

1. Kodowanie PCM

1.1 Informacje podstawowe

Zdefiniowanie pojęcia sygnału należy poprzedzić określeniem samej informacji, która jest pojęciem pierwotnym, a więc nie wymagającym definiowania. Encyklopedia powszechna PWN oraz Słownik języka polskiego podają jednak, że informacja to: "każdy czynnik, dzięki któremu ludzie lub urządzenia mogą działać w sposób celowy". Informacja jest więc związana z działalnością człowieka lub automatu, który musi ją odebrać. Inne, podobne określenie informacji to: "Ślad, mniej lub więcej trwały, pozostawiony w umyśle człowieka lub w pamięci maszyny przez każdy nieoczekiwany bodziec energetyczny odbierany z otoczenia". Należy w tym miejscu podkreślić konieczność nieoczekiwanego charakteru bodźca (bodziec, pojawiający się z prawdopodobieństwem $p = 1$, nie niesie żadnej informacji) oraz jego energetyczny charakter. Obiekty, które wytwarzają i wysyłają bodźce energetyczne nazywane są źródłami, zaś realizujące procesy ich odbioru - odbiornikami.

W przypadku przekazywania informacji następuje wysłanie i odebranie bodźca lub ciągu bodźców energetycznych nazywanych sygnałem lub inaczej nośnikiem informacji. Charakter sygnału powinien być dostosowany do sposobu jego przekazywania oraz właściwości odbiornika. W przypadku przekazywania informacji w relacjach międzyludzkich sygnałem może być np. światło lub energia akustyczna, w relacjach typu maszyna-maszyna może to być np. sygnał elektryczny.

Z sygnałem wiąże się zawsze pojęcie jego przekazywania, które zakłada fakt istnienia drogi transmisyjnej pomiędzy źródłem i odbiornikiem. Droga ta składa się z odcinków, będących łączami lub wydzielonymi elementami łączy, oraz elementów urządzeń komutacyjnych, które umożliwiają zestawianie relacji połączeniowej na czas trwania przekazu. Źródło sygnału, droga transmisji i odbiornik sygnału tworzą całość zwaną łańcuchem telekomunikacyjnym.

Przesyłanie sygnału na duże odległości wymaga optymalnego dostosowania jego parametrów do warunków łącza. Uwzględnia się przy tym możliwości transmisyjne, efektywność (bilans energetyczny) oraz różnorodne wpływy otoczenia. Docierający do odbiornika sygnał powinien zapewnić możliwość odtworzenia przez odbiornik jego pierwotnej postaci z zadaniem nieprzekraczalnym poziomem błędu. W rezultacie postać sygnału zależy od źródła informacji (nadajnika), odbiornika i toru transmisyjnego.

W najpowszechniej spotykanej usłudze telekomunikacyjnej - telefonii, sygnały pochodzące z aparatów telefonicznych są sygnałami analogowymi, co oznacza, że wielkość niosąca informację zmienia swoją wartość w sposób ciągły, tj. w dozwolonym przedziale zmian liczba jej wartości jest nieograniczona. Droga transmisyjna i urządzenie końcowe muszą być więc dostosowane do transmisji i odbioru sygnałów o określonych parametrach (czas, zakres częstotliwości, poziom mocy itp.), mieszczących się w zadanych granicach, ale o nieprzewidywalnych wartościach, które powinny być odtworzone możliwie idealnie.

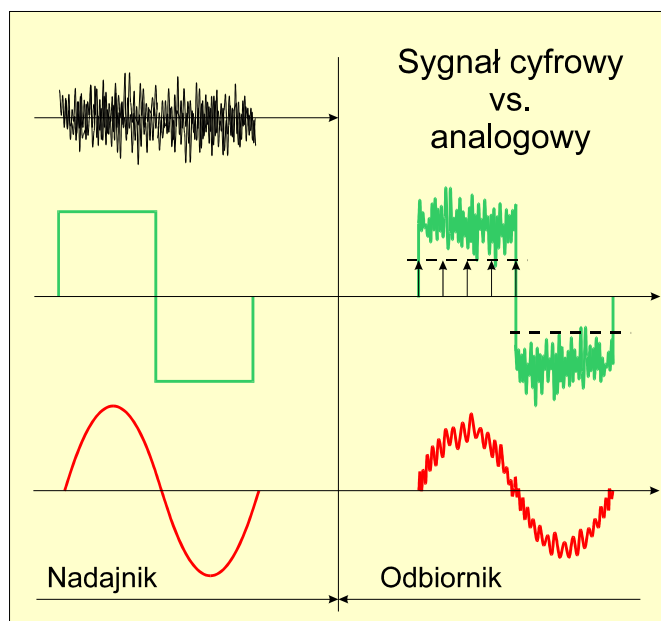
Tymczasem wprowadzane przez kanał telekomunikacyjny zniekształcenia i pochodzące z otoczenia zakłócenia zmieniają przebieg sygnału tak, że do odbiornika dochodzi on obciążony błędem. W szczególnie niekorzystnych warunkach może to nawet uniemożliwić poprawne odtworzenie informacji, natomiast zawsze powoduje ograniczenie zasięgu oraz pogorszenie jakości świadczonych usług, a w rezultacie konieczność zastosowania innych (droższych i dostępnych po opanowaniu określonego etapu technologii) łączy i urządzeń komutacyjnych.

Alternatywnym rozwiązaniem jest zamiana sygnałów analogowych na cyfrowe, których zastosowanie przynosi określone korzyści. Sygnał cyfrowy stanowi bodziec, którego parametry niosące informację mogą przyjmować ściśle określoną liczbę wartości, ograniczoną w najprostszym przypadku do dwóch (sygnał binarny). Wielkościami odpowiedzialnymi za przenoszenie informacji mogą być dowolne wielkości fizyczne, które można zmieniać w sposób nieciągły. Szczególną cechą sygnału cyfrowego, jaką jest ściśle określona liczba wartości wielkości będącej nośnikiem informacji ułatwia poprawną transmisję i odbiór sygnału cyfrowego.

W odróżnieniu od odbiornika sygnału analogowego, który musi z określoną dokładnością odtworzyć w zadanym zakresie wszystkie wartości wielkości niosącej informację (np. wartości napięcia czy częstotliwości), odbiornik sygnału cyfrowego może być przystosowany do rozróżniania tylko tylu wartości odbieranego sygnału, ile jest możliwych stanów w sygnale wejściowym. Wszelkie odchyłki wartości odbieranego sygnału od wartości przewidywanej traktowane są jako niepożądane zakłócenie lub

zniekształcenie i w konsekwencji eliminowane.

Przebieg zmian sygnałów analogowego i cyfrowego transmitowanych w kanale telekomunikacyjnym przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Porównanie oddziaływania zakłóceń kanałowych

Sygnał podawany na wejście łącza dostosowany jest do parametrów toru transmisyjnego (czas trwania kanału, zakres dopuszczalnych poziomów, pasmo), możliwości detekcji lub regeneracji w odbiorniku (lub regenerators). Tłumienność toru transmisyjnego i wnoszone przez niego zniekształcenia powodują zmniejszenie poziomu i *rozmycie* (dyspersję) odbieranego sygnału. Zakłócenia pochodzące od zewnętrznych źródeł energii zawarte w paśmie transmitowanego sygnału, nakładają się na sygnał, który tak zdeformowany dociera do odbiornika (regeneratora).

W przypadku sygnału analogowego jego poprawne odtworzenie jest niemożliwe, ponieważ wzmacnienie oddziałuje jednocześnie na treść przekazu oraz niepożądane składowe. Natomiast sygnał cyfrowy po wzmacnieniu poddawany jest procesowi detekcji. W chwilach t_o odbywa się porównanie wartości odbieranego sygnału z wartością zwaną progiem decyzji. W przypadku sygnału binarnego jest to np. średnia wartość pomiędzy wartościami przyporządkowanymi stanom "0" i "1". Jeżeli wartość odbieranego sygnału jest większa od progu decyzji, przyjmuje się, że został nadany impuls "1", w przeciwnym przypadku "0". Na podstawie detekcji formowany jest w odbiorniku (regenerators) impuls o parametrach identycznych jak na wejściu kanału. Jeśli wnoszone przez łącze i otoczenie zniekształcenia i zakłócenia nie powodują przekroczenia progu detekcji, odbiór sygnału przebiega bezbłędnie. Możliwe jest zatem eliminowanie deformacji sygnału o wartościach:

$$\sigma_{max} = A - \varepsilon$$

gdzie σ_{max} jest maksymalną dopuszczalną sumą wartości wnoszonych zniekształceń i zakłóceń, A chwilową wartością przebiegu w chwili t_o , a ε - wartością progu decyzji. Dla sygnału binarnego σ_{max} może wynosić prawie 50% wartości odpowiadającej amplitudzie odbieranych impulsów. Możliwość korekcji tak dużych zmian występuje wyłącznie w przypadku sygnałów cyfrowych i jest ich podstawową zaletą. Pozwala to w szczególności na stosowanie dowolnie wielu odcinków regeneratorskich a więc na praktycznie nieograniczony zasięg łączności o doskonałej jakości.

Dodatkową zaletą stosowania sygnałów cyfrowych jest możliwość ujednoczenia postaci sygnałów dla różnych usług i sygnalizacji, czyli możliwość stworzenia zintegrowanej technicznie i usługowo sieci telekomunikacyjnej. Celowe zatem jest zastosowanie przekształcenia sygnałów analogowych na cyfrowe i wykorzystywanie w telekomunikacji wyłącznie sygnałów cyfrowych.

1.2 Zasady przetwarzania analogowo - cyfrowego

Wykorzystywanie sygnałów cyfrowych wiąże się z zamianą sygnału analogowego na cyfrowy, czyli prowadzeniem przetwarzania analogowo-cyfrowego lub modulacji analogowo-cyfrowej. Ma ona zastosowanie, jeśli źródło sygnału pierwotnego dostarcza go w postaci analogowej. Spośród modulacji analogowo-cyfrowych w telekomunikacji najczęściej stosowane są różne odmiany modulacji impulsowo-kodowej PCM (*Pulse Code Modulation*).

Często występuje także konieczność zmiany postaci sygnału cyfrowego np. dla dostosowania jego parametrów do wymagań wynikających z właściwości toru transmisyjnego lub sygnału zbiorczego. Przetwarzanie tego typu nazywane jest transkodowaniem, kodowaniem liniowym, modulacją liniową, lub modulacją cyfrową. Wszystkie te określenia stosowane są szczególnie w radiokomunikacji ruchomej, gdzie niejednokrotnie występuje potrzeba prowadzenia modulacji "pomocniczych", w których sygnał użytkowy nie jest przedmiotem przetwarzania, lecz ich wykorzystanie poprawia jakość transmisji.

Przetwarzanie analogowo-cyfrowe powinno spełniać następujące podstawowe warunki:

- proces powinien wprowadzać jak najmniejszą stratę informacji;
- stanowić funkcję wzajemnie jednoznaczną, to znaczy odbiornik po przetworzeniu cyfrowo-analogowym (demulacji) powinien odtworzyć sygnał oryginalny;
- parametry ciągu impulsów sygnału cyfrowego (zwanego także kodowym) powinny być niezależne od charakteru przetwarzanego sygnału.

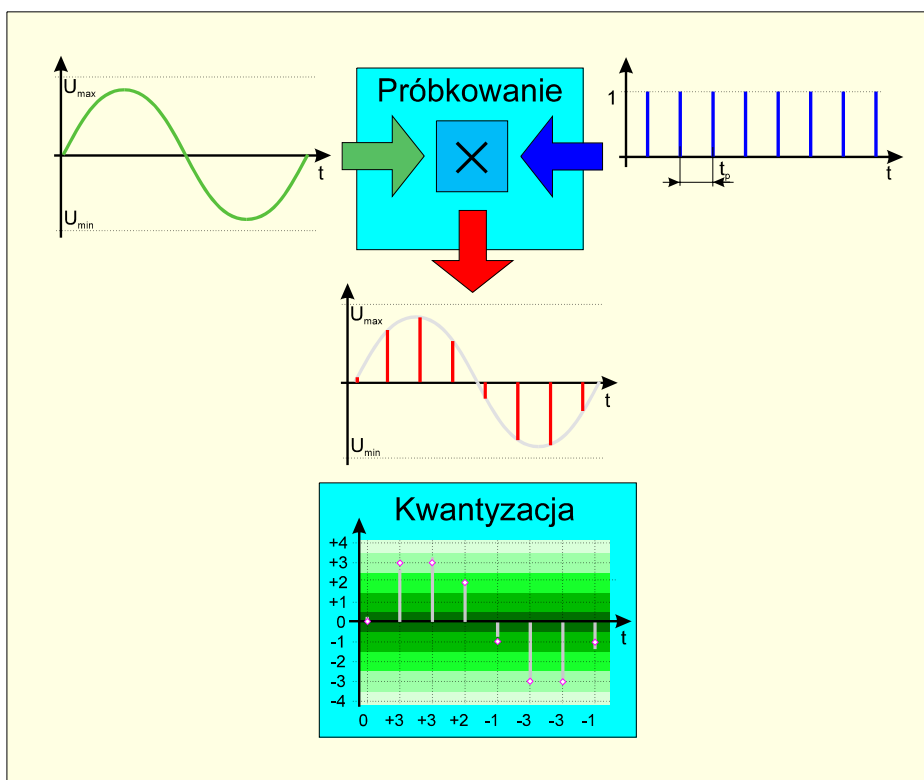
Za pomocą najprostszego sygnału cyfrowego sygnału binarnego, można przesyłać wyłącznie dwa stany: "0" lub "1". Błędy wprowadzone przy takim bezpośrednim sposobie kodowania sygnału analogowego (jest sygnał/nie ma sygnału) byłyby niedopuszczalnie duże. Dlatego też, za pomocą sygnału cyfrowego rozróżnia się nie dwa stany sygnału analogowego, lecz informację o sygnale analogowym - liczbę binarną, która może określać, w którym przedziale wartości, zwanym poziomem lub przedziałem kwantowania, znajduje się chwilowa wartość sygnału analogowego. Numerowi przedziału kwantowania odpowiada

n -bitowa liczba binarna, reprezentowana przez ciąg n impulsów o wartościach "0" lub "1". Ten właśnie sposób przetwarzania a/c nazwano modulacją impulsowo-kodową PCM.

Modulacja PCM jest stosowana powszechnie w większości cyfrowych sieci telekomunikacyjnych na świecie. Jej powszechność związana jest z wiernością przetwarzania i odtwarzania sygnału analogowego oraz parametrami sygnału cyfrowego.

Proces przetwarzania analogowo-cyfrowego nakłada pewne warunki wstępne na sygnał analogowy. Zakładając, że istnieje opisująca go funkcja $f(t)$, niezbędne jest wypełnianie przez nią tzw. warunków Dirichleta tj. ciągłości (przynajmniej odcinkami), posiadania skończonej liczby ekstremów oraz ograniczonego widma (powyżej pewnej częstotliwości górnej f_g , funkcja gęstości widmowej $a(f)$ powinna mieć wartości równe zero). Dowodzi się, że tylko taki sygnał można bez dużych przekłamań (nadmiernej utraty) niesionej informacji poddać modulacji analogowo-cyfrowej.

Modulacja PCM jest wieloetapowym procesem, na który składają się trzy podstawowe operacje: próbkowanie, kwantowanie i kodowanie. Ponadto, w obecnie wykorzystywanych urządzeniach stosowane jest przedstawione dalej komparatorowanie. Choć jego wpływ na jakość sygnału jest istotny, nie jest ono etapem modulacji, lecz stanowi odrębne działanie prowadzone z uwagi na fizjologię procesów słuchowych. Uproszczony, blokowy schemat funkcjonowania modulatora PCM przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Schemat funkcjonowania przetwornika PCM

Próbkowanie polega na zamianie ciągłego sygnału analogowego na ciąg impulsów o amplitudzie równej chwilowej wartości sygnału w momencie próbkowania i ustalonej częstotliwości powtarzania $f_p = t_p^{-1}$, zwanej częstotliwością próbkowania. Częstotliwość ta zależna jest od częstotliwości maksymalnej sygnału próbkowanego; Dla telefonii wykorzystującej sygnały zawarte w paśmie $0,3 \div 3,4 \text{ kHz}$ - $f_p \geq 6,8 \text{ kHz}$ (przyjęto $f_p = 8 \text{ kHz}$). Sygnał po próbkowaniu jest nieciągły w dziedzinie czasu, lecz nadal jest sygnałem analogowym.

W kolejnym kroku otrzymany ciąg impulsów poddawany jest kwantowaniu. Kwantowanie jest właściwym procesem cyfryzacji sygnału. W tej operacji następuje zamiana analogowej wartości próbki sygnału na liczbę o wartości należącej do ograniczonego zbioru. Kwantowanie prowadzone jest przy następujących założeniach:

- określonej rozpiętości zmian sygnału wejściowego czyli ograniczonym zakresie przetwarzania;
- podziale zakresu przetwarzania na n części (przedziałów kwantowania) i przyporządkowaniu im liczb stanowiących ich unikalne numery.

Kwantowanie polega na sprawdzeniu, w którym przedziale kwantowania znajduje się próbka sygnału, zaś jego wynikiem jest numer, który poddawany jest kodowaniu.

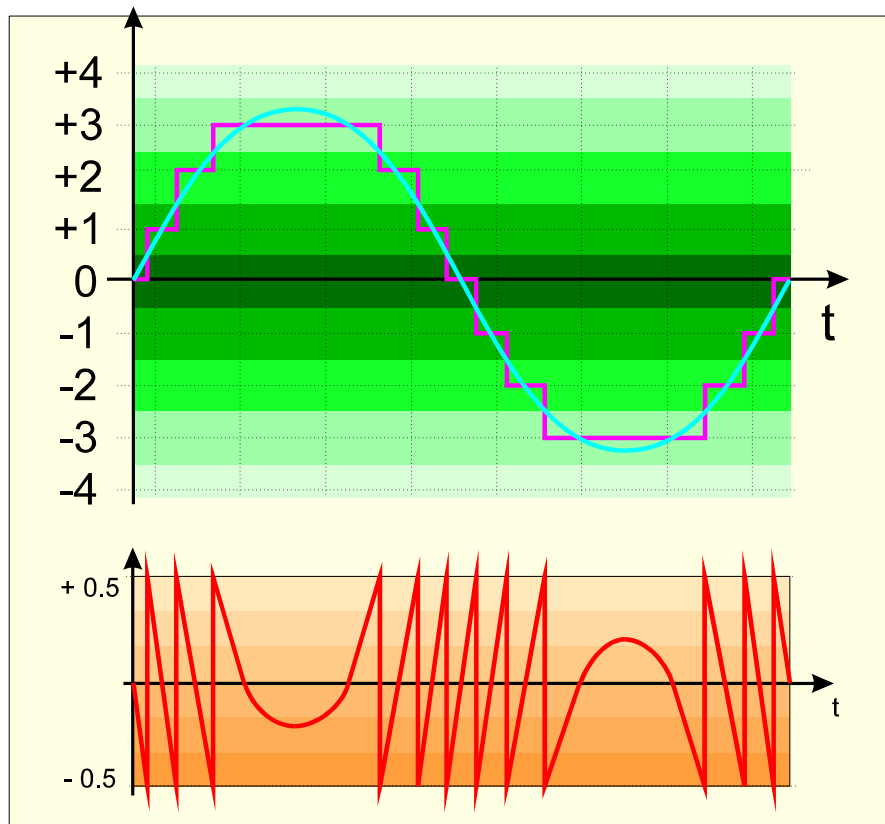
Kodowanie oznacza przy tym przyporządkowanie numerowi przedziału kwantowania sygnału cyfrowego, czyli ciągu impulsów o ustalonych parametrach (liczba impulsów, czas trwania i amplituda impulsu), przy czym w szczególności określony jest sposób odwzorowywania stanów "0" oraz "1".

W ten sposób analogowy sygnał pierwotny, po próbkowaniu i przypisaniu w procesie kwantowania liczby określającej numer przedziału kwantowania, w którym znajduje się próbka, zostaje przekształcony do postaci cyfrowej. Ponieważ znany jest zakres zmian napięcia wejściowego (U_{min} , U_{max}), a liczba przedziałów kwantowania jest ustalona i równa N , ich szerokość ξ może być łatwo wyznaczona jako:

$$\xi = \frac{U_{max} - U_{min}}{N}$$

Wartość ξ określa dokładność przetwarzania analogowo-cyfrowego w modulacji PCM. Podczas

odtworzenia (demodulacji) sygnału, z ciągów impulsów można odebrać informację, w którym przedziale znajdowała się zakodowana wartość próbki. Najmniejszy średni błąd przy demodulacji występuje, gdy sygnał jest odtwarzany w połowie grubości przedziału kwantowania. Błąd ten wprowadza do sygnału odtwarzanego zniekształcenia zwane zniekształceniami kwantowania lub (nieprawidłowo, ale zgodnie z odczuciem słuchowym) "szumem kwantowania" (rys. 3).



Rys. 3. Powstawanie szumu kwantowania PCM

Zniekształcenia te są cechą charakterystyczną wszystkich modulacji analogowo-cyfrowych, które prowadzą do utraty części informacji niesionej przez sygnał. Jakość odtworzenia sygnału analogowego określa się poprzez stosunek sygnał/zniekształcenia kwantowania (lub poprzez odstęp sygnał - zniekształcenia). Np. dla sygnału odtwarzanego w punkcie „P” na rys. 2.3. stosunek sygnał/zniekształcenia wynosi:

$$\frac{U_S}{U_N} = \frac{2.5}{0.25} = 10 \quad \text{czyli} \quad a_q = P_S - P_N = 10 \log \frac{P_S}{P_N} = 10 \text{ dB}$$

Porównując tę wartość z odstępem sygnał/szum rzędu 25 ÷ 35 dB, zachowywanym w systemach analogowych dla całego toru transmisyjnego z uwzględnieniem wszystkich zakłóceń i zniekształceń można stwierdzić, że w podanym przykładzie jakość przetwarzania jest niedopuszczalna. Dokładność odtwarzania zdekodowanego sygnału można poprawić przez zmniejszenie szerokości przedziałów kwantowania. Podział zakresu przetwarzania na n przedziałów powoduje zapis numeru w systemie binarnym na $k = \log_2 n$ pozycjach, czyli wytworzenie po każdym próbkowaniu k -bitowego ciągu. Dla 8 przedziałów kwantowania (rys. 2.3) mamy więc 3-bitowe ciągi, odpowiadające każdej próbce sygnału analogowego. Przy częstotliwości próbkowania 8 kHz sygnał cyfrowy ma przepływność $\nu = 3 \times 8000 = 24 \text{ kbit/s}$. Wymagane dla transmisji takiego sygnału pasmo to ok. 12 kHz (trzykrotnie szersze niż dla sygnału analogowego). (Szerokość zajmowanego przez sygnał cyfrowy pasma wynika z twierdzenia Shannona postaci

$H = B \log_2(S/N + 1)$, gdzie: H - przepływność sygnału cyfrowego (bit/s), B - pasmo (Hz), S - średnia moc sygnału, zaś N - średnia moc szumów. W tym przypadku założono, że transmitowana będzie wyłącznie pierwsza harmoniczna sygnału cyfrowego, co daje ok. 2 bity/Hz.) Uzyskanie odstepu sygnału od zniekształceń rzędu 35 dB dla średniego poziomu wysterowania przetwornika wymaga zwiększenia

liczby przedziałów do 256 i w konsekwencji zwiększenia długości ciągów do 8 impulsów, co oznacza zwiększenie przepływności sygnału cyfrowego do $\nu = 8 \times 8000 = 64 \text{ kbit/s}$. Odpowiadająca tej przepływności sygnału cyfrowego szerokość pasma to ok. 32 kHz.

Dla kodu o 8 cyfrach mamy do czynienia z $2^8=256$ przedziałami kwantowania. Stąd szczytowa wartość błędu kwantowania wyniesie:

$$U_N = \Delta U_S * \frac{1}{2} * \frac{1}{2^N - 1} = \Delta U_S * \frac{1}{2} * \frac{1}{2^8 - 1},$$

natomiast skuteczną wartość błędu można wyznaczyć z zależności:

$$U_{N_{sk}} = \frac{\Delta U_S}{\sqrt{12}} * \frac{1}{2^N - 1},$$

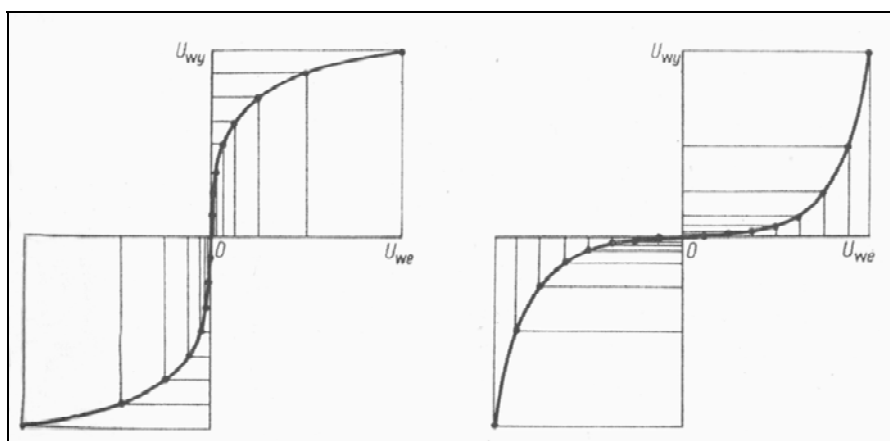
gdzie ΔU_S - przewidywana maksymalna wartość szczytowa sygnału poddanego procesowi przekształcenia. Na podstawie rys. 2.3. możemy także stwierdzić, że składowa błędów na brzegach każdego z przedziałów kwantowania zbliżona jest do 0,5 jego wysokości. Oznacza to, że dla słabych sygnałów, które nie wykorzystują całego zakresu przetwarzania, odstęp sygnału od zniekształceń będzie jeszcze mniejszy. Dla całego przedziału kwantowania średni odstęp zniekształceń kwantowania wyraża się wzorem:

$$a_q = 10 \log \frac{P_S}{P_N} = 6N + P_S = 1.8 \text{ [dB]},$$

z którego wynika niedopuszczalne pogorszenie jakości sygnału o niskim poziomie odtwarzanego w demodulatorze.

Rozwiązanie tego problemu można osiągnąć przez zastosowanie techniki noszącej nazwę komparatorowania, które składa się z dwóch procesów: następującej w nadajniku kompresji sygnału i jego ekspansji dokonywanej w odbiorniku.

Kompresor przyporządkowuje zmiennym przedziałom kwantowania sygnału wejściowego zawsze takie same przedziały kwantowania sygnału wyjściowego. Proces ten ma charakter nieliniarny. Aby przywrócić linearność kanału w ekspandorze dokonuje się operacji odwrotnej - jednakowym przedziałom sygnału wejściowego przyporządkowuje się zmienne przedziały kwantowania sygnałów wyjściowych, tak jak przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyki kompresji i ekspansji

Charakterystyka kompresji $U_{wy} = f(U_{we})$ jest tak dobrana, aby mogły być spełnione narzucone warunki na odstęp sygnału od zniekształceń kwantowania oraz efekty wynikające z ziarnistości kanału analogowego. realizowanego w sposób cyfrowy (wartość przeników i szumów w kanale nieobciążonym). Charakterystyka ta jest prostoliniowa dla x w zakresie od 0 do $1/A$, a powyżej tej wartości (aż do $x = 1$) charakterystyka jest zbliżona do logarytmicznej. Wartość A wybiera się stosownie do narzuconych

wymagań na zniekształcenia kwantowania.

Charakterystyki ekspandora wyrażają się zależnościami odwrotnymi w stosunku do charakterystyki kompresora jako $y = f^{-1}(x)$. Zastosowanie procesu kompresji zmienia rozkład zniekształceń kwantowania. Przedziały kwantowania mają wówczas zróżnicowane rozmiary, tak że do wartości $1/A$ odstęp sygnału od zniekształceń rośnie proporcjonalnie, natomiast powyżej tej wartości jest stały i nie zależy od mocy sygnału. Zatem w tym zakresie ($1/A, 1$) powinny się znaleźć wartości skuteczne sygnałów, które mają być przesyłane w danym systemie z dopuszczalnymi zniekształceniami. Należy jednak uwzględnić, że w miarę zbliżania się do granic zakresu kodera (do poziomu przecięcia) zniekształcenia zwiększają się na skutek ograniczenia sygnału.

Przez odpowiedni wybór współczynnika A i liczby przedziałów kwantowania N można dla danego sygnału uzyskać dopuszczalną wartość zniekształceń kwantowania oraz zminimalizować przeniki i szumy, spowodowane ziarnistością kanału.

W celu przeprowadzenia kompresji sygnału w etapie kwantowania przyporządkowuje się próbkom sygnału nie ośmio- lecz dwunastobitowe numery przedziałów kwantowania, gdyż zakres wartości sygnału wejściowego (U_{\min}, U_{\max}) dzieli się nie na 256, lecz na 4096 poziomów. Efektem jest zwiększenie odstepu sygnał/zniekształcenia kwantowania. Kompresja polega na skróceniu 12-bitowych ciągów kodowych do postaci 8 bitowej, zgodnie z Tab. 1.

Tablica 1. Kompresja sygnału PCM w standardzie europejskim

Nr grupy przedziałów kwantowania	Liczba przedziałów w grupie	Kod przed kompresją	Kod po kompresji
7	1024	S1WXYZabcdef	S111WXYZ
6	512	S01WXYZabcde	S110WXYZ
5	256	S001WXYZabcd	S101WXYZ
4	128	S0001WXYZabc	S100WXYZ
3	64	S00001WXYZab	S011WXYZ
2	32	S000001WXYZa	S010WXYZ
1	16	S0000001WXYZ	S001WXYZ
0	16	S0000000WXYZ	S000WXYZ

Po przeprowadzeniu kompresji sygnału zachowana jest 8-bitowa długość słowa kodowego, odpowiadającego każdej próbce, więc zachowana jest także standardowa przepływność sygnału równa 64 kbit/s. Jak wynika z tabeli, dla próbek o najmniejszych wartościach nie następuje utrata informacji - wszystkie najbardziej znaczące niezerowe bity (WXYZ dla sekcji "0" i 1WXYZ dla sekcji "1") są po kompresji zachowane. Dla próbek o większych wartościach tracona jest informacja o wartości próbki zawarta w bitach na pozycjach a,b,c,...f. Związane z utratą informacji zniekształcenie kwantowania rośnie ze wzrostem wartości próbki, lecz odstęp sygnał/zniekształcenie nie maleje i jest wystarczający, przekraczając dla średniej wartości sygnału wejściowego (analogowego) 35 dB.

Poddawanie sygnału telefonicznego kompresji jest stosowane we wszystkich urządzeniach PCM, przy czym obowiązują dwa podstawowe standardy: w Stanach Zjednoczonych i w Japonii stosuje się kompresję sygnałów według formuły $\mu = 225$. natomiast w Europie według formuły $A = 87.6$. Obydwie nazwy pochodzą od parametru krzywej aproksymującej charakterystykę kompresji. W Europie jej charakterystyka opisywana jest zależnością:

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{Ax}{1 + \ln A} & 0 \leq x \leq \frac{1}{A} \\ y &= \frac{1 + \ln Ax}{1 + \ln A} & \frac{1}{A} \leq x \leq 1 \end{aligned} \right\}$$

W odbiorniku i demodulatorze sygnału cyfrowego przebiega proces odwrotny do kompresji - ekspansja sygnału. Ekspansja przebiega z zastosowaniem charakterystyki odwrotnej do charakterystyki kompresji, a sygnał po ekspansji ma postać 13-elementową. Proces ekspansji przedstawia Tab. 2.

Tablica 2. Dekompresja sygnału PCM w standardzie europejskim

Nr grupy przedziałów kwantowania	Liczba przedziałów w grupie	Kod przed ekspansją	Kod po ekspansji
7	1024	S111WXYZ	S1WXYZ1000000
6	512	S110WXYZ	S01WXYZ100000
5	256	S101WXYZ	S001WXYZ10000
4	128	S100WXYZ	S0001WXYZ1000
3	64	S011WXYZ	S00001WXYZ100
2	32	S010WXYZ	S000001WXYZ10
1	16	S001WXYZ	S0000001WXYZ1
0	16	S000WXYZ	S0000000WXYZ1

Odtworzenie sygnału po procesie komandorowania w demodulatorze PCM obarczone jest błędem wzrastającym ze wzrostem wartości zakodowanej próbki. Zastosowanie komandorowania poprawia jednak odstęp sygnał/ zniekształcenia, a więc ogólnie jakość sygnału jest lepsza.