy, nie potrzebując specjalnej wiedzy programistycznej aby robić to efektywnie, bowiem

programy stały się przyjazne dla użytkownika, szczególnie dzięki zastosowaniu interfejsów graficznych. Dziś już nikt prawie nie pamięta, że można wykorzystywać programy pracujące w trybie tekstowym, gdzie polecenia wprowadza się słownie lub odpowiednimi kodami, bez korzystania z ikon, okienek i innych elementów graficznych. Studenci powinni zatem opanować technikę tworzenia takich przyjaznych użytkownikowi interfejsów graficznych, choć opanowanie korzystania z programów korzystających nadal z trybu tekstowego również jest w programie zajęć uwzględnione.

W ramach tego kursu studenci poznają poszczególne elementy komputerowych systemów akwizycji danych, w tym zarówno tych najnowszych jak i tych trochę starszych, ale jeszcze ciągle wykorzystywanych w laboratoriach systemów sprzęgania sprzętu pomiarowego i komputerów. Właśnie interfejs, którego właściwa polska nazwa brzmi „sprzęg", używana jest czasem także nazwa „łącze", umożliwia bardziej różnorodne wykorzystanie komputera w badaniach doświadczalnych. Jest to urządzenie które pozwala łączyć komputer z urządzeniami pomiarowymi zwanymi często czujnikami.

Urządzenie, które wytwarza sygnał elektryczny proporcjonalny do stanu fizycznego lub wielkości fizycznej, jest zwykle zwane przetwornikiem. Ściślej mówiąc nazwa ta powinna być zastrzeżona dla urządzeń, które przetwarzają jedną postać energii w drugą, np. energię mechaniczną w energię elektryczną. Wynikałoby z tego, że urządzenie takie dla wytworzenia sygnału elektrycznego na wyjściu powinno pobrać pewną porcję energii z otaczającego je środowiska. Dla procesu pomiaru najkorzystniej jest jednak, gdy przetwornik otrzymuje energię potrzebną do wytworzenia sygnału wyjściowego ze źródła zewnętrznego, nie zaś z obiektu pomiaru. Przetwornik nie pobierający energii z mierzonego obiektu jest zwykle zwany czujnikiem, choć nie jest to wyróżnik terminologiczny stosowany konsekwentnie. Nazwa przetwornik stosowana jest również do urządzeń zamieniających jedną formę sygnału w inną, poznamy w trakcie tego kursu zarówno przetworniki analogowo-cyfrowe (przedstawia je rozdział 3) jak i cyfrowo-analogowe (w rozdziale 4).

Kolejnym pojęciem wykorzystywanym w tym wykładzie a mającym wielorakie znaczenie jest interfejs. Pod nazwą tą kryją się zarówno elementy pozwalające na wymianę informacji wewnątrz komputera (tak jak wspomniany uprzednio graficzny interfejs użytkownika) jak i komunikację z komputerem. Interfejs pozwala bowiem na wprowadzanie informacji cyfrowej (np. danych pomiarowych) do komputera, ale daje również możliwość przekazywania informacji od komputera do urządzeń zewnętrznych, a więc pozwala na sterowanie pomiarami za pomocą komputera. Takie interfejsy omówione są w rozdziale 5. O przydatności komputera w badaniach doświadczalnych przemawia jeszcze jeden fakt: obecne komputery są na tyle szybkie, i dysponują wystarczająco dużą pamięcią, że wykonywanie pomiarów, zapisywanie wyników i ich prezentacja graficzna mogą odbywać się niemal jednocześnie.

To fakt, że rozwój technologii informacyjnej stawia przed nami trudne wyzwania, ale też technologia ta wyposaża nas w nowe i nieznane do tej pory narzędzia. Stają się one obecnie coraz bardziej ważnymi obiektami zainteresowań również w kręgach metrologów, zajmujących się projektowaniem i użytkowaniem nowoczesnych systemów pomiarowych oraz laboratoriów badawczych i dydaktycznych. Komputer otwiera bowiem nowe możliwości interpretacji wyników: pozwala bardzo szybko dopasowywać dowolną funkcję matematyczną do wyników doświadczenia czy filtrować dane w czasie pomiaru. Oczywiście jednym z podstawowych warunków poprawnego i efektywnego wykorzystania systemów pomiarowych jest wyposażenie ich w niezawodne i przyjazne użytkownikowi oprogramowanie. Studenci w ramach tego przedmiotu zapoznają się zarówno z wykorzystaniem

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

komercyjnego oprogramowania pomiarowego (z przykładami zastosowań takich zintegrowanych środowisk pomiarowych jak LabWindows/CVI, LabVIEW (prod. National Instruments), TestPoint (Keithley Instruments) czy DasyLab (DASYTEC)) jak i z tworzeniem własnych programów ze szczególnym naciskiem położonym na właściwy interfejs użytkownika.

Komputer znalazł niedawno jeszcze jedno zastosowanie w analizie danych: komputerową analizę obrazów uzyskiwanych zarówno z mikroskopów optycznych, elektronowych i innych, a także makrofotografii i innych obrazów uzyskiwanych na drodze elektronicznej (np. z radioteleskopów). Zagadnieniom tym poświęcony jest rozdział 7 tego skryptu.

Z analizą danych pośrednio związana jest również filtracja cyfrowa sygnałów elektrycznych, której poświęcony jest rozdział 8. Cyfrowe przetwarzanie sygnałów nigdy dotąd nie było takie proste w realizacji i powszechnie stosowane. Jeszcze nie tak dawno Szybka Transformata Fouriera (FFT ang. Fast Fourier Transform) była bardzo skomplikowanym procesem matematycznym dostępnym jedynie w komputerach na uniwersytetach czy wielkich ośrodkach badawczych. Obecnie FFT jest funkcją wbudowaną w arkusze kalkulacyjne stanowiące oprogramowanie komputerów domowych, jest też wykorzystywana w sprzęcie radiowo-telewizyjnym powszechnego użytku. Dostępne obecnie komercyjne oprogramowanie do przetwarzania sygnałów pozwala nam szybko i niezawodnie przeprowadzić analizę widmową, zaprojektować filtry cyfrowe, przeprowadzić kompresję sygnałów lub obrazów.

Niniejszy skrypt z oczywistych względów nie wyczerpuje całej wiedzy na każdy z wymienionych tematów, ma tylko stanowić swoisty przewodnik pomagający poruszać się studentom po tych tematach, dlatego tez w miarę możliwości oprócz terminologii polskiej autor podaje terminologię angielską, najczęściej dziś wykorzystywaną w literaturze fachowej.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

2. Systemy pomiarowe

Najstarsze systemy pomiarowe były obsługiwane wyłącznie przez człowieka – przez niego były także odczytywane i rejestrowane wyniki pomiarów. Następnym etapem rozwoju było powstanie systemów pomiarowych zapisujących wynik pomiaru samoczynnie – w postaci analogowej lub cyfrowej. Dalszym krokiem naprzód było wyposażenie systemu w programowane wejścia, pozwalające na sterowanie pracą systemu za pomocą sygnałów cyfrowych generowanych z układu sterującego o sztywnych sekwencjach sygnałów sterujących. Istotny przełom w rozwoju tych ostatnich stanowiło wprowadzenie w miejsce układu sterującego, komputera, który nie tylko ustawia programowane wejścia elementów systemu, lecz także odczytuje sygnały wprowadzane przez operatora oraz prowadzi złożone niekiedy przetwarzanie sygnałów wyjściowych. Aby zapewnić właściwą pracę podzespołów systemu konieczna jest normalizacja wszystkich środków technicznych tworzących system, począwszy od wymiarów gabarytowych podzespołów systemu, poprzez konstrukcję okablowania, a na poziomach sygnałów wyjściowych, kodach i konwencjach programowych skończywszy. Stąd też obecnie podstawowym zadaniem przy konstruowaniu i eksploatacji systemów pomiarowych jest zapewnienie odpowiedniej standaryzacji i kompatybilności wymienionych środków. Przedstawiony tu kierunek rozwoju nie powinien jednak przesłaniać faktu, że w praktyce w laboratoriach naukowych i przemysłowych, w kontroli produkcji i urzędach miar są użytkowane systemy wszystkich wymienionych wyżej generacji.

Oddzielny rozdział zagadnień technicznych w konstruowaniu i eksploatacji systemów pomiarowych, to współpraca operatora z systemem. Zdolność człowieka do wyciągania wniosków ogólnych z wielu oddzielnych informacji, a także jego zdolności adaptacyjne, umożliwiające prawidłowe reagowanie na nieprzewidziane sytuacje, powodują, że systemy pomiarowe i dzisiaj i w przyszłości powinny w założeniach swej struktury i algorytmu działania, te właśnie zdolności operatora uwzględniać. Skuteczne uczestniczenie operatora w działaniu systemu wymaga wyprowadzenia i przedstawienia informacji w takiej postaci i za pomocą takich środków by powodować możliwie najmniejsze jego zmęczenie fizyczne i psychiczne, stąd bardzo ważne staje się tworzenie interfejsów użytkownika oraz GUI.

Spróbujmy teraz zdefiniować podstawowe pojęcia związane z pomiarami i systemami pomiarowymi.

Pomiar jest to zbiór operacji mających na celu określenie wartości wielkości mierzonej. Pierwszym etapem pomiaru jest określenie podmiotu procesu pomiarowego. Określić obiekt pomiaru to wyodrębnić, z otaczającej rzeczywistości, interesujący nas fragment (może mieć wyraźne granice fizyczne lub nie, np. ławka lub powietrze). Kolejnym etapem pomiaru jest wskazanie cech charakteryzujących obiekt (ławka ma: szerokość, wysokość, długość, kolor, temperaturę). Wskazanie obiektu i jego cech jest jakościowym opisem rzeczywistości. Następnym krokiem jest wskazanie intensywności z jaką występują lub ujawniają się poszczególne cechy. Intensywność jest elementem pewnego zbioru zwanego zbiorem stanów cechy. Ten krok pomiaru jest już ilościowym opisem rzeczywistości. Możemy powiedzieć, że pomiar jest czynnością abstrakcyjną ponieważ nazwy obiektów

są umowne (nazwy to abstrakcje). Teraz na poziom abstrakcji możemy przenieść cechę obiektu. Jeżeli za abstrakcję uznajemy cechę to abstrakcjami muszą być również stany cechy (wyrażane liczbowo).

Podstawowy aksjomat meteorologii: nie ma pomiarów bezbłędnych, z każdym pomiarem wiąże się błąd, który wyraża niezgodność wartości uzyskanej w wyniku pomiaru z faktyczną wielkością wartości mierzonej.

Wynik pomiaru – to wartość przypisana wielkości mierzonej uzyskana drogą pomiaru. W realnych warunkach wynik pomiaru jest tylko pewnym przybliżeniem lub estymatą (oszacowaniem) wartości wielkości mierzonej. Dlatego też jest on pełny jeśli podamy także niepewność tej estymaty.

System pomiarowy – funkcjonalny zbiór środków technicznych objętych wspólnym sterowaniem wewnętrznym lub zewnętrznym, tworzący jedną organizacyjną całość i przeznaczony do wykonania pewnej operacji pomiarowej. Operacja ta może składać się z dokonania samego pomiaru jednej lub kilku wielkości fizycznych, przesłania sygnałów, rejestracji i zapamiętania wyników. Systemy pomiarowe nazywane są również urządzeniami lub układami pomiarowymi. Dzielą się one na: przetworniki pomiarowe, wzorce i przyrządy pomiarowe.

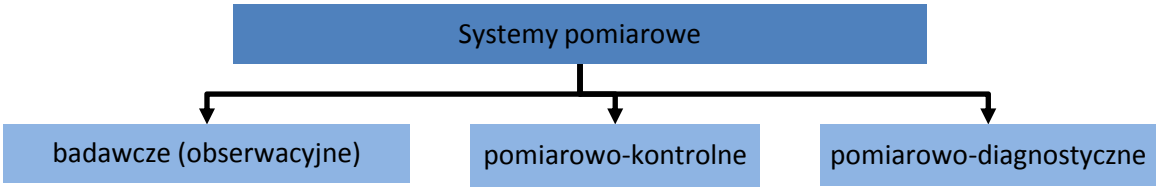
Tor pomiarowy – droga przebiegu sygnału od jego źródła, które stanowi zjawisko fizyczne, przez człony przetwarzające i porównujące, elementy transmisyjne aż do urządzeń wyjściowych za pomocą których otrzymuje się zobrazowanie lub wydruk wyników pomiaru.

Mezurand (ang. Mezurand) jest pojęciem szerszym niż wielkość mierzona (określona wielkość fizyczna stanowiąca przedmiot pomiaru), które obejmuje też wieloparametrowe obiekty pomiaru, takie jak np.: zależność funkcyjna $y = f(x)$, charakterystyka częstotliwościowa, współrzędne wektora itp.

Do narzędzi pomiarowych zaliczamy:

- wzorce miar - odtwarzają wzorcową wartość danej wielkości;
- przyrządy pomiarowe - przetwarzają wielkość mierzoną na wskazanie;
- przetworniki pomiarowe – przetwarzają wielkość mierzona na równoważną informację.

W zależności od przeznaczenia (rys. 2.1) rozróżnia się trzy klasy systemów pomiarowych: badawcze, pomiarowo-kontrolne i pomiarowo-diagnostyczne.



Rys. 2.1. Podział systemów pomiarowych

Systemy badawcze stosowane są w pomiarach naukowych, do empirycznej weryfikacji hipotez naukowych. Podstawowy zbiór otrzymywanych informacji jest na ogół wyprowadzany poza strukturę systemu dla operatora kierującego eksperymentem. Systemy te są wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki, w fizyce, chemii, elektronice, mechanice, biologii czy medycynie.

Systemy pomiarowo-kontrolne używane są w przemyśle do automatyzacji procesów technologicznych. W systemach takich stosuje się zwykle znaczne ilości czujników rozmieszczonych na całym kontrolowanym obiekcie i przetworników formujących sygnały wykorzystywane dalej przez regulatory sterujące procesem technologicznym.

Systemy pomiarowo-diagnostyczne służą do detekcji, lokalizacji, identyfikacji lub predykcji uszkodzeń obiektów (np. diagnostyka techniczna, diagnostyka medyczna). Celem diagnozowania jest nie tylko stwierdzenie stanu obiektu, ale często również wskazanie uszkodzonego elementu.

Podział systemów pomiarowych ze względu na zasięg terytorialny:

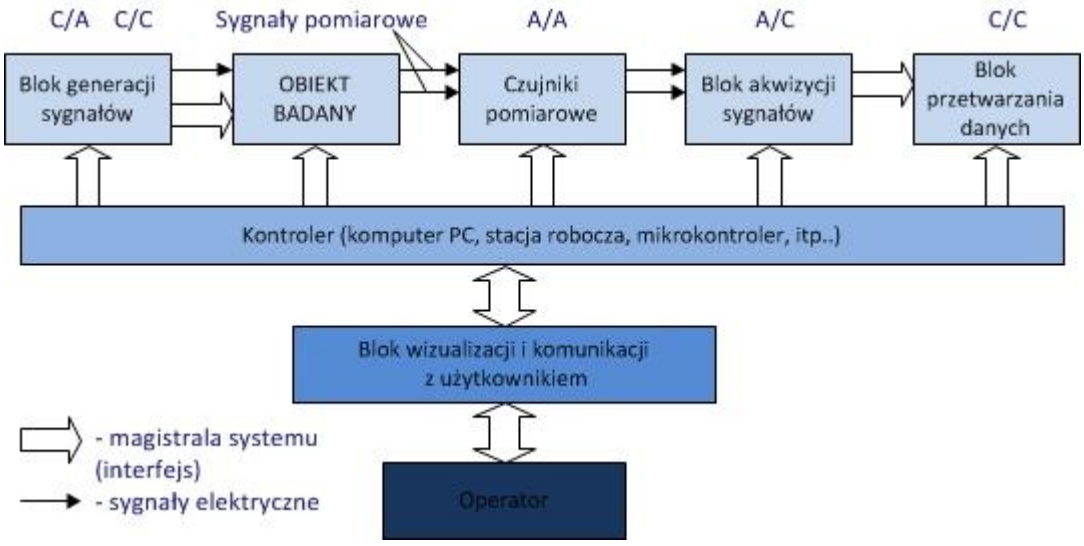
- skupione: umiejscowione w jednym pomieszczeniu
- rozproszone: zlokalizowane w wielu pomieszczeniach a nawet budynkach.

Rozproszony system pomiarowy jest systemem pomiarowym rozłożonym terytorialnie. Przy czym rozłożenie geograficzne poszczególnych elementów może przybierać różną skalę:

- od systemu kontroli produkcji np. w obrębie jednej hali produkcyjnej,
- do systemów globalnych np. metrologicznych z centralą i kontrolą w jednym miejscu, a czujnikami rozrzuconymi po terenie kraju.

Podział systemów pomiarowych ze względu na oddziaływanie na badany obiekt:

- aktywne: system może oddziaływać na badany obiekt w celu stworzenia odpowiednich warunków do wykonania doświadczenia
- pasywne: są pozbawione możliwości oddziaływania na obiekt.



Rys. 2.2. Struktura systemu pomiarowego.

Struktura typowego systemu pomiarowego przedstawiona jest na rysunku 2.2. W jego skład wchodzi kontroler sterujący pracą systemu oraz zespół jednostek funkcjonalnych, wśród których są czujniki pomiarowe przetwarzające wielkości pomiarowe pochodzące z obiektu pomiaru na sygnały elektryczne, blok akwizycji sygnałów umożliwiający zbieranie sygnałów pomiarowych i przetwarzanie

analogowo-cyfrowe (A/C), blok przetwarzania danych realizujący cyfrowe przetwarzanie sygnałów, blok generacji wymuszeń umożliwiający zwrotne oddziaływanie na obiekt oraz blok komunikacji z użytkownikiem pozwalający na przekazanie w formie czytelnej dla człowieka przebiegu i wyniku pomiaru.

Kontroler systemu jest odpowiedzialny za czasowo-przestrzenną koordynację działań systemu, a więc wybór punktów pomiarowych, ustalenie warunków pomiaru, określenie momentu rozpoczęcia pomiaru oraz organizację przepływu informacji. Najczęściej funkcję kontrolera pełnią systemy mikroprocesorowe, które obok czynności sterujących mogą także przetwarzać dane.

Konfiguracja systemu pomiarowego jest to sposób połączeń jednostek funkcjonalnych w systemie pomiarowym. Konfiguracja określa układ dróg przepływu informacji w systemie. Aktualnie są stosowane trzy podstawowe konfiguracje systemów pomiarowych: gwiazdowa, magistralowa i pętlowa, a także ich kombinacje.

W konfiguracji gwiazdowej centralna pozycja jest zarezerwowana dla kontrolera systemu. Kontroler pośredniczy w przekazywaniu każdej informacji między pozostałymi jednostkami funkcjonalnymi. Przesyłanie informacji jest możliwe jedynie między kontrolerem a jednostkami funkcjonalnymi. Oznacza to, że jednostka funkcjonalna nie może przesłać informacji do innej jednostki bezpośrednio, tylko za pośrednictwem kontrolera. Konfiguracja gwiazdowa jest stosowana w prostych systemach pomiarowych, o niewielkiej i ustalonej liczbie jednostek funkcjonalnych. Rozbudowa systemu o konfiguracji gwiazdowej, jest bardzo utrudniona.

W konfiguracji magistralowej wszystkie współpracujące w systemie urządzenia są dołączone równolegle do magistrali cyfrowej. Sama magistrala jest zespołem linii, po których przekazywane są wszystkie informacje przesyłane pomiędzy dowolnymi urządzeniami pracującymi w systemie. W konfiguracji tej żadne z urządzeń systemu nie ma wyróżnionej pozycji. Kontrolerem systemu może być każde z urządzeń dołączonych do magistrali i mające zdolność sterowania systemem. Zatem w systemie tym może pracować kilka kontrolerów przekazujących sobie funkcje sterowania systemem, przy czym w danej chwili aktywny może być tylko jeden z nich.

W systemie o konfiguracji magistralowej zachodzi konieczność udzielania zezwoleń poszczególnym urządzeniom na nadawanie informacji, jak i powiadamianie o konieczności przyjęcia nadawanej informacji. Te czynności organizacyjne nazywa się odpowiednio adresowaniem do nadawania i adresowaniem do odbioru. W danej chwili aktywna może być dowolna liczba odbiorców, ale tylko jeden nadawca.

Konieczność adresowania powoduje, że rozmieszczenie inteligencji w systemie o konfiguracji magistralowej jest bardziej równomierne niż w konfiguracji gwiazdowej. Podnosi to koszt systemu, ale znacznie zwiększa jego elastyczność. Możliwa jest np. wymiana informacji między urządzeniami bez pośrednictwa kontrolera. Konfiguracja magistralowa zapewnia największą strukturalną i funkcjonalną elastyczność systemu i umożliwia jego rozbudowę podczas eksploatacji przez zamianę lub zwiększenie liczby jednostek funkcjonalnych.

Trzecią podstawową konfiguracją systemów pomiarowych jest konfiguracja pętlowa. Wszystkie linie sygnałowe są w tej konfiguracji jednokierunkowe, wskutek czego kierunek obiegu informacji w pętli jest ustalony. Podobnie jak w konfiguracji magistralowej, kontroler systemu nie zajmuje tu wyróżnionego miejsca.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Transmisja informacji w pętli odbywa się w sposób następujący. Informacja nadawana przez kontroler wysyłana jest do najbliższej jednostki funkcjonalnej, w kierunku zgodnym z obiegiem pętli, gdzie zostaje ona przyjęta i przeanalizowana. Jeżeli jest przeznaczona właśnie dla tej jednostki funkcjonalnej, to zostaje wykorzystana, co oznacza albo przyjęcie danych, albo wykonanie instrukcji sterującej. Następnie informacja w niezmienionej postaci zostaje przesłana dalej. Jeśli zaś nie była przeznaczona dla tej jednostki funkcjonalnej, to jest bezzwłocznie przekazywana dalej, tuż po wstępnej interpretacji. Powrót informacji do kontrolera oznacza, że przeszła ona przez wszystkie urządzenia i została wykorzystana przez te z nich, które były wcześniej wyznaczone (zaadresowane) do odbioru. Jest to więc jednocześnie potwierdzenie odbioru i zezwolenie na nadanie następnej informacji.

2.1. Komputerowe systemy pomiarowe

Rozwój techniki komputerowej, której punktem przełomowym było opracowanie minikomputera w postaci pojedynczego elementu (układu scalonego) oznaczonego symbolem 8080 pozwoliło na powstanie nowej generacji przyrządów, czujników oraz przetworników pomiarowych, których elementem składowym stał się ten właśnie nowy element umożliwiający bezpośrednie przetwarzanie sygnałów pomiarowych oraz sterowanie procesem pomiarowym.

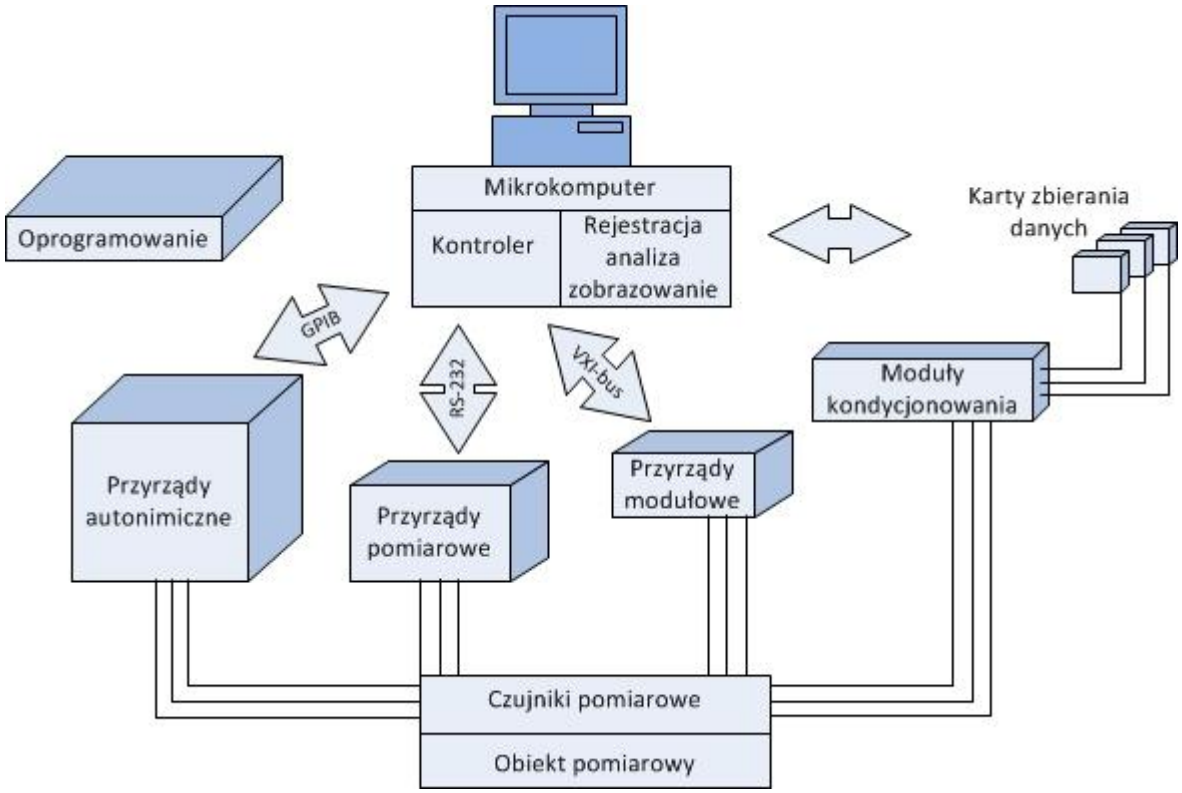
Od tej właśnie chwili przyjęło się mówić o Komputerowych lub inaczej Inteligentnych Systemach Pomiarowych (rys. 2.3), a wynikało to z ich możliwości adaptacyjnych, które stały się możliwe dzięki zastosowaniu mikrokomputerów.

Komputeryzacja umożliwia:

- wykonanie pomiarów, łącznie z ich opracowaniem, w cyklu automatycznym zgodnie z opracowanym algorytmem (programem) działania,
- znaczne skrócenie czasu pomiarów,
- zmniejszenie wymaganych kwalifikacji personelu zaangażowanego w pomiary,
- zwiększenie dokładności pomiarów m.in. poprzez:
  - szybkie wykonanie wielu pomiarów (wyeliminowanie wpływu zmieniających się warunków zewnętrznych na wyniki kolejno wykonywanych pomiarów),
  - wykonanie wielokrotnych pomiarów i ich uśrednienie np. poprzez włączenie statystycznej obróbki wyników pomiarów,
  - włączenie procesów okresowego wzorcowania i testowania aparatury w cykl pomiarowy,
- prowadzenie pomiarów w miejscach niedostępnych, niebezpiecznych, w warunkach szkodliwych dla człowieka,
- bieżącą kontrolę i sterowanie badanych obiektów zwłaszcza w ich stanach dynamicznych (rozruch, zmiana obciążenia), szybkie wykrywanie stanów awaryjnych i ich sygnalizacja (wzrokowa, akustyczna) bądź też podjęcie odpowiednich działań zabezpieczających przed awarią

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

- bezpośrednie włączenie procesu pomiarowego w cykl produkcyjny (bieżąca kontrola wykonywanych operacji technologicznych),



Rys. 2.3. Schemat komputerowego systemu pomiarowego

Potrzeba przetwarzania danych decyduje o obecności komputera w wielu systemach pomiarowych. Przetwarzanie danych może odbywać się w czasie rzeczywistym, czyli równolegle ze zbieraniem danych, lub z opóźnieniem w czasie, czyli w czasie własnym.

Systemy pracujące w czasie rzeczywistym wymagają szybkich algorytmów przetwarzania danych, szybkich komputerów, procesorów sygnałowych oraz układów sprzęgających o dużej szybkości transmisji. Przetwarzanie danych, w tym nadmiarowych, wydłuża czas wykonania pomiarów. Dlatego w wielu systemach zachodzi potrzeba redukcji nadmiaru informacji. Może się to odbywać się w torze pomiarowym lub podczas przetwarzania. Zmniejszenie prawdopodobieństwa powstania błędów oraz zwiększenie wiarygodności informacji wyjściowej występuje w systemach z auto-kalibracją. Polega ona na sprawdzaniu systemu lub jego części pod względem zachowania właściwości metrologicznych, a także poprawności wykonywania obliczeń. Pozytywny wynik testu, wykonanego na rozkaz operatora lub zgodnie z założonym z algorytmem działania, jest równoznaczny z przyjęciem wyników pomiaru za wiarygodne.

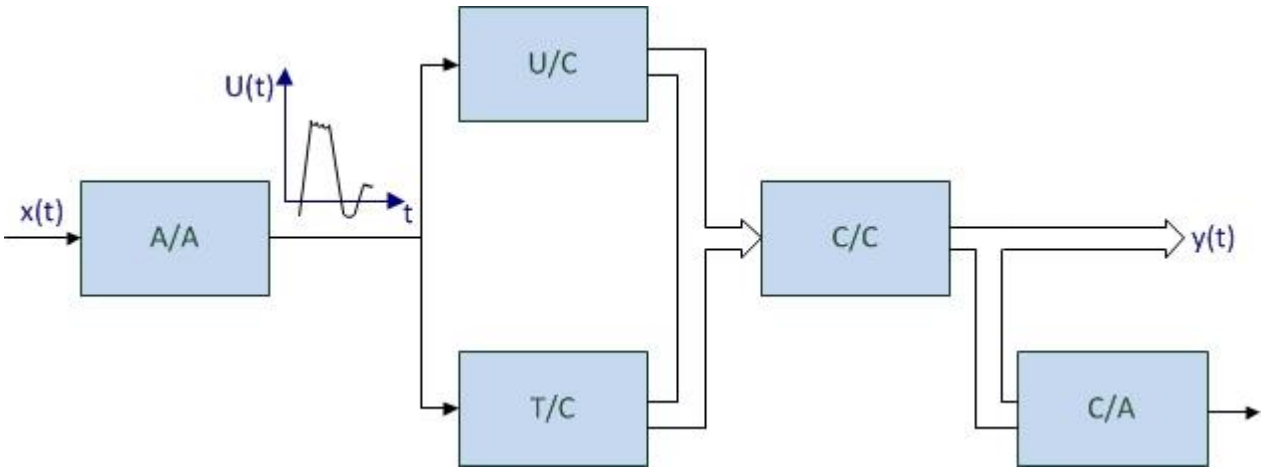
Dalszym etapem rozwoju systemów są systemy adaptacyjne, a zwłaszcza systemy mające możliwość automatycznej korekcji swoich charakterystyk. Wykorzystuje się w nich wyniki auto-kalibracji do modyfikacji charakterystyk systemu, zgodnie ze zmieniającymi się właściwościami sygnałów pomiarowych lub warunkami eksploatacji systemu.

Komputerowy system pomiarowy możemy zdefiniować jako system pomiarowy wyposażony w komputer ogólnego przeznaczenia lub specjalizowany sterownik mikroprocesorowy, którego zadaniem jest:

- sterowanie przepływem informacji w systemie;
- przetwarzanie danych pomiarowych;
- wizualizacja danych pomiarowych;
- archiwizacja danych pomiarowych.

Integralna częścią komputerowego systemu pomiarowego jest oprogramowanie sterujące. Zastosowanie komputera do sterowania umożliwia w prosty sposób modyfikację algorytmu dziania systemu. W systemach, w których funkcję kontrolera pełni komputer, interfejs użytkownika realizowany jest w sposób programowy. Obsługiwany jest za pomocą myszy, klawiatury, ekranu dotykowego. Graficzny interfejs użytkownika ma wygląd i funkcjonalność zbliżoną do typowych przyrządów pomiarowych.

Na każdym etapie pracy systemu pomiarowego wykorzystywany jest sprzęt komputerowy. Wielkości fizyczne mierzone są przy pomocy czujników zaopatrzonych w komputer. Otrzymany w ten sposób sygnał dopasowywany jest w układach kondycjonowania, gdzie komputer ustala poziom wzmocnienia, dokonuje filtrowania szumów oraz zakłóceń i przekazuje do układów akwizycji, gdzie jest



Rys. 2.4. Schemat pomiaru cyfrowego.

on przekształcany na postać cyfrową. W tej formie sygnał przesyłany jest do komputera, którego zadaniem jest obróbka, wizualizacja, analiza i interpretacja danych pomiarowych. Również archiwizacja odbywa się w postaci cyfrowej na nośnikach charakteryzujących się większą pojemnością i trwałością.

Cechą charakterystyczną cyfrowych układów pomiarowych jest sposób zbierania informacji o badanym obiekcie pomiarowym. Pierwszym etapem jest pozyskanie sygnałów elektrycznych w postaci analogowej, a następnie przetworzenie ich na kod cyfrowy i poddanie dalszej obróbce cyfrowej, w celu przedstawienia wyników w postaci wizualnej. Rysunek 2.4 przedstawia schemat pomiaru cyfrowego dowolnej wielkości fizycznej *u(t)* przetworzonej wstępnie na sygnał elektryczny *x(t)*. Blok oznaczony symbolem A/A odpowiada za dopasowanie poziomem zmiennego w czasie sygnału *x(t)* do zakresu przetwornika analogowo-cyfrowego. Następnie sygnał poddawany jest kwantyzacji i dyskretyzacji w blokach oznaczonych odpowiednio U/C i T/C, skąd przekazywany jest do dalszej obróbki cyfrowej w bloku C/C. W wyniku otrzymujemy wyjściowy sygnał cyfrowy w postaci kodu cyfrowego zapisanego jako słowo bitowe. Dodatkowo, w układach adaptacyjnych oraz systemach pomiarowych będących częścią układów sterowania procesami lub współpracujących z nimi, sygnał cyfrowy może ponownie być zamieniony na analogowy sygnał napięciowy.

2.2. Elementy składowe systemu pomiarowego

Jednostki funkcjonalne systemu pomiarowego mogą być realizowane w sposób sprzętowy, sprzętowo-programowy lub programowy. Realizacje sprzętowe są zwykle najdroższe, jednak zapewniają największą szybkość działania. Poszczególne elementy systemu pomiarowego możemy podzielić na bloki funkcjonalne. Podział funkcjonalny systemu na bloki funkcjonalne nie zawsze pokrywa się z jego realizacją techniczną, często oddzielny element systemu może odpowiadać kilku blokom funkcjonalnym.

Podstawową formą realizacji technicznej jednostek funkcjonalnych w komputerowych systemach pomiarowych z interfejsem GPIB oraz RS232 są przyrządy pomiarowe, mogące pracować również w trybie autonomicznym. W systemach modułowych typu CAMAC czy VXI jednostki funkcjonalne realizowane są w postaci modułów wsuwanych do standardowej obudowy. Moduły te nie mogą pracować poza systemem. Interfejsy komputerowe i te występujące w systemach modułowych opisane są szczegółowo w rozdziale 3.

W pracach eksperymentalnych analizujemy najczęściej sygnały zmieniające się w sposób ciągły (np. potencjał elektrody, prąd fotoogniwa) ale także dyskretny (np. energia elektronu w atomie). Wielkość tych sygnałów dostarcza nam informacji. Informacją jest każdy czynnik zmniejszający stopień niewiedzy o badanym zjawisku czy obiekcie Przetwarzanie sygnałów odbywa się z zastosowaniem techniki analogowej lub cyfrowej. W systemach cyfrowych wejściowa informacja analogowa musi być przekształcona do takiej postaci, aby system ten mógł z niej skorzystać i poddać dalszemu procesowi przetwarzania. System cyfrowy, w tym m.in. komputer gromadzi i przetwarza informację zapisaną wyłącznie w postaci liczbowej, w systemie dwójkowym.

W cyfrowych systemach pomiarowych często zachodzi konieczność zmiany sygnału cyfrowego na analogowy, np. w celu wytworzenia napięcia polaryzującego elektrody w polarografii. Rolę tę spełniają przetworniki cyfrowo – analogowe (C/A), którym poświęcony jest Rozdział 4.

Blok komunikacji z użytkownikiem pozwala na wprowadzanie i wyprowadzanie informacji; wprowadzanie: przełączniki w systemach bez komputera oraz klawiatura, mysz, dyskietka lub pióro świetlne w systemach skomputeryzowanych; wyprowadzanie: rejestratory cyfrowe lub analogowe, monitory ekranowe, drukarki etc.

Blok akwizycji należy do najważniejszych bloków funkcjonalnych systemu pomiarowego. Praktyczne realizacje bloku akwizycji są uzależnione od przeznaczenia systemu. Rozpowszechnienie komputerów personalnych spowodowało pojawienie się tzw. kart pomiarowych, służących do akwizycji sygnałów analogowych, karty takie opisane są szerzej w rozdziale 6.2. Obecnie wiele firm (Advantech, National Instruments, Keithley itd.) specjalizuje się w realizacji tych kart, zapewniając wiele ich wersji, o zróżnicowanej strukturze i parametrach metrologicznych. Wiele kart wyposażonych jest również w przetworniki cyfrowo-analogowe (C/A) umożliwiające generację sygnałów wymuszających analogowych i cyfrowych, przetwornikom tym poświęcony jest rozdział 5.

Czujniki pomiarowe to elementy umożliwiające odbiór informacji z obiektu fizycznego, którego parametry podlegają identyfikacji w procesie pomiarowym; czujniki wielkości fizycznych, czujniki wielkości chemicznych. Konstrukcyjnie czujnik stanowi przetwornik złożony na ogół z kilku prostszych przetworników mechanicznych i elektrycznych umieszczonych we wspólnej obudowie umożliwiającej zamontowanie go na obiekcie badanym lub w jego bezpośrednim otoczeniu.

Mostki czujnikowe to układy, których gałęzie są utworzone przez elementy rezystancyjne, indukcyjnościowe lub pojemnościowe przetworników pomiarowych.

Blok generacji sygnałów wykorzystywany jest do wytwarzania sygnałów wymuszających (programowane źródła napięć i prądów), do generacji sygnałów wzorcowych oraz do wytwarzania sygnałów sterujących elementami wykonawczymi obiektu pomiarowego. Blok ten wymaga jednego lub kilku przetworników C/A w celu wytworzenia sygnałów analogowych.

Blok przetwarzania danych jest odpowiedzialny za cyfrową obróbkę sygnałów pomiarowych zgodnie z przyjętym algorytmem. Jeżeli kontrolerem w systemie pomiarowym jest komputer, to na ogół, oprócz sterowania systemem, pełni on jednocześnie funkcje bloku przetwarzania danych. W przypadku systemów wymagających przetwarzania w czasie rzeczywistym (ang. real time processing) przyspieszenie obliczeń zapewniają wydzielone bloki funkcjonalne z procesorami sygnałowymi, realizujące złożone algorytmy przetwarzania danych.

2.3. Graficzny interfejs użytkownika

Obsługa współczesnych systemów pomiarowo-diagnostycznych realizowana jest poprzez symulowany na ekranie monitora panel operatora. Graficzny interfejs użytkownika GUI (ang. Graphical User Interface), nazywany też środowiskiem graficznym, pozwala na interaktywną komunikację operatora z systemem za pomocą elementów (zwanych często kontrolkami) takich jak: okna, przyciski, pola wyboru, pola radiowe, pola edycyjne, paski menu, ikony, listy, okna dialogowe, suwaki, paski narzędzi.

Pierwsze koncepcje interfejsu graficznego zostały opracowane w latach sześćdziesiątych XX wieku ale w praktyce zostały zastosowane przez firmę Xerox w 1981 roku. Dopiero powstanie

graficznych menedżerów okien stosowanych w różnych Unixach, MacOS, a później w kolejnych wersjach systemu MSWindows, spowodowało powszechne zastosowanie interfejsów graficznych.

Zastąpienie rzeczywistych zadajników i wskaźników przez ich wirtualne odpowiedniki ma wiele zalet:

- jest dużo tańsze,
- pozwala na łatwą i szybką modyfikację oraz rozbudowę panelu,
- umożliwia ograniczenie zajmowanej powierzchni – różne części panelu mogą być pokazywane na tym samym monitorze.

Obsługa panelu wirtualnego powinna być intuicyjna i prostsza niż obsługa za pomocą panelu rzeczywistego. Szersze są również możliwości przedstawienia wyników. Nie muszą to być pojedyncze liczby, ale można je przedstawiać w postaci bardziej złożonej, np. tabel i wykresów. Nie ma też ograniczenia przetwarzania wyników zgodnie z funkcjami wbudowanymi do przyrządu autonomicznego. Odpowiednie oprogramowanie pozwala dowolnie rozszerzyć możliwości przetwarzania i analizy wyników.

Przygotowując graficzny interfejs użytkownika należy poświęcić wiele uwagi temu by był estetyczny, przejrzysty i wygodny dla operatora . Nie należy umieszczać zbyt wielu obiektów na panelu. Może to spowodować, że panel będzie nieczytelny i trudny do obsługi. Zadajniki i wskaźniki na panelu można pogrupować według wspólnego przeznaczenia. Do wprowadzania informacji do systemu służą zadajniki, takie jak przyciski, pokrętła, suwaki, pole wyboru, pole edycyjne, menu rozwijane. Z systemu do użytkownika informacja wyprowadzana jest przy pomocy wskaźników: wyświetlacze, lampki, mierniki, wykresy. Dostępne są różne style zadajników i wskaźników, mimo dostępu do różnych stylów należy korzystać z nich oszczędnie. Znajdujące się na jednym panelu zadajniki i wskaźniki powinny być tego samego stylu.

Ułatwieniem obsługi panelu są znajdujące się na nim opisy. Jednak zbyt duża liczba długich opisów spowoduje trudności w odszukaniu potrzebnej informacji. Opisy na panelu mogą być w formie etykiet zadajników i wskaźników, podpowiedzi pokazujących się po najechaniu kursorem na obiekty, dodatkowych okien z tekstami otwieranymi z menu lub przyciskiem na panelu oraz jako dodatkowe opisy, podpowiedzi i komentarze umieszczone bezpośrednio na panelu. Warto zwrócić uwagę na rodzaj czcionki, jej kolor i wielkość. Nie jest wskazane używanie wielu krojów czcionki na jednym panelu. Wyróżnione teksty można napisać większą czcionką lub pismem pogrubionym.

Bardzo ważnym problemem jest kolor panelu. Do wypełnienia większych powierzchni panelu należy stosować kolory pastelowe. Nie wszystkie kolory ze sobą współgrają. Czasami zamiast używać różnych kolorów, lepiej operować odcieniami tego samego koloru. Jaskrawe kolory można użyć np. dla wskaźników mających przykuć uwagę w sytuacjach awaryjnych. Użycie kolorów i czcionek systemowych pozwoli upodobnić wygląd panelu do okna systemowego. Przy dobieraniu kolorów oznaczających dwa różne stany wskaźników warto też zwrócić uwagę, by mogły być one identyfikowane przez osoby, które nie odróżniają pewnych kolorów.

Jeżeli ilość przekazywanych na panelu informacji jest bardzo duża, zamiast panelu z gęsto umieszczonymi kontrolkami, lepiej podzielić je na grupy. Poszczególne grupy wskaźników mogą być pokazywane w nowych oknach, otwieranych po naciśnięciu wybranego przycisku lub w tym samym oknie, na kolejnych zakładkach.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

2.4. Projektowanie systemu pomiarowego

Projektowanie obiektu technicznego, jakim jest system pomiarowy, polega na tworzeniu modelu tego obiektu, umożliwiającego jego bezpośrednią realizację. Wynikiem projektowania inżynierskiego jest więc dokumentacja techniczna projektowanego obiektu, stanowiąca podstawę procesu technologicznego, która jest niezbędna do jego wytworzenia. Powstaje ona jako produkt transformacji wejściowego modelu obiektu - najczęściej modelu pojęciowego - wynikającego z interpretacji celu, któremu ma służyć obiekt. W procesie projektowania model ten podlega formalizacji i wzbogaceniu w treści zawarte w modelach, które składają się na wiedzę inżynierską dostępną projektantowi, wynikającą z jego osobistego doświadczenia, a także pochodzącą ze źródeł informacji naukowo - technicznej, podręczników, poradników, katalogów, baz danych, komputerowych systemów wspomagania projektowania.

Projektowanie systemu pomiarowego, tak jak projektowanie każdego obiektu, realizowane jest w następujących etapach:

1. Analiza zadania - obejmuje identyfikację strukturalną modelu obiektu mierzonego (określenie wielkości opisujących obiekt, charakteru tych wielkości, zależności między tymi wielkościami itp.), definicję mezurandów oraz analizę rozwiązywalności zadania. Poprawna (jednoznaczna, kompletna, weryfikowalna i spójna) specyfikacja wymagań, jakie musi spełnić projektowany system pomiarowy, powinna zawierać:
   - rodzaj i postać wyników pomiarów,
   - dopuszczalne graniczne błędy pomiaru mezurandów,
   - dopuszczalny czas pomiarów,
   - powiązania projektowanego systemu z otoczeniem,
   - dopuszczalne koszty i czas realizacji.

2. Opracowanie projektu wstępnego - systemu pomiarowego stanowi etap o kluczowym znaczeniu dla całego procesu projektowania. Decyzje podjęte na tym etapie wpływają w sposób znaczący na realizację i właściwości projektowanego systemu. Projekt wstępny obejmuje:
   - dekompozycję zadania pomiarowego na bloki funkcjonalne (schemat funkcjonalny systemu),
   - sformułowanie wymagań dotyczących poszczególnych bloków funkcjonalnych,
   - podział zadań na sprzęt i oprogramowanie,
   - wybór technologii realizacji bloków funkcjonalnych i systemu,
   - wybór struktury systemu oraz typu interfejsu (RS-232, IEC-625, VXI, CAMAC, niestandardowy),
   - wybór kontrolera systemu (procesor ogólnego przeznaczenia, procesor specjalizowany, mikrokontroler, mikrokomputer, komputer),
   - wybór typu przetworników pomiarowych (czujników) i bloków wykonawczych,
   - wybór typu urządzeń pomiarowych,
   - określenie algorytmu działania systemu (ogólna sieć działań),

- wybór języka programowania oraz narzędzi komputerowego wspomagania projektowania (LabWindows, LabView, HP VEE, TestPoint i innych),
- analiza błędów systemu.

3. Opracowanie projektu szczegółowego - obejmuje przygotowanie projektu technicznego bloków funkcjonalnych przeznaczonych do konstrukcji oraz projektu oprogramowania podstawowego (komunikacyjnego) i procedur przetwarzania danych. W ramach projektu technicznego otrzymuje się schematy ideowe realizowanych bloków funkcjonalnych, szczegółowe schematy powiązań wszystkich bloków funkcjonalnych w system wraz z protokołami komunikacji oraz projekt programu obsługi systemu.
4. Realizacja - jest etapem wykonania zaprojektowanych bloków funkcjonalnych (wraz z ich indywidualnym uruchomieniem) oraz zestawienia całego systemu.
5. Uruchomienie i testowanie - systemu wymaga na wstępie wyboru metodyki postępowania przy uruchamianiu i testowaniu danego systemu. Następnie po sprawdzeniu poprawności konfiguracji (kable, połączenia, adresy) uruchamiane jest oprogramowanie pod względem formalnym (tzn. likwidowane s błędy językowe programu). Kolejnymi podetapami są: badania poprawności przepływu informacji w systemie, badania poprawności procedur przetwarzania danych oraz testowanie całości systemu.
6. Ocena - projektu systemu polega głównie na badaniu zgodności charakterystyk metrologicznych i systemowych zrealizowanego systemu pomiarowego z wymaganiami, jakie musi spełnić projektowany system. Ponadto dodatkowymi (ale nie mniej ważnymi) kryteriami oceny są:
    - niezawodność,
    - prostota obsługi,
    - prostota testowania systemu (zarówno w całości, jak i we fragmentach).

2.5. Literatura

1. J.L. Kulikowski, Komputery w badaniach doświadczalnych, PWN, Warszawa 1993.
2. M. Jakubowska, Organizacja komputerowych systemów pomiarowych, Strona internetowa: http://galaxy.agh.edu.pl/~kca/boap.htm
3. P.H. Sydenham, R. Thorn, Ed.: Handbook of Measuring System Design, J. Wiley & Sons, 2005.
4. D. Świsulski, Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w LabVIEW, Agenda Wydawnicza PAK-u, Warszawa 2005.
5. D. Świsulski, Komputerowe systemy pomiarowo-diagnostyczne, http://digital.ni.com/worldwide/poland.nsf/webcustsol/AB76D387C84144C28625715D006E4B58?OpenDocument&node=166560_pl

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

3. Przetworniki analogowo-cyfrowe

Większość urządzeń pomiarowych lub rejestratorów sygnałów w systemach pomiarowych kontaktujących się bezpośrednio z obiektami badań reaguje na oddziaływania fizyczne (np. temperatura, napięcie elektryczne itp.) zmieniające się w sposób ciągły (nazywane sygnałami analogowymi). Aby te informacje mogły być przetworzone przez system komputerowy muszą być przetworzone w kodowane sygnały cyfrowe. Rolę tę spełniają przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C) umieszczone na styku części analogowej i cyfrowej systemu. Schemat procesu przetwarzania analogowo-cyfrowego przedstawia rysunek 3.1. Poszczególne etapu procesu wykonywane są w oddzielnych modułach przetwornika i w takiej kolejności w jakiej są wykonywane zostaną również dalej omówione.

Rys. 3.1. Schemat przetwarzania analogowo-cyfrowego.

Wiele urządzeń pomiarowych wyposażonych jest obecnie w przetworniki A/C. Końcówki takich urządzeń to najczęściej typowe interfejsy np. RS-232C. Tego rodzaju standardy nie określają jednak sposobu kodowania danych. Do przesyłania danych w takiej sytuacji najczęściej używany jest albo jeden z kodów binarnych albo standardowy kod ASCII. Takie rozwiązanie nie jest jednak wygodne w przypadku, gdy wymagana jest obróbka w komputerze dużej ilości danych (konwersja tych danych w komputerze do postaci liczbowej wymaga stosunkowo długiego czasu). Z tego powodu do zapisu danych na wyjściu przetworników używa się innych rodzajów kodów opisanych w rozdziale 3.2.

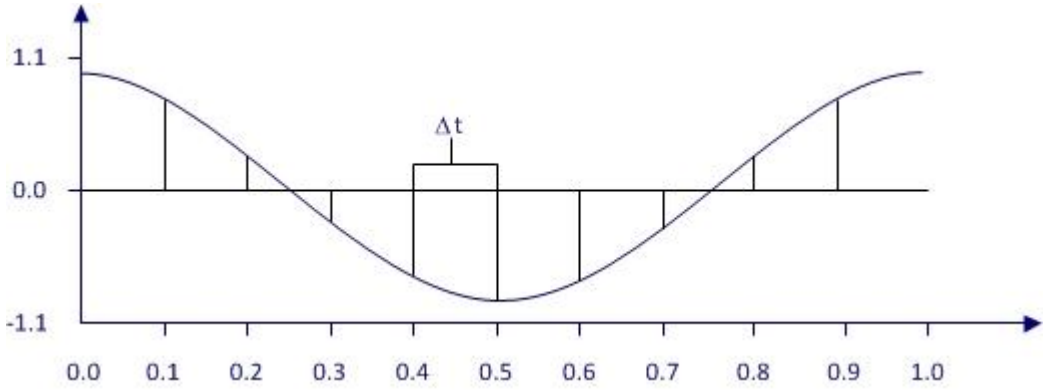
Z punktu widzenia projektanta i użytkownika skomputeryzowanego systemu pomiarowego istotny jest wybór przetworników w taki sposób, aby ich parametry odpowiadały przewidywanej dla nich klasie zastosowań. Jedną z takich cech charakterystycznych przetwornika A/C jest rodzaj stosowane kodu. Pozostałymi parametrami są: fizyczny charakter sygnału analogowego (uni- bądź bi-polarny) i dopuszczalny zakres jego zmian na wejściu przetwornika. Do najważniejszych parametrów charakteryzujących możemy zaliczyć: rzeczywisty zakres przetwarzania, całkowy błąd przetwarzania, współczynnik różniczkowej nieliniowości przetwornika i częstotliwość przetwarzania przedstawione w rozdziale 3.4.

3.1. Próbkowanie i kwantowanie sygnału analogowego.

Przetwarzanie ciągłego sygnału analogowego na sygnał cyfrowy polega na dyskretyzacji sygnału w czasie czyli jego próbkowaniu, dyskretyzacji wartości sygnału czyli kwantowaniu oraz na kodowaniu uzyskanego sygnału dyskretnego. Próbkowanie następuje przez kolejne pobieranie próbek wartości sygnału w pewnych odstępach czasu, w taki sposób, aby ciąg próbek umożliwiał jak najwierniejsze

odtworzenie całego przebiegu funkcji. Kwantowanie przebiegu analogowego polega na przyporządkowaniu każdej próbce skończonej liczby poziomów amplitudy, odpowiadającym dyskretnym wartościom od zera do pełnego zakresu. Tymi etapami zajmiemy się teraz.

Próbkowanie sygnału (patrz rys. 3.2) polega na tym, że w ustalonych odstępach czasu t (impulsowanie) pobierane są tzw. próbki (ang. sample) i mierzony jest poziom sygnału $x(t)$. Wynik pomiaru zostaje skwantowany, by mógł być przekształcany w dziedzinie liczb całkowitych. Sygnał przekształcony do postaci impulsowej, którego amplituda została skwantowana nazywa się sygnałem dyskretnym lub cyfrowym. Jeśli odstępy czasowe pomiędzy kolejnymi chwilami próbkowania są stałe, to mówimy, że próbkowanie jest równomierne, w przeciwnym razie nazywane jest nierównomiernym.



Rys.3.2. Próbkowanie sygnału sinusoidalnego

Aby spróbkowany sygnał z postaci cyfrowej dało się przekształcić z powrotem do postaci analogowej musi być spełnione twierdzenie Shannona-Kotielnikowa o próbkowaniu, które opiera się na trzech założeniach:

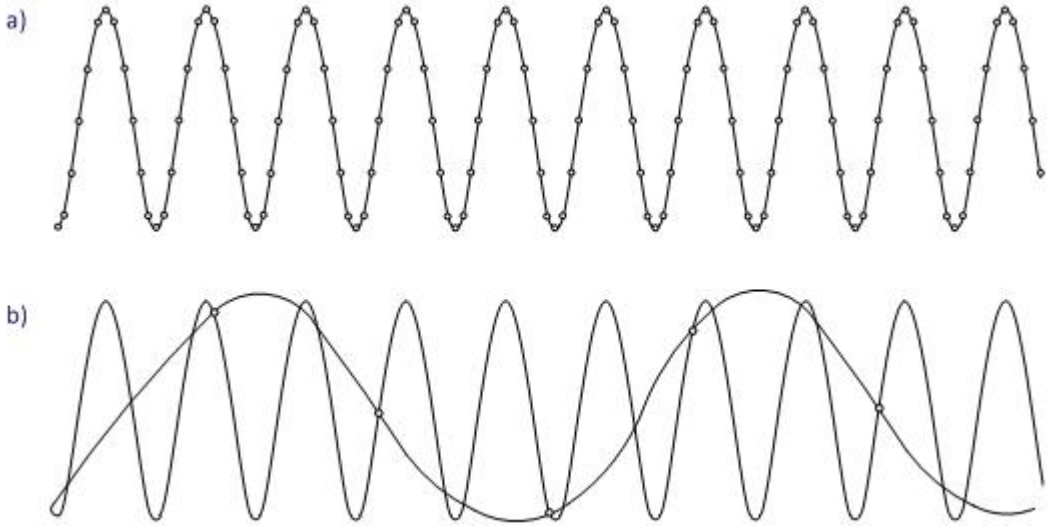
- przebieg $x(t)$ określony jest na przedziale $-\infty < t < \infty$,
- widmo gęstości mocy $Gx(f)$ przebiegu $x(t)$ ma skończoną wartość,
- widmo $Gx(f) = 0$ dla częstotliwości $|f| = f_{max}$, gdzie f_{max} jest maksymalną częstotliwością występującą w sygnale.

Mówi ono, że częstotliwość próbkowania nie może być mniejsza niż podwojona wartość największej częstotliwości występującej w sygnale. Na rysunku 3.3 przedstawione są dwa przykłady próbkowania sygnału sinusoidalnego, gdzie w jednym przypadku (a) warunek ten jest spełniony a w drugim (b) nie jest.

Podobnie sformułowane jest twierdzenie Nyquista: sygnał ciągły może być ponownie odtworzony z sygnału dyskretnego, jeśli był próbkowany z częstotliwością co najmniej dwa razy większą od granicznej częstotliwości swego widma.

Częstotliwość Nyquista definiuje się jako najmniejszą częstotliwość z jaką należy próbkować sygnał aby można go było odtworzyć bez przekłamań.

Jeśli w sygnale analogowym obecne są składowe o częstotliwości wyższej od częstotliwości Nyquista, spowoduje to powstanie błędów próbkowania (aliasing).



Rys. 3.3. Próbkowanie sygnału z różną częstotliwością

Aliasing to szczególny typ zniekształcenia sygnału, który może wystąpić w trakcie przetwarzania cyfrowo-analogowego lub analogowo-cyfrowego. Występuje wówczas gdy w wyniku intermodulacji częstotliwości próbkowania oraz składowych o częstotliwości wyższej od częstotliwości Nyquista (dopuszczalnej maksymalnej częstotliwości sygnału próbkowanego, równej połowie częstotliwości próbkowania) pojawiają się zniekształcenia o częstotliwości leżącej w paśmie sygnału. Inaczej mówiąc aliasing występuje gdy w sygnale są składowe wyższe od połowy częstotliwości próbkowania.

Przy przetwarzaniu sygnałów szybkozmiennych korzystnie jest zapamiętać wartość sygnału pobranej próbki aż do zakończenia procesu kwantowania, czyli do chwili pobrania następnej próbki. Zapewnia to układ próbkująco-pamiętający (S/H, ang. Sample and Hold). Proces kwantowania jest zwykle znacznie dłuższy niż czas potrzebny na pobranie próbki, zastosowanie układu S/H pozwala zatem zmniejszyć błędy dynamiczne powstające przy przetwarzaniu sygnałów szybkozmiennych.

Parametry charakterystyczne układów S/H to:

- czas przyjęcia próbki (czas po jakim napięcie na kondensatorze pamiętającym wyrówna się z napięciem wejściowym),
- szybkość spadku pamiętanego napięcia (wynikająca z rozładowywania się kondensatora pamiętającego).

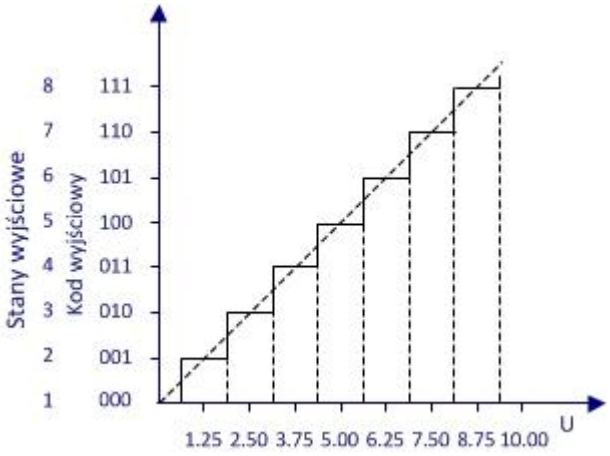
Kwantowanie (kwantyzacja) przebiegu analogowego polega na przyporządkowaniu każdej próbce skończonej liczby poziomów amplitudy, odpowiadającym dyskretnym wartościom od zera do pełnego zakresu (patrz rysunek 3.4).

Najczęściej stosowane jest kwantowanie równomierne opisane wzorem:

$$X_0 = q \cdot \mathrm{ent}\left(\frac{X}{q} + 0{,}5\right)$$

gdzie: X_0 – wartość na wyjściu układu kwantującego, X – wartość sygnału analogowego na wejściu układu, q – elementarny przedział kwantowania, ent(x) – część całkowita liczby rzeczywistej.

Proces kwantowania polega na zaokrąglaniu wartości wyznaczonej próbki do takiej, którą przy danej rozdzielczości cyfrowej można zapisać w postaci zadanej liczby bitów. Dla przykładu, jeżeli zmierzona próbka posiada wartość 3,2 i rozdzielczość cyfrowa w danym procesie kwantowania została ustalona na 3 bity, tak jak na rysunku 3.4, to w wyniku procesu kwantowania wartość próbki zostanie zaokrąglona do 3,75, a więc do najbliższej granicy przedziału kwantowania.



Rys. 3.4. Kwantowanie sygnału.

Błąd kwantowania określa zatem różnicę między wartością cyfrową (wynikiem kwantowania) a wartością analogową mierzonej wielkości. Na ogół wartości błędu dla poszczególnych pomiarów nie są znane, korzystamy ze statystycznego modelu dla procesu kwantowania uważając, że błąd kwantowania jest białym szumem (zmienne losowe tworzące proces błędu są nieskorelowane), błędy kwantowania nie są skorelowane z wynikami dokładnymi a rozkład prawdopodobieństwa procesu jest rozkładem równomiernym w zakresie błędu kwantowania (szerokości połowy przedziału kwantowania).

3.2. Sposoby kodowania danych

Powszechnie używany w informatyce dwójkowy (binarny) system liczbowy to pozycyjny system liczbowy, w którym podstawą pozycji są kolejne potęgi liczby 2. Do zapisu liczb potrzebne są więc tylko dwa znaki zero i jeden. Jak w każdym pozycyjnym systemie liczbowym, liczby zapisuje się tu jako ciąg cyfr, z których każda jest mnożnikiem kolejnej potęgi liczby stanowiącej podstawę systemu. Wewnątrz

sprzętu cyfrowego liczby są reprezentowane za pomocą cyfr dwójkowych znanych jako bity (ang. Binary digIT). Bit położony najbardziej po prawej stronie liczby nazywamy bitem najmłodszym (najmniej znaczącym) LSB (ang. Least Significant Bit), zaś położony najbradziej po lewej stronie jako bit najstarszy (najbardziej znaczący) MSB (ang. Most Significant Bit). W zasadzie stosuje się dwa sposoby kodowania – tzw. dwójkowe kodowanie cyfr dziesiątkowych, przy którym ciągi kodowe są przypisane poszczególnym cyfrom dziesiątkowego rozwinięcia pozycyjnego (tzw. kod BCD, ang. Binary Coded Decimals) oraz dwójkowy system pozycyjny tj. przedstawienie liczb w systemie pozycyjnym o podstawie dwa.

Przy opracowaniu sposobu reprezentacji liczb niecałkowitych został wykorzystany fakt, że dowolną liczbę w systemie pozycyjnym o podstawie p można zapisać w postaci:

$$l = m * p^c,$$

gdzie m oznacza mantysę, zaś c – cechę.

W przetwornikach analogowo-cyfrowych najczęściej wykorzystuje się następujące kody: kod uzupełnień do dwóch, kod binarny z przesunięciem, kod znak-moduł.

3.2.1. Naturalny binarny kod pozycyjny

Naturalny system dwójkowy (ang. NBS - Natural Binary System) jest najprostszym systemem pozycyjnym, w którym podstawa $p = 2$. System posiada dwie cyfry 0 i 1, zatem można je kodować bezpośrednio jednym bitem informacji. Wartość liczby obliczamy zgodnie ze wzorem:

$$N = a_n 2^n + a_{n-1} 2^{n-1} + \ldots + a_1 2^1 + a_0 2^0$$

W kodzie tym możemy przedstawić liczby naturalne od zera (słowo kodowe zawiera same zera) do $2^n - 1$ (słowo zawiera same jedynki), jest więc kodem unipolarnym.

W kodach bipolarnych jeden z bitów słowa kodowego zawiera informację o znaku. Niedostatkiem takiego wykorzystania naturalnego binarnego kodu pozycyjnego jest to, że liczba 0 ma w nim wtedy dwie różne reprezentacje kodowe, oraz fakt, że dodanie według zasad arytmetyki binarnej dwóch niezerowych liczb o przeciwnych znakach a jednakowej wartości bezwzględnej nie daje w wyniku wartości zerowej.

3.2.2. Binarny kod uzupełnieniowy

Binarny kod uzupełnieniowy, nazywamy tez kodem uzupełnień do dwóch (ang. Two's Complement Code), służy do kodowania liczb całkowitych ze znakiem. Kodów uzupełnieniowych o różnych podstawach używa się w celu uproszczenia operacji odejmowania. Tworzymy go na podstawie naturalnego kodu pozycyjnego w ten sposób, że tworzy się odwrotny zapis słowa (zamieniając 0 na 1 i odwrotnie), do tak otrzymanej liczby binarnej dodaje się 1 (modulo 2), odrzucając przy tym ewentualny

znak przeniesienia po najwyższej pozycji słowa kodowego. Wadą binarnych kodów pozycyjnych jest utrudniona czytelność zapisów o większej liczbie znaków.

Tabela 3.1. Zestawie kodów naturalnego i uzupełnieniowego do dwóch.

Kod dziesiętny	Kod naturalny	Kod uzupełnieniowy
8	1000	-
7	0111	0111
6	0110	0110
5	0101	0101
4	0100	0100
3	0011	0011
2	0010	0010
1	0001	0001
+0	0000	0000
-0	-	1111
-1	-	1110
-2	-	1101
-3	-	1100
-4	-	1011
-5	-	1010
-6	-	1001
-7	-	1000

Cechy kodu:

- do przedstawienia *n* - bitowej liczby binarnej z uwzględnieniem jej znaku potrzeba *n*+1 bitów;
- liczby dodatnie zapisywane są w naturalnym kodzie binarnym;
- najstarszy bit reprezentacji binarnej jest bitem znaku;
- znak "+" reprezentowany jest przez 0, znak "-" przez 1;
- liczba ujemna jest arytmetycznym uzupełnieniem liczby dodatniej o tej samej wartości bezwzględnej;
- identyczna realizacja operacji dodawania dla liczb dodatnich i ujemnych;
- pozycja znaku sumuje się tak jak pozostałe bity;
- konwersja ujemno/dodatnia i dodatnio/ujemna są odwracalne;
- liczba dodatnia + (-liczba dodatnia) = 0;

- jednoznaczna reprezentacja zera;
- konwersja binarno-dziesiętna: zamienić liczbę ujemną na dodatnią, przekonwertować na system dziesiętny, dopisać znak "-".

3.2.3. Kod binarny z przesunięciem

W kodzie binarnym z przesunięciem (ang. Offset Binary Code) przesuwa się naturalny kod binarny w taki sposób aby kod (10..00) odpowiadający połowie zakresu przetwarzania reprezentował napięcie o wartości równej zeru.

Zaletą kodu z przesunięciem jest jego kompatybilność z wejściami i wyjściami cyfrowymi komputerów, może być też łatwo zamieniony na bardziej wygodny do obliczeń kod uzupełnień do dwóch i ma jednoznaczny kod reprezentujący zero.

Tabela 3. 2. Porównanie liczb w kodzie znak-moduł z naturalnym

Kod dziesiętny	Kod naturalny	Kod znak-moduł
8	1000	-
7	0111	0111
6	0110	0110
5	0101	0101
4	0100	0100
3	0011	0011
2	0010	0010
1	0001	0001
+0	0000	0000
-0	-	1000
-1	-	1001
-2	-	1010
-3	-	1011
-4	-	1100
-5	-	1101
-6	-	1110
-7	-	1111

Wadami tego kodu są mylące wyniki operacji arytmetycznych (np. suma liczby dodatniej i ujemnej daje w wyniku kod odpowiadający pełnemu zakresowi przetwarzania a nie zeru), oraz to, że

największa zmiana stanu bitów występuje przy zerze, a to powoduje największe statyczne błędy nieliniowości.

3.2.4. Kod znak-moduł

Kod znak-moduł (ang. Magnitude Plus Sign Code) to sposób zapisu dodatnich i ujemnych liczb całkowitych w sposób najbardziej zbliżony do znanego nam z zapisu dziesiętnego. Wszystkie bity poza najstarszym mają takie samo znaczenie jak w naturalnym kodzie binarnym. Wyróżniony bit w tym zapisie jest bitem znaku. Jeżeli ma on wartość 0 to dana liczba jest dodatnia, jeżeli 1 to liczba jest ujemna. W związku z tym występują dwie reprezentacje zera: +0 (00000000) i -0 (10000000). Przy zmianie znaku liczby w tym kodzie następuje zmiana tylko jednego bitu, zaś w kodach uzupełnień do dwóch czy binarnym przesuniętym zmieniają wszystkie bity lub wszystkie bity poza jednym.

3.2.5. Dziesiętno-binarny kod pozycyjny (kod BCD)

Jest to dziesiętny kod pozycyjny, w którym każda cyfra dziesiętna jest zakodowana dwójkowo na 4 bitach, według reguł kodowania binarnego. Tego rodzaju zapis daje się łatwo przekształcić w zapis dziesiętny. Oczywistą zaletą tego kodu jest wygoda odczytu liczb dziesiętnych i możliwość zapisu ułamkowych liczb dodatnich. Wadą tego kodu jest jego nadmiarowość: 4-cyfrowa liczba binarna pozwala zakodować 16 możliwości z czego wykorzystuje się 10 odpowiadających poszczególnym cyfrom.

Tabela 3.2. Kody BCD dla poszczególnych cyfr dziesiętnych

Cyfra dziesiętna	Kod BCD
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

3.2.6. Kod Graya

Kod Graya (nazywany również kodem refleksyjnym) jest kodem binarnym, ale pozycjom w tym kodzie nie są przyporządkowane wagi, co oznacza, że może reprezentować dowolnie wybrany zakres wielkości analogowej o wybranym znaku.

Specyficzna właściwość kodu Graya polega na tym, że przy przejściach od jednego stanu do drugiego zmienia się tylko jeden bit. Zapis w tym kodzie można uzyskać z zapisu w binarnym kodzie uzupełnieniowym do dwóch. W tym celu pozostawia się bez zmiany znak na najbardziej znaczącej pozycji wyrazu kodowego, a jeśli znak na określonej pozycji wyrazu kodowego różni się od znaku znajdującego się na pozycji z lewej strony (wyższej o 1 rząd wielkości), to w kodzie Graya na odpowiedniej pozycji występuje 1, w przeciwnym razie na pozycji tej występuje 0, patrz Tabela 3.3.

Kod Graya nie nadaje się do operacji matematycznych i stosuje się go wówczas, gdy potrzebne są jeszcze szczególne właściwości, a więc w bardzo szybkich przetwornikach typu „flash" czy przetwornikach kątowo-cyfrowych.

Tabela 3.3. Zestawie kodów naturalnego i Graya

Kod dziesiętny	Kod naturalny	Kod Graya
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

3.3. Parametry charakterystyczne przetwornika

Parametry przetwornika charakteryzują jego własności w sposób ilościowy, umożliwiając dobór właściwego układu do spełnienia żądanych wymagań. Parametry przetwornika powinny przede wszystkim określać z jaką dokładnością i szybkością odbywa się proces przetwarzania. Podaje się oczywiście również parametry mechaniczne i elektryczne tych urządzeń, jednak z naszego punktu widzenia nie są one tak istotne.

Nominalny pełny zakres przetwarzania (ang. Full scale range) jest wartością napięcia przetwarzanego odpowiadająco maksymalnej wartości słowa wyjściowego powiększonej o 1:

$$U_{FS} = q2^n$$

gdzie q oznacza skok kwantowania (zdolność rozdzielczą przetwornika) zakładając, że jest on stały w całym zakresie przetwarzania, a n – liczbę znaków w wyrazie kodowym.

Rzeczywisty zakres przetwarzania jest to wartość napięcia wejściowego, której odpowiada maksymalna wartość zakodowana na wyjściu przetwornika (przy założeniu, że najniższej wartości zakodowanej odpowiada punkt początkowy zakresu przetwarzania). Dla przetwornika o idealnej (równomiernej) charakterystyce rzeczywisty zakres przetwarzania dany jest wzorem:

$$U_{\max} = q\left(2^n - 1\right)$$

Różnica między nominalną a rzeczywistą wartością zakresu przetwarzania wynika z faktu, że w przetworniku n-bitowym jednym z 2^n możliwych stanów jest stan zerowy, więc istnieje tak naprawdę $(2^n - 1)$ przedziałów kwantowania.

Rozdzielczość lub zdolność rozdzielcza (and. Resolution) wyraża najmniejszą wielkość sygnału wejściowego rozróżnialną przez przetwornik, może być wyrażona w miliwoltach jako wielkość przedziału kwantyzacji, lub w procentach jako względna wartość przedziału kwantyzacji w stosunku do pełnego zakresu przetwarzania. W katalogach dość często podaje się zamiast rozdzielczości ilość bitów słowa wyjściowego przetwornika.

Częstotliwość przetwarzania f_{prz} określa się jako maksymalną liczbę przetworzeń napięcia wejściowego w wartości zakodowane w jednostce czasu.

Czas przetwarzania T_{prz} jest to czas upływający pomiędzy momentem podania na wejściu przetwornika sygnału inicjującego odczyt napięcia a momentem ustalenia się na wyjściu zakodowanej wartości napięcia.

Ze względu na to, że każdy akt przetworzenia napięcia w kod cyfrowy powoduje powstanie krótkotrwałego procesu przejściowego, zachodzi nierówność:

$$f_{prz} < T_{prz}^{-1}$$

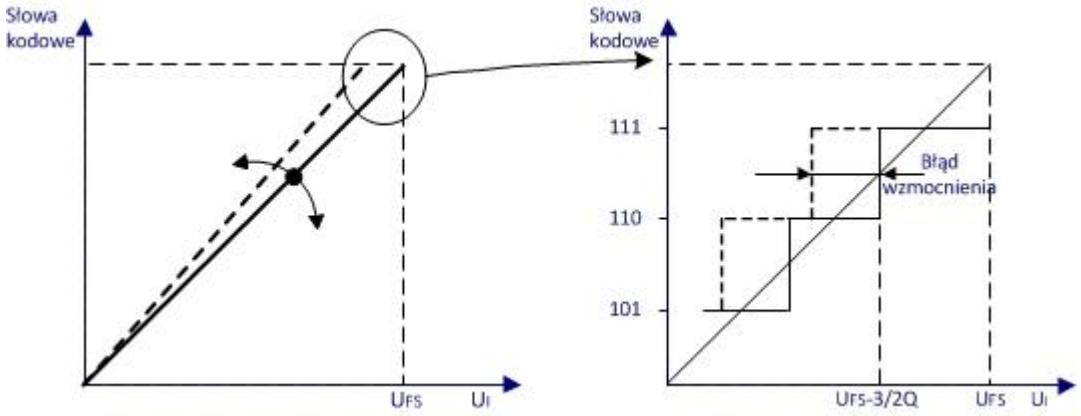
Praca przetwornika z częstotliwością porównywalną z f_{prz} wprowadza dodatkowe błędy przetwarzania, których przyczyną są właśnie procesy przejściowe.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

3.4. Błędy rzeczywistego przetwornika

Idealna charakterystyka przetworników A/C może być przedstawiona jako linia schodkowa przyporządkowująca poszczególnym przedziałom przetwarzanego napięcia wejściowego określony sygnał cyfrowy (słowo kodowe). Charakterystyka rzeczywistego przetwornika A/C wykazuje odstępstwa od charakterystyki idealnego przetwornika, określane jako błędy przetwornika. Uwzględnienie tych błędów może prowadzić do wniosku, że rozdzielczość przetwornika nie odzwierciedla rzeczywistej dokładności przetwornika.

Błąd skalowania (wzmocnienia) wynika ze zmiany nachylenia charakterystyki przetwarzania $N=f(UI)$ w stosunku do charakterystyki idealnej (rys. 3.5).



Rys. 3.5. Błędy przetwornika analogowo-cyfrowego: błąd wzmocnienia

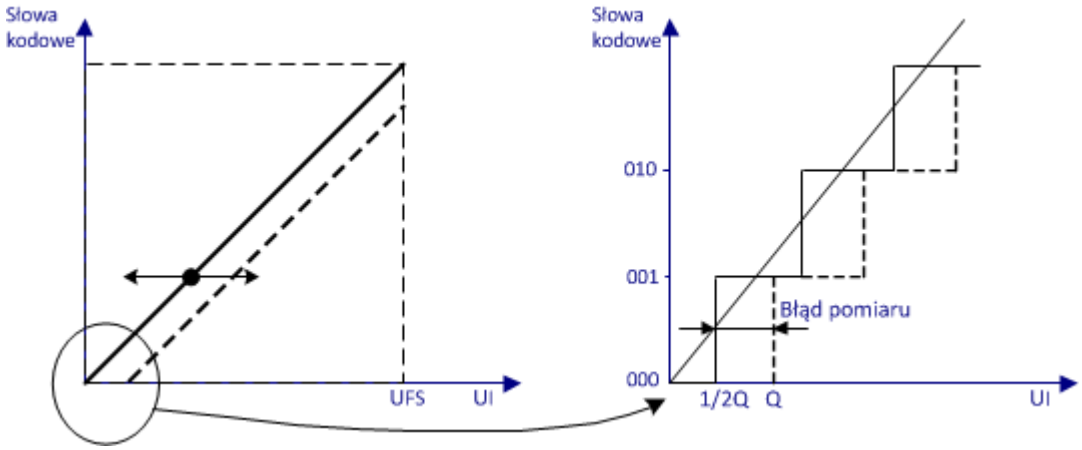
Błąd przesunięcia zera (ang. Offset) jest określany przez wartość napięcia wejściowego dla zerowej wartości słowa wyjściowego, podaje się ja w woltach lub procentach zakresu przetwornika. Na rys. 3.6 charakterystyka rzeczywista jest przesunięta w dół w stosunku do charakterystyki idealnej.

Zarówno błąd zera, jak i błąd wzmocnienia może być wyeliminowany przez odpowiednią regulację przetwornika (adjustację). Nie istnieje natomiast metoda zmniejszania błędów liniowości, poza użyciem innego przetwornika z lepszą liniowością lub większą rozdzielczością.

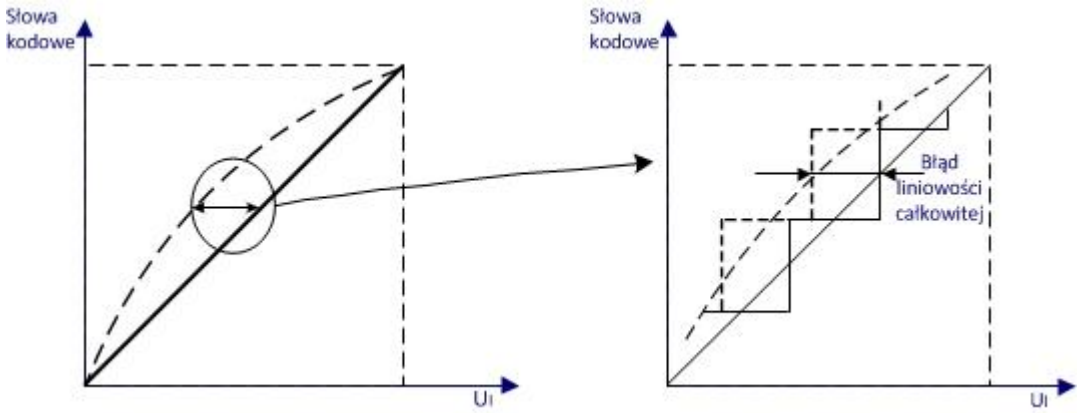
Błąd liniowości całkowitej oznacza, że charakterystyka przetwornika nie jest zbliżona do liniowej (rys. 3.7).

Błędy nieliniowości charakterystyki przetwarzania występuje wówczas, gdy środki schodków nie da się połączyć jedną linią, gdyż są one według niej przesunięte w różne strony, co bardziej odpowiadało by krzywej, w wyniku czego następuje pominięcie w początku skali kilku wartości binarnych np. 4 (100b) i 12 (1100b).

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 3.6. Błędy przetwornika analogowo-cyfrowego: błąd zera



Rys. 3.7. Błędy przetwornika analogowo-cyfrowego: błąd liniowości całkowitej.

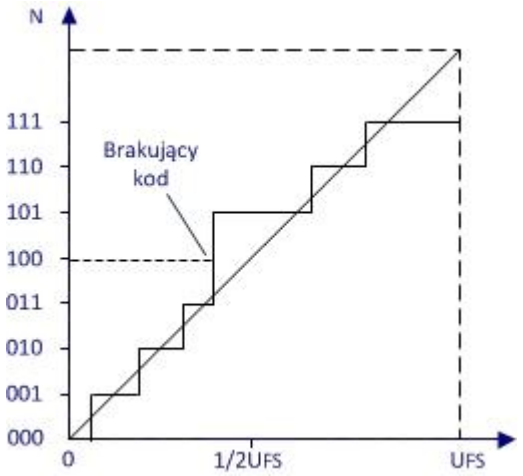
Nieliniowość całkowa (rys. 3.8) jest to maksymalne względne odchylenie $(\Delta UI)_{max}$ charakterystyki rzeczywistej przetwarzania *N=f(UI)* od charakterystyki idealnej (Rys. 3.8). Nieliniowość całkowa εC jest wyrażona w procentach w stosunku do pełnego zakresu przetwarzania:

$$\varepsilon C = ((\Delta UI)_{max} / UI_{max})\ 100\ \%$$

Całkowy błąd przetwarzania określa się korzystając ze wzoru:

$$\Delta U = \max\left(U_{rz} - U_k\right)$$

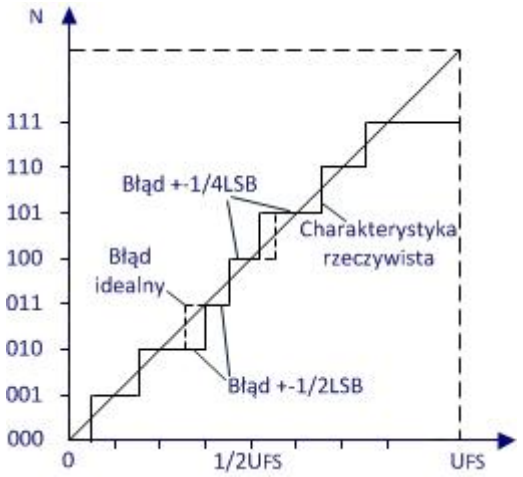
Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 3.8. Błędy przetwornika analogowo-cyfrowego: błąd nieliniowości całkowej

gdzie U_{rz} oznacza rzeczywistą wartość napięcia wejściowego a U_k przypisaną jej wartością wynikającą z interpretacji zapisu cyfrowego, zaś funkcję maksimum oblicza się w całym rzeczywistym zakresie przetwarzania.

Nieliniowość różniczkowa, wyznacza się różnice między sąsiednimi wartościami napięcia wejściowego, powodującymi zmianę słowa wyjściowego o wartość najmniej znaczącego bitu (rys. 3.9). Nieliniowość różniczkowa jest podawana w procentach, jako maksymalne względne odchylenie tej różnicy od jej wartości średniej w całym zakresie przetwarzania. Błąd nieliniowości różniczkowej może w tym przypadku powodować zniekształcenia uzyskanego widma, utrudniające jego obróbkę i interpretację.



Rys. 3.9. Błędy przetwornika analogowo-cyfrowego: nieliniowość różniczkowa

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Współczynnik nieliniowości różniczkowej przetwornika wyznaczamy korzystając z zależności:

$$r_{\%} = \frac{1}{\overline{\delta}} \max_i(\delta_i) \cdot 100\%$$

przy czym

$$\delta_i = U_i - U_{i-1}$$

$$\overline{\delta} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i$$

gdzie U_0 oznacza początkowe napięcie zakresu przetwarzania a wartości U_1, U_2, ..., U_n oznaczają napięcia wejściowe przy których następuje kolejny przyrost o 1 zakodowanej wartości wyjściowej.

Jeżeli podczas przetwarzania zmienia się wartość sygnału wejściowego, to podczas przetwarzania przez przetworniki reagujące na wartość chwilową sygnału powstaje błąd dynamiczny, będący funkcją szybkości zmian przebiegu wejściowego i czasu przetwarzania.

Problem polega na tym, że błędy przetwarzania nakładają się na siebie i ich odseparowanie nie jest proste (kompensacja jednego błędu może powodować zwiększenie innego). Istotne znaczenie mają błędy nieliniowość tzw. nieliniowości całkowej i nieliniowości różniczkowej. Błąd nieliniowości całkowej informuje jakie jest maksymalne odchylenie interpolowanej charakterystyki przetwarzania od charakterystyki idealnej (przy q -> 0) i wyrażany jest w procentach pełnego zakresu przetwarzania UFS. Błąd nieliniowości różniczkowej informuje jaka jest relacja pomiędzy kolejnymi wartościami napięcia wejściowego powodującymi zmianę kodu wyjściowego, a szerokością przedziału kwantowania q. Zauważmy, że jeżeli różnica napięć będzie większa od 2*q to na wyjściu zabraknie jednego kodu, powstanie ważny i niepożądany błąd gubienia kodów.

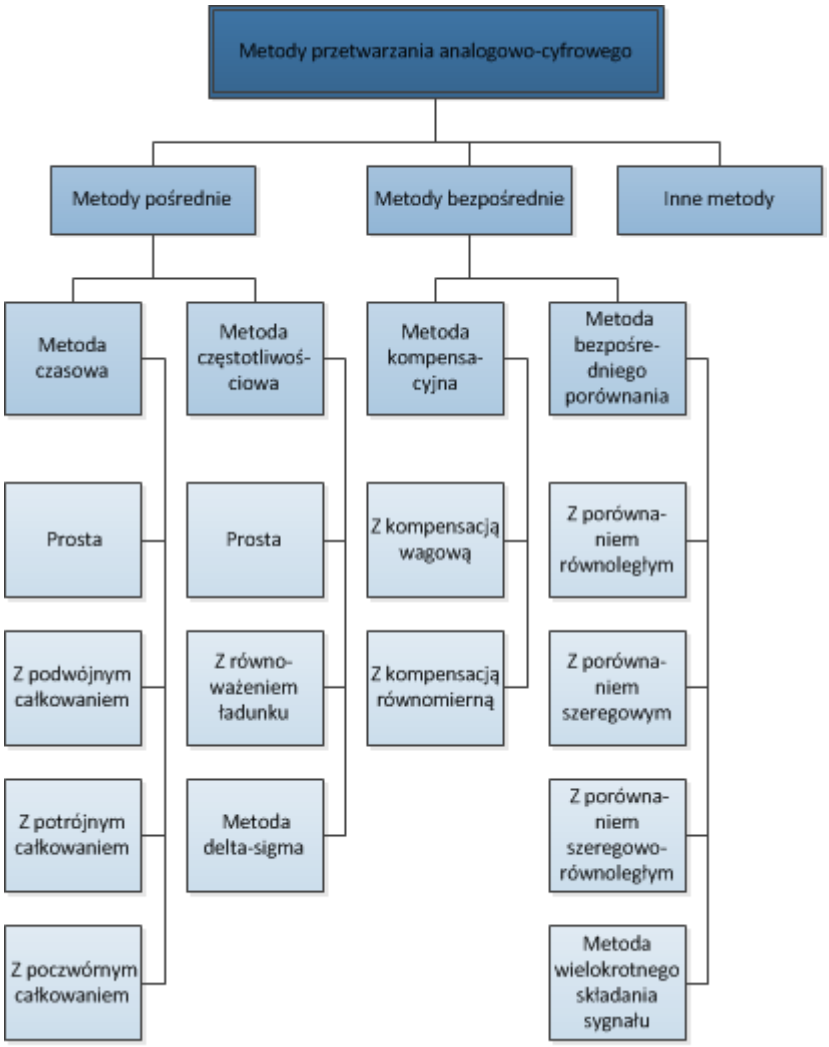
Współczynniki termicznie zera i skali to zmiany nachylenia charakterystyki przetwarzania które powstają pod wpływem zmian temperatury i są wyrażane w %/°C. Są one definiowane jako średnie odchylenia przypadające na określony zakres temperatur.

Współczynnik termiczny nieliniowości różniczkowej opisuje maksymalną zmianę błędu nieliniowości różniczkowej w funkcji temperatury w określonym zakresie temperatur. Często zamiast podawania tego współczynnika producenci podają zakres temperatury w którym zmiany temperaturowe można pominąć.

3.5. Metody przetwarzania

Liczne metody przetwarzania sygnału analogowego na jego reprezentację cyfrową można podzielić na metody pośrednie i bezpośrednie (rys. 3.10). W układach działających w oparciu o metody bezpośrednie wielkość przetwarzana od razu jest porównywana z wielkością odniesienia. Do grupy tej zalicza się przetworniki z bezpośrednim porównaniem oraz przetworniki kompensacyjne. Układ przetwornika opartego na metodzie bezpośredniego porównania z napięciem odniesienia jest złożony

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 3.10. Podział metod przetwarzania analogowo-cyfrowego

z *n* komparatorów, które porównują napięcie wejściowe z równomiernie rozłożonym napięciem odniesienia na dzielniku rezystorowym. Sygnały z komparatorów, są podawane do dekodera priorytetów i są przetwarzane na kod binarny. Najwyższy priorytetem komparator wymusza sygnałem na swoim wyjściu na dekoderze przekodowanie swojego priorytetu na kod binarny. Metoda ta nosi nazwę przetwarzania typu flash, schemat blokowy takiego przetwornika przedstawia rysunek 3.11.

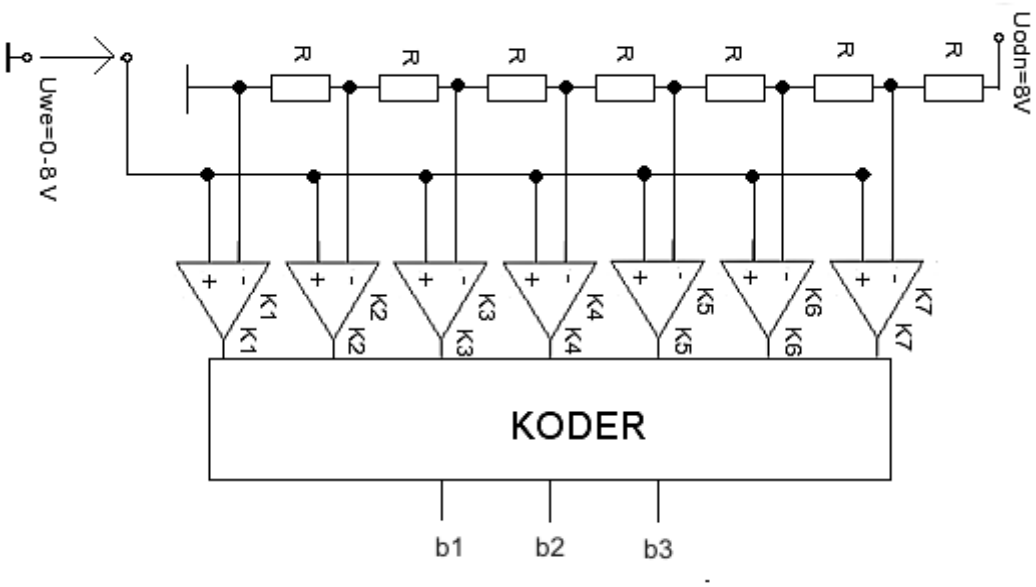
Przetworniki z bezpośrednim porównaniem, szczególnie przetworniki typu „flash" gwarantują najkrótszy czas przetwarzania, są tanie, mają za to małą rozdzielczość i nie są odporne na zakłócenia, i dlatego są stosowane do przetwarzania sygnałów wizyjnych. Przetworniki kompensacyjne cechują się natomiast szczególnie małym błędem i są wykorzystywane w laboratoriach. W przypadku metod

pośrednich najpierw zamienia się wielkość przetwarzaną na pewną wielkość pomocniczą (np. czas lub częstotliwość), która dopiero porównuje się z wielkością odniesienia.

Zależnie od rodzaju wielkości pomocniczej wyróżnia się metody częstotliwościowe i czasowe. Innym istotnym kryterium podziału jest czas przetwarzania sygnału. Pod tym względem metody przetwarzania można podzielić na integracyjne i chwilowe. Metody chwilowe dają wynik odpowiadający wartości sygnału w chwili czasu względem okresu przetwarzania. Na odwrót, rezultaty metod integracyjnych odpowiadają wartości sygnału średniej za okres integracji, który na ogół zajmuje znaczną część okresu przetwarzania.

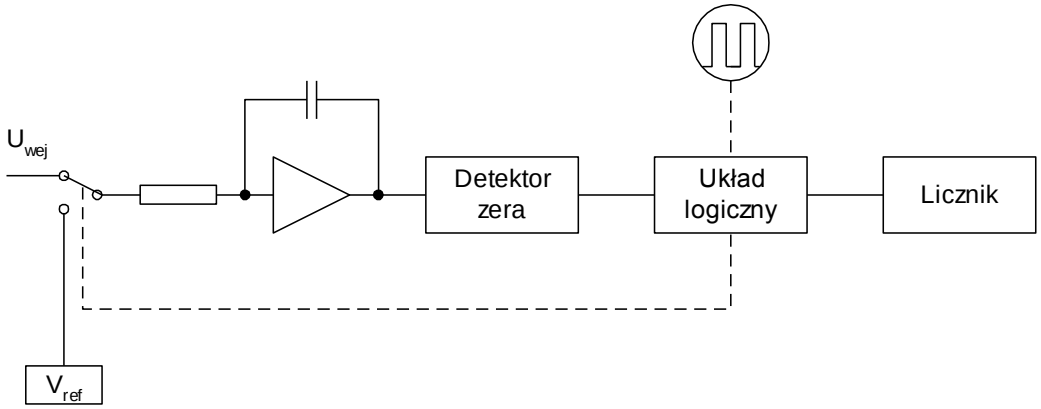
Przetwornik analogowo-cyfrowy może również działać na zasadzie kombinacji dwóch metod przetwarzania. Najczęściej stosuje się obecnie przetworniki całkujące, ze względu na korzystne właściwości tłumienia zakłóceń w procesie całkowania sygnału wejściowego.

Przetwarzanie integracyjne napięcia na sygnał cyfrowy metodą podwójnego całkowania (ang. dual slope conversion) nosi również nazwę przetwarzania napięcie-czas. Schemat blokowy takiego przetwornika przedstawia rysunek 3.12. Przetwarzanie napięcia na kod binarny metodą dwukrotnego całkowania, polega na tym, że kondensator jest ładowany przez ustalony czas prądem o natężeniu proporcjonalnym do amplitudy sygnału wejściowego, a następnie rozładowywany prądem o stałej wartości, aż do momentu osiągnięcia zera. Czas rozładowywania jest proporcjonalny do wartości



Rys. 3.11. Schemat blokowy 3-bitowego przetwornika typu flash

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 3.12. Schemat blokowy przetwornika z podwójnym całkowaniem

sygnału wejściowego. Podczas rozładowywania cały czas działa licznik, który zlicza impulsy z generatora wzorcowego o stałej częstotliwości. Liczba jaką otrzymamy jest wynikiem zliczania i jest ona proporcjonalna do wartości sygnału wejściowego. Przetworniki z podwójnym całkowaniem są bardzo dokładne i odporne na zakłócenia, niestety są za to wolne.

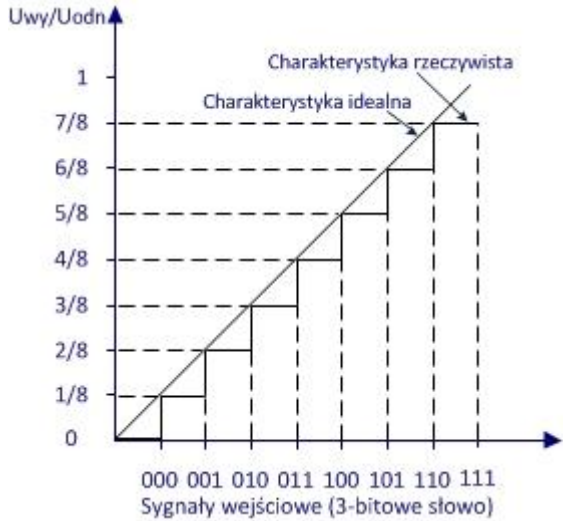
3.6. Literatura

1. M. Łakomy, J. Zabrodzki, Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, PWN, Warszawa1985.
2. Z. Kulka, A. Libura, M. Nadachowski: Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, WKŁ, Warszawa 1987.
3. W. Nawrocki, Komputerowe systemy pomiarowe, WKŁ, Warszawa 2002.
4. J. L. Kulikowski, Komputery w badaniach doświadczalnych, PWN, Warszawa 1993.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

4. Przetworniki cyfrowo-analogowe

Zasada działania przetworników cyfrowo-analogowych (ang. Digital-to-Analog Converter) polega na tym, aby dla każdego słowa kodowego wytworzyć sygnał analogowy (napięcie lub prąd) o wartości takiej samej jakiej w procesie przetwarzania analogowo-cyfrowego przypisywane jest dane słowo kodowe. Najmniejsza różnica napięć dla dwóch różnych słów kodowych (skok kwantowania) wynosi q. Wartość q jest równa wynikowi podzielenia zakresu napięć na wyjściu przetwornika przez ilość poziomów kwantowania (2^n, gdzie *n* oznacza długość słowa kodowego, może też być nazywana rozdzielczością przetwornika). Liczba poziomów sygnału wyjściowego (lub inaczej liczba kroków kwantowania) dla przetworników 8–bitowych wynosi 256 a dla 12-bitowych 4096. Kształt idealnej charakterystyki przejściowej nie zależy od liczby bitów przetwornika, a wartość maksymalna U_{fs} nie jest nigdy osiągana przez sygnał wyjściowy. Na rysunku 4.1 przedstawiono idealną i rzeczywistą charakterystykę przetwornika C/A dla słowa trzybitowego.



Rys. 4.1 Charakterystyka przejściowa przetwornika C/A.

Dla przetwarzania sygnałów bipolarnych niezbędne jest podanie informacji dotyczącej znaku sygnału wyjściowego. Najczęściej wykorzystuje się w tym celu rozwinięcia liczb dwójkowych w postaci kodu z uzupełnieniem do dwóch lub innych kodów komplementarnych (patrz poprzedni wykład), ze względów technicznych nie stosuje się ich realizacji w innych kodach (np. kodzie Graya). W przypadku tych przetworników sygnał wyjściowy nie może osiągnąć maksymalnej wartości dodatniej, osiąga jednak maksymalną wartość ujemną. Zakres przetwornika bipolarnego wynosi $2U_{fs}$.

Z idealnym przetwarzaniem C/A nie jest związany żaden błąd takiego typu, jak błąd kwantowania charakterystyczny dla przetwarzania A/C. Stąd łącząc wyjścia przetwornika A/C z wyjściami

przetwornika C/A oraz porównując wyjściowe napięcie z przetwornika C/A z wejściowym napięciem przetwornika A/C można przy zachowaniu warunku idealności układów określić błąd kwantowania, można też wykorzystać ten układ do testowania i regulacji układów przetworników.

Charakterystyka przejściowa rzeczywistego przetwornika C/A wykazuje wiele odstępstw od charakterystyki idealnej podobnych do tych dla przetwornika analogowo-cyfrowego, które zostały omówione w rozdziale 3.4. Spośród najczęściej występujących należy wymienić: błąd przesunięcia zera (offset), błąd wzmocnienia i błąd nieliniowości (całkowitej i różnicowej). Na ogół wszystkie te odstępstwa występują równocześnie w każdym przetworniku, co gorsze ich wartość ulega zmianie w czasie w wyniku zmian np. temperatury oraz starzenia. Praktycznie we wszystkich przetwornikach istnieje możliwość zewnętrznej regulacji błędów przesunięcia zera i błędów wzmocnienia. Nie istnieje natomiast możliwość regulacji błędów liniowości, w tym przypadku poprawę można uzyskać jedynie poprzez zastosowanie przetwornika wysokiej jakości lub użycie przetwornika o większej rozdzielczości niż niezbędne minimum.

4.1. Parametry charakterystyczne przetwornika

Najważniejszymi parametrami przetwornika cyfrowo-analogowego są:

- Zakres przetwornika unipolarnego (wartość maksymalna wytwarzanego napięcia). Wartość maksymalna sygnału wyjściowego wynosi:

$$\frac{2^n - 1}{2^n} U_{odn}$$

  dla przetwornika unipolarnego. Dla wygody i prostoty definicji zakres przetworników definiuje się jako zakres nominalny, nie zaś jako rzeczywistą wartość maksymalną sygnału wyjściowego wytwarzanego przez przetwornik.

- Krok kwantowania q (najmniejszy skok sygnału wyjściowego nazywany również kwantem przetwarzania);
- Liczba poziomów (kroków kwantowania) sygnału wyjściowego czyli długość słowa kodowego;
- Rozdzielczość przetwarzania definiowana jest jako najmniejsza zmiana sygnału wyjściowego (patrz kwant przetwarzania) i zależy od napięcia odniesienia U_{odn} i długości słowa kodowego n:

$$\Delta U_{wy} = \frac{U_{odn}}{2^n};$$

  Zwykle mówimy jednak, że przetwornik ma rozdzielczość n bitów (obecnie spotyka się przetworniki 4 - 24 bitowe).

- Dokładność przetwornika określona przez:
  - błąd bezwzględny – największą różnicę między zmierzonym napięciem wyjściowym a obliczonym z powyższego wzoru;
  - błąd względny – stosunek błędu bezwzględnego do wartości napięcia odniesienia,

jest zawsze gorsza od jego rozdzielczości. Błąd bezwzględny podawany jest zwykle w bitach LSB. Gdy rozdzielczość przetwornika jest o kilka bitów lepsza od dokładności, tak duża rozdzielczość jest najczęściej bezużyteczna, bowiem funkcją przetwornika jest wytworzenie napięcia zadanego słowem kodowym, a w tym przypadku część bitów byłaby bezużyteczna.

- Czas ustalania to przedział czasu od chwili zmiany sygnału cyfrowego na wejściu do momentu ustalenia się właściwego sygnału analogowego na wyjściu, z dokładnością sygnału analogowego równą połowie kwantu *q*. W przetwornikach o dużej rozdzielczości czas ustalania definiuje się jako czas upływający od chwili zmiany stanu na wejściu do czasu momentu ustalenia się sygnału na wyjściu z dokładnością do 0,01% lub nawet 0,001%. Czas ustalania podaje się w mili- lub mikrosekundach.
- Stosunek sygnału do szumu (ang. Signal to noise ratio) określa wartość (wyrażoną najczęściej w dB) mocy sygnału użytecznego w zadanym paśmie częstotliwościowym do mocy szumów w tym samym paśmie częstotliwościowym.
- Częstotliwość przetwarzania jest określona liczbą okresów przetwarzania na sekundę, przy zachowaniu założonych parametrów przetwarzania dotyczących dokładności, najczęściej podaje się ją w ilości próbek na sekundę (SPS – ang. Samples per second).

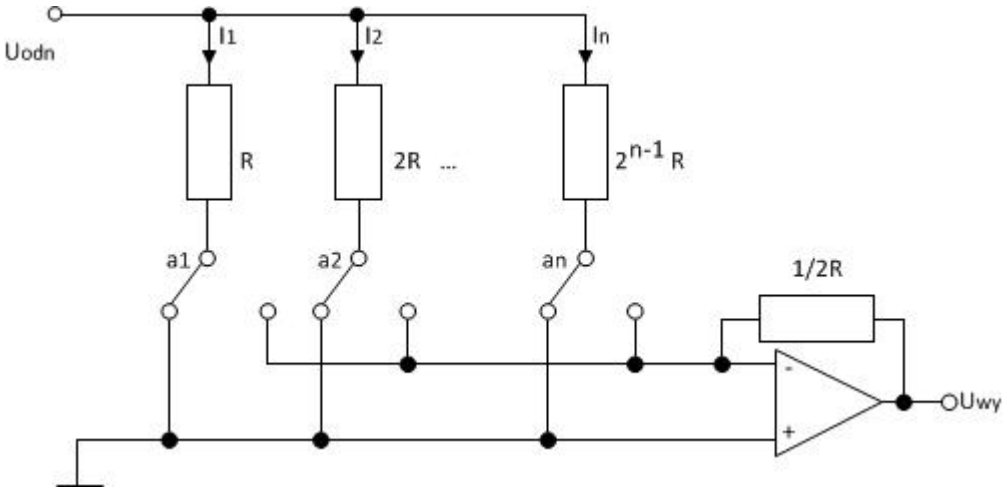
4.2. Konstrukcje przetworników

Przetworniki cyfrowo-analogowe ze względu na ich budowę dzielimy na:

- przetworniki z rezystancyjnym dzielnikiem napięcia lub prądu;
- przetworniki mnożące;
- przetworniki o zmiennym współczynniku wypełnienia ciągu impulsów;
- przetworniki nieliniowe;
- przetworniki wizyjne.

Najprostszą konstrukcją przetwornika C/A z rezystancyjnym dzielnikiem napięcia (drabinką rezystancyjną) jest układ o przetwarzaniu prądowym przedstawiony na rys. 4.2. Jest to wzmacniacz sumujący zbudowany z użyciem wzmacniacza operacyjnego i stabilnego źródła napięcia odniesienia U_{odn}. Drabinka rezystancyjna R-2R złożona z takiej sieci rezystorów i przełączników napięcia nie tylko wytwarza napięcia wyjściowe stopniowane dwójkowo, ale także sumuje je z odpowiednimi wagami, zależnie od pozycji i liczby włączonych przełączników, stanowi więc przetwornik cyfrowo-analogowy w którym słowo kodowe służy do zmiany „położenia" przełączników. Rezystancja wyjściowa takiej drabinki jest stała i wynosi 2/3 R, ale rezystancja obciążająca źródło odniesienia jest zmienna i zależy od słowa kodowego.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 4.2. Przetwornik C/A o przetwarzaniu prądowym.

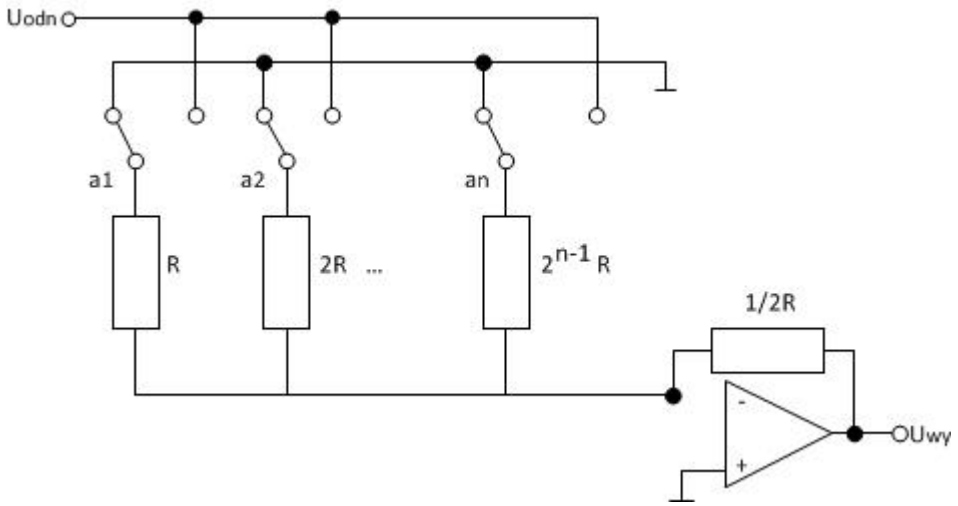
Napięcie wyjściowe układu ma postać:

$$U_{wy} = -\frac{RU_{odn}}{2}\left(\frac{a_1}{R} + \frac{a_2}{2R} + \frac{a_3}{4R} + ... + \frac{a_n}{2^{n-1}R}\right)$$

Jest ono równe co do modułu spadkowi napięcia na rezystorze łączącym wyjście układu z wejściem odwracającym wzmacniacza operacyjnego. Wartość napięcia wyjściowego zależy od wartości prądu płynącego przez ten rezystor, regulowanej położeniem przełączników (kluczy). Pozycja lewa przełącznika odpowiada wartości 0 danego bitu wejściowego, natomiast pozycja prawa odpowiada wartości 1. Jeżeli przełącznik jest ustawiony w lewej pozycji, to prąd płynący w tej gałęzi spływa do masy, natomiast jeżeli jest w prawej pozycji, to prąd ten dodaje się do prądu płynącego przez rezystor w pętli sprzężenia, powodując zwiększenie spadku napięcia na nim, a tym samym zwiększenie (co do modułu) wartości napięcia wyjściowego. Przez rezystory dołączone do kluczy płynie cały czas taki sam prąd, bez względu na ich pozycję.

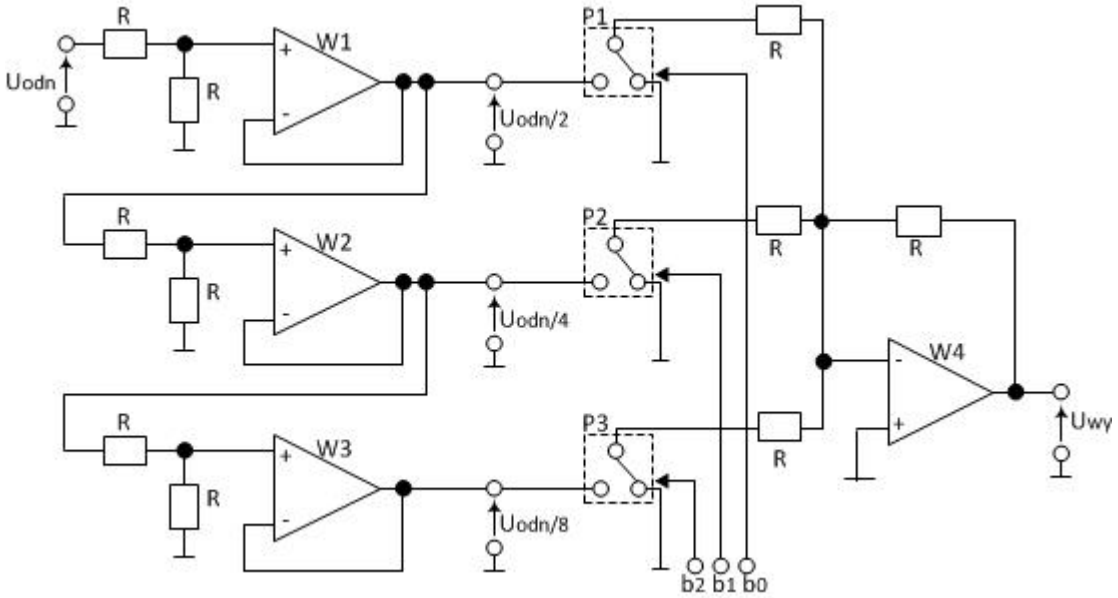
Modyfikacją tego rozwiązania jest układ o przetwarzaniu napięciowym pokazany na rysunku 4.3. Działa on na podobnej zasadzie. Zmieniając położenie przełączników, ustala się wartość prądu płynącego w pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego. Gdy przełącznik jest dołączony do źródła napięcia odniesienia, wówczas przez rezystor płynie prąd (jak w układzie z przetwarzaniem prądowym). Gdy natomiast przełącznik jest połączony z masą, przez rezystor nie płynie prąd. Wartość napięcia wyjściowego oblicza się korzystając ze wzoru obowiązującego dla układu z rysunku 4.2.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 4.3. Przetwornik C/A o przetwarzaniu napięciowym.

Wadą tego typu przetworników jest konieczność stosowania rezystorów o znacznie różniących się wartościach, np. jeśli dla pierwszego bitu 8-bitowego słowa wejściowego rezystancja wynosi 100W, to dla ostatniego – 12,8W. Powoduje to, że przez rezystor o najmniejszej wartości płyną względnie duże prądy, co znacznie zmniejsza niezawodność działania układu (zwiększa jego awaryjność).



Rys. 4.4. Przetwornik C/A zbudowany z wtórników.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Wady tej nie ma przetwornik zbudowany z wtórników pokazany na rysunku 4.4. Składa się on z układu wtórników (W_1, W_2, W_3), układu sumującego (W_4), źródła napięcia odniesienia oraz kluczy analogowych (P_0, P_1, P_2) sterowanych wejściowym sygnałem cyfrowym. Ustawienie wartości (0 lub 1) bitu słowa sterującego powoduje dołączanie lub odłączanie układu sumującego od źródła napięcia U_{odn}. Pozycja lewa przełącznika odpowiada wartości 0 danego bitu wejściowego, natomiast pozycja prawa odpowiada wartości 1. Wzmacniacze W_1, W_2 i W_3, pracujące jako wtórniki, dają na wyjściu napięcia równe odpowiednio: połowie, jednej czwartej i jednej ósmej wartości napięcia odniesienia.
Działanie tego przetwornika dla trzech sygnałów wejściowych:

a) Gdy b_0, b_1, b_2 = 000, wszystkie przełączniki są połączone z masą, a zatem na wejściu układu sumującego pojawi się napięcie o wartości. Wtedy $U_{wy} = 0$.
b) Gdy b_0, b_1, b_2 = 010, na wejście układu sumującego jest podawane napięcie o wartości $U_{odn}/4$ poprzez przełącznik P_2 oraz napięcie o wartości zero poprzez przełączniki P_1 i P_3. Wtedy $U_{wy} = U_{odn}/4$.
c) Gdy b_0, b_1, b_2 = 111, na wejścia układu sumującego jest podawane napięcie o wartości $U_{odn}/2$ poprzez przełącznik P_1 oraz napięcie $U_{odn}/4$ poprzez przełącznik P_2 oraz napięcie o wartości $U_{odn}/8$ poprzez przełącznik P_3. Wówczas $U_{wy} = 7/8 \cdot U_{odn}$.

4.3. Literatura

1. M. Łakomy, J. Zabrodzki, Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, PWN, Warszawa1985.
2. Z. Kulka, A. Libura, M. Nadachowski: Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, WKŁ, Warszawa 1987.
3. W. Nawrocki, Komputerowe systemy pomiarowe, WKŁ, Warszawa 2002.
4. J. L. Kulikowski, Komputery w badaniach doświadczalnych, PWN, Warszawa 1993.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

5. Interfejsy

Interfejs to zespół środków zapewniających dopasowanie mechaniczne, elektryczne i informacyjne oraz ustalających funkcjonalne relacje pomiędzy fizycznie odrębnymi częściami systemu, zgromadzonymi w celu wymiany informacji między nimi. Podstawowymi elementami interfejsu są: kable, złącza, nadajniki linii, odbiorniki linii, linie sygnałowe, funkcje interfejsowe z opisem logicznym, zależności czasowe oraz sterowanie. Wymiana danych odbywa się przez kanał transmisyjny, którym może być np. przewód, światłowód, fale radiowe.
Poszczególne elementy składowe (bloki funkcjonalne) można połączyć w jeden system pomiarowy, jeżeli spełniają one tzw. warunki kompatybilności. Oznacza to:

- zgodność mechaniczną i konstrukcyjną gniazd przyłączeniowych oraz rozmieszczenia sygnałów w gnieździe
- zgodność parametrów elektrycznych poszczególnych sygnałów
- zgodność stosowanych kodów i protokołów komunikacyjnych
- zgodność metod transmisji danych.

Interfejsy komputerowe możemy z grubsza podzielić na dwie kategorie:

- interfejsy szeregowe: jedna linia sygnałowa, przy wysyłaniu grupy bitów (bajtów, słów itd.) bity są wysyłane po kolei, każdy ma przyporządkowaną jednostkę czasu;
- interfejsy równoległe: dla każdego bitu z grupy oddzielna linia sygnałowa, wszystkie bity z grupy wysyłane jednocześnie w określonej jednostce czasu.

Współpraca systemu mikroprocesorowego z urządzeniami zewnętrznymi, których nie można obsłużyć przy pomocy układów bezpośredniego wejścia/wyjścia wymaga zastosowania uniwersalnych lub specjalizowanych układów sprzęgających (określenie uniwersalne/specjalizowane określa czy dany układ wejścia/wyjścia może być przystosowany do współpracy z wieloma różnorodnymi urządzeniami zewnętrznymi czy jest dedykowany do jednego ściśle określonego urządzenia/zastosowania). Możemy spotkać dwa możliwe sposoby transmisji cyfrowych danych pomiarowych, transmisję szeregową i transmisję równoległą. Transmisja szeregowa polega na przesyłaniu ciągu bitów bit po bicie, w takt zegara synchronizującego transmisję. Transmisja równoległa polega na przesyłaniu ciągów słów (najczęściej 8-bitowych) słowo po słowie, w tak sygnałów synchronizujących.

5.1. Parametry charakterystyczne

Najważniejsze parametry charakterystyczne interfejsu są następujące:

- Rodzaj transmisji: Asynchroniczna lub synchroniczna, napięciowa lub prądowa, niesymetryczna lub różnicowa.
- Szybkość transmisji: podawana jest maksymalna szybkość transmisji, lepiej gdy jest podana szybkość transmisji w zależności od długości linii.
- Maksymalna długość linii: maksymalna odległość komputera od urządzenia zewnętrznego lub pomiędzy sąsiednimi urządzeniami.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

- Wyjście nadajnika: napięcie lub prąd charakteryzujące stan „0” i „1”;
- Czułość odbiornika: najmniejsza różnica napięć rozpoznawana jako zmiana stanu.
- Zasilanie: czy interfejs może zasilać urządzenia zewnętrzne i jaka jest dopuszczalna obciążalność takiego zasilania.
- Protokoły transmisji (protokoły komunikacyjne) czyli zbiory reguł logicznych określających sposób nawiązania łączności, prowadzenia seansu transmisji danych i kończenia seansu między parami (grupami) urządzeń.

5.2. Interfejsy szeregowe

Komputerowe systemy pomiarowe z interfejsem szeregowym pozwalaja na budowę zarówno prostych systemów zbierania danych jak i systemów rozproszonych, decyduje tu typ wykorzystywanego interfejsu.

Interfejs RS 232C był do niedawna powszechnie stosowany w komputerach PC, głównie do podłączenia sprzętu komunikacyjnego (DCE, ang. Data Communication Equipment), np. modemów. Zestawienie standardów interfejsów szeregowych zbliżonych do interfejsu RS-232 przedstawia tabela 5.1.

Tabela 5.1. Porównanie standardów EIA transmisji szeregowej

Parametr	**RS-232C**	**RS-423A**	**RS-422A**	**RS-485**
Rodzaj transmisji	niesymetryczna	niesymetryczna	różnicowa	różnicowa
Dozwolona ilość nadajników	1 nadajnik 1 odbiornik	1 nadajnik 10 odbiorników	1 nadajnik 10 odbiorników	32 nadajniki 32 odbiorniki
Maksymalna długość kabla [m]	15	1200	1200	1200
Maksymalna szybkość transmisji [bity/s]	20 k	100 k	10 M	10 M
Maksymalne napięcie wspólne [V]	± 25	±6	+6 -0,25	+12 -7
Wyjście nadajnika [V] min Max	 ±5 ±15	 ±3,6 ±6,0	 ±2,0	 ±1,5
Szybkość zmian napięcia na wyjściu nadajnika	max. 30 V/·s	sterowana zewnętrznie		
Czułość odbiornika [V]	±3	±0,2	±0,2	±0,2

Tryby przesyłania danych w standardzie RS-232:

- simpleks – transmisja jednokierunkowa między dwoma urządzeniami
- półdupleks – transmisja dwukierunkowa niejednoczesna po jednej linii transmisyjnej
- dupleks – transmisja dwukierunkowa jednoczesna.

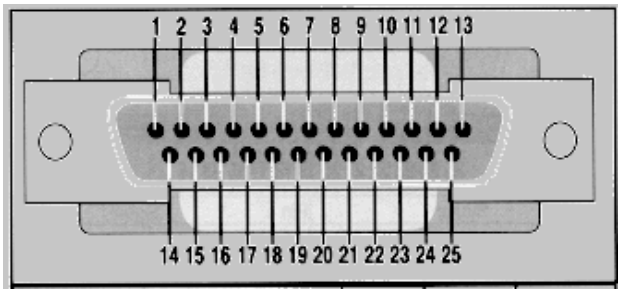
W niemal identyczny sposób (na poziomie zasad transmisji, a nie np. adresowania) jak interfejs RS-232 obsługuje się interfejsy szeregowe RS 422 i RS 485, które mają duże znaczenie w sieciach przemysłowych. Ponieważ interfejs RS-232 jest standardowo dostępny w większości komputerów korzysta się często z konwerterów sygnałów interfejsu RS 232C na RS 485 lub RS 422 i w ten sposób łączy urządzenia wyposażone w interfejsy RS 485 lub RS 422 z komputerem.

Poza wspomnianymi powyżej interfejsami na rynku pojawiło się wiele innych konstrukcji z których tylko interfejs USB na dobre zadomowił się w systemach pomiarowych, inne jak np. I^2C znalazły zastosowanie głównie w łączeniu układów scalonych w systemach mikroprocesorowych lub w łączeniu modułów sprzętu RTV, i tych konstrukcji interfejsów w tym skrypcie nie będziemy omawiali.

Pojawiają się w sprzęcie pomiarowym także interfejsy nowe, jeszcze rzadko spotykane jak np. HART czy IEC-1158 i nimi również w tym skrypcie się nie zajmiemy.

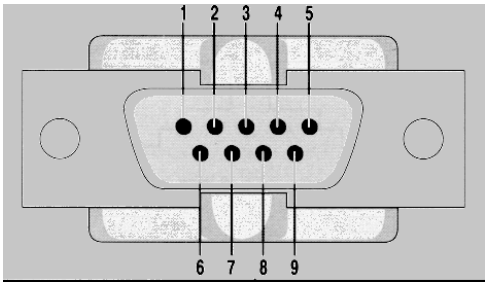
5.2.1. Interfejs RS-232C

Standard RS-232 powstał w 1962 r. jako interfejs do współpracy terminali z modemem w dużych systemach komputerowych, później powstawały jego odmiany oznaczane kolejnymi literami od A do F, w latach 1990-tych został zmodyfikowany jako standard EIA232. Najpowszechniej jest obecnie stosowany w wersji RS-232C. Najpowszechniej stosowany jest w prostych systemach pomiarowych, składających się z kontrolera i jednego bloku funkcyjnego, lub gdy istnieje konieczność przesyłania danych na większe odległości. Wykorzystuje on tanie kable o bardzo małej liczbie przewodów (3-5). Systemy oparte na standardzie szeregowym RS-232 charakteryzuje mała prędkość przesyłania danych, wymiana informacji możliwa jest w danej chwili jedynie między dwoma urządzeniami. Zgodnie ze standardem stosowane powinno być złącze 25-stykowe (rys. 5.1) lub 9-stykowe (rys. 5.2), wielu producentów stosuje jednak specjalne zaprojektowane złącza. Magistrala interfejsu składa się z linii



Rys.5.1. Wtyczka 25-pinowa

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys.5.2. Wtyczka 9-pinowa.

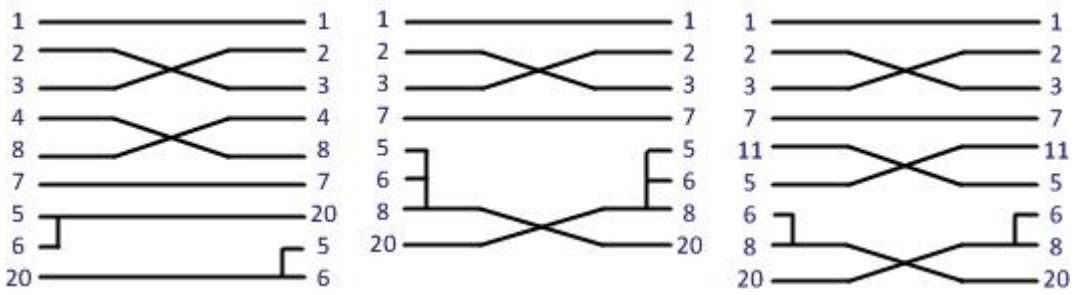
danych (RxD i TxD), linii sterujących (RTS, DTR), linii synchronizacji (CTS, DSR, RI, DCD lub RLSD) oraz linii masy. Zgodnie z zaleceniami normy RS-232C dopuszcza się stosowanie dowolnego podzbioru zdefiniowanych w normie linii (tabela 5.2).

Tabela 5.2. Linie sygnałowe interfejsu RS-232

Numer		Kierunek	Oznaczenie	Nazwa angielska	Nazwa polska
9 pin	25 pin				
1	8	DCE – > DTE	DCD (RLSD)	Data Carrier Detected	sygnał wykrycia nośnej
2	3	DCE – > DTE	RxD	Receive Data	odbiór danych
3	2	DCE < – DTE	TxD	Transmit Data	transmisja danych
4	20	DCE < – DTE	DTR	Data Terminal Ready	gotowość terminala
5	7	DCE – DTE	GND	Signal Ground	masa
6	6	DCE – > DTE	DSR	Data Set Ready	gotowość urządzenia
7	4	DCE < – DTE	RTS	Request to Send Data	żądanie wysyłania danych
8	5	DCE – > DTE	CTS	Clear to Send Data	gotowość wysyłania danych
9	22	DCE – > DTE	RI	Ring Indicator	wskaźnik dzwonka
	9-19; 21; 23-25	-	NC		nie wykorzystane

W związku z tym występują również różne kable połączeniowe, pozwalające na dopasowanie do siebie urządzeń wykorzystujących różne zestawy linii sterujących, przykłady takich kabli przedstawia rysunek 5.3.

Łącza szeregowe wykorzystywane w systemach komputerowych klasy IBM PC to łącza asynchroniczne. Przesyłanie danych odbywa się w oparciu o tzw. ramki (ang. frame), oznacza to, że najmniejszą porcją informacji przesyłanej przez łącze szeregowe jest właśnie ramka.



Rys.5.3. Przykłady połączeń kablowych.

W skład ramki wchodzą:

- bit startowy –umieszczony na początku każdej ramki;
- bity danych – do 8 bitów, będących przesyłanymi danymi;
- bit kontroli parzystości – zabezpieczający przed przekłamaniami;
- bity stopu – 1, 1,5 lub 2 bity sygnalizujące zakończenie informacji.

Wszystkie parametry ramki, takie jak czas trwania transmisji, liczba bitów danych, liczba bitów stopu, tryb kontroli parzystości są uzgadniane między nadajnikiem i odbiornikiem jeszcze przed nawiązaniem właściwego połączenia (ręcznie lub przez odpowiedni program konfigurujący).

Każdy port szeregowy ma w komputerze standardowo przypisany numer przerwania IRQ oraz zakres adresów wejścia–wyjścia (Tabela 5.3). Ponieważ BIOS płyty głównej nie przewiduje obsługi dodatkowych portów szeregowych, poprzez przerwania BIOSu możliwe jest obsługiwanie tylko dwóch podstawowych portów COM1 i COM2. Przed przystąpieniem do pracy z portami w trybie bezpośrednim należy ustalić ile jest portów COM i pod jakimi portami się znajdują. Informacja o ilości dostępnych portów zawarta jest w komórce 0x00400011, zaś w celu znalezienia adresów należy się odwołać do obszaru BIOS-u o następujących adresach:

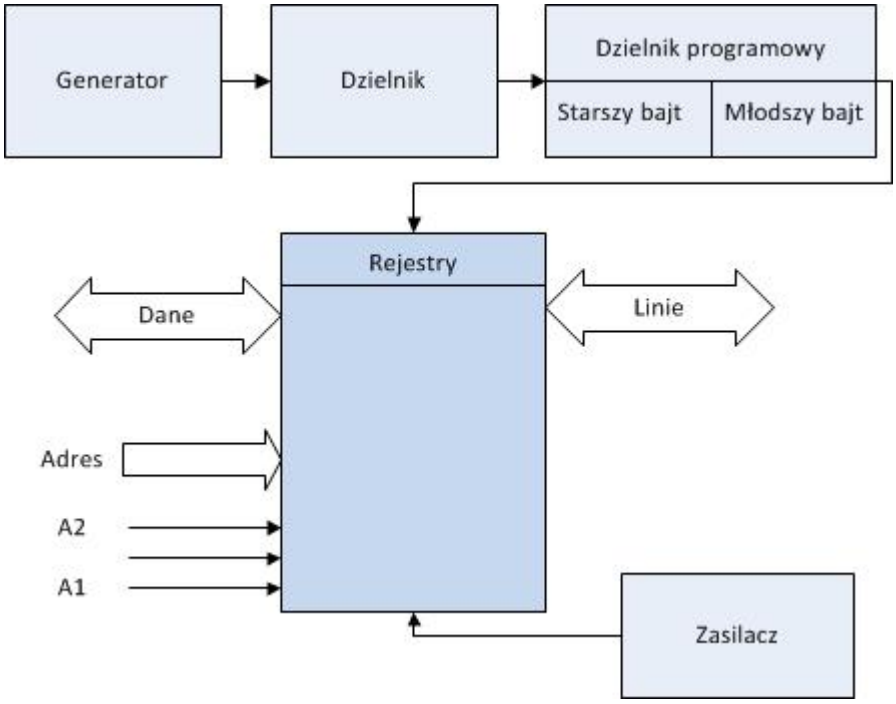
0x00400000 (0000:0400H) - COM1
0x00400002 (0002:0400H) - COM2
0x00400004 (0004:0400H) - COM3
0x00400006 (0006:0400H) - COM4

Limity czasowe dla poszczególnych portów zapisane są w sekundach w pojedynczych komórkach pamięci począwszy od adresu 0x0040007c dla portu COM1.

Tabela 5.3. Standardowe adresy portów i przerwania w BIOS-ie

Nazwa	Adres bazowy	Przerwanie (IRQ)
COM1	03F8h	4
COM2	02F8h	3
COM3	03E8h	4
COM4	02E8h	3

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 5.4. Schemat funkcjonalny interfejsu RS-232C

Przez odpowiednie ustawienie wartości w rejestrach sterowników łącza (Tabela 5.4) można prowadzić tylko nadawanie, tylko odbieranie, naprzemienne lub równoczesne nadawanie z odbieraniem.

Tabela 5.4. Zestaw rejestrów obsługujących łącza RS-232C (przesunięcie względem rejestru bazowego, LCR7 oznacza bit numer 7 rejestru sterowania transmisji, który jest rozszerzeniem adresu A2, A1, A0). Uwaga: w interfejsach wyposażonych w układ 16450 występuje dodatkowy rejestr przesunięty o 0x07.

A2	A1	A0	Nazwa rejestru	Uwagi
0	0	0	bufor nadajnika	tylko zapis przy LCR7=0
0	0	0	bufor odbiornika	tylko odczyt przy LCR7=0
0	0	0	mniej znaczący bajt podzielnika	LCR7=1
0	0	1	rejestr aktywacji przerwań IER	LCR7=0
0	0	1	bardziej znaczący bajt podzielnika	LCR7=1
0	1	0	rejestr identyfikacji przerwań	tylko do odczytu
0	1	1	rejestr parametrów transmisji LCR	
1	0	0	rejestr sterowania modemu MCR	
1	0	1	rejestr stanu transmisji LSR	
1	1	0	rejestr stanu modemu MSR	

Warto zauważyć, że nie istnieje możliwość zablokowania transmisji szeregowej za pomocą poleceń wpisywanych do rejestrów sterowania, ale można to osiągną poprzez wstawienie wartości 0 do rejestru podzielnika.

Bufor nadajnika (TBR) jest rejestrem pośredniczącym w nadawaniu znaku. Przeznaczony do wysłania znak należy zapisać do TBR, po uprzednim sprawdzeniu, czy jest on wolny. O zajętości bufora nadajnika informuje bit 5 w rejestrze LSR (znacznik zajętości bufora). Każdy zapis do TBR powoduje ustawienie bitu LSR5 na zero, co oznacza zajętość bufora. Ustawienie znacznika zajętości bufora nadajnika na 1 odbywa się automatycznie, po przepisaniu znaku z TBR do rejestru przesuwającego nadajnika. LSR5=1 informuje, że bufor jest gotowy do przyjęcia następnego znaku.

Bufor odbiornika (RBR) jest rejestrem pośredniczącym w odbiorze znaku. Po skompletowaniu znaku w rejestrze przesuwającym odbiornika, zostaje on przepisany do bufora odbiornika, co sygnalizowane jest ustawieniem bitu 0 w rejestrze LSR na 1. Odczyt bufora RBR powoduje skasowanie bitu LSR0. Jeżeli odczyt bufora odbiornika nie nastąpi przed odebraniem kolejnego znaku, występuje "błąd nie odebrania znaku" (OE – ang. Overrun Error), który oznacza utratę znaku poprzedniego, spowodowaną zapisaniem do bufora odbiornika następnego odebranego znaku.

Ustalenie prędkości transmisji polega na ustawieniu programowalnego dzielnika częstotliwości bazowej (115200 Hz), co daje możliwość uzyskania maksymalnie transmisji 115200 bodów (dla dzielnika 1). Rejestr podzielnika jest 16 bitowy i dostępny wówczas, gdy ustawiony jest bit LCR7. Typowe prędkości transmisji to 1200 (dzielnik 96), 2400 (dzielnik 48), 4800 (dzielnik 24), 9600 (dzielnik 12), 19200 bodów (dzielnik 6).

Nadawanie znaków odbywa się za pośrednictwem dwóch rejestrów: bufora nadajnika (TBR) oraz rejestru przesuwającego (TSR). Do bufora nadajnika zapisywany jest (przez procesor) znak przeznaczony do wysłania. Następnie, po uzupełnieniu znaku o bity sterujące, cała jednostka informacyjna wprowadzana jest do rejestru przesuwającego nadajnika, który posiada wejście równoległe i wyjście szeregowe. Kolejne bity jednostki informacyjnej wyprowadzane są z rejestru przesuwającego zgodnie z taktem nadawania TxC i poprzez nadajnik linii pojawiają się na wyjściu TxD. Bity o wartości logicznej 1 reprezentowane są na zacisku TxD złącza interfejsu napięciem ujemnym, a bity o wartości 0, napięciem dodatnim.

Transmisja asynchroniczna znakowa najczęściej stosowana w układach pomiarowych polega na kolejnym przesyłaniu znaków alfanumerycznych, przy czym każdy znak zawiera od 5 do 8 bitów i jest poprzedzony bitem START oraz zakończony bitami kontroli parzystości (opcjonalnie) i bitami STOP. Pole danych w większości przypadków zawiera siedem bitów przedstawiających znak zapisany w kodzie ASCII. Taki format jednostki informacyjnej powoduje, że spora część transmisji nie przenosi danych. Asynchroniczny sposób transmisji wynika z niezsynchronizowanego w czasie przesyłania kolejnych znaków, bowiem odstęp między bitem STOP jednego słowa a bitem START następnego jest nieokreślony. Rejestr parametrów transmisji (LCR) opisany w Tabeli 5.5 określa format jednostki informacyjnej, tzn. długość pola danych, ilość bitów stopu oraz, czy występuje bit kontrolny i jaki jest jego rodzaj (bit parzystości lub nieparzystości). Ponadto jeden z bitów pozwala na przerwanie nadawania i wymuszenie stanu 0 na wyjściu TxD (jest to tak nazywany sygnał BREAK). Bit siódmy (LCR7), jak już powiedziano, stanowi rozszerzenie adresu.

Tabela 5.5. Rejestr parametrów transmisji (LCR).

Nr bitu	Funkcja	Wartość	Znaczenie
1, 0	Długość słowa	00 01 10 11	5 bitów/słowo 6 bitów/słowo 7 bitów/słowo 8 bitów/słowo
2	Bity stopu	0 1	1 bit stopu 1,5 bitu, gdy słowo 5 bitowe 2 bity w innym przypadku
4, 3	Parzystość	X0 01 11	bez parzystości bit nieparzystości bit parzystości
5	Odwrócenie parzystości	0 1	normalna parzystość zanegowana parzystość
6	Sygnał przerwania transmisji (break)	0 1	normalna praca wyjścia szeregowego wymuszenie stanu 0 na wyjściu szeregowym
7	Rozszerzenie adresu		zob. tabelę 5.4. - bit LCR7

Odbiorowi znaku towarzyszy kontrola formatu jednostki informacyjnej oraz błędów transmisji. Informacje o zajętości bufora nadajnika, obecności danej w buforze odbiornika oraz o błędach transmisji dostępne są w rejestrze stanu transmisji (LSR) – patrz Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Rejestr stanu transmisji (LSR)

Nr bitu	Znaczenie stanu „1”
0	skompletowana dana w buforze odbiornika
1	błąd nieodebrania danej (overrun)
2	błąd parzystości
3	błąd ramki (framing)
4	sygnał przerwania połączenia odebrany na wejściu szeregowym
5	bufor nadajnika pusty, zawartość przekazana do rejestru szeregującego
6	rejestr szeregujący opróżniony
7	zawsze wartość 0

Wszystkie sygnały protokołu współpracy z modemem wymagają programowej obsługi - wprowadzenia właściwej wartości do rejestru sterowania modemu MCR (Tabela 5.7) i odczytania odpowiedzi z rejestru stanu MSR (Tabela 5.8). Rejestr sterowania modemu (MCR) pozwala ustalić poziomy sygnałów DTR i RTS, jak również wprowadzić sygnał przerwania INTRPT na linię IRQ3 lub IRQ4. Jeden z bitów rejestru przewidziano do zamknięcia pętli sprzężenia zwrotnego, co umożliwia samo testowanie sterownika interfejsu szeregowego. Stan aktywny na linii DTR lub RTS (wysoki poziom napięcia) wymuszany jest poprzez zapis 1 na bit odpowiadający danemu sygnałowi. Nadawanie i odbiór nie są sprzętowo uzależnione od stanu sygnałów DTR i RTS, co oznacza, że można nadawać i

odbierać znaki przy nieaktywnym stanie tych sygnałów. Przy współpracy z modemem, lub innym urządzeniem symulującym modem, należy oczywiście sterować liniami DTR i RTS zgodnie z protokołem komunikacji z modemem.

Tabela 5.7. Rejestr sterowania modemu (MCR)

Nr bitu	Funkcja
0	poz. logicz. na wyjściu DTR (negacja)
1	poz. logicz. na wyjściu RTS (negacja)
2	wyjście OUT1 (negacja)
3	wyjście OUT2 (negacja)
4	*0* - normalne działanie *1* - zamknięcie pętli wewnętrznego sprzężenia (samotestowanie)
5,6,7	ustawione na 0

Tabela 5.8. Rejestr stanu modemu (MSR)

Nr bitu	Znaczenie
0	1 - gdy linia CTS zmienia stan logiczny
1	1 - gdy linia DSR zmienia stan logiczny
2	1 - gdy stan linii RI zmienia się z *1* na *0*
3	1 - gdy linia RLSD zmienia stan logiczny
4	stan linii CTS (negacja)
5	stan linii DSR (negacja)
6	stan linii RI (negacja
7	stan linii RLSD (negacja)

Rejestr aktywacji przerwań (IER) służy do maskowania przerwań występujących w sterowniku interfejsu szeregowego. Są cztery źródła przerwania:

- przerwanie po skompletowaniu znaku w buforze odbiornika,
- opróżnienie bufora nadajnika,
- błędy związane z odbiorem znaku (błąd parzystości PE, formatu ramki FE, błąd nie odczytania znaku przed zakończeniem odbioru następnego znaku OE, przerwanie transmisji sygnałem BREAK),
- zmiana sygnału kontrolnego (DSR, CTS, DCD lub RI), odbieranego z modemu.

Rejestr identyfikacji przerwań (IDR) umożliwia stwierdzenie, czy istnieje aktywne przerwanie oraz rozpoznanie jego przyczyny. Znacznikiem przerwania jest bit IDR0, którego stan informuje o istnieniu aktywnego przerwania. Odczytanie rejestru IDR powoduje ustawienie znacznika przerwania na 1, co oznacza brak aktywnego przerwania.

Wszystkie operacje nadawania-odbioru należy poprzedzić inicjalizacją rejestrów: aktywacji przerwań, sterowania transmisji, sterowania modemu, bajtów podzielnika.

Współpraca sterownika z procesorem może odbywać się przez przerwania lub na drodze programowej, poprzez testowanie znaczników LSR5 (przy nadawaniu) i LSR0 (przy odbiorze). Komunikacja przez przerwania wymaga inicjalizacji rejestrów IER oraz MCR. Należy pamiętać o konieczności ustawienia bitu MCR3 , w celu uaktywnienia przerwań. Nadawanie może być realizowane z wykorzystaniem przerwania lub poprzez testowanie znacznika zajętości bufora nadajnika (bit LSR5). Jeżeli LSR5=1, to można wpisać kolejny znak do bufora nadajnika. Znak ten zostaje przepisany do rejestru przesuwającego nadajnika, co następuje jednak dopiero po opróżnieniu rejestru przesuwającego. O zakończeniu nadawania znaku informuje bit 6 rejestru LSR. LSR6=1 oznacza, że rejestr przesuwający zakończył nadawanie poprzedniego znaku i jest gotowy do przesłania kolejnego znaku. Taki sposób współpracy procesora ze sterownikiem interfejsu szeregowego wymaga ciągłej kontroli wspomnianych bitów rejestru stanu transmisji, mimo to jest powszechnie stosowany w przypadku nadawania niedługich ciągów znaków.

Funkcje BIOS'u dają nam również dostęp do interfejsów RS-232C na płycie głównej za pośrednictwem przerwania $14. Mamy wówczas dostęp do czterech funkcji, które pozwalają nam na ustawienie parametrów portu (inicjalizację), wysłanie znaku, odebranie znaku oraz sprawdzenie statusu interfejsu. Funkcje te opisane są poniżej:

Funkcja 0 - inicjalizacja łącza
Parametry wywołania które muszą być ustawione w rejestrach procesora:
AH = 0x00
AL = parametry transmisji (patrz Tabela 5.9).
DX = numer portu (0 dla COM1, 1 dla COM2, 2 dla COM3 oraz 3 dla COM3)
Wartości zwracane:
AH = bajt statusu łącza (Tabela 5.10)
AL = bajt statusu linii modemu (Tabela 5.11)

Funkcja 1 - wysłanie jednego znaku
Parametry wywołania które muszą być ustawione w rejestrach procesora:
AH = 0x01
AL = kod znaku.
DX = numer portu
Wartości zwracane:
AH = bajt statusu łącza

Funkcja 2 - odebranie jednego znaku
Parametry wywołania które muszą być ustawione w rejestrach procesora:
AH = 0x02
DX = numer portu
Wartości zwracane:
AH = bajt statusu łącza
AL = kod odebranego znaku

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Tabela 5.9. Ustawianie parametrów transmisji

Nr bitu	Funkcja	Wartość	Znaczenie
0,1	Długość słowa	10 11	7 bitów/słowo 8 bitów/słowo
2	Bity stopu	0 1	1 bit 2 bity
3,4	Kontrola parzystości	00, 10 01 11	bez parzystości bit parzystości bit nieparzystości
5-7	Prędkość transmisji	000 001 010 011 100 101 110 111	110 bodów 150 bodów 300 bodów 600 bodów 1200 bodów 2400 bodów 4800 bodów 9600 bodów

Tabela 5.10. Bajt statusu łącza

Nr bitu	Znaczenie dla "1"
0	w buforze odbiornika jest nieodczytany znak
1	błąd przepełnienia bufora odbiornika
2	błąd parzystości
3	błąd ramki (nieprawidłowy bit stopu)
4	wykrycie przerwania transmisji
5	bufor nadajnika pusty
6	pusty rejestr przesuwny
7	nastąpiło przekroczenie dopuszczalnego czasu oczekiwania

Funkcja 3 - status łącza
Parametry wywołania które muszą być ustawione w rejestrach procesora:
AH = 0x03
DX = numer portu
Wartości zwracane:
AH = bajt statusu łącza (Tabela 5.10)
AL = bajt statusu linii modemu (Tabela 5.11)

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Tabela 5.11. Bajt statusu linii modemu

Nr bitu	Znaczenie dla "1"
0	zmiana sygnału CTS
1	zmiana sygnału DSR
2	zmiana sygnału RI (koniec dzwonienia)
3	zmiana sygnału DCD
4	aktywny sygnał gotowości do wysłania CTS
5	aktywny sygnał gotowych danych DSR
6	aktywny sygnał dzwonienia RI
7	aktywny sygnał nośnej DCD

Microsoft Windows API (ang. Application Programming Interface czyli interfejs programowania aplikacji, sposób, w jaki komunikuje się ona z systemem operacyjnym i innymi programami) umożliwia wykorzystanie większej liczby portów, w Windows struktura kontroli urządzeń zewnętrznych DCB (ang. Device Control Block) odpowiada w pewnym sensie funkcji 0 przerwania $14 BIOS-u. Struktura ta daje jednak większe możliwości programistom, umożliwia bowiem bezpośrednie zapisywanie do rejestrów układu.

Przy programowaniu w systemie operacyjnym MS Windows należy pamiętać, że:

- zasady programowania różnią się w zależności od wersji systemu;
- istnieją też rożne podejścia w zależności od dostawcy bibliotek;
- uniwersalnym podejściem jest korzystanie z metod zapewnianych przez system operacyjny;

Przykładowy program w języku C:

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>

int main(int argc, char** argv)
{
   HANDLE hCom;      //uchwyt portu
   DCB dcb;          //konfiguracja portu
   BOOL fSuccess;    //flaga pomocnicza
  BYTE RS_buf;      //bufor danej
  DWORD RS_ile;     //ilosc bitow wyslanych

  //otwarcie portu COM1 z prawami RW
   hCom = CreateFile( TEXT("COM1"), GENERIC_READ | GENERIC_WRITE,
      0,    // exclusive access
      NULL, // default security attributes
      OPEN_EXISTING, FILE_ATTRIBUTE_NORMAL, NULL);

   if (hCom == INVALID_HANDLE_VALUE)
   {
      printf("CreateFile failed with error %d.\n", GetLastError());
```

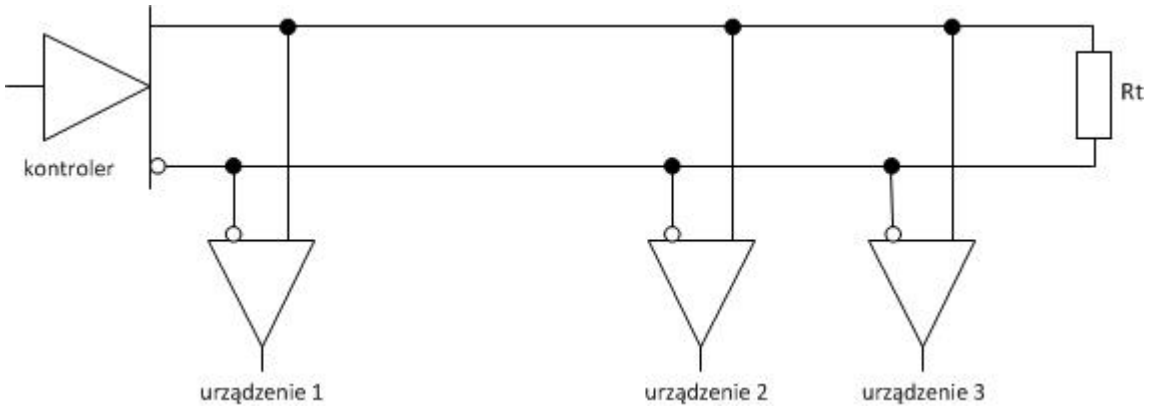
Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

```
    return 1;
 }

//pobranie aktualnych ustawien portu
 fSuccess = GetCommState(hCom, &dcb);
 if (!fSuccess)
 {
  printf ("GetCommState failed with error %d.\n", GetLastError());
  return 2;
 }

//ustawienie naszej konfiguracji
dcb.BaudRate = CBR_19200;     // predkosc transmisji
dcb.ByteSize = 8;             // ilosc bitow danych
dcb.Parity = NOPARITY;        // brak bitu parzystosci
dcb.StopBits = TWOSTOPBITS;    // dwa bity stopu

fSuccess = SetCommState(hCom, &dcb);

if (!fSuccess)
{
  printf ("SetCommState failed with error %d.\n", GetLastError());
  return 3;
}

//wyslanie 1 bajta przez RS
RS_buf='a';
 fSuccess = WriteFile( hCom, &RS_buf, 1, &RS_ile, 0);
 if (!fSuccess)
 {
  printf ("WriteFile failed with error %d.\n", GetLastError());
  return 4;
 }

while(1)
{
    fSuccess = ReadFile( hCom, &RS_buf, 1, &RS_ile, 0);
    if (!fSuccess)
    {
       printf ("ReadFile failed with error %d.\n", GetLastError());
       return 5;
    }

  if(RS_ile==1)
  {
    if(RS_buf == 1)   break;
    printf("%c", RS_buf);
```

```
    }
  }
  return 0;
}
```

5.2.2. Interfejs RS-422A i RS-423A

W celu zwiększenia szybkości transmisji, zasięgu oraz ochrony przed zakłóceniami w porównaniu z interfejsem RS-232C wprowadzono dwuprzewodowe obwody. Istnieje kilka wariantów tego interfejsu oznaczonych symbolami RS-422A, RS-423A, zob. też zestawienie standardów EIA w Tabeli 5.1.
Standard elektryczny interfejsu RS-422 dopuszcza dołączenie do jednej pary przewodów tylko jednego nadajnika i do 10 odbiorników. Zatem typowym zastosowaniem tego interfejsu jest transmisja danych z centralnego komputera do wielu odległych monitorów itp., lub elementów sterujących. Aby zapewnić dwukierunkową transmisję pomiędzy dwoma urządzeniami, konieczne są dwie pary przewodów (rys. 5.5). W takim układzie transmisja odbywa się w trybie Full Duplex (jednoczesne nadawanie i odbiór).



Rys. 5.5. Magistrala w standardzie RS-422.

W standardzie RS-422A szybkość transmisji wynosi od 100 kbit/s do 10 Mbit/s. Standard ten nie wprowadza ograniczeń na minimalną lub maksymalną częstotliwość, a jedynie na zależność pomiędzy szybkością zmian sygnału a czasem trwania bitu. System ten jest określany jako symetryczny zrównoważony czyli taki obwód dwuprzewodowy w którym obydwa przewody i przyłączone do nich obwody mają taką samą impedancję do ziemi i do innych przewodów.

Typowym zastosowaniem interfejsu RS-422A jest transmisja danych z centralnego komputera do wielu odległych stacji. W kablu transmisyjnym wykorzystuje się najczęściej pary przewodów skręcanych zamknięte rezystorami dopasowującymi umieszczonymi w punkcie najbardziej odległym od nadajnika.

Zastosowanie w interfejsie RS-423A różnicowego obciążenia pozwala na znaczne zmniejszenie wpływu napięcia wspólnego powstałego na skutek różnicy potencjałów masy nadajnika i odbiornik oraz ograniczenie przesłuchów pomiędzy liniami. Dla zmniejszenia przesłuchu wprowadzono też ograniczenie szybkości narastania i opadania sygnałów. standard wymaga też aby dla każdego

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Tabela 5.12. Linie interfejsu RS-422

Nr pinu	Nazwa	Kierunek	Opis
1	GND	-	Masa (Ground)
2	SRI	I	(Signal Rate Indicator)
3	brak	-	rezerwowa
4	SD	O	(Send Data)
5	ST	O	(Send Timing)
6	RD	I	(Receive Data)
7	RTS	O	Żądanie nadawania (Request To Send)
8	RR		Gotowość odbiornika (Receiver Ready)
9	CTS		Gotowość do wysyłania (Clear To Send)
10	LL		Lokalne sprzężenie (Local Loopback)
11	DM		(Data Modem)
12	TR		Terminal gotowy (Terminal Ready)
13	RR		Odbiornik gotowy (Receiver Ready)
14	RL		Sprzężenie zwrotne (Remote Loopback)
15	IC		(Incoming Call)
16	SF/SR		(Select Frequency/Select Rate)
17	TT		(Terminal Timing)
18	TM		(Test Mode)
19	GND	-	Masa
20	RC		Przewód wspólny odbiornika
21	GND	-	Zapasowy przewód powrotny
22	/SD	-	Kanał powrotny SD
23	GND	-	Masa
24	GND	-	Masa
25	/RS	-	Kanał powrotny RTS
26	/RT	-	Kanał powrotny
27	/CS	-	Kanał powrotny
28	IS		Terminal pracuje (Terminal In Service)
29	/DM	-	Kanał powrotny
30	/TR	-	Kanał powrotny
31	/RR	-	Kanał powrotny
32	SS		Gotowość do wybrania (Select Standby)
33	SQ		Jakość sygnału (Signal Quality)
34	NS		Nowy sygnał (New Signal)
35	/TT	-	Kanał powrotny
36	SB		Wskaźnik gotowości (Standby Indicator)
37	SC	-	Przewód wspólny nadajnika

kierunku transmisji istniał przynajmniej jeden niezależny przewód powrotny, jakkolwiek zaleca się oddzielny przewód powrotny dla każdego obwodu.

Typowa prędkość transmisji w tym standardzie wynosi 100 kbit/s przy odległości do 30 m i spada do 3 kbit/s przy 1200 m. Jeden nadajnik może współpracować z kilkoma odbiornikami (do 10).

W celu uniknięcia odbić sygnału tor transmisyjny zamyka się rezystorem dopasowującym o wartości równej impedancji falowej toru, umieszczając go na wejściu odbiornika najbardziej odległego od nadajnika.

Interfejs w komputerze (DTE) wyposażony jest w 37 szpilkowe gniazdo (37 PIN D-SUB MALE) zaś urządzenia (DCE) w 37 otworowe gniazdo (37 PIN D-SUB FEMALE), znaczenie poszczególnych linii przedstawia Tabela 5.12.

Możliwe jest też wykorzystanie w komputerze gniazdka 9-pinowego, i wtedy taki uproszczony interfejs ma linie przedstawione w tabeli 5.13.

Tabela 5.13. Linie interfejsu RS-422 w wersji uproszczonej

Nr pinu	Nazwa	Opis
1	GND	Masa
2	RTS+	Żądanie nadawania
3	RTS-	Żądanie nadawania
4	TX+	Dane nadawane
5	TX-	Dane nadawane
6	CTS-	Gotowość wysyłania
7	CTS+	Gotowość wysyłania
8	RX+	Dane odbierane
9	RX-	Dane odbierane

5.2.3. Interfejs RS-485

Standard RS 485 jest przeznaczony do szeregowej transmisji danych cyfrowych poprzez dwuprzewodową symetryczną linię transmisyjną. Charakterystyczną jego cechą jest możliwość dołączenia do jednej linii wielu nadajników i odbiorników. W związku z tym nadajniki są trójstanowe, tzn. mają możliwość przełączenia w stan wysokiej impedancji (wyłączenia). W czasie, gdy nie odbywa się transmisja danych wszystkie nadajniki są wyłączone, w czasie transmisji jeden nadajnik określa stan linii, a wszystkie odbiorniki mogą odbierać transmitowane dane. Standard RS 485 pozwala na realizację wielopunktowej transmisji typu Half Duplex.

Standard RS-485 wprowadzono jako rozwinięcie standardu RS-422A. Łącze tego interfejsu jest również symetryczne i zrównoważone, przy czy dopuszcza się nie tylko wiele odbiorników, ale i wiele nadajników podłączonych do jednej lini (rys. 5.6)i. Ograniczenie ilości urządzeń dołączonych do linii transmisyjnej wynika z dopuszczalnego obciążenia tej linii.

W celu jednoznacznego określenia polaryzacji sygnału, poszczególne przewody linii transmisyjnej oznaczone są najczęściej jako "A" i "B" lub odpowiednio "+" i "-". Najczęściej stosowana jest

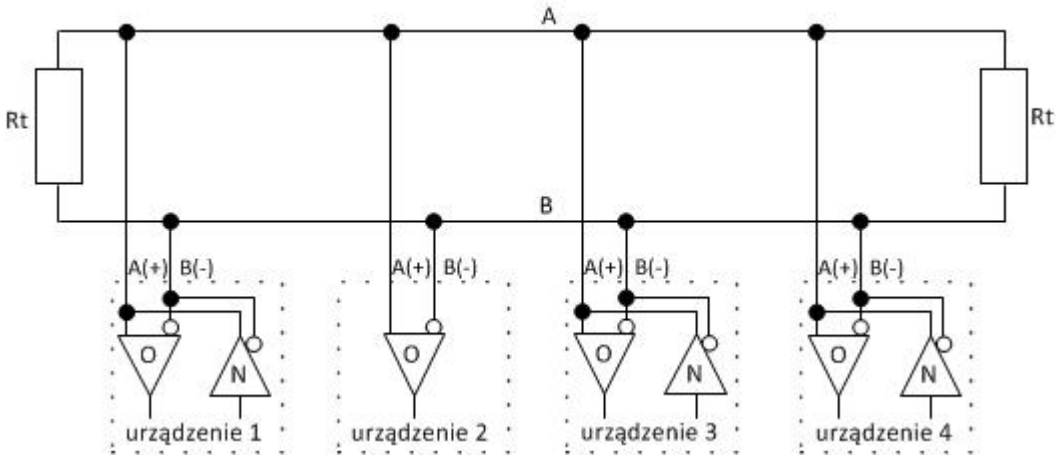
konwencja, zgodnie z którą napięcie powyżej +200 mV na przewodzie "A" w odniesieniu do "B"

Tabela 5.14. Linie interfejsu RS-485

Nr pinu	Nazwa	Opis
1	GND	Masa (Ground)
2	GND	Masa (Fused Ground)
3	GND	Masa (Fused Ground)
4	TX/RX+	Dane nadawane/odbierane
5	TX/RX-	Dane nadawane/odbierane
6		Nieużywane
7		Nieużywane
8	TX/RX+	Dane nadawane/odbierane
9	TX/RX-	Dane nadawane/odbierane

oznacza stan "Space", co odpowiada polaryzacji bitu startu znaku transmitowanego asynchronicznie. Tak samo mierzone napięcie mniejsze od -200 mV odpowiada stanowi "Mark", czyli polaryzacji bitu stopu. Ze względu na histerezę odbiorników po wyłączeniu nadajnika, odbiornik pozostaje w stanie odpowiadającym napięciu na linii w momencie przed wyłączeniem nadajnika.

Standard dopuszcza dołączenie do linii do 32 nadajników i odbiorników, co wynika z pozostałych parametrów elektrycznych tych urządzeń określonych przez normę. Jednostkowym obciążeniem jest obwód który wprowadza obciążenie do 1 mA przy obecności napięcia wspólnego równego 12 V. Zatem w zależności od pobieranego natężenia prądu dany nadajnik lub odbiornik reprezentuje odpowiednią cześć lub wielokrotność jednostkowego obciążenia. Istnieje możliwość zwiększenia ilości urządzeń przyłączonych do linii przez zastosowania odpowiednich regeneratorów sygnału (powielaczy).

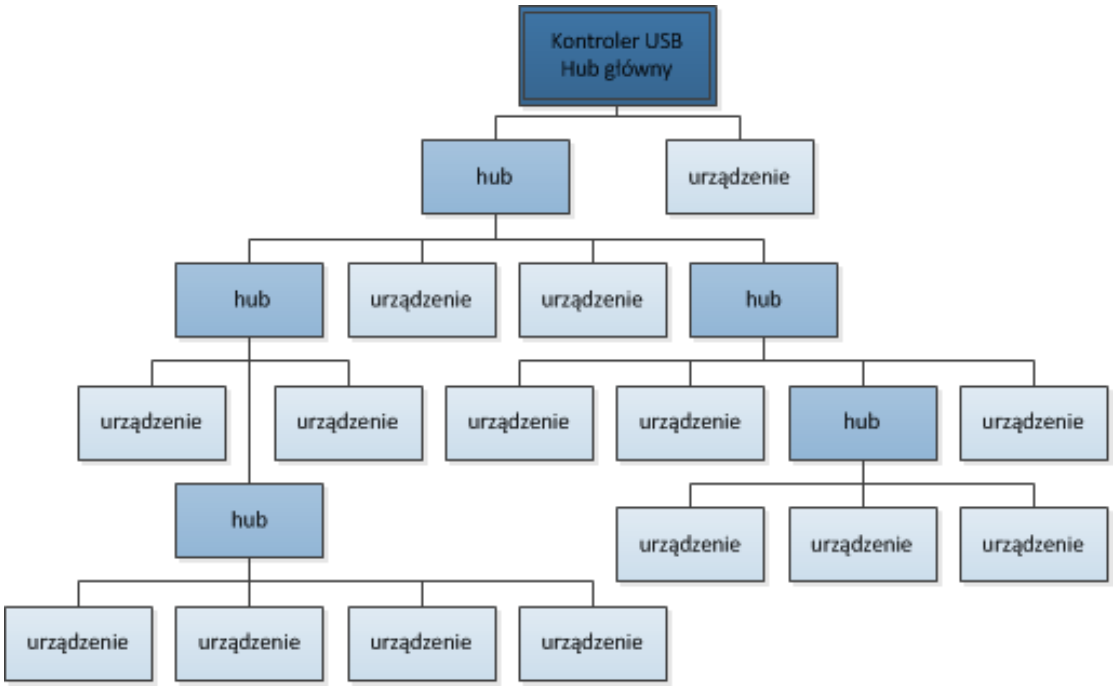


Rys. 5.6. Magistrala RS-485.

Jako linia transmisyjna używana jest najczęściej dwuprzewodowa skrętka zakończona obustronnie rezystorami dopasowującymi. Typowa wartość każdego z tych rezystorów wynosi 120 Ω.

5.2.4. Interfejs USB

Od pewnego czasu interfejs USB stał się podstawowym interfejsem szeregowym komputerów, zastępując wiele wcześniej stosowanych konstrukcji. Chociaż kontroler USB (ang. host) wyposażony jest zwykle 2 do 6 portów, to można tę ilość zwiększyć za pomocą zewnętrznym modułów komunikacyjnych zwanych hubami lub koncentratorami, wyposażonymi zwykle w 4 porty dla podłączania urządzeń zewnętrznych, możliwe jest kaskadowe łączenie hubów tworząc wielopoziomową gwiaździstą strukturę (rys. 5.7). Maksymalnie do komputera można podłączyć 127 urządzeń z tym interfejsem. Interfejs ten oferuje kilka rodzajów transmisji danych (4 typy transferów oraz wiele szybkości transmisji), pozwala zatem na równoczesne podłączenie do komputera wielu urządzeń o różnych wymaganiach komunikacyjnych i sposobach obsługi. Elastyczność tego systemu i jego wygoda dla użytkownika (urządzenia powinny być wykrywane automatycznie i automatycznie również powinny instalować się sterowniki do tych urządzeń) nie oznaczają że interfejs ten jest prosty w działaniu a na dokładkę tworzenie oprogramowania jest skomplikowane.



Rys.5.7. Schemat blokowy systemu USB.

Oprócz kilkakrotnie większej niż w przypadku standardowo montowanego w komputerze złącza szeregowego (115,2 kbit/s) czy równoległego (2 Mbit/s) przepustowości magistrali USB (12 Mbit/s, a dla USB 2.0 nawet 480 Mbit/s) urządzenia zgodne z tym standardem można podłączać w dowolnej chwili do komputera (tzw. hot plug) bez obawy uszkodzenia sprzętu.

Transmisja odbywa się przy wykorzystaniu dwóch przewodów (zielonego Data+ i białego Data-). Magistrala zawiera również linię zasilającą V_{cc} o napięciu +5 V i maksymalnym poborze prądu 0,5 A (przewód czerwony) i linię masy GND (przewód czarny).

Łącze oparte jest na obwodzie różnicowym, różnicowy nadajnik jest połączony z różnicowym odbiornikiem za pośrednictwem pary przewodów. W standardzie tym zmiana napięcia na liniach danych względem masy służy do sygnalizowania podłączenia lub odłączenia urządzeń, resetu urządzenia a początku i końca transmisji.

W systemie USB obowiązuje złożony pakietowy protokół komunikacyjny. Żądania przesłania danych dzielone są na transakcje, które z kolei zbudowane są z pakietów: kontrolnego (ang. token packet), danych (ang. data packet) i potwierdzenia (ang. handshake packet). Pakiety zabezpieczone są sumą kontrolną. Potwierdzenie transakcji przez odbiorcę jest podstawowym mechanizmem kontroli transmisji.

W interfejsie USB zmiana napięcia na liniach danych względem masy służy do sygnalizowania podłączenia lub odłączenia urządzenia, resetu urządzenia a także sygnalizowania początku i końca pakietu.

Ze względu na wielką różnorodność urządzeń podłączanych do tego interfejsu wyróżniono 4 typy transferów:

- kontrolny (ang. Control Transfer);
- przerwaniowy (ang. Interrupt Transfer);
- masowy (ang. Bulk Transfer);
- izochroniczny (ang. Isochronous Transfer).

Każdy z tych transferów wymaga innego kanału komunikacyjnego (ang. Pipe). Transfery USB jak i również związane z nimi kanały komunikacyjne można podzielić na strumieniowe (ang. Stream Transfer) i komunikatowe (ang.Message Transfer). Transfer kontrolny jest transferem komunikatowym, pozostałe transfery są transferami strumieniowymi.

Urządzenie USB zanim zostanie skonfigurowane i udostępnione aplikacjom przechodzi przez kilka stanów. Pierwszy stan to fizyczne podłączenie urządzenia do portu, co powoduje ustawienia przez hub odpowiedniego bitu w rejestrze stanu. Komputer cyklicznie sprawdza te rejestry, i w momencie wykrycia nowo podłączonego urządzenia uruchamia procedurę enumeracji. Pierwszym etapem procesu enumeracji jest wyzerowanie portu na którym wykryto urządzenie i bitu statusu oraz nadanie urządzeniu adresu 0. Host otwiera dla takiego urządzenia kanał kontrolny i odpytuje urządzenie w celu jego skonfigurowania. Jednym z etapów konfiguracji jest nadanie urządzeniu unikatowego adresu z zakresu od 1 do 127. Od tej chwili selekcja urządzenia odbywa się za pomocą tego adresu.

Po odczycie i analizie wszystkich deskryptorów host dysponuje pełną wiedzą o właściwościach funkcjonalnych i komunikacyjnych urządzenia co pozwala na podjęcie decyzji o jego skonfigurowaniu i udostępnieniu dla aplikacji.

Standard USB wymaga od każdego urządzenia przedstawienia następujących deskryptorów:

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

- urządzenia (Tabela 5.15),
- konfiguracji (urządzenie musi mieć taki deskryptor dla każdej możliwej konfiguracji, np. gdy może pracować w trybach zwiększonego lub zmniejszonego poboru mocy powinno posiadać deskryptory dla obu konfiguracji, oraz zawierać informację o liczbie dostępnych dla danej konfiguracji interfejsów),
- interfejsu (dana konfiguracja może posiadać kilka interfejsów i wszystkie one są aktywne w tym samym czasie, pozwalając na dostęp do różnych funkcji urządzenia poprzez różne sterowniki),
- punktów końcowych (opisuje element, który jest źródłem lub odbiornikiem danych w urządzeniu, a ponieważ USB jest interfejsem szeregowym, punkt końcowy jest właściwie kolejką FIFO sekwencyjnie opróżnianą/wypełnianą przez nadawane/odbierane bajty danych. Liczba punktów końcowych w urządzeniu może być różna, jednakże nie może być większa niż 32 (16 wejściowych i 16 wyjściowych), co wynika ze sposobu ich adresowania. Do najważniejszych parametrów, z punktu widzenia oprogramowania, w przypadku punktów końcowych należą: rodzaj realizowanej przez nie transmisji oraz rozmiar bufora danych).

Urządzenie może posiadać ponadto deskryptor tekstowy (ang. String Descriptor) zawierający np. opis urządzenia, konfiguracji, nazwę producenta.

Tabela 5.15. Deskryptor urządzenia

Lp.	Ilość Bajtów	Wartość	Opis
1	1	12h	Długość deskryptora
2	1	01h	Typ deskryptora
3	2	00h 01h	Numer wersji specyfikacji USB w kodzie BCD (1.00)
4	1	00h	Klasa urządzenia
5	1	00h	Podklasa urządzenia
6	1	00h	Protokół urządzenia
7	1	08h	Maksymalny rozmiar pakietu dla punktu 0
8	2	71h,04h	Kod producenta nadany przez USB
9	2	1Dh,D1h	Kod produktu nadany przez producenta
10	2	00h,01h	Numer wersji produktu w BCD
11	1	00h	Indeks tekstu opisującego producenta; 00h – brak
12	1	00h	Indeks tekstu opisującego produkt; 00h – brak
13	1	00h	Indeks tekstu opisującego numer seryjny; 00h – brak
14	1	01h	Liczba możliwych konfiguracji min

Kompilator C++ w module *setupapi.h* udostępnia szereg przydatnych funkcji i struktur które umożliwiają samodzielne przeprowadzenie detekcji i identyfikacji ścieżek dostępu do urządzeń aktualnie podłączonych do magistrali USB.

Microsoft opracował specjalne API pod nazwą WinUSB który pozwala w sposób uniwersalny na tworzenie aplikacji współpracujących z urządzeniami USB, nie wspiera jedynie transferów izochronicznych.

5.2.5. Interfejs IEEE1394

Interfejs IEEE1394 (zwany też "FireWire", „iLink") umożliwia połączenie do 63 urządzeń peryferyjnych w strukturę drzewiastą. Urządzenia są równouprawnione, co pozwala na transmisję bezpośrednio pomiędzy urządzeniami dołączonymi do magistrali, bez pośrednictwa komputera lub koncentratora. Interfejs spełnia standardy plug-and-play i hot-swap, czyli pozwala na dynamiczne przyłączanie i odłączanie urządzeń. Sześciożyłowy kabel (w wersji z zasilaniem) dopuszcza użycie mocy do 60 W (prąd do 1,5 A), co umożliwia rezygnację z zewnętrznych źródeł zasilania w przypadku mniej prądożernych urządzeń. Kabel standardu 1394 składa się z 6 żył zamkniętych we wspólnej izolacji. W wersji bez zasilania wykorzystywane są kable 4-żyłowe i mniejsze wtyki.

Interfejs ma kilka standardów komunikacji zapewniających transfer rzędu: 100, 200, 400 Mb/s. Najnowsza specyfikacja IEEE-1394b dopuszcza również przesył z prędkością 800 Mbit/s (wersja 9-żyłowa) długość kabla ograniczona jest do ok. 4,5 metra, natomiast wersja optyczna ok. 1000 metrów. Standard ten jest znacznie szybszy i stabilniejszy niż USB 2.0. Planowane jest zwiększenie maksymalnej szybkości do 2 Gb/s. Długość kabla ograniczona jest do 4,5 metra, ale można stworzyć specjalne połączenia nawet 16 odcinków kabla, co daje efektywną długość siedemdziesięciu dwóch metrów. Transmisja odbywa się za pomocą dwóch par przewodów (TPA+ i TPA- oraz TPB+ i TPB-), dodatkowo interfejs wyposażony jest w linię zasilającą (masa i nieregulowane napięcie dodatnie 30 V bez obciążenia).

Najnowszy standard IEEE1394b przewiduje również wykorzystanie połączeń optycznych, co umożliwi transfer 3,2 Gb/s i uzyskanie długości ponad 100 m, natomiast przy wykorzystaniu standardowej skrętki 5. kategorii możliwe jest uzyskanie 100 Mbit/s i odległości 100 m.

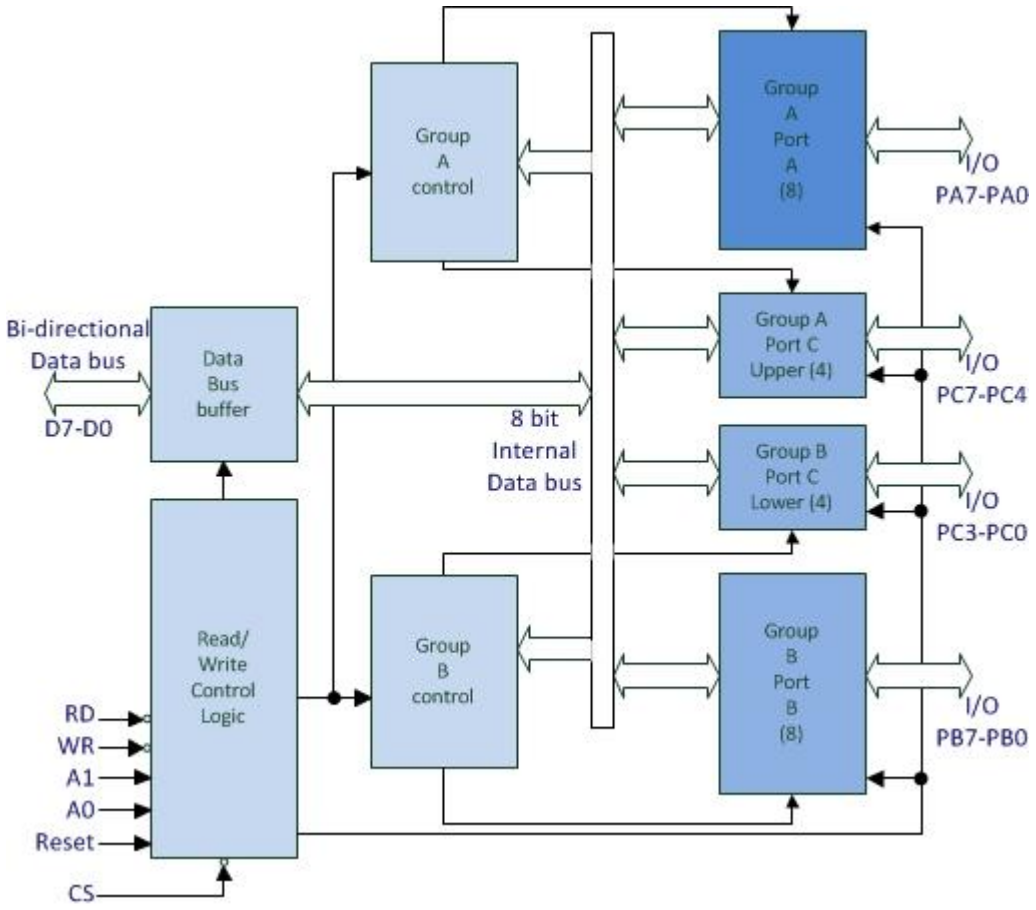
5.3. Interfejsy równoległe

Przez lata interfejsy równoległe konkurowały z interfejsami szeregowymi pod względem szybkości transmisji, powstawały coraz to nowe standardy, jednak po wprowadzeniu kolejnego interfejsu szeregowego o zbliżonej prędkości zanikały, nie były bowiem wygodne dla użytkownika ze względu na duże ilości linii transmisyjnych. Największą szybkość transmisji danych pomiarowych można osiągnąć stosując kasetowe lub modułowe systemy pomiarowe z interfejsem równoległym, gdyż w takich konstrukcjach ilość linii przesyłowych nie gra roli.

5.3.1. Programowalny sterownik równoległego wejścia/wyjścia

Pierwszym interfejsem równoległym który pojawił się w komputerach był interfejs zbudowany w oparciu o układ programowalnego sterownika równoległego wejścia/wyjścia Intela o symbolu 8255 (ang. Programmable Peripheral Interface) lub układ Motoroli 6522 (ang. Versatile Interface Adapter).

Układ 8255 ma trzy porty 8-bitowe A, B i C oraz rejestr sterujący, port C jest podzielony na dwie grupy po 4 bity. Układ ten posiada również ulepszoną wersję oznaczoną symbolem 8255A (rys. 5.8). Ten programowalny układ wejścia/wyjścia jest przeznaczony do stosowania w systemach z mikroprocesorami firmy Intel, ale może współpracować z większością procesorów innych firm. Układ zapewnia 24 linie wejścia/wyjścia, które mogą być indywidualnie – w dwóch grupach po 12 – programowane do pracy w trzech trybach przesyłania danych.



Rys. 5.8. Struktura układu I8255A.

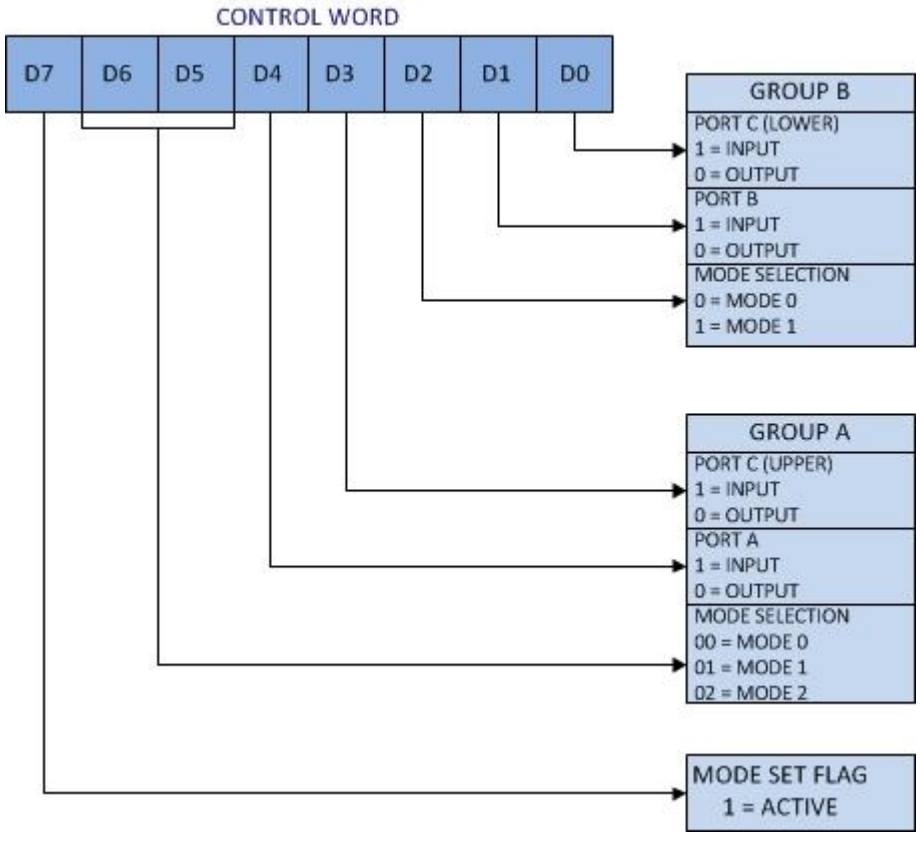
Linie wejścia/wyjścia układu 8255A są podzielone na trzy 8-bitowe porty (oznaczone jako A, B i C), które w zależności od wybranego trybu pracy funkcjonują jako rejestry zatrzaskowe lub bufory. Po włączeniu zasilania (lub zerowaniu sygnałem RESET) układ na wszystkich portach jest zaprogramowany jako bezpośrednie wejście. Zmiana konfiguracji wymaga wysłania do układu słowa sterującego. Słowo sterujące jest zapisywane do rejestru sterującego gdy A1A0=11. Przesyłanie danych przy pomocy układu jest bardzo proste – w przypadku portu A zapis danych do portu lub odczyt danych z portu jest możliwy gdy A1A0=00, w przypadku portu B gdy A1A0=01, zaś w przypadku portu C gdy A1A0=10.

Na potrzeby procedury programowania dokonuje się podziału portów na dwie grupy:

1) grupa A – port A i 4 starsze bity portu C (C7-C4)

2) grupa B – port B i 4 młodsze bity portu C (C3-C0)

W trybie 0, każda grupa 12 linii wejścia/wyjścia może być zaprogramowana (w zestawie 4 i 8) jako bezpośrednie wejście lub wyjście. W trybie 1, każda grupa może być zaprogramowana jako wejście lub wyjście o 8 liniach; pozostałe 3 linie (z 4 wolnych) pełnią rolę sygnałów sterujących w przesyłaniu z potwierdzeniem. W trybie 2 układ zapewnia możliwość przesyłania dwukierunkowego z potwierdzeniem.



Rys. 5.9. Format słowa sterującego.

Szczegóły formatu słowa sterującego (ang. Control Word) przedstawiono na rys. 5.9. Do zaprogramowania wszystkich linii jako bezpośredniego wyjścia (tryb 0) wystarczy wysłanie bajtu o wartości 80H.

5.3.2. Interfejs IEEE1284

Interfejs IEEE1284 został opracowany w 1994 r. jako standard zapewniający wsteczną kompatybilność z używanym od lat 70. jednokierunkowym portem Centronics. Zwany jest też portem LPT lub portem równoległym (błędne uproszczenie wynikające z faktu, iż zwykle jest jedynym portem równoległym wyprowadzonym na zewnątrz komputera PC). Interfejs równoległy Centronics wykorzystywany jest w komputerze do dołączenia drukarki. Można go również wykorzystać do dołączenia urządzeń pomiarowych. Posiada on 8 bitową równoległa szynę danych oraz 4 linie sterujące i 5 linii statusu, które można również wykorzystać do przesyłania danych. Nie zawiera linii zasilających. Maksymalna szybkość przesyłanych danych w najnowszym trybie pracy interfejsu EPP (ang. Enhanced Parallel Port) i ECP (ang. Enhanced Capability Port) wynosi do 500 kB/s. Linie magistrali są dwukierunkowe (w standardzie Centronics jednokierunkowe), poziomy sygnałów na liniach odpowiadają poziomom TTL. Interfejs IEEE 1284 zapewnia transmisję na odległość do 5 metrów, jeśli przewody sygnałowe są skręcane z przewodami masy, w przeciwnym przypadku na odległość do 2 metrów. Transmisja danych odbywa się z potwierdzeniem, z maksymalną prędkością ok. 2 Mb/s.

W standardzie IEEE 1284 zdefiniowano następujące protokoły transmisji danych:

- SPP (ang. Standard Parallel Port, znany też pod nazwą Compatibility Mode) – tryb kompatybilności ze złączem Centronics z możliwością transmisji dwukierunkowej. Port zapewnia najniższy transfer (150 kb/s). Wadą jest obsługa poprzez przerwania, co jest utrudnione w systemach wielozadaniowych.
- Nibble Mode – tryb półbajtowy (czterobitowy), przy transmisji z urządzenia zewnętrznego po liniach statusu. Prędkość transmisji nie przekracza 50 kb/s.
- Byte Mode – tryb bajtowy (ośmiobitowy).
- EPP (ang. Enhanced Parallel Port) – najczęściej stosowany tryb. Brak tutaj kanału DMA. Handshake realizowany jest sprzętowo, co umożliwia działanie w systemie wielozadaniowym (po wywłaszczeniu procesu transmisja nadal trwa) oraz znacznie ułatwia pracę programistów.
- ECP (ang. Extended Capability Port) – port używa DMA i oferuje najwyższe prędkości (do 2 Mb/s). Wykorzystywane są bufory FIFO.

5.2.3. Interfejs GP-IB

W roku 1965 Hewlett-Packard zaprojektował interfejs Hewlet-Packard Interface Bus (HP-IB), który miał służyć do łączenia i kontrolowania programowalnych urządzeń. Zaletą tego interfejsu była duża prędkość transmisji (250 k – 1 M bajtów/s), dzięki czemu zyskał on duże znaczenie w przypadku

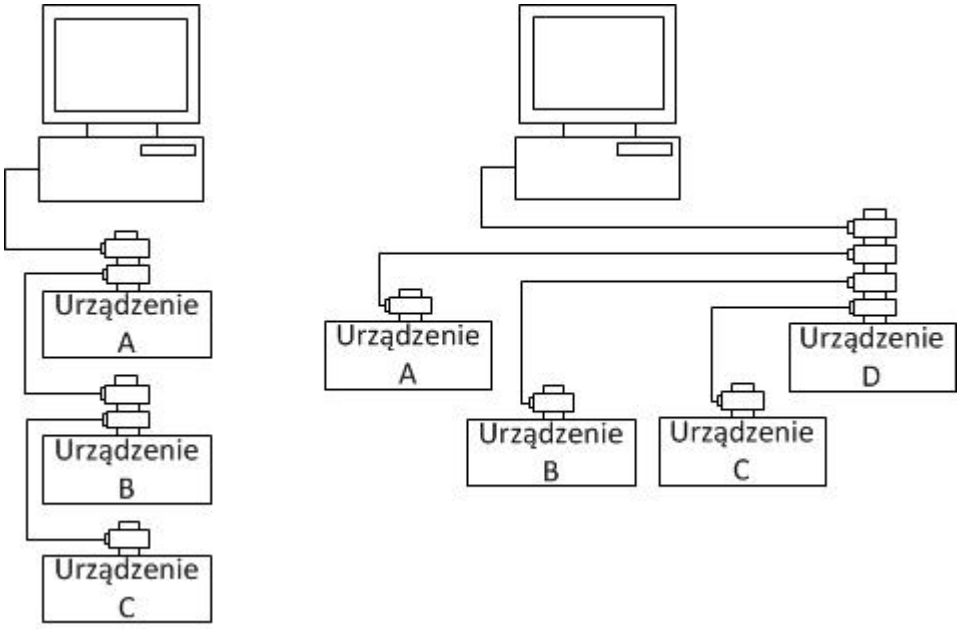
połączeń pomiędzy komputerami a urządzeniami zewnętrznymi, i został w 1978 roku zaakceptowany jako standard IEEE-488 oraz standard IEC-625. Odmianą tego interfejsu, produkowaną przez innych niż Hewlett-Packard wytwórców jest interfejs GP-IB (ang. General Purpose Interface Bus).

Do magistrali tej może być przyłączone maksymalnie 15 urządzeń. W systemie IEC-625 urządzenia kwalifikuje się jako:

- nadajniki - urządzenie transmituje dane do innych urządzeń przez magistralę
- odbiorniki – urządzenie przyjmuje dane wysyłane przez nadawcę
- kontroler - zarządza systemem interfejsu.

W systemie tym może być kilka kontrolerów nadzorujących pracę systemu, ale w danym momencie tylko jeden z nich może być aktywny.

Urządzenia GP-IB mogą być połączone ze liniowo lub w gwiazdę z zachowaniem magistralowej konfiguracji systemu. (rys. 5.10). Sposób połączenia ma wpływ na parametry linii transmisyjnych a tym samym na szybkość transmisji danych w systemie.



Rys. 5.10. Schematy połączeń w systemie pomiarowym

Każde urządzenie przyłączone poprzez interfejs IEC-625 ma możliwość pracy jako urządzenie zdalnie sterowane przez komputer lub jako samodzielny, autonomiczny przyrząd pomiarowy sterowany ręcznie z płyty czołowej.

Każde z urządzeń posiada swój indywidualny adres od 0 do 30. Kontroler uaktywnia (poprzez podanie adresu) właściwości nadawcze i odbiorcze urządzeń. Sposób ustawienia adresów zależy od producenta urządzenia (sprzętowe lub programowe). Transmisja komunikatów i danych między

urządzeniami odbywa się sekwencyjnie bajtami w sposób asynchroniczny poprzez dwukierunkowa szynę danych. Szybkość transmisji dostosowana jest do możliwości odbioru przez najwolniejsze z urządzeń (maksymalnie 1 MB / sekundę).

Wszystkie urządzenia współpracujące z magistralą korzystają z dostępu do niej na identycznych zasadach, bez pośrednictwa centralnej jednostki sterującej. Przy szybkości przesyłania 500 kb/s długość kabla pomiędzy parą urządzeń nie powinna przekraczać 2 m, natomiast całkowita długość magistrali nie powinna przekraczać 20 m. Skrócenie tych odległości o połowę pozwala zwiększyć dopuszczalną prędkość transmisji dwukrotnie.

Kabel interfejsowy składa się z co najmniej 24 przewodów umieszczonych w zewnętrznym ekranie i zakończony jest obustronnie złączem 25-stykowym (rys. 5.10).

Tabela. 5.15. Linie sygnałowe w magistrali GPIB

Grupa linii	Oznaczenie	Liczba	Przeznaczenie
Linie danych	DIO1 ... DIO8	8	Przesyłanie danych przedmiotowych lub instrukcji
Linie sterowania interfejsem	IFC ATN REN SRQ EOI	1 1 1 1 1	Ustalenie stanu zerowego Wskazanie typu komunikatu Przełączenie na sterowanie zdalne Żądanie obsługi Koniec lub identyfikacja
Linie kontroli transmisji	DAV NRFD NDAC	1 1 1	Sygnalizowanie aktualności danych Sygnalizowanie gotowości do odbioru Sygnalizowanie prawidłowości odbioru

W magistrali stosowana jest tzw. logika ujemna, czyli logicznej "1" odpowiada obniżone napięcie, a "0" podwyższone.

Rys. 5.10. Typowa wtyczka interfejsu IEC-625.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Do przesyłania danych w liniach DIO1 ... DIO7 używa się 7-bitowego kodu ASCII (ISO-7) a linię DIO8 wykorzystuje się do przesyłania bitu parzystości. Do rozróżniania czy przesyłane są dane czy instrukcje (adresy, rozkazy) służy linia ATN (0 – dane, 1 – instrukcje). Linia REN w stanie 1 blokuje ręczne sterowanie urządzeniami, a tym samym umożliwia ich sterowanie automatyczne przez magistralę. Ważną cechą interfejsu jest protokół potwierdzeń (ang. handshake) za pomocą trzech przewodów (DAV – DAta Valid, NRFD – Not Ready For Data i NDAC - Not Data ACcepted), umożliwiający synchronizację urządzeń o różnej prędkości działania i transmisji.

Niezależnie od funkcji użytkowych każde urządzenie musi być przygotowane do wykonywania 10 standardowych funkcji umożliwiających współpracę z innymi urządzeniami:

- inicjowanie współpracy (Source Handshaking - SH)
- potwierdzenie współpracy (Acceptor Handshaking - AH)
- nadawanie danych (Talking - T)
- odbieranie danych (Listening - L)
- żądanie obsługi (Serving Request - SR)
- zerowanie urządzeń (Device Clearing - DC)
- wyzwalanie urządzeń (Device Triggering - DT)
- przełączanie na obsługę zdalną (Remote/Local - RL)
- sterowanie (Control - C)
- kontrola równoległa (Parallel Poolling - PP)

Zgodnie ze standardem urządzenia podłączone do magistrali GPIB dzielą się na cztery grupy w zależności od wykonywanych funkcji:

- kontroler realizuje funkcje: AH, SH, T, L i C
- moduł nadawczy realizuje funkcje: AH, SH, T i L
- moduł odbiorczy realizuje funkcje: AH, L, RL
- moduł nadawczo-odbiorczy realizuje funkcje: AH, SH, T, L, SR, RL, PP, DC, DT.

Komunikaty przesyłane magistralą mogą mieć postać bitów przesyłanych pojedynczymi liniami lub słów wielobitowych przesyłanych równolegle kilkoma liniami grupy DIO0 ... DIO8.
Komunikaty zdalne (służące do przesyłania informacji pomiędzy urządzeniami współpracującymi w systemie) możemy podzielić na 7 grup:

- rozkazy adresowe
- rozkazy uniwersalne
- adresy
- komunikaty sterowania współpracą

- komunikaty zależne od urządzenia
- komunikaty statusu
- komunikaty wtórne

Oprócz tych komunikatów mogą też występować komunikaty lokalne, które są przesyłane od urządzeń zewnętrznych do modułów interfejsu.

Język SCPI (ang. Standard Commands for Programmable Instruments) służy do obsługi autonomicznych oraz modułowych przyrządów pomiarowych. Za pierwowzór do utworzenia tego języka posłużyły tzw. rozkazy uniwersalne i zapytania zdefiniowane w standardzie interfejsu IEC-625.2. SCPI zawiera zestaw instrukcji, które niezależnie od rodzaju przyrządu i typu interfejsu, wysłane z kontrolera pozwalają na pełne oprogramowanie jego funkcji oraz pełną obsługę pomiaru. Do opracowania mnemoniki i składni tego języka użyty został oryginalny schemat blokowy uniwersalnego przyrządu pomiarowego, zwany modelem urządzenia SCPI. Urządzenia rozpoznają i interpretują wysłane przez kontroler rozkazy języka SCPI za pomocą tzw. procesora SCPI.

5.3.4. Interfejs VME

VME (ang. Versa Module Europe) jest standardem określającym budowę komputera modułowego, sens modularności polega na tym, że w ramach jednego standardu użytkownik ma dostęp do zgodnych pod względem mechanicznym, elektrycznym i funkcjonalnym podzespołów różnych producentów, z których konfiguruje system kontrolno-pomiarowy pod konkretne swoje potrzeby. Interfejs ten nie był jednak optymalizowany pod kątem użycia go do sterowania systemami pomiarowymi. Dotyczy to przede wszystkim zastosowanych rozwiązań i sposobu wykonania jego płyty głównej. Magistrala elektryczna VME charakteryzuje się stosunkowo wysokim poziomem szumów własnych i brakiem skutecznego sposobu ich ekranowania, co praktycznie uniemożliwia przesyłanie po niej wielu dobrze zdefiniowanych czasowo (niewielki czas opóźnienia i małe rozrzuty) impulsów synchronizacji, sygnałów zegarowych o wysokiej częstotliwości (100 MHz) oraz niskonapięciowych sygnałów analogowych. Ponadto, zakresy napięć zasilających i wielkość dostarczanej mocy zdefiniowane dla VME są zbyt ograniczone w stosunku do wymagań oprzyrządowania modułowego.

Systemy VME mogą być wyposażone w 1 lub 2 płyty magistrali oznaczane jako J1 i J2, a każda z nich może mieć od 2 do 21 złącz.

Magistrala VME zawiera szynę transmisji danych – 16, 32 lub 64 linii danych w zależności od wersji, linie adresowe (25, 41 lub 73) i 6 linii sterowania; szynę arbitrażu transmisji danych (14 linii); szynę przerwań priorytetowych (10 linii), szynę pomocniczą (zasilanie, sygnały zegarowe i sygnalizacja uszkodzenia modułów).

Opierając się na magistrali VME można budować systemy wieloprocesorowe, zawierające kilka kart procesorów podłączonych do wspólnej magistrali.

5.3.5. Interfejs VXI

Standard VXI (czyli VMEbus Extension for Instrumentation) jest rozwijany od roku 1987 i stanowi najbardziej zaawansowanym technologicznie sposób sprzęgania aparatury kontrolno – pomiarowej. Przeznaczony jest do sterowania i obsługi zautomatyzowanych, modułowych systemów pomiarowych. System VXI posiada strukturę hierarchiczną:

- najniższy poziom to urządzenie zajmujące zwykle jeden moduł
- średni poziom to kaseta zawierająca do 13 modułów (jest to autonomiczny system pomiarowy albo część systemu większego)
- system kilku połączonych kaset to poziom najwyższy.

Podstawowym elementem systemu w standardzie VXI jest obudowa (kaseta), która stanowi element zespalający mechanicznie i elektrycznie poszczególne moduły w jeden system (podsystem). W obudowie tej można zamontować moduły funkcjonalne o czterech rozmiarach, zgodnych ze znormalizowanymi wymiarami eurokart. Magistrala główna składa się z ośmiu typów szyn. Interfejs VXI pozwala na szybkie, asynchroniczne przekazywanie danych pomiędzy modułami w postaci słów 8-, 16- i 32-bitowych po szynach transmisji danych. Maksymalna prędkość wynosi 40 MB / sekundę.

Istnieją dwa sposoby sterowania systemem: z użyciem komputera zewnętrznego, połączonego z obudową VXI poprzez moduł IEC-625/VXI lub z wykorzystaniem modułowej wersji komputera, zainstalowanej bezpośrednio w obudowie VXI.

Magistralę systemu VXI tworzą:

- magistrala ogólnego przeznaczenia zawierająca magistralę VME oraz szynę zasilania, szynę wyzwalania, szynę sumy analogowej);
- magistrala specjalna zawierająca szynę sygnałów zegarowych i synchronizacyjnych, szynę identyfikacji modułu i szynę połączenia w gwiazdę);
- magistrala wydzielona zawierająca szynę lokalną.

Nowością jest tutaj szyna sumy analogowej przeznaczona dla sygnałów analogowych oraz szyna lokalna przeznaczona dla komunikacji pomiędzy sąsiednimi modułami.

Podstawową jednostką logiczną w systemie VXI, zdefiniowaną w sposób jednoznaczny na mapie pamięci adresowej, jest urządzenie VXI. W pełnym systemie VXI może być zainstalowanych maksymalnie 256 urządzeń. W standardzie VXI istnieją cztery typy urządzeń:

- Podstawowe (rejestrowe).
- Pamięciowe.
- Komunikacyjne (inteligentne).
- Rozszerzone.

5.3.6. Interfejs FASTBUS

Standard FASTBUS został przyjęty w roku 1986 i jest obecnie najszybszym systemem gromadzenia danych. System ten ma wszystkie zalety, jakie charakteryzowały systemy opracowane

wcześniej, lecz również pozwala na wykorzystanie możliwości współczesnej elektroniki. Dotyczy to parametrów takich, jak bardzo gęste upakowanie urządzeń elektronicznych, 32 bitowe słowo danych i adresów, jak również duża prędkość przesyłania danych (do 40 Mbajtów na sekundę), dzięki przystosowaniu magistrali do standardu sygnałów ECL oraz możliwość stosowania wielu procesorów
Aparatura zbudowana w systemie FASTBUS jest podzielona na segmenty, z których każdy ma niezależny kontroler (procesor). Jednak dostęp do danego segmentu mogą mieć i inne procesory, przy czym w przypadku powstania kolizji interesów o pierwszeństwie i wzajemnym podporządkowaniu procesorów decyduje procesor nadrzędny Maksymalna szybkość transmisji danych zapewniona jest przy komunikacji synchronicznej. Jednak w przypadku gdy pewne moduły pracują wolniej niż 1pozostałe, stosować można również komunikację asynchroniczną z potwierdzaniem. W systemie FASTBUS wykorzystywać można trzy sposoby adresowania:

- geograficzne - gdy następuje komunikacja z modułem poprzez lokalizację danego stanowiska w danym segmencie,
- logiczne - gdy komunikacja z modułem następuje po wywołaniu go za pomocą przydzielonego mu zakodowanego adresu, co umożliwia dowolne umieszczenie modułu w segmencie, oraz powszechne czyli przesłanie informacji jednocześnie od pewnego procesora do grupy modułów w jednym lub kilku segmentach.

Adresowanie powszechne, które zwiększa szybkość pracy, stosuje się dla pewnych typów operacji jak inicjalizacja, zerowanie, zgłoszenie akwizycji danych itp. Możliwe jest również tzw. adresowanie wtórne, czyli uaktywnienie za pomocą danego adresu grupy nowych adresów, co umożliwia praktycznie nieograniczoną rozbudowę systemu.

Standardy mechaniczne FASTBUS, jak również napięcia na szynach zasilających kasety, różnią się od standardu CAMAC. Inna jest też organizacja magistrali przystosowanej do transmisji danych z użyciem sygnałów wielkiej częstotliwości. Jednak układy FASTBUS mogą się komunikować z innymi systemami za pośrednictwem odpowiednich sterowników

Dla zestawów złożonych, pracujących bez przerwy przez długi czas, ważne jest to, że dzięki zainstalowanym układom zabezpieczającym istnieje możliwość wyjęcia modułu z kasety przy włączonym jej zasilaniu bez obawy o spowodowanie uszkodzenia, co nie jest dopuszczalne w systemach VME, VXI czy CAMAC. Pozwala to na przebudowę lub naprawę aparatury bez przerywania pracy całego zestawu.

5.4. System CAMAC

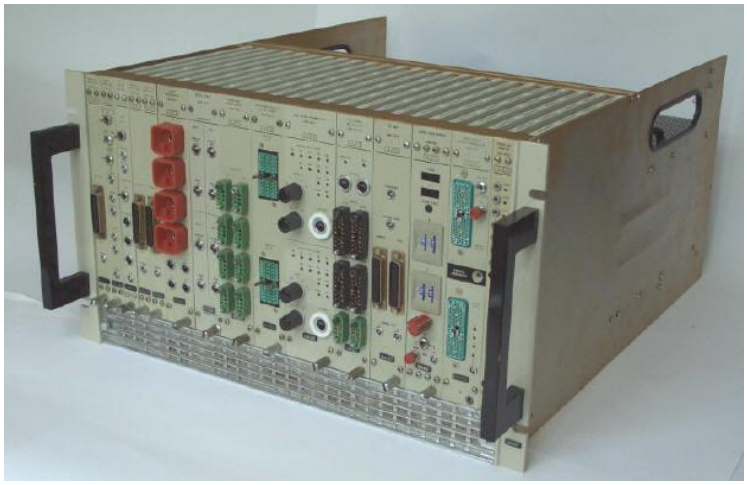
Pierwszy dokument opisujący standard CAMAC (ang. Computer Automated Measurement and Control lub Computer lub Computer Application for Measurement and Control) powstał w roku 1968, opracowany pierwotnie dla potrzeb fizyki jądrowej przez komitet ESONE zrzeszający laboratoria fizyki jądrowej, przyjęty także w wielu innych dziedzinach nauk eksperymentalnych, znalazł również zastosowanie w systemach automatyki przemysłowej. Ważną cechą tego standardu jest jego modularność: umożliwia ona komponowanie złożonych systemów kontrolno-pomiarowych z prostych

standardowych modułów konstrukcyjnych. W systemie tym wykorzystywana jest zarówno transmisja szeregowa jak i równoległa.

Podstawowym modułem konstrukcyjnym jest kaseta (ang. crate, rys. 5.11) zawierająca 25 równolegle rozmieszczonych pakietów w których zmontowane są poszczególne bloki funkcjonalne. Rozmiary kasety są znormalizowane, wszystkie pakiety zakończone są 86 stykowymi złączami, które umożliwiają przyłączenie ich do magistrali kasetowej (równoległej). Każda kaseta jest wyposażona w sterownik, który zajmuje 24 i 25 moduł kasety, choć w szczególnych przypadkach (np. kasety z autonomicznym sterowaniem) może zajmować ich więcej. W systemie CAMAC opracowano kilka tysięcy bloków różnego rodzaju. Pełne wykorzystanie możliwości systemu CAMAC daje użycie jako kontrolera komputera połączonego ze sterownikiem kasety za pośrednictwem GPIB.

W zasadzie standard ten został opracowany z myślą o systemach większych, wielokasetowych. Systemy takie mogą tworzyć dwie podstawowe struktury:

- struktura pierwsza zwana gałęzią równoległą (rys. 5.12) może być utworzona z maksymalnie 7 kaset połączonych magistralą typu równoległego - oznacza się dużą prędkością przesyłania danych, ale duża liczba przewodów magistrali (132) ogranicza odległości wzajemne kaset do kilku metrów;
- struktura druga nazywana pętlową (rys. 5.13) może być utworzona z maksymalnie 62 kaset współpracujących z jednostką centralną poprzez moduł sterujący systemu - dzięki zastosowaniu transmisji szeregowej i mniejszej liczby przewodów magistrali (65) odległości między kasetami mogą być większe, ale za to zmniejszona jest prędkość transmisji danych;

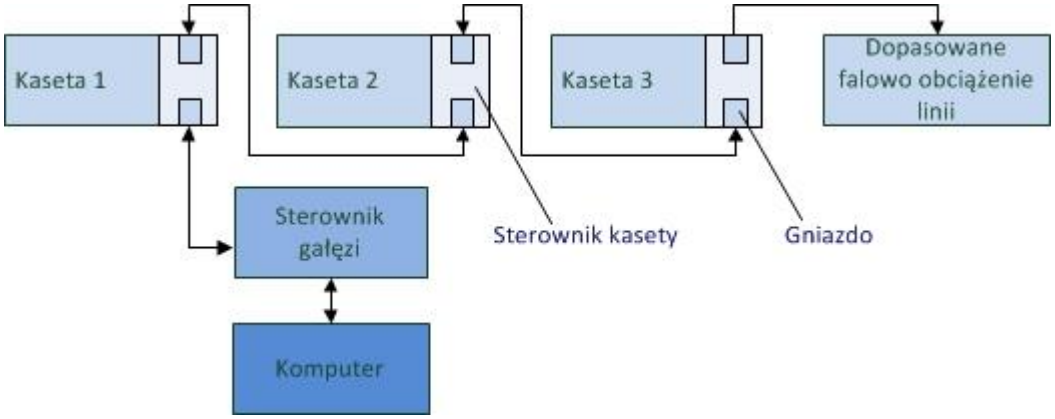


Rys.5.11. Kaseta standardu CAMAC

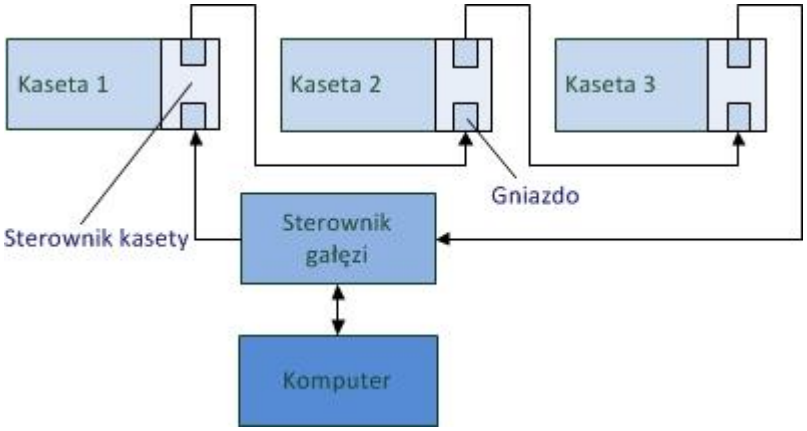
niemniej możliwa jest również autonomiczna praca pojedynczych kaset. System autonomiczny zawiera kontroler mikroprocesorowy, który może przeprowadzać wstępna analizę danych i sterować przebiegiem pomiaru. System autonomiczny może być również kontrolowany przez komputer zewnętrzny poprzez moduł zawierający jeden z interfejsów.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Pierwotnie sprzęg oparty na standardzie CAMAC został opracowany z myślą o podłączeniu sieci urządzeń pobierających i wstępnie przetwarzających dane pomiarowe z jednostką centralną komputera o 24-bitowej długości słowa. W miarę rozwoju techniki mikroprocesorowej opartej na 8-, 16- i 32-bitowej długości słowa i otwierającej drogę do systemów wieloprocesorowych ograniczenia strukturalne przyczyniły się do tego, że znaczenie tego systemu zaczęło relatywnie maleć, niemniej ten standard jest jeszcze stosowany w wielu laboratoriach na świecie.



Rys. 5.11. Połączenie równoległe (kaskadowo-liniowe) kaset w systemie CAMAC



Rys. 5.12. Połączenie szeregowe (kaskadowo-pętlowe) kaset w systemie CAMAC

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

W systemie CAMAC stanowi logicznemu "1" odpowiada poziom niski napięcia na linii (< 0,8 V) zaś stanowi "0" stan wysoki (>2,8 V).

5.4.1. Organizacja magistrali kasetowej

Jakkolwiek każda kaseta łączy się z magistralą 86 stykami, to jednak liczba przewodów magistrali jest większa, co wynika z równoległego sposobu adresowania modułów i przydzielenia im priorytetu dostępu do sterownika (patrz Tabela 5.16).

Tabela 5.16. Przewody magistrali kasetowej.

Grupa	Oznaczenie	Przeznaczenie	Kierunek transmisji
Przesyłanie danych	W1 ... W24 R1 ... R24 F1, F2, F4, F8, F16	Zapis danych Odczyt danych Kody funkcji	O I O
Adresowanie	N1 ... N24 A1, A2, A4, A8	Kod modułu Kod rozszerzający urządzenia	O O
Sterowanie zgłoszeniami	L1 ... L24 B Q X	Żądanie dostępu do magistrali Zajętość Odzew Przyjęcie rozkazu	I O I I
Sterowanie ogólne	S1, S2 Z I C	Synchronizacja Zerowanie stanu modułu Zakaz wykonania operacji Kasowanie rejestru	O O O O
Połączenia niestandardowe	P1, P2, P3, P4, P5	Linie wolne Styki wolne	
Zasilanie obligatoryjne	+24 +6 -6 -24 0	+24 V +6 V -6 V -24 V 0 V (2 linie)	
Zasilanie opcjonalne	+200 +12 -12 ACL ACN E Y1, Y2	+200 V +12 V -12 V 117 V 0 (117 V) masa rezerwa	

Oznaczenia kierunku: O - od kontrolera, I - do kontrolera.

Na przykład linia N z grupy adresowania modułów, służący do przesyłania wywołania ze sterownika do wybranego modułu, ma w magistrali odrębny przewód dla każdego modułu (oznaczony przez N1 do N24) zaś dodatkowe linie A1, A2 itd. umożliwiają wybranie jednego z urządzeń wchodzących w skład modułu (np. wybór czujnika). Rozdzielone są również linie przesyłania danych na dwa kierunki Linie W pozwalają na przesyłanie danych od kontrolera do modułów zaś linie R od modułów do kontrolera, synchronizacja przesyłania danych wykonywana jest za pomocą sygnału strobującego na linii S1.

Linie F1, F2, F4, F8 i F16 służą do przesyłania rozkazów do modułów, mogą być również realizowane operacje bezadresowe realizowane jednocześnie we wszystkich modułach. Ustalenie sposobu przesyłania danych w kasecie (pojedyncza lub blok danych: ze zmianą adresów, z powtórzeniami, z odliczaniem) odbywa się za pomocą rozkazów wyrażonych w języku sterowania systemem IML.

5.4.2. Organizacja magistrali równoległej

Magistrala równoległa umożliwia połączenie pomiędzy modułem sterującym gałęzi a modułami sterującymi poszczególnych kaset, liczba tych ostatnich nie może przekroczyć 7 (włączonych jednocześnie).

Tabela 5.17. Linie sygnałowe magistrali równoległej

Grupa	Oznaczenie	Przeznaczenie	Kierunek transmisji
Przesyłanie danych	BRW1 ... BRW24 BF16, BF8, BF4, BF2, BF1	Zapis i odczyt danych Kody funkcji	I/O O
Adresowanie	BCR1 ... BCR7 BN16, BN8, BN4, BN2, BN1 BA8, BA4, BA2, BA1	Adresy kaset Adresy modułów kasety Subadresy urządzeń	O O O
Sterowanie	BQ BX BD BG BZ	Odzew Przyjęcie rozkazu Żądanie obsługi Ustalenie reżymu obsługi żądań Ustalenie stanu początkowego	I I I O O
Synchronizacja	BTA BTB1 ... BTB7	Strobowanie przesyłania rozkazów Strobowanie przesyłania danych	 O I
Rezerwa	BV1 ... BV7		

W celu uniknięcia niedopasowań na linii koniec magistrali jest zamknięty przez obciążenie dopasowujące. Moduł sterowania gałęzią pośredniczy pomiędzy modułami sterującymi kaset a

komputerem sterującym pomiarem i gromadzącym wyniki. Rozkazy wychodzące z komputera mają adres trójczłonowy: adres kasety, adres modułu funkcjonalnego oraz adres subadres urządzenia. Dane w magistrali równoległej są przesyłane asynchronicznie, wykorzystuje się przy tym dwa sygnały strobujące: BTA wysyłane przez moduł sterujący systemu oraz jeden z sygnałów BTB przypisany danej kasecie.

5.4.3. Organizacja magistrali szeregowej

W magistrali szeregowej opracowanej w celu tworzenia systemów o konfiguracji pętlowej, gdy odległości między kasetami są duże, stosuje dwa podstawowe sposoby przesyłania danych:

- bitowo- i bajtowo-sekwencyjny – bity tworzące słowo komunikatu są transmitowane metodą start-stopową w sposób szeregowy, za pomocą trójprzewodowej linii (2 przewody sygnałowe i przewód sygnału synchronizacji bitów);
- bitowo-równoległy i bajtowo-sekwencyjny – komunikaty transmitowane są między kasetami za pomocą linii ośmioprzewodowej, przewody 1-6 służą do przesyłania zakodowanego komunikatu, przewód 7 przenosi sygnał synchronizujący, a przewód 8 zawiera bity kontroli parzystości.

W magistrali tej są przesyłane komunikaty trzech podstawowych typów:

- Sterujące – wysyłane przez moduł sterujący systemu do modułów sterujących kaset przyłączonych do pętli,
- Odpowiedzi – wysyłane przez moduły sterujące kaset jako potwierdzenie otrzymania od modułu sterującego systemu rozkazu, lub zawierające dane przesyłane do tego modułu.
- Zgłoszenia żądania dostępu – przesyłane z modułów sterujących kaset do modułu sterującego systemu.

5.5. Literatura

1. B. Szumielewicz, B. Słomski, W. Styburski, Pomiary elektroniczne w technice, WNT, Warszawa 1982.
2. J.W. Coffron, W.E. Long, Technika sprzęgania układów w systemach mikroprocesorowych, WNT, Warszawa 1988.
3. J.L. Kulikowski, Komputery w badaniach doświadczalnych, PWN, Warszawa 1993.
4. W. Mielczarek, Szeregowe interfejsy cyfrowe, Helion, Gliwice 1993.
5. B. Marzec, Wprowadzenie do standardu magistrali VMEbus, WNT, Warszawa 1994.
6. W. Nawrocki, Komputerowe systemy pomiarowe, WKŁ, Warszawa 2002.
7. A. Daniluk, RS 232C. Praktyczne programowanie, Helion, Gliwice 2001.
8. W. Mielczarek, USB. Uniwersalny interfejs szeregowy, Helion, Gliwice 2005.
9. M. Gook, Interfejsy sprzętowe komputerów PC, Helion, Gliwice 2005.
10. A. Daniluk, USB. Praktyczne programowanie z Windows API w C++, Helion, Gliwice 2009.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

11. How to Use WinUSB to Communicate with a USB Device, Microsoft Corp. 2010.

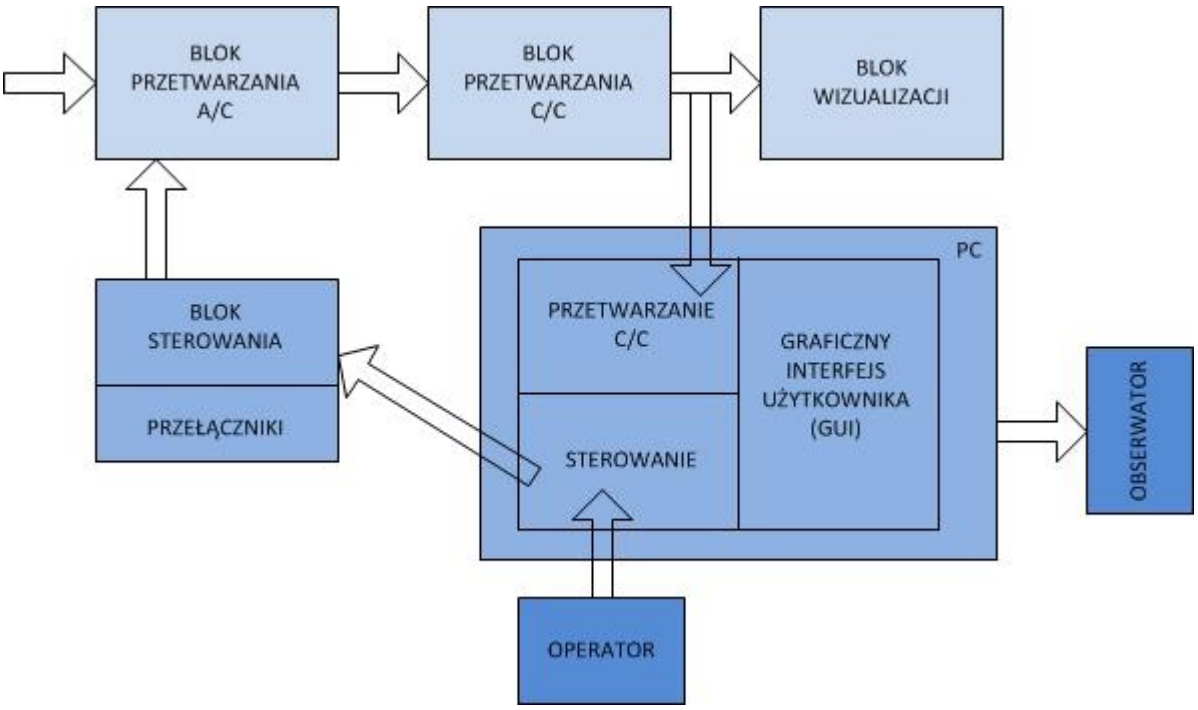
Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

6. Wirtualne przyrządy pomiarowe

W klasycznym laboratorium pomiarowym jest wiele różnych przyrządów pomiarowych, a każdy z nich umożliwia najczęściej pomiar jednej wielkości fizycznej i posiada z góry zadane zakresy pomiarowe i sposoby przedstawienia wyniku. Użytkownik przyrządu nie może zmienić ani mierzonej wielkości fizycznej, ani sposobu działania przyrządu. Jeśli chce mierzyć inną wielkość musi nabyć kolejny przyrząd pomiarowy.

Rozwój programowania graficznego i powstanie takich środowisk jak LabView stworzył alternatywę dla klasycznych przyrządów pomiarowych, pojawiły się bowiem wirtualne przyrządy pomiarowe, istniejące tylko w pamięci komputera ale zachowujące się tak jak odpowiadające im przyrządy rzeczywiste.

Wirtualny przyrząd pomiarowy tworzy komputer, komputerowa karta pomiarowa (DAQ, ang. Data Acquisition Card) i oprogramowanie.



Rys. 6.1. Schematyczne przedstawienie wirtualnego przyrządu pomiarowego

Przyrząd wirtualny może zamiast karty komputerowej zawierać także urządzenia wolno stojące, podłączone do komputera za pomocą typowego lub specjalizowanego interfejsu, pod warunkiem jednak że spełniają one te same zadania co karta pomiarowa.

W części sprzętowej wirtualnego przyrządu pomiarowego mogą znajdować się jeszcze dodatkowe elementy: moduły kondycjonerów dopasowujących sygnały wejściowe do zakresów pomiarowych

karty, karty lub moduły kondycjonerów do czujników temperatury lub ciśnienia, moduły optoizolacji sygnałów, moduły filtrów itp.

Właściwości metrologiczne takiego urządzenia pomiarowego zależą zarówno od parametrów karty pomiarowej opisanych w następnym rozdziale, jak i od właściwości programu komputerowego przygotowanego dla tego systemu. Wykorzystanie filtracji i uśredniania sygnałów, obliczenia funkcji statystycznych i inne procedury mogą w znaczący sposób poprawić jakość otrzymywanych wyników.

6.1. Komputerowe karty pomiarowe

Działanie współczesnej karty pomiarowej obejmuje znacznie więcej funkcji niż tylko przetwarzanie analogowo-cyfrowe pojedynczego sygnału, na przykład:

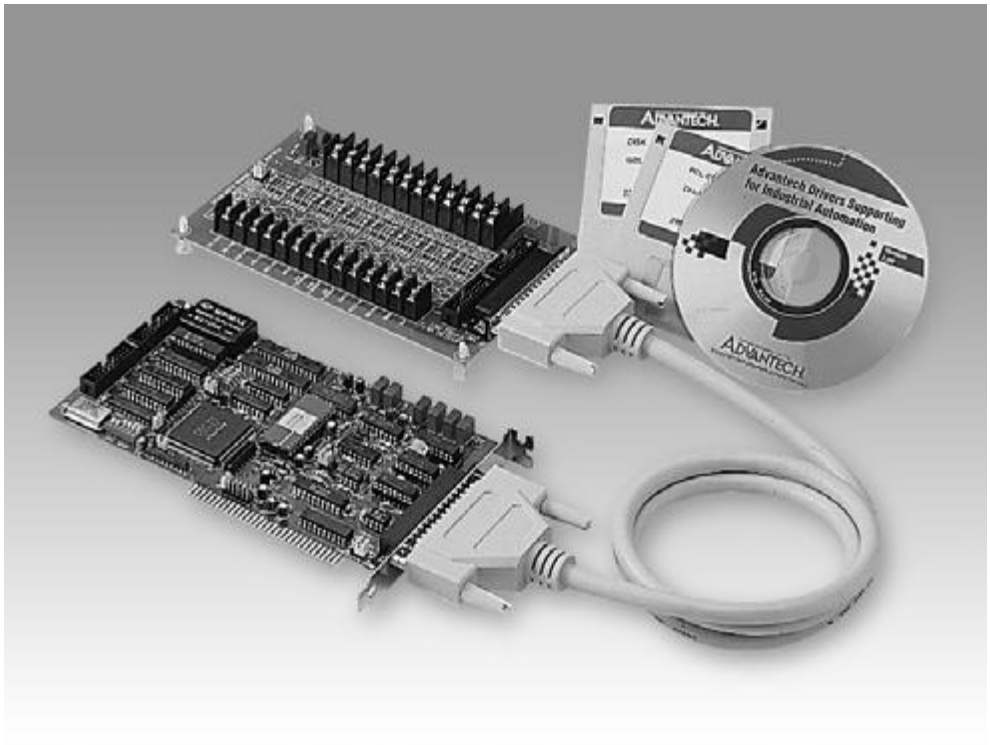
- przełączanie wejść analogowych na wejściu przetwornika A/C,
- filtracja antyaliasingowa analogowych sygnałów wejściowych,
- wytwarzanie żądanych analogowych sygnałów sterujących za pomocą przetwornika C/A,
- odczytywanie i zapisywanie do portów wejścia-wyjścia cyfrowych sygnałów sterujących,
- generowanie sygnałów o zadanej częstotliwości lub impulsów o zadanym czasie trwania,
- pomiar częstotliwości sygnału wejściowego lub długości czasu trwania impulsu,
- przechowywanie ostatnich danych pomiarowych i danych konfiguracyjnych w pamięci wewnętrznej karty.

Typowa karta pomiarowa (rys. 6.2) składa się zatem z następujących bloków funkcjonalnych: multipleksera analogowego, wzmacniacza programowalnego, bloku filtrów, układu próbkująco-pamiętającego (S&H, ang. Sample and Hold), przetwornika analogowo-cyfrowego, przetwornika cyfrowo-analogowego, multipleksera cyfrowego, źródła napięcia odniesienia, układu wyzwalania, bloku rejestrów, bloku sterowania, bloku pamięci, układu autokalibracji i bloku liczników lub koderów. Część kart pomiarowych ma budowę modułową, co pozwala na dostosowywanie bloków funkcjonalnych do aktualnych potrzeb.

Parametry charakterystyczne karty pomiarowej:

- liczba wejść analogowych (od 1 do 64, może być zwiększona przez dołączenie tzw. karty rozszerzenia zawierającej dodatkowe multipleksery);
- liczba wyjść analogowych (od 0 do 2);
- rodzaj wejść analogowych (niesymetryczne lub różnicowe; zwykle wejść niesymetrycznych jest dwa razy więcej niż różnicowych, w których komutowane są 2 linie sygnałowe);
- zakres pomiarowy (od miliwoltów do kilkuset woltów; podawany jako przedział wartości napięć symetrycznych względem zera w przypadku wejść różnicowych lub napięcia dodatniego dla wejść niesymetrycznych);
- rozdzielczość bitowa przetwornika analogowo-cyfrowego (typowo od 8 do 24 bitów);
- rozdzielczość bitowa przetwornika cyfrowo-analogowego.
- dokładność pomiaru (w zależności od zakresu pomiarowego, czasu obserwacji, temperatury itp.)

- szybkość próbkowania (może sięgać nawet 10^8 próbek/s; zmniejsza się proporcjonalnie do liczby wykorzystywanych kanałów wejściowych);
- pojemność pamięci wewnętrznej (wielkość bufora danych w którym mogą być przechowywane wyniki pomiaru);
- typ magistrali do której podłącza się kartę pomiarową.



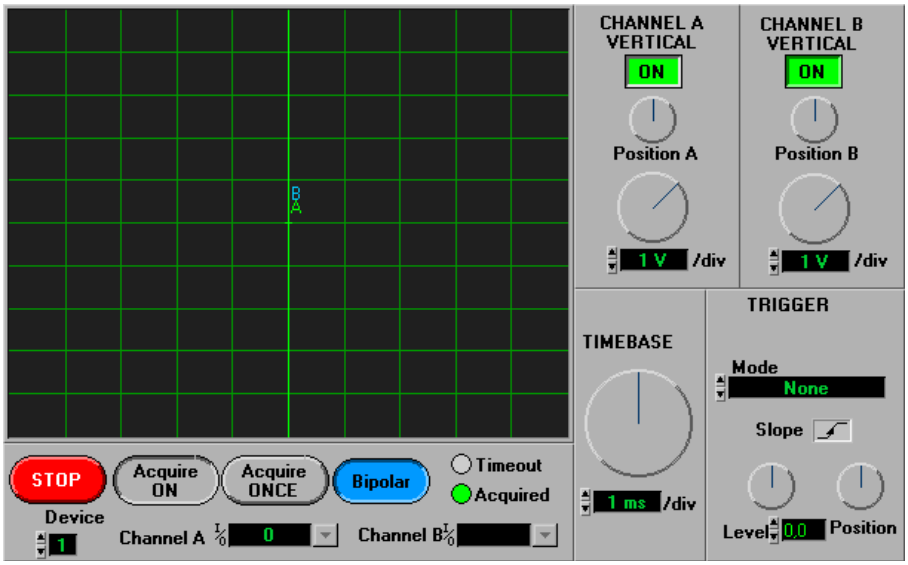
Rys. 6.2. Karta Advantech PCL-818HG

6.2. Oprogramowanie

Oprogramowanie tworzące wirtualny przyrząd pomiarowy dzieli się na kilka odrębnych części (modułów). Należą do nich: graficzny interfejs użytkownika (obsługa manualna, zobrazowanie wyników), moduł obsługi zasobów sprzętowych (sterowanie/programowanie, zbieranie i wstępne przetwarzanie danych pomiarowych), moduł przetwarzania i analizy sygnałów. Obsługa modułów sprzętowych tradycyjnie może być zrealizowana na trzech poziomach: rejestrowym, rozkazowym (sterownika) oraz oprogramowania narzędziowego.

Oprogramowanie na poziomie rejestrowym (ang. Registry level software) wymaga znajomości wewnętrznej struktury urządzeń, (takich jak autonomiczny przyrząd pomiarowy, moduł VXI czy karta akwizycji danych). Po to, aby oprogramować ich funkcje pomiarowe, należy wpisać do wskazanych rejestrów, odpowiednie i na ogół złożone kombinacje bitów. Jest to zajęcie niezwykle uciążliwe i wymaga stałego kontaktu z instrukcją obsługi.

Oprogramowanie na poziomie rozkazowym (ang. Command level software) wykorzystuje sterowniki czyli jeden z najbardziej popularnych składników współczesnej techniki pomiarowej, bardzo pomocny w procesie tworzenia oprogramowania do obsługi różnego typu dedykowanych zasobów sprzętowych. Jest to rodzaj, zwykle firmowego, łatwego w implementacji oprogramowania, zawierającego instrukcje realizujące pełny dostęp do złożonych funkcji pomiarowych konkretnego urządzenia (przyrząd autonomiczny, przyrząd modułowy, karta DAQ), za pośrednictwem intuicyjnych modułów API. Obecnie sterowniki stanowią nieodłączny element wszelkiego typu sprzętu, który daje się obsłużyć w sposób programowy.



Rys. 6.3. Wirtualny oscyloskop.

Oprogramowanie narzędziowe (ang. Instrument tool software) pojawiło się z chwilą wprowadzenia w różnych systemach operacyjnych menedżerów okien oraz języków programowania obiektowego. Klasycznym przykładem programowania narzędziowego zawierającego wszystkie nowoczesne mechanizmy wspomagania projektowania wirtualnych przyrządów pomiarowych w środowisku Windows jest produkt LabView firmy National Instruments. Pozostałe, godne uwagi, pakiety oprogramowania to: TestPoint (Keithley Instruments), DasyLab (Dasytec).

Interfejs użytkownika (przykład na rys. 6.6) komputerowych systemów pomiarowych powinien spełniać następujące wymagania:

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

- wygląd interfejsu powinien przypominać klasyczne urządzenia pomiarowe – pokrętła, przełączniki, wyświetlacze, itp.,
- łatwa analiza wyników pomiarów,
- możliwość zachowywania wyników pomiarów,
- zapamiętywanie ustawień najczęściej wykonywanych pomiarów,
- automatyzacja,
- elastyczność, ergonomia, prosta obsługa.

6.3. Literatura

1. W. Nawrocki, Komputerowe systemy pomiarowe, WKŁ, Warszawa 2002.

7. Analiza obrazu

Nasz zmysł wzroku z pewnością przewyższa komputer w interpretacji obrazu. Komputer jest natomiast jednoznaczny w swoich decyzjach, a przyrządy służące do rejestracji obrazów mogą być czulsze od ludzkiego oka (np. ludzkie oko rozróżnia do 70 poziomów szarości, zaś przyrządy przynajmniej 256) i takie połączenie narzędzi pozwala na wykrywanie i uwypuklanie elementów obrazu tak, aby stały się one czytelne dla ludzkiego oka. Dodatkowo komputer może przeprowadzić pomiary ilościowe, czego nie jest w stanie wykonać ludzki wzrok.

Analiza obrazów (z ang. image analysis) jest procesem polegającym na wyodrębnieniu z informacji wizualnej (np. ze zdjęć lub filmów) tej części, która jest istotna z punktu widzenia użytkownika lub procesu. W odróżnieniu od metod poprawy jakości obrazu, restauracji obrazów, kodowania obrazów, wynikiem analizy obrazów jest nie obraz a dane w postaci numerycznej lub symbolicznej. Zatem analiza obrazu nie służy do poprawiania kiepskich obrazów mikroskopowych czy zdjęć, ale do wydobywania z nich istotnych informacji.

W praktyce proces przetwarzania i analizy obrazów polega najczęściej na wykonaniu szeregu operacji mających na celu przekształcenie obrazu wejściowego (szarego lub kolorowego) na obraz binarny, na którym to obrazie są poprawnie odwzorowane wszystkie interesujące nas obiekty. Obraz binarny jest punktem wyjścia do prowadzenia pomiarów. Ich dokładność zależy głównie od zgodności kształtów obiektów rzeczywistych i kształtów obiektów odwzorowanych na obrazie binarnym.

Gdy obraz znajdzie się już w pamięci komputera wykorzystując odpowiednie oprogramowanie do analizy obrazów dokonuje się wydzielenia z obrazu interesujących obiektów np. na podstawie ich jasności lub barwy, buduje się charakterystyki wydzielonych obiektów poprzez pomierzenie ich parametrów geometrycznych lub radiometrycznych, klasyfikuje się obiekty na podstawie ich charakterystyk, wykonuje się analizę statystyczną uzyskanych wyników oraz przedstawia je graficznie.

Systemy komputerowej analizy obrazu mogą znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie istnieje konieczność dokonywania pomiarów planimetrycznych, stereometrycznych, morfologicznych, histochemicznych oraz analizy kształtu na obrazach mikroskopowych, ultrasonograficznych, makroskopowych i innych.

Autorzy zajmujący się analizą obrazu często dzielą cały jej proces na kilka etapów. Do najważniejszych zaliczają:

1. akwizycję obrazu,
2. przekształcania obrazu,
3. rozpoznawanie obrazu,
4. pomiary wykonywane na obrazach.

W skrypcie tym skoncentruję się na kluczowym etapie analizy obrazu, jakim są przekształcenia obrazu, których celem jest, aby z jednego lub kilku (kolorowych lub szarych) obrazów wejściowych otrzymać jeden lub kilka obrazów binarnych, na których w sposób poprawny wyróżnione są wszystkie interesujące nas (z punktu widzenia aktualnie rozpatrywanego problemu) obiekty. Proces ten często

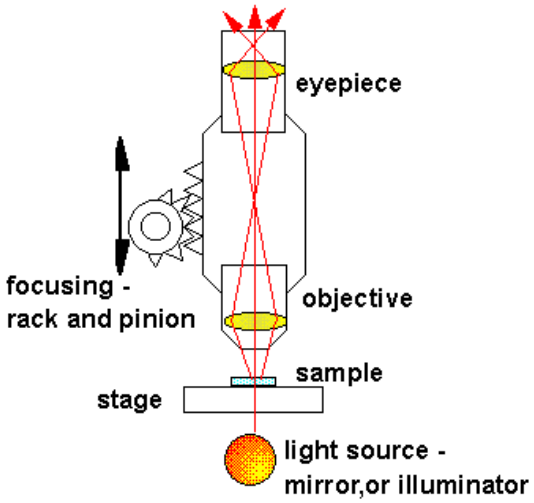
nosi nazwę segmentacji obrazu. Należy jednocześnie zaznaczyć, że w przypadku posiadania poprawnie posegmentowanego obrazu binarnego, pomiary wielkości geometrycznych analizowanych obiektów, w większości przypadków, nie nastręczają większego problemu.

7.1. Źródła obrazów

Aby odczytywać obrazy komputer potrzebuje czegoś, co zastępowałoby mu oczy. Może to być kamera CCD podłączona do karty akwizycji obrazu (ang. Frame grabber), kamera cyfrowa, czy cyfrowy aparat fotograficzny. Oddzielne zagadnienie stanowią elektroniczne układy otrzymywania i rejestracji obrazów stosowane w mikroskopii elektronowej i tunelowej. Oczywiście nadal część obrazów rejestrowana jest przy pomocy techniki analogowej: fotografii czy filmu, które muszą być przeniesione do postaci cyfrowej za pomocą np. skanera.

7.1.1. Mikroskopy optyczne

Mikroskopy świetlne wykorzystują widzialne pasmo fal elektromagnetycznych i umożliwiają uzyskiwanie powiększeń rzędu 10-1500 razy. Mogą być sprzężone z cyfrowym aparatem fotograficznym lub kamerą CCD. Bieg promieni świetlnych oraz sposób powstawania obrazu w klasycznym mikroskopie optycznym został przedstawiony na rysunku 7.1. Oprócz klasycznych mikroskopów optycznych w pracowniach fizycznych wykorzystuje się również inne typy mikroskopów optycznych.



Rys. 7.1. Otrzymywanie obrazu w klasycznym mikroskopie optycznym.

Siatkówka oka ludzkiego reaguje na dwa spośród trzech parametrów fizycznych fali świetlnej tzn. na długość fali (odbierana jako barwa) oraz jej amplitudę (odbierana jako stopień jasności). Trzeci parametr fali świetlnej – faza - nie jest rejestrowana przez siatkówkę, chociaż także ulega zmianom przy przechodzeniu światła przez preparat mikroskopowy. Różne struktury obecne w preparacie powodują odmienne przesunięcie fazy fali świetlnej. Zjawisko to zostało wykorzystane w konstrukcji

mikroskopu kontrastowo- fazowego. Zastosowano w nim specjalny układ optyczny, który przesunięcie fazy fali świetlnej przekształca w zmianę jej amplitudy. W obrębie kondensora mikroskopu kontrastowo-fazowego znajduje się pierścieniowa przesłona, która powoduje przekształcenie strumienia świetlnego emitowanego ze źródła światła w wiązkę promieni o kształcie pustego stożka. Przy przejściu tak uformowanej wiązki przez preparat ten ostatni działa jako siatka dyfrakcyjna , bowiem część promieni ulega ugięciu, natomiast reszta przechodzi prostoliniowo. Struktury preparatu powodują zróżnicowane ugięcie promieni przesuniecie fazy. Obiektyw mikroskopu zawiera dodatkowy układ optyczny, który powoduje jednolite opóźnienie lub przyspieszenie fazy promieni biegnących prostoliniowo. W płaszczyźnie obrazu dochodzi do interferencji obu typów promieni, podczas której nałożenie na siebie fal świetlnych o zróżnicowanych fazach powoduje powstanie nowych fal, o zróżnicowanej amplitudzie. W ten sposób struktury obecne w preparacie i powodujące różnego stopnia przesunięcie fazy fali świetlnej dostrzegane są w postaci skontrastowanej.

Mikroskop polaryzacyjny posiada wbudowane w układ optyczny dwa pryzmaty Nicola lub siatki polaryzacyjne, powodujące polaryzację światła. Jeden z pry6zmatów-polaryzator umieszczony jest pomiędzy źródłem światła a kondensorem. Natomiast drugi-analizator- znajduje się nad obiektywem. Pozycja analizatora może być ustawiana dowolnie poprzez jego obrót. Jeżeli płaszczyzny polaryzacji światła są ustawione równolegle, spolaryzowane promienie świetlne przechodzą swobodnie przez analizator i docierają do oka osoby mikroskopującej - pole widzenia jest wówczas jasne. Jeżeli natomiast płaszczyzna polaryzacji analizatora zostanie ustawiona pod kątem prostym do płaszczyzny polaryzatora, wówczas światło spolaryzowane przez polaryzator nie może przejść przez analizator i pole widzenia jest ciemne Przy takim właśnie ustawieniu elementów polaryzujących światło (tzw. skrzyżowanie pryzmatów) mikroskop polaryzacyjny spełnia swoją rolę.

Mikroskop interferencyjny działa na zasadzie przekształcania różnic faz fal świetlnych w różnice ich amplitudy. Odznacza się on natomiast odmienną konstrukcją układu optycznego. W obrębie kondensora znajduje się układ optyczny rozdzielający wiązkę światła na dwie składowe:

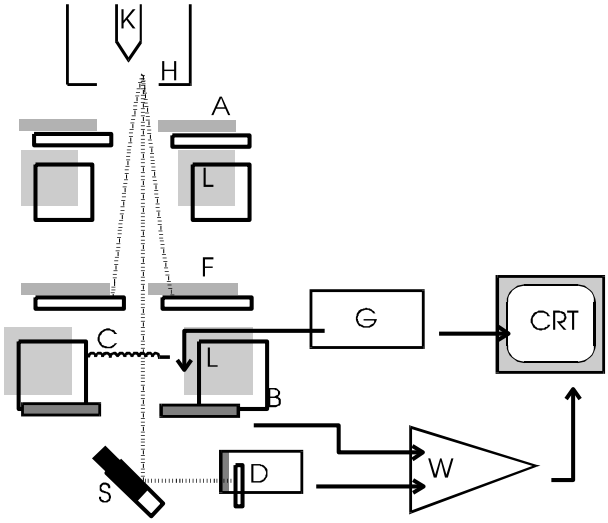
- promienie przechodzące bezpośrednio przez preparat,
- promienie przechodzące przez obszar przejrzysty, obok preparatu, jest to tzw. wiązka odniesienia.

Z drugiej strony tubus zawiera układ działający odwrotnie czyli ponownie zespalający powyższe promienie w spójną wiązkę świetlną. Dochodzi zatem do interferencji pomiędzy wiązką odniesienia a promieniami ugiętymi przez struktury zawarte w preparacie. Z uwagi na fakt że wiązka odniesienia posiada stałą charakterystykę, układ optyczny mikroskopu interferencyjnego nie tylko kontrastuje obraz, lecz może służyć do analizy ilościowej suchej masy badanych struktur oraz do określenia grubości warstw.

7.1.2. Skaningowy mikroskop elektronowy

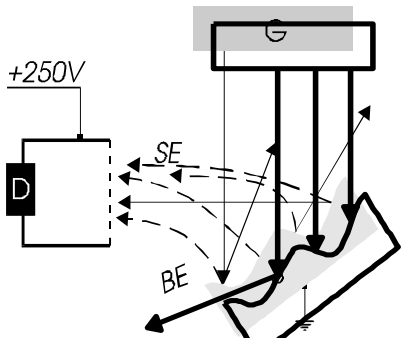
Podstawy działania skaningowego mikroskopu elektronowego przedstawia w uproszczony sposób rysunek 7.2. Elektrony emitowane z katody K są przyspieszane w polu elektrycznym wytworzonym pomiędzy katodą a anodą A. System soczewek elektrycznych L formuje wiązkę o średnicy 1-10 nm odpowiadającą przepływowi przez powierzchnię próbki prądu o natężeniu 1-100 nA. System cewek odchylających C przemieszcza wiązkę elektronów po powierzchni próbki S w sposób zsynchronizowany

(przez generator G) z przemieszczaniem wiązki elektronów w lampie obrazowej (CRT) w klasycznych konstrukcjach lub na ekranie monitora komputerowego w mikroskopach współczesnych. Natężenie wiązki elektronów w lampie obrazowej sterowane jest odpowiednio wzmocnionym (we wzmacniaczu W) sygnałem pochodzącym od detektora B (elektronów wtórnych) lub D (elektronów odbitych). Powiększenie mikroskopu jest regulowane poprzez zmianę amplitudy prądu w cewkach odchylających przy zachowaniu stałego rozmiaru obrazu otrzymywanego na monitorze.



Rys. 7.2. Schemat budowy skaningowego mikroskopu elektronowego.

Możliwa jest też praca SEM w sposób określany jako "modulacja Y", gdy na ekranie nie widzimy "obrazu" powierzchni, a jedynie wykres zależności sygnału detektora od położenia miejsca w którym na powierzchnię pada wiązka elektronów.



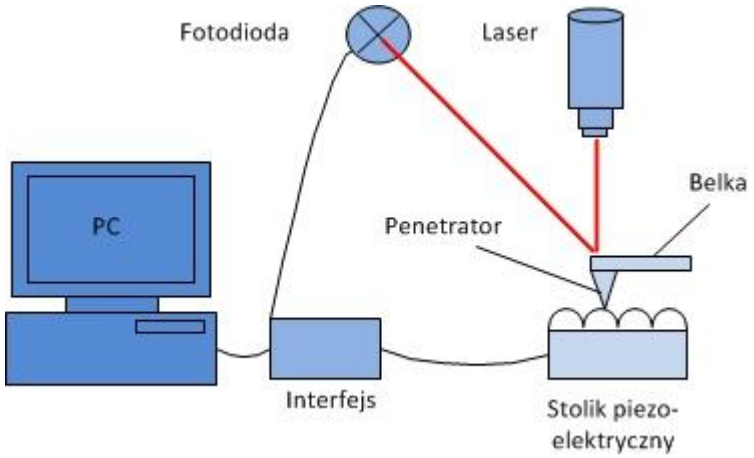
Rys. 7.3. Otrzymywanie kontrastu topograficznego dla elektronów odbitych (BE) i elektronów wtórnych (SE).
G- źródło elektronów, S - próbka, D - detektor.

Sygnał pochodzący od powierzchni próbki składa się z dwóch składowych: pierwszej pochodzącej od elektronów odbitych (rozproszonych) od powierzchni oraz nakładającej się na nią składowej pochodzącej od elektronów wtórnych (rysunek 7.3) i jest rejestrowany przez wspólny detektor.

Wszystkie powierzchnie z których elektrony odbite i wtórne docierają do detektora widoczne są na ekranie CRT jako jasne, natomiast te powierzchnie z których elektrony nie mogą bezpośrednio trafić do detektora widzimy jako ciemne. Obraz widziany na ekranie jest zatem zbliżony do tego, jaki otrzymalibyśmy w mikroskopii optycznej przy oświetleniu powierzchni próbki dwoma źródłami światła i obserwacji pod bardzo dużym kątem.

7.1.3. Mikroskop sił atomowych

Mikroskop sił atomowych (AFM, ang. Atomic Force Microscope) umożliwia uzyskanie obrazu powierzchni ze zdolnością rozdzielczą rzędu wymiarów pojedynczego atomu dzięki wykorzystaniu sił oddziaływań międzyatomowych, na zasadzie przemiatania ostrza nad lub pod powierzchnią próbki. Występowanie sił magnetycznych, elektrostatycznych i oddziaływań międzyatomowych pomiędzy atomami ostrza i badanej powierzchni umożliwia wykorzystanie detekcji ruchów ostrza sunącego po powierzchni próbki do obrazowania tej powierzchni. Ostrze (ang. Tip) jest wytworzone na sprężystej



Rys. 7.4. Schemat budowy mikroskopu sił atomowych

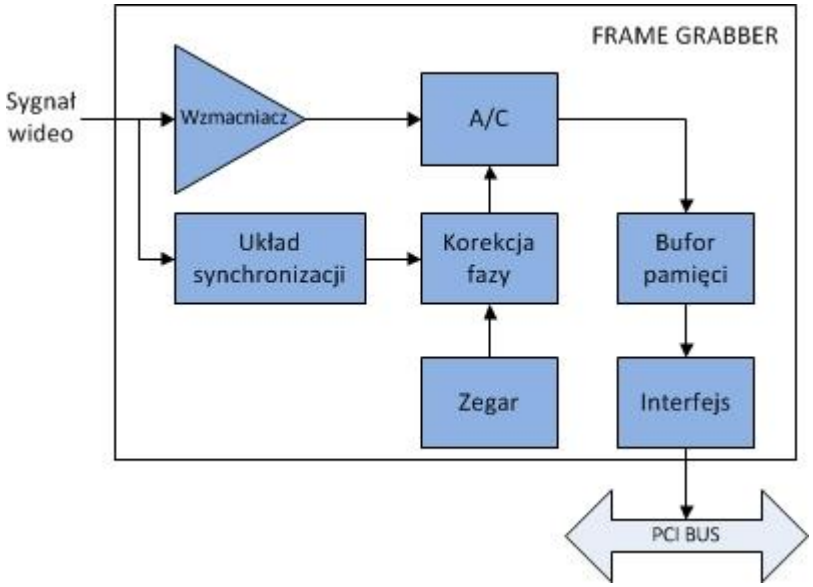
mikrodźwigni (mikrobelce, ang. Cantilever), której odchylenie umożliwia wyznaczenie siły oddziaływania międzyatomowego pomiędzy atomami ostrza i badanej powierzchni (rys. 7.4). Mapa sił dla każdego punktu powierzchni próbki jest przetwarzana komputerowo na obraz. Pomiar ugięcia dźwigni jest najczęściej dokonywany metodami optycznymi. Czułość odczytu ugięcia dźwigni sięga dziesiątych części angstrema.

7.1.4. Karta akwizycji obrazu

Karta akwizycji obrazu (ang. frame grabber) jest urządzeniem w jakie może zostać wyposażony system komputerowy w celu zamiany obrazu pochodzącego z analogowego źródła na postać cyfrową. Źródłem sygnału wejściowego dla karty akwizycji obrazu jest zwykle kamera video CCD, opisana w kolejnym rozdziale. Może być nim też dowolne inne urządzenie generujące sygnał video (VHS, S-VHS, Video8, Hi8) np. magnetowid, ultrasonograf, telewizor, aparatura naukowa, skaner, itp.

Zwykle frame grabber jest urządzeniem w formie karty instalowanej w złączu rozszerzeń w komputerze, lub modułu podłączanego przez port USB, niekiedy stanowi element większego lub wyspecjalizowanego systemu elektronicznego do obróbki sygnału wideo.

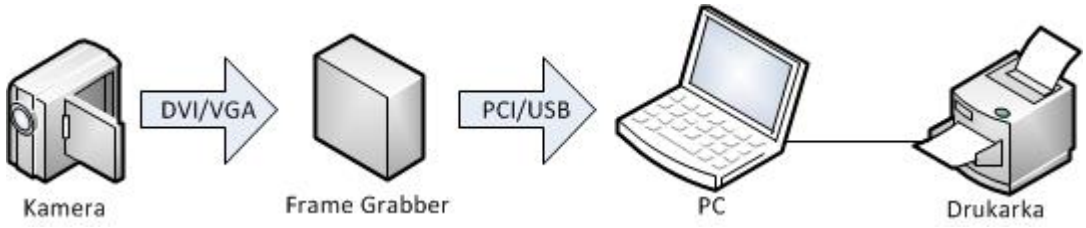
Z wejścia sygnał trafia do układu elektronicznego dokonującego wyodrębniania przebiegu odchylania poziomego i pionowego (rys. 7.5) , co jest niezbędne dla właściwego odtworzenia



Rys. 7.5. Schemat blokowy budowy frame grabbera.

wysokości i szerokości obrazu. Szybki przetwornik analogowo-cyfrowy zamienia sygnał analogowy na dane cyfrowe, które są gromadzone następnie w pamięci (tzw. buforze ramki) urządzenia, gdzie przybiera rozmiar pojedynczej ramki obrazu. Interfejs komunikacyjny umożliwia głównemu procesorowi zarządzanie procesem pobierania obrazu oraz dostęp do przetworzonych danych (rys. 7.6).

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 7.6. Tor akwizycji obrazów z kartą frame grabbera.

Od jakości przetwornika A/C zależy wierność przetworzenia obrazu na postać cyfrową. Ze względu na małą wydajność przetwornika pierwsze frame grabbery pozwalały jedynie na pobranie pojedynczej klatki filmu. Jednak już od dawna urządzenia te pozwalają na przetwarzanie sekwencji wideo o długości ograniczonej ilością pamięci dostępnej w komputerze, a współczesne modele oferują m.in. obraz cyfrowy o 24/32 bitowej głębi koloru.

7.1.4. Kamera CCD

Samo określenie CCD (ang. C*harge-Coupled Device*) oznacza jedynie zestaw miniaturowych kondensatorów połączonych w taki sposób, że możliwe jest przesłanie ładunku zgromadzonego w pojedynczym elemencie do jednego z jego sąsiadów. Na końcu takiego łańcucha ładunek z każdego elementu można zamienić na napięcie elektryczne, a następnie na sygnał cyfrowy. Proces rejestracji obrazu przez kamerę CCD można podzielić na cztery etapy:

1. Wygenerowanie ładunku.
   Jest ono zależne od wydajności kwantowej (QE), która określa jaka część padających na detektor fotonów zostanie zarejestrowana. W idealnym przypadku wydajność ta powinna wynosić 100%, co na razie jest nieosiągalne (np. ze względu na to, że QE jest zależne od długości fali). Kiedy na płytkę krzemową pada foton, w wyniku efektu fotoelektrycznego wewnętrznego następuje przekazanie jego energii elektronom. Jeżeli foton ma wystarczająco dużą energię, wynoszącą przynajmniej 1,13 elektronowolta, powstaje jeden lub kilka wolnych elektronów. Energia ta z kolei jest ściśle związana z długością fali co powoduje, że czułość CCD jest różna dla różnych częstotliwości padającego światła. Zakres czułości kamery CCD mieści się na ogół w przedziale od 330 nm do 1100 nm, osiągając swoje maksimum w okolicach 650 nm. Fale krótsze niż 650 nm zaczynają być pochłaniane przez elektrody na powierzchni płytki krzemowej, zmniejszając tym samym wydajność detektora w zakresie krótkofalowym (w okolicach 400 nm QE na ogół nie przekracza kilku procent). Stosuje się różne techniki, aby podnieść wydajność kwantową. Jedna z nich polega na oświetlaniu płytki krzemu od tyłu, gdzie jej powierzchnia nie jest przesłonięta przez siatkę elektrod. Pozwala to przekroczyć 80% próg rejestracji fotonów, ale jest bardzo kosztowne.
2. Zbieranie ładunku.
   Wydajność tego procesu jest zależna od trzech parametrów:

- Ilości pikseli w detektorze - im większa płytka i mniejsze piksele tym większa rozdzielczość i zdjęcie. Jednak wadą jest dłuższy czas odczytywania detektora i trudności z obsłużeniem tak dużej matrycy. Mniejsze piksele powodują też trudności z uzyskaniem drugiego parametru.
- Ilości elektronów, które mogą być zgromadzone w jednym pikselu - wielkość ta zazwyczaj mieści się w przedziale od 50 tys. do 1 mln. Im większa wartość tym lepiej (można uzyskać większy kontrast). Optymalnym rozmiarem piksela jest 15 μm^2 , może on zgromadzić do 500 tysięcy elektronów. Większe piksele pozwalają zebrać więcej ładunku.
- Zdolność do utrzymania ładunku zanim zostanie on zmierzony - wiąże się z tym możliwość rozlewania ładunku na inne piksele, co daje wrażenie jakby zdjęcie nie było dobrze zogniskowane. W idealnej sytuacji elektrony zgromadzone przez piksel powinny w nim pozostać do czasu dokonania odczytu.

3. Transfer ładunku.
   Po zgromadzeniu ładunku, musi on zostać przesłany do wyjściowego wzmacniacza poprzez cały rząd oddzielających go elementów. W tym celu przykłada się do wejścia napięcie, które zmusza elektrony do ruchu od jednego piksela do następnego. Jeden ze sposobów transferu to tzw. transfer liniowy, gdzie najpierw odczytuje się pionowe piksele a następnie sprawdza się do którego rzędu należą. Drugi to transfer klatkowy polegający na skopiowaniu całej klatki do innej, która służy jako pamięć do chwili odczytu. W czasie tych operacji ważne jest aby stracić jak najmniejszą część tego ładunku. Współczesne kamery CCD mają wydajność transferu przekraczającą 99,9999%.
4. Pomiar zgromadzonego ładunku.
   Pomiar dokonywany jest w małym kondensatorze (o pojemności ok. 50 fF), podłączonym do wyjściowego tranzystora. Tranzystor działa jak wzmacniacz, generując napięcie proporcjonalne do ładunku. Ostatecznie sygnał trafia do przetwornika analogowo-cyfrowego.

Standardowe kamery czarno-białe stosowane (rys. 7.7) w systemach przemysłowych zgodne są ze standardem RS-170 i przesyłają z przeplotem 525 poziomych linii z szybkością 30 obrazów na sekundę (zgodnie ze standardem amerykańskim lub 25 obrazów na sekundę zgodnie ze standardem europejskim). Zależnie od karty akwizycji obrazu i stosowanej kamery pozwala to na zapisanie obrazu zawierającego 640x480 punktów lub 512x480 punktów. Kamery stosowane w specjalizowanych systemach akwizycji obrazu pozwalają uzyskać 1024x1024 punkty lub więcej, wymagają jednak odpowiednich kart akwizycji obrazu. Produkowane obecnie kamery cyfrowe są wyposażone w odpowiednie przetworniki i od razu na wyjściu kamery otrzymujemy obraz cyfrowy.

Praktyczną przydatność kamery do celów badawczych warunkuje posiadanie przez nią następujących właściwości:

- możliwość wyłączenia automatyki sterującej wzmacniacza sygnału;
- wysoka czułość użytego przetwornika;
- opcja ręcznego ustawiania poziomu oraz kontrastu rejestrowanych obrazów;
- wyposażenie w mechanizm regulowania czasu pojedynczej ekspozycji.

Rys.7.7. Monochromatyczna kamera CCD

7.2. Przekształcenia obrazów

Programy do analizy obrazu zwykle posiadają bardzo dużo procedur przekształcających obrazy, szacuje się, że liczba użytecznych przekształceń obrazów jest rzędu kilku tysięcy. Aby racjonalnie dobierać odpowiednie dla naszych celów przekształcenia grupuje się je na podstawie cech wspólnych. Wyróżniamy cztery grupy przekształceń:

- Przekształcenia geometryczne (przesunięcia, obroty, odbicia oraz zniekształcenia przypominające naciąganie gumowej błony);
- Przekształcenia punktowe (poszczególne punkty obrazu są modyfikowane niezależnie od tego jakich mają sąsiadów za pomocą operacji logicznych, arytmetycznych lub operacji anamorficznych - tablic LUT);
- Filtry (przekształcenia kontekstowe, których wynik zależy od modyfikowanego punktu i jego otoczenia, a modyfikacja jest wykonywana zawsze);
- Przekształcenia morfologiczne (przekształcenia których wynik zleży od modyfikowanego punktu i jego otoczenia, a modyfikacja jest wykonywana po spełnieniu konkretnego warunku np. erozja);
- Przekształcenia widmowe (transformata Fouriera).

Najbardziej złożone sposoby przetwarzania obrazów polegają na kombinacji kilku typów operacji, stosowanych jednakże kolejno (zaawansowane programy przetwarzania obrazów pozwalają na zapamiętanie wypróbowanej sekwencji przekształceń i automatyczne jej powtórzenie w odniesieniu do innych obrazów początkowych).

7.2.1.Przekształcenia geometryczne

Przekształcenia geometryczne mogą być wykorzystywane do korekcji błędów optyki (likwidacja beczkowatości lub poduszkowatości obrazu) lub jako operacje pomocnicze (np. pomiary średnicy pod

różnymi kątami), to m. in. przesunięcia, przechylenia, obroty i odbicia, również przeskalowania - dokonywane są na obrazie jako całości.

Pochylenia i przesunięcia wykorzystuje się do kompensacji błędnego ułożenia badanego obiektu na zdjęciu.

Przeskalowań dokonuje się aby w celach porównawczych dopasować wielkościowo obrazy obiektów różniących się wielkością w naturze, albo wprawdzie jednakowych w rzeczywistości, lecz w sfotografowanych np. w różnym powiększeniu. Przeskalowań możemy dokonywać trzema metodami: najbliższego sąsiada, biliniową i bikubiczną.

W metodzie najbliższego sąsiada oblicza się odwrotną transformację skorygowanych współrzędnych określonego piksela, a następnie szuka się piksela o najbliższych współrzędnych. Wartość najbliższego piksela przepisuje się jako nową wartość piksela obrazu skorygowanego. W ten sposób uzyskuje się skorygowane współrzędne macierzy obrazu wraz z przeliczonymi wartościami poszczególnych pikseli.

Metoda interpolacji biliniowej wykorzystuje cztery najbliższe piksele względem współrzędnych piksela obrazu skorygowanego po jego transformacji odwrotnej. Metoda ta interpoluje kolejno wartości pomiędzy poszczególnymi pikselami w sposób liniowy.

Metoda interpolacji bikubicznej bazuje na szesnastu pikselach obrazu oryginalnego najbliższych względem piksela poszukiwanego. Funkcja interpolująca jest funkcją sześcienną, a wykorzystanie tak dużej ilości pikseli obrazu oryginalnego znacznie wpływa na eliminację składowych wysokich częstotliwości.

7.2.2. Przekształcenia punktowe

Przekształcenia punktowe mogą być wykorzystane np. do tworzenia negatywu. Wśród przekształceń punktowych wyróżniamy trzy podgrupy:

* operacje logiczne
* operacje arytmetyczne
* tablice korekcji (LUT - Look Up Tables) nazywane też operacjami anamorficznymi.

Przekształcenia punktowe mogą być wykorzystane m. in. do tworzenia negatywów, tworzenia masek, wyrównywania histogramu i binaryzacji. Punktowość w nazwie oznacza, że przekształcenia te dokonywane są na poszczególnych punktach w oderwaniu od charakterystyki punktów sąsiednich.

Binaryzacja jest jedną z ważniejszych czynności punktowego przetwarzania obrazów. Poprzedza prawie zawsze analizę obrazu a także jest bardzo przydatna w procesie rozpoznawania. Dopiero dla obrazów binarnych, czyli takich które składają się z białych i czarnych punktów, można przeprowadzić większość pomiarów oraz niektóre złożone przekształcenia.

Podstawowym problemem przy binaryzacji jest znalezienie odpowiedniego progu binaryzacji. Najczęściej dla znalezienia właściwej wartości progu tworzy się histogram obrazu, a następnie próg binaryzacji ustala się w ewentualnej „dolinie histogramu".

Operacje logiczne które wykonujemy na obrazach binarnych to:

NOT – zaprzeczenie,

AND – iloczyn logiczny,

OR – suma logiczna,

XOR – suma rozłączna,

NXOR - równoważność logiczna,
SUB – różnica logiczna.

Operacje logiczne możemy wykonywać również na obrazach o wielu stopniach szarości, o ile będziemy je przeprowadzać dla każdego bitu oddzielnie.

Operacje arytmetyczne możemy przeprowadzać na dwóch całych obrazach (np. odejmować je od siebie), jak i wykonywać je na pojedynczym obrazie (np. mnożąc wartości poziomu szarości w każdym punkcie przez jakąś liczbę).

Wynikiem działania dla poszczególnych punktów obrazu jest nowa wartość stopnia szarości. W przypadku działania na samych obrazach trzeba pamiętać o tym, że muszą mieć one takie same rozmiary.

Tablice LUT charakteryzują się kilku ciekawymi cechami:

- modyfikują rozkład stopni szarości bez jakiegokolwiek wpływu o charakterze geometrycznym;
- celem operacji jest lepsze uwidocznienie (uwypuklenie zawartych w obrazie informacji) interesujących nas szczegółów bez wprowadzania do obrazu dodatkowych informacji;
- funkcja przekształcająca obraz powinna być ściśle rosnąca lub malejąca, można wprowadzić inne funkcje, ale wpłyną one w sposób istotny na informację zawartą w obrazie.

Przykładem stosowania tablicy LUT jest korekcja (modulacja) gamma, którą stosujemy, gdy z powodu nadmiernego kontrastu trudno jest na zdjęciu rozróżnić szczegóły. Korekcja gamma jest operacją punktową wykonywaną na obrazie monochromatycznym lub składowych RGB obrazu kolorowego. Stosowana jest zazwyczaj w przetwarzaniu sekwencji wizyjnych, zarówno analogowych jak i cyfrowych. Jednym z zadań korekcji gamma jest kompensacja nieliniowej charakterystyki urządzenia wejściowego lub wyjściowego.

7.2.3. Filtry

Filtry najczęściej stosowane są w przypadku, gdy sygnał (obraz) jest zmieszany z szumem. Zadaniem filtrów jest usunięcie tego szumu. Różne otaczające nas urządzenia techniczne mają wbudowane filtry, filtry redukujące szumy posiadają np. magnetowidy.

Jeśli brakuje innych przesłanek dotyczących sposobu przeprowadzenia filtracji, wykorzystuje się koncepcję lokalnej średniej, gdzie każdy punkt przyjmuje wartość będącą średnią z jego lokalnego otoczenia. Opisana metoda opiera się na intuicyjnym założeniu, że niewielkie odchylenia wynikają z obecności szumu; zatem filtr zachowuje główny trend funkcji.

Potrzeba takiego postępowania przy analizie obrazu wynika wprost z potrzeb procesu analizy. Jego celem jest najczęściej usunięcie zbędnych szczegółów i przeprowadzenie pomiarów na zgeneralizowanym obrazie. Do tego celu znakomicie nadają się niektóre przekształcenia morfologiczne wykorzystujące erozję i dylatację będące operacjami morfologicznymi.

Filtry odwołują się do lokalnego otoczenia poszczególnych punktów, co pozwala zarówno zwiększyć istniejące różnice (poprawa obrazów ze słabym kontrastem na krawędziach) jak i je wyeliminować (korekcja przypadkowych błędów). Filtry możemy podzielić na liniowe i nieliniowe oraz wykorzystujące transformatę Fouriera.

Ważną grupę filtrów nieliniowych stanowią filtry adaptacyjne, są to filtry, których charakterystyka zmienia się w zależności od analizowanego obszaru. Jest to o tyle ważne że wspomniane wcześniej filtry potrafiły np. uśredniać obraz lub wzmacniać krawędzie, ale nie potrafiły tych dwóch operacji wykonać równocześnie

Z matematycznego punktu widzenia filtr jest pop prostu pewną funkcją, która przekształca jeden obraz w drugi. Filtry możemy podzielić na liniowe i nieliniowe oraz wykorzystujące transformatę Fouriera. Filtr jest liniowy, jeżeli:

$$f(f + g) = f(f) + f(g)$$

i

$$f(lf) = l\, f(f), \quad l \in R$$

gdzie: f, g - obrazy, f- filtr, l - stała.

Rozpowszechnienie filtrów liniowych wynika przede wszystkim z dużej łatwości ich implementacji, czyli praktycznego wykonania przez systemy komputerowe. Nie bez znaczenia jest też fakt, że filtry liniowe odpowiadają też często intuicyjnym oczekiwaniom wykorzystującego je człowieka.

Z innych zagadnień występujących w praktyce trzeba wymienić co najmniej trzy:

* korekcja błędów obrazu (np. usuwanie wad z odbitek fotograficznych wykonanych z porysowanych negatywów),

* poprawa obrazu otrzymanego w warunkach uniemożliwiających otrzymanie obrazu o wysokiej jakości (obrazy poruszone, nieostre, ze słabym kontrastem itp.),

* rekonstrukcja obrazu, który był poprawny, ale uległ częściowemu zniszczeniu (np. zdjęcia zalane wodą lub poplamione tłuszczem). W tym przypadku poprawne postępowanie przy odtwarzaniu pierwowzoru zależy w znacznym stopniu od znajomości przebiegu procesu uszkadzania obrazu.

7.2.4. Przekształcenia morfologiczne

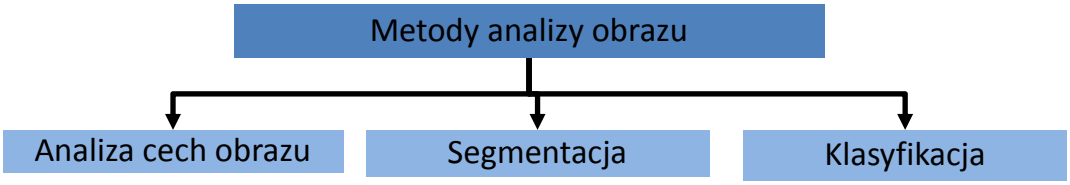
Przekształcenia morfologiczne, podobnie jak filtry, uwzględniają otoczenie każdego analizowanego punktu. Różnica polega na tym, że w przypadku tych przekształceń operacje są wykonywane tylko po spełnieniu pewnego warunku logicznego, czyli otoczenie punktu musi odpowiadać pewnemu wzorcowi struktury (nazywanemu elementem strukturalnym).

Przekształcenia morfologiczne to głównie erozja oraz dylatacja. Erozja pozwala m. in. na usuwanie izolowanych punktów (posiadających strukturę odmienną od zadanego, najbliższego otoczenia), likwidację małych izolowanych cząstek (o wielkości mniejszej od zadanej) oraz usuwanie wąskich wypustek (półwyspów). Dylatacja czyni to samo w stosunku do negatywu (dopełnienia) obrazu. Łącznie oba te przekształcenia pozwalają dokonać „wygładzenia" brzegów figur obrazu.

Dzięki lokalnemu działaniu algorytmów, operacje te pozwalają na przekształcanie poszczególnych obiektów znajdujących się na obrazie, w celu wydobycia jedynie istotnych cech.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

7.3. Metody analizy obrazów



Rys. 7.4. Podział metod analizy obrazu

Segmentacja jest podstawa metodą przetwarzania obrazów. Procedura segmentacji dzieli obraz na rozłączne obszary. W jej wyniku uzyskuje sie wyodrębnienie fragmentów obrazu charakteryzujących sie szczególnymi cechami (np. jasność, kolor, tekstura), do tła, tj. obszarów nie będących przedmiotem analizy. Zadaniem procedur segmentacji obrazów jest jedynie podział obrazu na odpowiednie obszary a nie ich rozpoznawanie.

Segmentacja obrazu przez progowanie jasności jest podstawowa metoda segmentacji obrazu. Polega ona na określeniu wartości progowej T (w skali jasności obrazu), która dzieli punkty obrazu na dwie grupy, tj. punkty obrazu dla których $f(x,y) \geq T$ oraz punkty, dla których $f(x,y) < T$. Po operacji progowania otrzymuje się tzw. obraz binarny. Progowanie takie może mieć zastosowanie w segmentacji obrazów kolorowych, na podstawie histogramu trójwymiarowego utworzonego z trzech składowych koloru.

Obszarowe metody segmentacji polegają na identyfikacji obszarów obrazu charakteryzujących sie pewnymi cechami wspólnymi (np. jasność, kolor, tekstura). Wyróżnia sie dwie, podstawowe metody segmentacji obszarów:

- rozrost obszaru (ang. region growing),
- podział obszaru (ang. region splitting).

W metodzie rozrostu obszaru segmentacja obrazu jest inicjowana od punktów obrazu zwanych „ziarnami". Obszar podlega rozrostowi o nowe punkty obrazu posiadające podobne cechy (tj. spełniające pewne kryterium jednorodności), np. może to polegać na tym, że dołącza się nowy punkt do obszaru gdy jest on podobny do innych punktów obszaru według określonego kryterium, np. miary podobieństwa. Główna trudnością w tej metodzie segmentacji jest wybór odpowiedniego kryterium rozrostu obszaru.

W metodzie podziału obszaru obraz jest wstępnie dzielony na pewna liczbę rozłącznych obszarów. Następnie, obszary te podlegają podziałowi lub łączeniu tak by spełnione były zdefiniowane kryteria segmentacji obszarowej.

Jedna ze specjalnych technik segmentacji obrazu jest metoda dopasowania wzorca (ang. Template matching). Stosuje sie ja w sytuacji, gdy jest znany a priori kształt obiektu podlegającego segmentacji (detekcji). Metoda bada stopień podobieństwa maski wzorca do kształtu obiektu

poszukiwanego w obrazie. Poszukiwanie obiektu w obrazie o założonym kształcie realizuje sie przez wyznaczenie korelacji pomiędzy maska wzornikiem a obrazem.

7.4. Kompresja obrazów

Kompresja obrazów cyfrowych pozwala na zmniejszenie rozmiaru danych opisujących obraz. Zależnie od tego, czy po dekompresji możliwe jest odtworzenie idealnego obrazu źródłowego, czy też dane zostaną częściowo zmienione (przez usunięcie drobnych szczegółów lub dodanie artefaktycznych elementów) dzielimy metody kompresji na stratne i bezstratne.

Najważniejszym twierdzeniem o kompresji bezstratnej jest Twierdzenie o zliczaniu (ang. counting theorem), wg którego: Niemożliwe jest skonstruowanie funkcji przekształcającej odwracalnie informację na informację (czyli funkcji kompresji bezstratnej), która nie wydłuża jakieś informacji o przynajmniej 1 bit, chyba że nie kompresuje ona żadnej informacji.

Algorytmy kompresji bezstratnej dobrze kompresują "typowe" dane, czyli takie w których występuje znaczna nadmiarowość informacji (redundancja).

Najczęściej używane metody kompresji bezstratnej można podzielić na słownikowe i statystyczne, choć wiele metod lokuje się pośrodku:

- metody słownikowe poszukują dokładnych wystąpień danego ciągu znaków, np. zastępują 'the ' krótszą ilością bitów niż jest potrzebna na zakodowanie 4 niezwiązanych znaków. Jednak znajomość symbolu 'the ' nie pociąga za sobą usprawnień w kompresowaniu 'they' czy 'then'.
- metody statystyczne używają mniejszej ilości bitów dla częściej występujących symboli, w przypadku praktycznie wszystkich oprócz najprostszych metod, prawdopodobieństwa zależą od kontekstu. A więc np. dla 'h' występującego po 't' używają mniejszej ilości bitów niż dla innych znaków w tym kontekście.

Popularne metody to:

- BZIP2
- Kodowanie Huffmana
- Kodowanie arytmetyczne
- Move To Front
- Transformata Burrowsa-Wheelera

Popularne formaty:

- LZ77 (GIF)
- LZW (GIF)
- PCX
- PNG
- RLE

Kompresja stratna to metody zmniejszania ilości bitów potrzebnych do wyrażenia danej informacji, które nie dają gwarancji, że odtworzona informacja będzie identyczna z oryginałem. Dla niektórych danych algorytm kompresji stratnej może odtworzyć informację w sposób identyczny.

Prostym przykładem kompresji stratnej jest np. zachowanie tylko co drugiego piksela, lub odrzucenie 2 najmniej istotnych bitów. Takie metody jednak nie dają zazwyczaj tak zadowalających rezultatów jak oparte na modelach psychozmysłowych.

Popularne formaty kompresji stratnej obrazu:

- JPEG
- JPEG2000 (kompresja falkowa)

JPEG to nazwa systemu kompresji statycznych obrazów rastrowych, przeznaczonego głównie do przetwarzania obrazów naturalnych (zdjęć satelitarnych, pejzaży, portretów itp.), a więc takich, które nie mają zbyt wielu ostrych krawędzi i małych detali. Motywacją do powstania tego systemu była standaryzacja algorytmów kompresji obrazów monochromatycznych i kolorowych.

Prace nad standardem rozpoczęły się w roku 1986 z inicjatywy organizacji ISO oraz CCITT i były prowadzone przez zespół ekspertów nazywany Joint Photographic Experts Group. Standard został opublikowany po 5 latach, w 1991 roku. Definiuje on cztery tryby kompresji:

- sekwencyjny, oparty na DCT (kompresja stratna)
- progresywny, oparty na DCT (kompresja stratna)
- sekwencyjny, bezstratny
- hierarchiczny

Dwie pierwsze metody umożliwiają uzyskanie bardzo dużej kompresji obrazu, rzędu 20:1 oczywiście kosztem pewnej utraty szczegółów, na ogół niezauważalnej dla ludzkiego oka, stanowiącej jednak przeszkodę dla komputerowej analizy obrazu.

Metoda sekwencyjna, bezstratna, pozwala na kompresję ok. 2:1 i nie jest zbyt powszechnie stosowana, jednak jest jedyną dopuszczalną dla obrazów które mają być potem analizowane komputerowo.

Tryb hierarchiczny kompresuje coraz mniejsze, przeskalowane obrazy (można to sobie wyobrazić jako piramidę obrazów: na samym dole znajduje się największy obraz, wyżej 2 razy mniejszy, jeszcze wyżej 4 razy mniejszy itd.). Został pomyślany głównie po to, by móc szybko pobierać z obrazów bardzo wysokiej rozdzielczości mniejsze obrazy; tryb ten nie definiuje która z metod kompresji ma zostać użyta: może być stratna, albo bezstratna.

7.5. Literatura

1. L. Wojnar, M. Majorek, Komputerowa analiza obrazu. Wydawnictwo Fotobit-Design, Warszawa 1994.
2. R. Tadeusiewicz, P. Korohoda, Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów, Wyd. Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997.
3. J.C. Russ, The Image Processing Handbook, 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton 1998.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

4. A. Pluta, Podstawy technik mikroskopowych, PWN, Warszawa 1999.
5. L. Reimer, Scanning Electron Microscopy. Physics of Image Formation and Microanalysis, Springer-Verlag, Berlin 1985.
6. Ch. D.Watkins, A. Sadun, S. Marenka, Nowoczesne metody przetwarzania obrazu, WNT, Warszawa 1995.
7. R. Fisher, S. Perkins, A. Walker, E. Wolfart, *Hypermedia Image Processing Reference - Point Operations* http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/pntops.htm
8. T. Young, J.J. Gerbrands, L.J. van Vliet, *Image Processing Fundamentals - Histogram-based Operations* http://www.tnw.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=0e20e2ba-36bc-4977-8b2d-e74cc2b63bb1&lang=en
9. Zieliński T.P., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań, WKŁ, Warszawa 2005
10. M.V. Newberry, Recovering The Signal, w: CCD Astronomy, Tom 2, Nr 1, (1995) 18-21.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

8. Filtracja cyfrowa

Dziedzina przetwarzania sygnałów dzieli się na dwie kategorie: analogowe przetwarzanie sygnałów i cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Rozwój cyfrowego przetwarzania sygnałów zapoczątkowany został przez projektantów systemów analogowego przetwarzania sygnałów, którzy usiłowali symulować procesy zachodzące w tych układach bez potrzeby budowania kosztownych prototypów. Te pionierskie prace były przyczynkiem do powstania w latach 80-tych dużego działu elektroniki zajmującego się cyfrową obróbką sygnałów (DSP, z ang. Digital Signal Processing).

Cyfrowa obróbka sygnału obejmuje:

- modelowanie sygnałów fizycznych za pomocą ciągów;
- modelowanie zależności między sygnałami za pomocą operatorów różnicowych;
- przetwarzanie ciągów za pomocą układów cyfrowych.

Aby sygnał analogowy mógł być poddany cyfrowej obróbce, musi być przetworzony na sygnał cyfrowy, dokonuje się tego za pomocą omówionego wcześniej przetwornika analogowo-cyfrowego.

Filtry, zarówno analogowe jak i cyfrowe, opisywane są za pomocą charakterystyk amplitudowych i fazowych. Charakterystyka amplitudowa filtru jest to przedstawienie w dziedzinie częstotliwości tego jak oddziaływuje na sygnały wejściowe. Charakterystyka ta jest krzywą tłumienia filtru (w dB) w funkcji częstotliwości. Charakterystyka fazowa jest to różnica w fazie, przy wybranej częstotliwości, pomiędzy wejściowym przebiegiem sinusoidalnym a wyjściowym przebiegiem sinusoidalnym o tej samej częstotliwości. Charakterystyka fazowa, zwana również opóźnieniem fazowym, jest zazwyczaj pokazywana jako wykres przesunięcia fazowego filtru w funkcji częstotliwości.

8.1. Sygnały cyfrowe

Podstawowy model matematyczny opisujący sygnały ciągłe opiera się na przekształceniach Fouriera i Laplace'a.

Fourier w roku 1822 opublikował fundamentalną rozprawę o przepływie ciepła, w której do opisu zjawiska transportu ciepła zaproponował wykorzystanie szeregów Fouriera. Szeregi te znalazły do tej pory wiele zastosowań, między innymi w analizie sygnałów. W zasadzie szeregi Fouriera mają zastosowanie w analizie sygnałów okresowych, zaś przekształcenie Fouriera (całka Fouriera) jest stosowane w analizie sygnałów aperiodycznych. Dyskretne przekształcenie Fouriera (DFT) stało się popularne w latach 40. i 50. XX wieku, jako narzędzie cyfrowych technik obliczeniowych, jednak ze względu na duże wymagania co do mocy obliczeniowych jego użycie było ograniczone. Dopiero opracowanie algorytmu szybkiego przekształcenia (transformaty) Fouriera (FFT, ang. Fast Fourier Transform) o zredukowanej liczbie operacji matematycznych doprowadziło do powszechnego stosowanie tego narzędzia.

Przekształcenie Laplace'a, a szczególnie jego modyfikacja nazywana przekształceniem Z, stało się głównym składnikiem struktury filtrów cyfrowych.

Cyfrowa obróbka sygnału polega na wykonywaniu operacji matematycznych na kolejnych próbkach, co przy pomocy odpowiednich algorytmów obliczeniowych pozwala między innymi na

filtrację sygnału. Mówimy wtedy o filtracji cyfrowej z zastosowaniem filtrów cyfrowych. Filtry cyfrowe pozwalają na realizację wszystkich filtrów realizowanych dotychczas drogą analogową, ponadto można uzyskać charakterystyki filtrów cyfrowych, których stworzenie przy zastosowaniu filtrów analogowych mogłoby się okazać bardzo trudne. Kolejną przewagą filtrów cyfrowych nad analogowymi jest możliwość dowolnej modyfikacji ich charakterystyki w trakcie filtracji, która sprowadza się do zmiany odpowiednich współczynników filtru. Można w ten sposób łatwo tworzyć filtry adaptacyjne, tzn. takie, których charakterystyka ulega zmianie w zależności od nadchodzącego sygnału. W odniesieniu do filtrów istnieją jeszcze inne istotne zalety stosowania rozwiązań cyfrowych. Po pierwsze możliwe jest przeprogramowanie urządzenia dokonującego cyfrowej obróbki sygnału i dzięki temu całkowita zmiana jego charakterystyki amplitudowej i fazowej. Na przykład możemy zmienić konkretny program danego filtru i z filtru dolnoprzepustowego utworzyć filtr górnoprzepustowy bez jakiejkolwiek zmiany sprzętowej. Istotna jest również powtarzalność czyli możliwość wytwarzania takich filtrów o jednakowych parametrach, co jest niemożliwe w przypadku filtrów analogowych.

Filtracja jest to proces przetwarzania sygnału w dziedzinie czasu. Polega na redukowaniu i odfiltrowaniu niepożądanych składowych zawartych w sygnale wejściowym.

Sygnały użyteczne są na ogół odbierane w obecności szumu (niekoniecznie białego) i innych sygnałów zakłócających. Usunięcie zakłóceń i szumów z sygnału odbieranego w taki sposób, aby sygnał użyteczny nie został nadmiernie zniekształcony, jest podstawowym zadaniem filtru cyfrowego. Filtr cyfrowy to algorytm lub proces obliczeniowy w wyniku którego jedna sekwencja (tzw. sygnał wejściowy) zamieniana jest w inną sekwencję (sygnał wyjściowy). Zaś ogólnie filtr to każde urządzenie posiadające selektywne charakterystyki częstotliwościowe.

Na przykład: jeśli znane jest pasmo częstotliwości sygnałów użytecznych, a widmo energetyczne zakłóceń i szumów kolorowych leży poza tym pasmem, to aby uniknąć zniekształceń sygnału, filtr powinien mieć stałą (różną od zera) charakterystykę amplitudową w tym paśmie (paśmie przepustowym filtru) i liniową charakterystykę fazową.

Charakterystyka poza pasmem przepustowym powinna przyjmować wartości bliskie zeru (pasmo zaporowe). Problem jest o wiele trudniejszy, jeśli widmo zakłóceń pokrywa sie częściowo z widmem sygnału użytecznego. Odfiltrowanie zakłóceń prowadzi do powstania zniekształceń sygnału.

Warto zaznaczyć, ze przez termin filtry cyfrowe rozumie sie nie tylko układy służące do eliminacji (odfiltrowania) zakłóceń, lecz również układy stosowane do celowego przekształcania danego sygnału w inny sygnał. Przykładem mogą być np. filtry różniczkujące, filtry Hilberta (stosowane do tworzenia sygnału analitycznego) lub tez bank (zestaw) filtrów pasmowych (o stałych pasmach lub stałych dobrociach). Te ostanie są coraz częściej stosowane w analizie czasowo-częstotliwościowej sygnałów, co w języku matematycznym oznacza dekompozycje sygnału względem funkcji bazowych. Metody te wykorzystuje sie w kompresji sygnału, wystarczy przesłać współczynniki rozwinięcia (zamiast próbek sygnału) i po stronie odbiorczej dokonać syntezy sygnału na podstawie znajomości funkcji bazowych.

8.2. Szumy i zakłócenia

Szumami elektrycznymi nazywa się jakikolwiek niepożądany sygnał zakłócający odczyt informacji zawartej w sygnale użytecznym. Takie zdefiniowanie pojęcia pozwala zaliczyć do szumów wszystkie sygnały, które pojawią się na wyjściu układu pomiarowego z przyczyn nie przewidzianych przez konstruktorów aparatury. Mogą to być zarówno sygnały okresowe (np. wyższe harmoniczne sygnałów

rozchodzących się w sieci zasilania związanych z włączaniem do sieci obciążenia pobierającego moc impulsami - tyrystorów, silników, serwomechanizmów itp.) jak i nieokresowe (sygnały wytwarzane przez silniki spalinowe z zapłonem iskrowym, wyładowania atmosferyczne) Wiele z tych sygnałów, które będziemy nazywać zakłóceniami, można wyeliminować ekranując układ pomiarowy od ich źródła, lub stosując inne środki techniczne.

Zjawisko szumów elektrycznych związane jest z dwoma podstawowymi faktami: z istnieniem ładunku elementarnego, a w związku z tym z nieciągłością przepływu ładunku; z istnieniem określonej energii, jaką mają nośniki ładunku w sieci krystalicznej w niezerowej temperaturze, których skutkiem jest pojawienie się w przewodnikach fluktuacji ładunku, a w związku z tym przypadkowych zmian napięcia na elementach oporowych (nazywanych szumem termicznym).

Rozkład gęstości mocy szumów termicznych nie zależy od częstotliwości, szum taki nazywa się szumem białym. Średni kwadrat siły elektromotorycznej źródła napięcia przypisanego elementowi szumiącemu opisany jest wzorem Nyquista:

$$\overline{\varepsilon_{\Delta f}^2} = 4k\,T\,R\,\Delta f$$

gdzie k jest stałą Boltzmanna, R - rezystancją elementu szumiącego, Δf - szerokością pasma częstotliwości, T - temperaturą.

Nieciągłość ładunku powoduje fluktuacje prądu podczas przenoszenia ładunku przez barierę potencjału. Szumy te występują w lampach elektronowych i elementach półprzewodnikowych, szumy te noszą nazwę szumów Schottky'ego lub szumów śrutowych. Jest to również szum biały, dla którego wartość skuteczna prądu opisana jest zależnością:

$$I_{sk} = \sqrt{2q\,I_{DC}\,\Delta f}$$

gdzie q jest wartością ładunku jednego nośnika prądu a I_{DC} - natężeniem prądu stałego płynącego przez element.

Istnieją również szumy związane z niedoskonałą strukturą elementów półprzewodnikowych, są to szumy których gęstość mocy rośnie w miarę obniżania częstotliwości sygnału czyli szumy typu 1/f lub nadmiarowe oraz szumy powstałe dzięki błędom technologicznym w strukturze elementu czyli szumy wybuchowe (szumy śrutowe). Zakłócenia typu lawinowego(szumy lawinowe) występują na złączach spolaryzowanych zaporowo. Modelowane są one przez mikro-przebicia lawinowe o charakterze lokalnym.

Właściwie należałoby w tym miejscu również powiedzieć, że odszumianie sygnałów stanowi sztukę samą w sobie. Stosuje się bowiem w tym zakresie bardzo wyrafinowane techniki filtracji, z których najbardziej skuteczne polegają na zastosowaniu transformaty falkowej oraz transformaty składowych głównych. W każdym przypadku, najpierw realizuje się przekształcenie proste, potem eliminację selektywnie wybranych współczynników i wreszcie przekształcenie odwrotne.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

8.3. Filtry cyfrowe

Aby sygnał analogowy mógł być poddany cyfrowej obróbce, musi być przetworzony na sygnał cyfrowy za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego. Częstotliwość próbkowania tego przetwornika determinuje największą częstotliwość sygnału, która może być jednoznacznie odwzorowana podczas przekształceń AC-CA, zgodnie z prawem Nyquista wynosi ona połowę częstotliwości próbkowania.

Cyfrowa obróbka sygnału polega na wykonywaniu operacji matematycznych na kolejnych próbkach, co przy pomocy odpowiednich algorytmów obliczeniowych pozwala między innymi na filtrację sygnału. Mówimy wtedy o filtracji cyfrowej z zastosowaniem filtrów cyfrowych. Filtry cyfrowe pozwalają na realizację wszystkich filtrów realizowanych dotychczas drogą analogową, ponadto można uzyskać charakterystyki filtrów cyfrowych, których stworzenie przy zastosowaniu filtrów analogowych mogłoby się okazać bardzo trudne. Kolejną przewagą filtrów cyfrowych nad analogowymi jest możliwość dowolnej modyfikacji ich charakterystyki w trakcie filtracji, która sprowadza się do zmiany odpowiednich współczynników filtru. Można w ten sposób łatwo tworzyć filtry adaptacyjne, tzn. takie, których charakterystyka ulega zmianie w zależności od nadchodzącego sygnału. W odniesieniu do filtrów istnieją jeszcze inne istotne zalety stosowania rozwiązań cyfrowych. Po pierwsze możliwe jest przeprogramowanie urządzenia dokonującego cyfrowej obróbki sygnału i dzięki temu całkowita zmiana jego charakterystyki amplitudowej i fazowej. Na przykład możemy zmienić konkretny program danego filtru i z filtru dolnoprzepustowego utworzyć filtr górnoprzepustowy bez jakiejkolwiek zmiany sprzętowej. Istotna jest również powtarzalność czyli możliwość wytwarzania takich filtrów o jednakowych parametrach, co jest niemożliwe w przypadku filtrów analogowych.
Możemy wyróżnić dwie formy filtrów cyfrowych:

- SOI (lub FIR) - filtry o Skończonej Odpowiedzi Impulsowej (ang. Finite Impulse Response) które do uzyskania bieżącej próbki sygnału wyjściowego wykorzystują próbkę bieżąca i próbki przeszłe sygnału wejściowego, nie korzystając z żadnych przeszłych próbek sygnału wyjściowego. Dysponując skończonym ciągiem różnych od zera próbek sygnału wejściowego, filtr SOI zawsze ma na wyjściu skończonej długości ciąg niezerowych próbek sygnału wejściowego, skąd bierze sie nazwa tego typu filtrów. Jeżeli sygnał wejściowy staje sie nagle ciągiem zerowych wartości, to sygnał wyjściowy tez będzie ciągiem próbek zerowych.
- NOI (lub IIR) - filtry o Nieskończonej Odpowiedzi Impulsowej (ang. Infinite Impulse Response). W przypadku filtrów NOI każda próbka wyjściowa zależy od poprzednich próbek sygnału wejściowego i poprzednich próbek sygnału wyjściowego. Filtry NOI są bardzo efektywne i wymagają znacznie mniejszej, w stosunku do filtrów SOI liczby mnożeń dla wyliczenia pojedynczej próbki sygnału wyjściowego przy zapewnieniu wymaganej charakterystyki częstotliwościowej. Ze sprzętowego punktu widzenia oznacza to, że filtry NOI mogą być bardzo szybkie, pozwalając na działanie w czasie rzeczywistym.

Zasadnicza różnica pomiędzy tymi filtrami polega na tym, że do obliczenia kolejnej próbki za pomocą filtru SOI wykorzystuje się próbki wcześniej poddawane filtracji (w ilości zależnej od rzędu filtru), oraz próbkę bieżącą. W przypadku filtru typu NOI dodatkowo brane pod uwagę są wszystkie wcześniej filtrowane próbki.

Filtry SOI mogą być zaprojektowane z dokładnie liniową charakterystyką fazową, gdyż są stabilne i ich zachowanie można dokładnie przewidzieć, stosujemy je zatem w przypadku gdy wymagana jest liniowość charakterystyki lub duży stopień kontroli odpowiedzi fazowej systemu. Filtry NOI charakteryzują się kiepską odpowiedzią fazową, która jest nieliniowa na brzegach pasm, ale obliczenia są wykonywane znacznie szybciej.

Odmianą filtru SOI jest filtr półpasmowy, jest to filtr którego pasmo przejściowe jest skoncentrowane wokół jednej czwartej szybkości próbkowania ($f_s/4$). W szczególności koniec pasma przenoszenia i początek pasma zaporowego są równoodległe od $f_s/4$. Dzięki ich symetrii w dziedzinie częstotliwości, filtry półpasmowe są często używane w filtracji decymacyjnej, ponieważ połowa ich współczynników w dziedzinie czasu jest równa zeru, a to znacząco zmniejsza liczbę mnożeń w filtrze. Filtrem decymacyjnym nazywamy taki filtr dolnoprzepustowy SOI, którego wyjściowa szybkość próbkowania jest mniejsza od wejściowej, przy czym wyjściowa szybkość próbkowania nie powinna naruszać kryterium Nyquista.

Filtr wszechpasmowy jest to filtr NOI, którego charakterystyka częstotliwościowa jest równa jeden w całym zakresie częstotliwości, ale którego charakterystyka fazowa nie jest funkcja stałą. Filtr wszechprzepustowy może być tak zaprojektowany, że jego charakterystyka fazowa kompensuje lub wyrównuje nieliniową charakterystykę fazową pierwotnego filtru NOI.

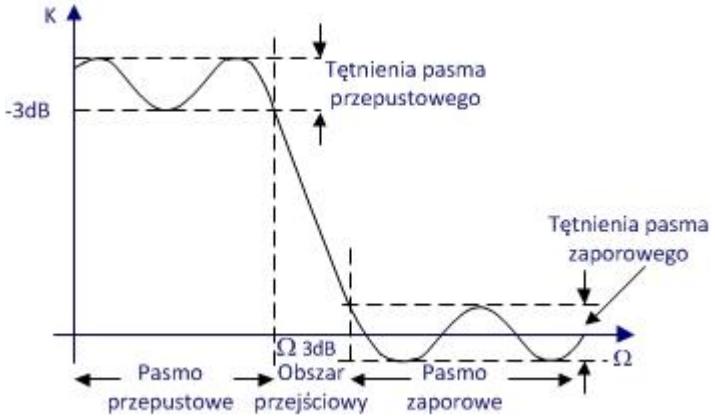
Podstawowe algorytmy modelowania sygnałów ciągłych bazują na przekształceniach Laplace'a i Fouriera. Fourier w roku 1822 opublikował fundamentalną rozprawę o przepływie ciepła, w której do opisu zjawiska transportu ciepła zaproponował wykorzystanie szeregów Fouriera. Szeregi te znalazły do tej pory wiele zastosowań, między innymi w analizie sygnałów. W zasadzie szeregi Fouriera mają zastosowanie w analizie sygnałów okresowych, zaś przekształcenie Fouriera (całka Fouriera) jest stosowane w analizie sygnałów aperiodycznych. Dyskretne przekształcenie Fouriera (ang. Discrete Fourier Transform - DFT) stało się popularne w latach 40. i 50. XX wieku, jako narzędzie cyfrowych technik obliczeniowych, jednak ze względu na duże wymagania co do mocy obliczeniowych jego użycie było ograniczone. Dopiero opracowanie algorytmu szybkiego przekształcenia (transformaty) Fouriera (ang. Fast Fourier Transform - FFT) o zredukowanej liczbie operacji matematycznych (operacji mnożenia) doprowadziło do powszechnego stosowanie tego narzędzia.

Z kolei za pomocą transformaty Laplace'a opisuje się pojedyncze sygnały, natomiast po odpowiednim rozszerzeniu i właściwej interpretacji jest ona nazywana transformatą Z, będącą podstawową zależnością opisującą bloki filtrów cyfrowych.

8.4. Kryteria oceny filtrów

W celu porównania właściwości filtrów powinien istnieć jakiś spójny zestaw kryteriów. Przeważnie do tej oceny stosuje się trzy podstawowe kryteria: odpowiedź amplitudową, odpowiedź fazową i odpowiedź na skok jednostkowy.

Parametry oceny filtru to tętnienie pasma przepustowego i zaporowego oraz stromość nachylenia charakterystyki (Rys. 8.2). W zależności od przeznaczenia filtru dopuszcza się pewien poziom tętnienia jak i określoną szerokość obszaru przejścia, możliwe jest zaprojektowanie filtru z bardzo stromą charakterystyką lub taki, który nie wprowadza zakłóceń w paśmie przepustowym.

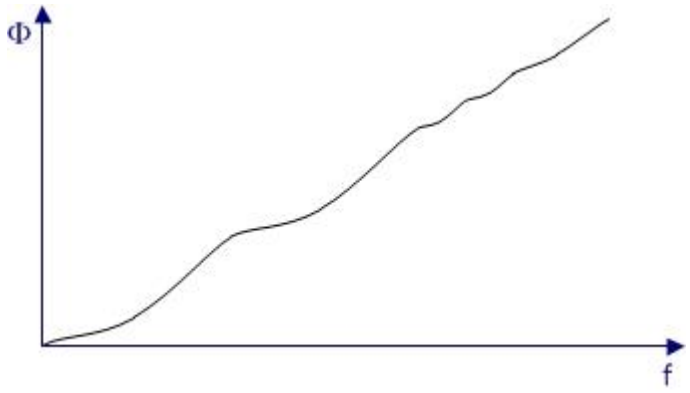


Rys. 8.1. Odpowiedź amplitudowa filtru dolnoprzepustowego.

Pasmo przepustowe (rys. 8.1)to obszar częstotliwości, w którym sygnał przechodzi przez układ praktycznie nie osłabiony. Pasmo to rozciąga się do punktu w którym amplituda spada poniżej 3dB wartości nominalnej. Punkt ten nazywany jest częstotliwością odcięcia f_{3dB}.

Obszarem przejściowym (pasmem przejściowym) nazywany obszar z dużą stromością nachylenia charakterystyki, która określa szybkość zmiany wzmocnienia wraz z częstotliwością, zawierający się pomiędzy pasmem przepustowym a zaporowym (rys. 8.1).

Pasmo zaporowe (rys. 8.1) to pasmo częstotliwości, których amplituda ma zostać zmniejszona poniżej zaprojektowanego poziomu.



Rys. 8.2. Odpowiedź fazowa filtru.

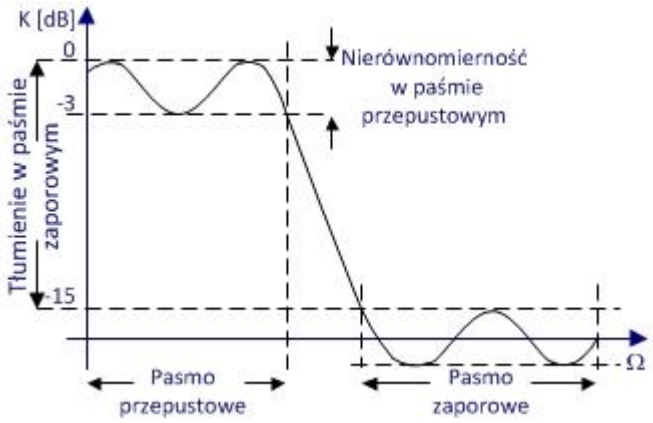
Charakterystyka fazowa **-** zależność przesunięcia fazy sygnału wejściowego filtru względem sygnału doprowadzonego do jego wejścia od częstotliwości tych sygnałów (rys. 8.2). Przedmiotem zainteresowania jest zespolona charakterystyka częstotliwościowa filtru, oznaczana zwykle symbolem

$H(s)$, $s = j\omega$, gdzie H, s i ω są liczbami zespolonymi. Ważność charakterystyki fazowej filtru wynika z faktu, ze jeśli składowe sygnału wyjściowego, których częstotliwości całkowicie mieszczą sie w paśmie przepustowym filtru, są różnie opóźnione po przejściu przez filtr, to sygnał wyjściowy filtru będzie zniekształcony. Stałość czasu opóźnienia sygnałów o różnych częstotliwościach odpowiada liniowemu narastaniu przesunięcia fazy w funkcji częstotliwości. Stąd termin filtr o liniowym przesunięciu fazy odnosi sie do filtru o idealnej charakterystyce fazowej. Na rysunkach 8.1 i 8.3 przedstawione są wykresy przesunięcia fazy oraz czasu opóźnienia w funkcji częstotliwości dla filtru dolnoprzepustowego, który jak widać nie jest filtrem o liniowym przesunięciu fazy. Charakterystyki fazowe najlepiej jest rysować dla liniowo wyskalowanej osi częstotliwości.

Tłumienie jest to zmniejszenie amplitudy, zazwyczaj mierzone w dB, na jakie narażony jest sygnał po przejściu przez filtr cyfrowy (rys. 8.3). Tłumienie T jest stosunkiem (przy danej częstotliwości) amplitudy sygnału na wyjściu filtru a_{out} do amplitudy na jego wejściu a_{in} :

$$T = 20 \log_{10}\left(\frac{a_{out}}{a_{in}}\right)$$

Jeśli dla danej częstotliwości amplituda wyjściowa sygnału jest mniejsza niż wejściowa, stosunek jest mniejszy od jedności a tłumienie wychodzi ujemne.



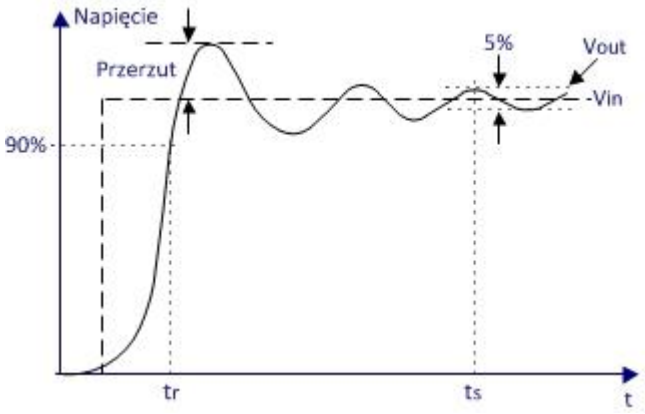
Rys. 8.3. Tłumienie filtru dolnoprzepustowego.

Powszechnie stosowanymi kryteriami oceny odpowiedzi filtru w dziedzinie czasowej są (rys. 8.4):

- czas narastania t_r (czas po jakim napięcie wyjściowe osiągnie 90% swej wartości maksymalnej);
- czas ustalania t_s (czas w jakim napięcie wyjściowe ustala się w obrębie 5% odchylenia od swej wartości końcowej);
- przerzut (maksymalna wartość napięcia o jaką napięcie wyjściowe przewyższa chwilowo swą wartość końcową po przekroczeniu czasu narastania);
- dzwonienie (oscylacje wokół wartości końcowej).

Znajomość tych parametrów jest szczególnie ważna wtedy, gdy sygnałami wejściowymi filtru są skoki lub impulsy. Na rysunku 8.4 przedstawiona jest typowa odpowiedz filtru na wejściowy sygnał skoku.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 8.4. Odpowiedź na skok jednostkowy.

8.5. Typy filtrów

Praktyczne realizacje filtrów stanowią kompromis pomiędzy poszczególnymi kryteriami oceny filtrów omówionymi w poprzednim rozdziale. Istnieje wiele typów filtrów, tylko niektórymi z nich zajmiemy się w tym miejscu. Dobierając filtry mamy do dyspozycji następujące parametry:

a) dla filtru Butterwortha tylko dwa parametry:
- f_c - częstotliwość odcięcia,
- N - rząd filtru.

b) dla filtru Czebyszewa trzy parametry:
- f_c - częstotliwość odcięcia,
- N - rząd filtru.
- δ_1 lub δ_2- wielkość zafalowań.

c) dla filtrów eliptycznych cztery parametry:
- f_c, f_r - początek i koniec pasma przejściowego,
- N - rząd filtru.
- δ - wielkość zafalowań.

Rząd filtru to liczba przedstawiająca najwyższy wykładnik w liczniku lub mianowniku funkcji transmitancji filtru w dziedzinie transformaty Z. Dla filtrów SOI nie ma mianownika w funkcji transmitancji i rząd filtru jest jedynie liczbą składników w strukturze filtru. Dla filtrów NOI rząd filtru jest równy liczbie elementów opóźniających w strukturze filtru. Ogólnie rzecz biorąc im wyższy jest rząd filtru tym lepsze są właściwości częstotliwościowe charakterystyki amplitudowej filtru.

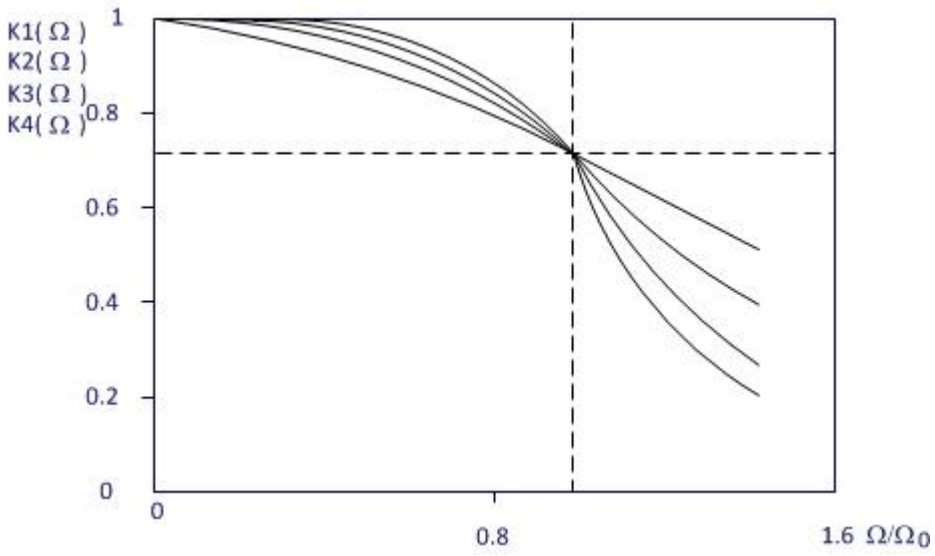
Filtry eliptyczne i Czebyszewa mają charakterystyki równomiernie faliste, czyli ich nierównomierność jest stała w całym paśmie przenoszenia, natomiast filtry Bessela i Butterwortha nie mają nierównomierności charakterystyk w paśmie przenoszenia.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

8.5.1. Filtr Butterwortha

Filtr Butterwortha jest to filtr charakteryzujący się maksymalnie płaską charakterystyką amplitudową w paśmie przenoszenia (rys. 8.5). Częstotliwość graniczną filtru wyznacza spadek sygnału o 3 dB. Nachylenie charakterystyki w paśmie zaporowym wynosi: n*6 dB na oktawę, gdzie n – rząd filtru.

Filtr ten działa w dziedzinie częstotliwości.



Rys. 8.5. Charakterystyki amplitudowe filtru Butterwortha

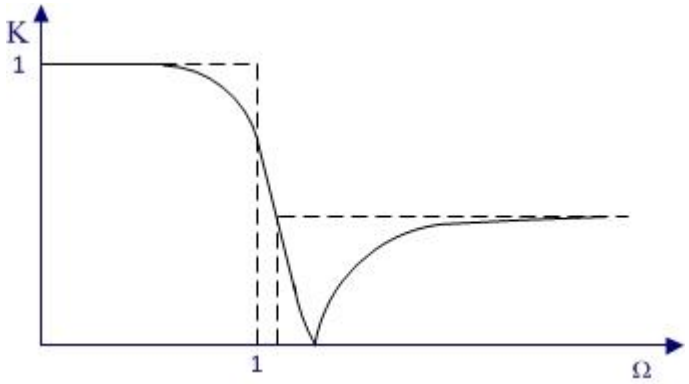
8.5.2. Filtr Czebyszewa

Filtr Czebyszewa zawiera niewielkie tętnienia w paśmie przepustowym, ale jego nachylenie obszaru przejściowego jest o wiele bardziej ostre. Filtr Czebyszewa typu I, charakteryzuje się monotoniczną charakterystyką amplitudową w zakresie pasma zaporowego i stałą amplitudą oscylacji tej charakterystyki w zakresie przepustowym.

Filtr Czebyszewa typu II, posiada odwrócone cechy filtru typu I. Charakteryzuje się stałą amplitudą oscylacji charakterystyki amplitudowej w zakresie zaporowym i monotoniczną charakterystyką amplitudową w zakresie pasma przepustowego**.**

Filtr Czebyszewa II typu posiada zafalowania w przebiegu charakterystyki amplitudowej w paśmie zaporowym (rys. 8.6).

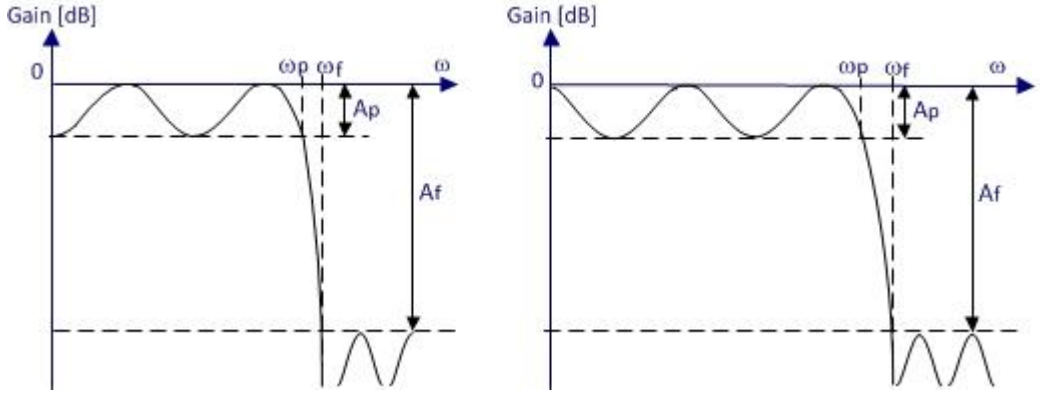
Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 8.6. Charakterystyka amplitudowa filtru Czebyszewa II rodzaju.

8.5.3. Filtr eliptyczny

Filtr eliptyczny (nazywany też filtrem Cauera lub Zolotareva) charakteryzuje się najkrótszym obszarem przejściowym, ale jego odpowiedź fazowa jest wyjątkowo nieliniowa. Oparty jest na funkcji eliptycznej Jacobiego. Charakteryzuje się stałą amplitudą oscylacji charakterystyki amplitudowej zarówno w paśmie zaporowym jak i w paśmie przepustowym (rys. 8.7).

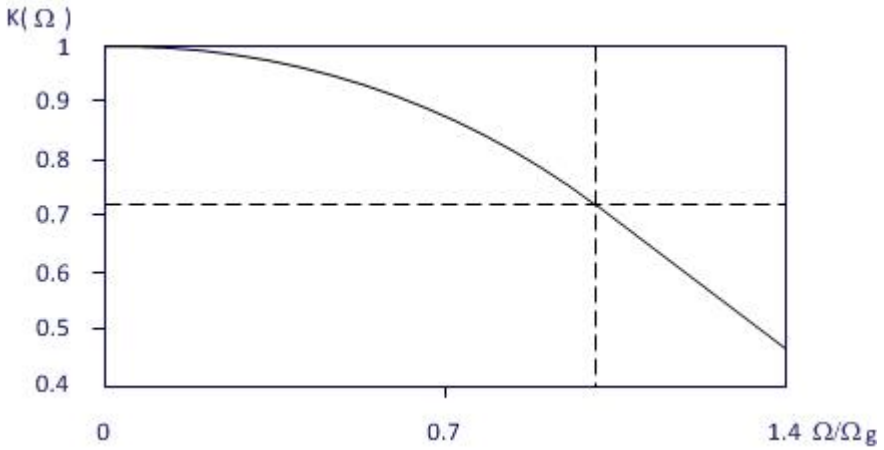


Rys.8.7. Charakterystyka amplitudowa filtru eliptycznego

8.5.4. Filtr Bessela

Filtr Bessela jest to filtr, w którym opóźnienie nie zależy od częstotliwości, tzn. w którym przesunięcie fazowe jest proporcjonalne do częstotliwości. Filtry te mają wyjątkowo płaską charakterystykę odpowiedzi fazowej w całym paśmie przepustowym, są to idealne właściwości do przenoszenia impulsów prostokątnych. Charakterystyka amplitudowa przedstawiona jest na rys. 8.8.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie



Rys. 8.8. Charakterystyka amplitudowa filtru Bessela

8.6. Literatura

1. C. Marven, G. Ewers, Zarys cyfrowego przetwarzania sygnałów, WKŁ, Warszawa 1999.
2. R.G. Lyons, Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów, WKŁ, Warszawa 1999.
3. J. Zarzycki, Cyfrowa filtracja ortogonalna sygnałów losowych, WNT, Warszawa 1998.
4. W. Tłaczała, L. Tykarski, Elektronika w eksperymencie fizycznym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
5. P. Horowitz, W. Hill, Sztuka elektroniki, WKŁ, Warszawa 1996.

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Indeks alfabetyczny

A

Aliasing 22

B

Bit
  kontroli parzystości 47
  startowy 47
Blok
  akwizycji danych 16
  generacji sygnałów 16
  komunikacji 16
  przetwarzania danych 16
Błąd
  dynamiczny 33
  liniowości całkowitej 30
  nieliniowości 30
  nieliniowości całkowej 31
  nieliniowości różniczkowowej 32
  przesunięcia zera 30
  skalowania 30
  wzmocnienia 30

C

Całkowy błąd przetwarzania 31
Centronics 66
Charakterystyka filtru
  amplitudowa 100
  fazowa 100
Czas
  narastania 106
  ustalania 106
Czas przetwarzania 29
Częstotliwość przetwarzania 29

D

DSP 100
Dupleks 45
Dzwonienie 106

F

FFT 100
Filtr 101
  adaptacyjny 103
  Bessela 109
  Butterwortha 108
  Cauera 109
  cyfrowy 101
  Czebyszewa 108
  eliptyczny 109
  FIR 103
  IIR 103
  Zolotareva 109
Filtracja 101
Funkcje BIOS'u 52

G

Graficzny interfejs użytkownika 16
GUI 16

I

Interfejs
  HP-IB 66
  IEC-625 67
  IEEE-488 67

J

Język
  SCPI 70

K

Kod
  BCD 27
  binarny pozycyjny 24
  dziesiętny pozycyjny 27
  Graya 28

refleksyjny 28
uzupełnieniowy do dwóch 24
Kodowanie
arytmetyczne 97
Huffmana..... 97
Konfiguracja
gwiazdowa..... 11
magistralowa..... 11
pętlowa 11
Kontroler systemu 11

M

Metody
bezpośrednie..... 33
chwilowe..... 35
czasowe..... 35
częstotliwościowe 35
integracyjne..... 35
pośrednie..... 33
Mezurand..... 9

N

Narzędzia
pomiarowe..... 9

O

Obszar przejściowy 105

P

Panel wirtualny..... 17
Pasmo przepustowe..... 105
Pasmo zaporowe 105
Pomiar..... 8
Półdupleks 45
Prawo
Nyquista 103
Progowanie jasności 96
Protokół
transmisji..... 44
Przekształcenia
Fouriera..... 104
Laplace'a 104
Przekształcenie
Z 100
Przerzut..... 106

R

Rejestr
parametrów transmisji 50
stanu modemu..... 51
stanu transmisji..... 50
sterowania modemu 51
Rzeczywisty zakres przetwarzania 29

S

Simpleks..... 45
Standardy
EIA 44
transmisji szeregowej 44
Status
linii modemu 54
łącza 53
Sygnału
kwantowanie..... 23
próbkowanie 21
System
adaptacyjny 14
aktywny..... 10
badawczy 9
czasu rzeczywistego..... 13
pasywny 10
pomiarowo-diagnostyczny 10
pomiarowo-kontrolny..... 10
pomiarowy..... 9
pozycyjny 24
rozproszony 10
skupiony..... 10
System dwójkowy
naturalny..... 24
uzupełnieniowy do dwóch 24
Szumy
elektryczne 101
lawinowe 102
Schottky'ego 102
śrutowe 102
termiczne..... 102

Książka/publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

typu 1/f 102
wybuchowe 102

T

Tor pomiarowy 9
Transformata
Burrowsa-Wheelera 97
Tryb
hierarchiczny 98
sekwencyjny bezstratny 98
sekwencyjny stratny 98
Twierdzenie
Shannona-Kotielnikowa 21

U

USB
hub 60
koncentrator 60

W

Współczynnik
różniczkowej nieliniowości 33
termiczny zera 33
termiczny nieliniowości różniczkowej 33
termiczny skali 33
Wynik pomiaru 9

Z

Zakłócenia 102

Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń
- zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej zarządzanie Uczelnią,
nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacniania zdolności do zatrudniania,
także osób niepełnosprawnych.

Politechnika Łódzka