

**ZESPÓŁ LABORATORIÓW TELEINFORMATYKI TRANSPORTU**

**ZAKŁAD INŻYNIERII TRANSPORTU LOTNICZEGO  
I TELEINFORMATYKI (ITLIT)**

**Politechnika  
Warszawska**

**Wydział  
Transportu**



**LABORATORIUM ZITLIT**

INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA NR 10

**Modulacja impulsowo-kodowa PCM**

© ZITLIT WT PW, DO UŻYTKU WEWNĘTRZNEGO

**Warszawa 2023**

## 1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest prezentacja procesu modulacji impulsowo-kodowej PCM. Zakres ćwiczenia obejmuje obserwację oraz rejestrację podstawowych dla tego zagadnienia kwestii i przebiegów, a w szczególności:

- próbkowanie sygnału mowy, częstotliwość Nyquista, twierdzenie o próbkowaniu,
- kwantyzacja, szum kwantyzacji,
- kodowanie, fazowanie, synchronizacja,
- zwielokrotnienie czasowe, przepływność.

## 2. Stanowisko laboratoryjne

W trakcie realizacji ćwiczenia laboratoryjnego studenci będą korzystać z następujących urządzeń technicznych:

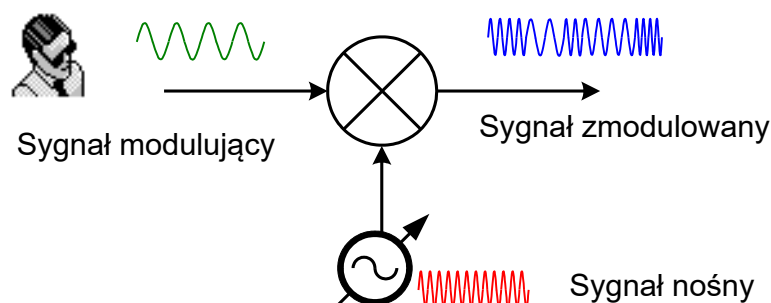
- multimetr elektroniczny M-3270 (Rys. 4.2c),
- komputerowa przystawka oscyloskopowa PCSU1000 (Rys. 4.2d),
- komputer PC z systemem Windows 10,
- moduł zasilacza SO3538-8D (Rys. 4.2a),
- moduł generatora SO5127-2R (Rys. 4.2b),
- moduł modulatora PAM SO3537-7G (Rys. 4.2e),
- moduł modulatora PCM SO3537-7N (Rys. 4.2f).

## 3. Wprowadzenie teoretyczne

### 3.1. Proces modulacji

W najogólniejszym przypadku **modulacja** to proces dostosowania (przekształcenia) sygnału informacyjnego do postaci dogodnej dla transmisji przez kanał telekomunikacyjny (Rys. 3.1). Polega na zmienianiu jednego z parametrów nośnika informacji (tzw. **fali nośnej**) zgodnie ze zmianami sygnału informacyjnego, nazywanego **sygnałem modulującym**. W wyniku modulacji powstaje **sygnał zmodulowany**, który zawiera w sobie pierwotny sygnał informacyjny, lecz ma inne parametry fizyczne (w szczególnym przypadku – elektryczne). Mówiąc prościej, modulacja to proces, w którym zmiana jednej wielkości fizycznej jest uzależniona od zmian drugiej wielkości fizycznej. Jest, więc procesem nakładania sygnału zawierającego informację (**modulującego**) na sygnał fali nośnej (**modulowanego**), w wyniku czego powstaje sygnał **zmodulowany**. Warto pamiętać, że występujące w procesie modulacji

sygnały wcale nie muszą być sygnałami elektrycznymi. Mało tego, modulacja może mieć także czysto naturalny charakter i nie musi być wytworem człowieka. Technicznie proces modulacji realizowany jest w urządzeniu zwanym **modulatorem**.



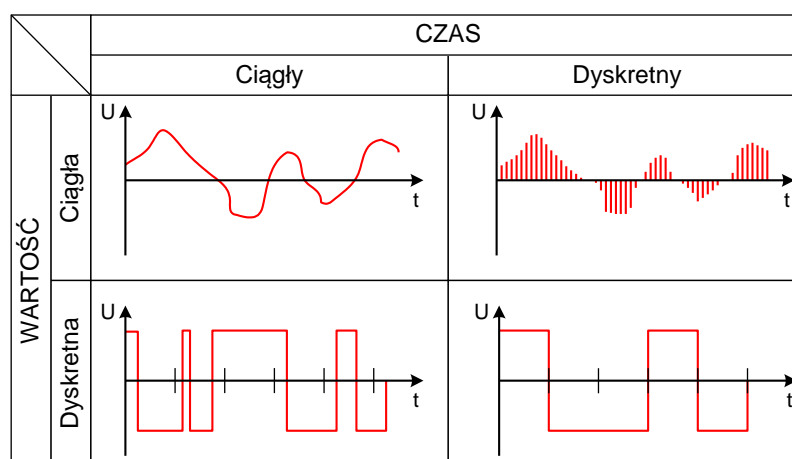
Rys. 3.1. Ogólny schemat procesu modulacji

Procesem odwrotnym do modulacji, którego celem jest odtworzenie sygnału pierwotnego (modulującego) z sygnału zmodulowanego, jest **demodulacja**, technicznie realizowana w urządzeniu zwanym **demodulatorem**.

Przyczyn stosowania modulacji jest wiele:

- wzrost skuteczności przesyłania sygnałów oryginalnych,
- dopasowanie widmowe sygnału do charakterystyki przenoszenia kanału,
- wzrost sprawności transmisji,
- prostsze urządzenia nadawcze dla sygnałów wysokiej częstotliwości (w.cz.),
- możliwość zwielokrotnienia sygnałów w torze,
- uodpornienie na szumy i zakłócenia,
- wzrost dokładności przy zastosowaniach w pomiarach i automatyce (sterowaniu).

Natura otaczającego nas świata ma zdecydowanie charakter **analogowy** – wszystkie wielkości ulegają zmianom w sposób ciągły, zarówno w zakresie zmian ich wartości, jak i czasu, w jakim zmiany te zachodzą. Ewentualne naturalne zmiany **dyskretne** (skokowe) są w istocie jedynie zmianami szybkimi, dokonanyymi w krótkim czasie. Ich natura pozostaje analogowa. Dotyczy to szczególnie zjawisk i wielkości naturalnych – ani temperatura, ani ciśnienie nie „przeskoczą” od jednej wartości do drugiej. Zmiana może nastąpić jedynie w sposób ciągły (analogowy) a różnica w charakterze tych zmian może dotyczyć jedynie ich szybkości i zakresu.



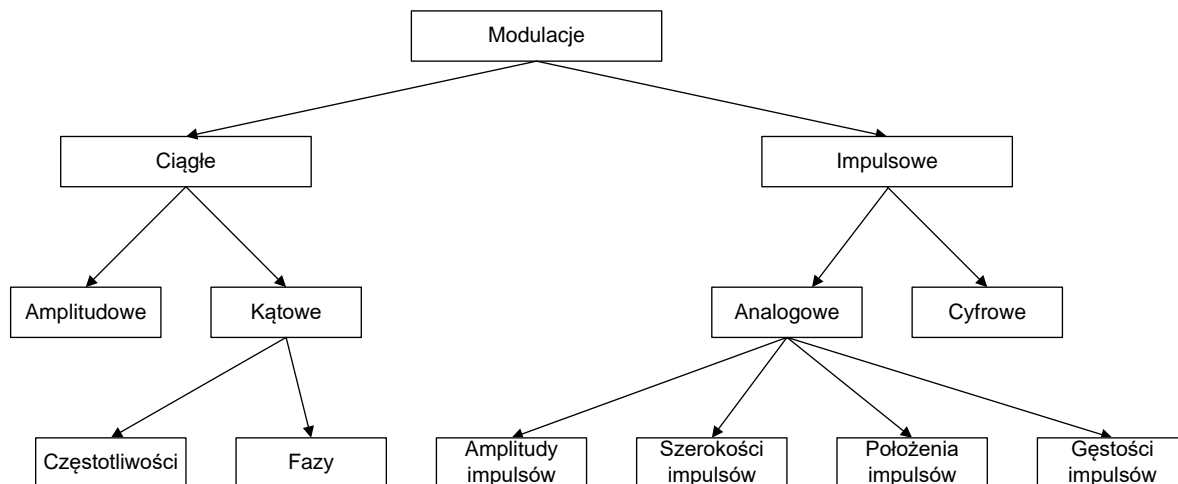
Rys. 3.2. Klasyfikacja sygnałów

W ujęciu telekomunikacyjnym wielkości te możemy traktować jak sygnały, które są niczym innym jak fizyczną reprezentacją określonej informacji – np. o natężeniu dźwięku. Z grubsza i ze słyszenia wiemy, że sygnały dzielimy na analogowe i cyfrowe. Tak naprawdę jednak podstawowy podział to sygnały ciągłe i dyskretne. Istotne jest jednak to, że zarówno ciągły, jak i dyskretny, może być nie tylko czas obserwacji zmian, ale i wartość sygnału. To daje nam aż cztery kombinacje (Rys. 3.2). Tymczasem wspomniany podział na analogowe i cyfrowe daje zaledwie dwie, gdzie ciągły jest czas i wartość (analogowe) oraz dyskretny czas i wartość (cyfrowe).

W **sygnałach analogowych** wielkość niosąca informację zmienia swoją wartość w sposób ciągły i w dozwolonym przedziale zmian (np.  $U_{\min}$  -  $U_{\max}$ ) liczba jej wartości jest nieograniczona – sygnał jest reprezentowany z nieskończoną dokładnością. Jak go zmierzyć, to już inny problem. **Sygnałem cyfrowym** nazywamy sygnał, którego wielkość (lub wielkości) niosąca informację może (mogą) przyjmować ściśle określoną i skończoną liczbę wartości. Liczba wartości wielkości niosącej informację w najprostszym przypadku może być ograniczona do dwóch i wówczas mamy do czynienia z sygnałem binarnym. Widać już w tym miejscu, że sygnał analogowy przetworzony do postaci cyfrowej zawsze będzie obciążony pewnym błędem – jest reprezentowany z pewnym przybliżeniem.

Najbardziej ogólnie modulacje dzielimy (Rys. 3.3) na **ciągłe** i **impulsowe**. Modulacje ciągłe ze względu na charakter fali nośnej nazywane są także sinusoidalnymi, natomiast w przypadku modulacji impulsowych „falę nośną” stanowi okresowy ciąg impulsów prostokątnych. Do modulacji ciągłych należą między innymi, stosowane w prostych systemach radiokomunikacyjnych, modulacja amplitudy (AM), modulacja fazy (PM) i

modulacja częstotliwości (FM). Natomiast modulacje impulsowe możemy podzielić na analogowe i cyfrowe. Przykładem modulacji cyfrowej jest prezentowana na ćwiczeniu modulacja impulsowo-kodowa PCM.



Rys. 3.3. Podział modulacji

### 3.2. Modulacja PCM

Modulacja impulsowo-kodowa PCM (*PulseCodeModulation*) została opatentowana już w 1938 roku, przez francuskiego inżyniera, którym był AlecReeves (Rys. 3.4). Jednakże trudności w skonstruowaniu odpowiednio tanich i szybkich układów przełączających oraz przetworników analogowo-cyfrowych spowodowały, że jej praktyczna realizacja możliwa była dopiero po wojnie, po wynalezieniu tranzystora.



Rys. 3.4. AlecReeves

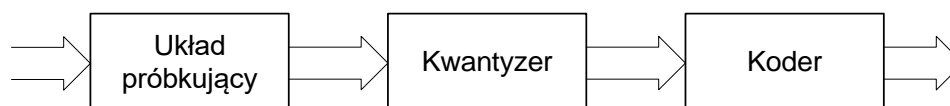
Modulacja PCM jest w chwili obecnej najczęściej stosowanym w telekomunikacji przetwarzaniem analogowo-cyfrowym, czyli przekształceniem sygnału analogowego do postaci cyfrowej (bitowej) znacznie dogodniejszej do dalszego przetwarzania. PCM jest, więc

przede wszystkim systemem teletransmisyjnym, choć przy jej zastosowaniu może być także realizowana komutacja, co jest dodatkową korzyścią tego procesu.

W modulacji PCM, rozumianej jako przekształcenie analogowo-cyfrowe, można ogólnie wyróżnić 3 kolejne etapy:

- próbkowanie,
- kwantowanie,
- kodowanie.

Pozwalają one na uzyskanie w określonych odstępach czasu wartości próbki sygnału analogowego, jej zakodowanie do postaci cyfrowej, a następnie przesłanie strumienia bitów zawierającego wartości numeryczne wszystkich próbek z każdego z kanałów. Najprostszy schemat modulatora PCM przedstawia rysunek (Rys. 3.5).



Rys. 3.5. Najprostszy schemat modulatora PCM

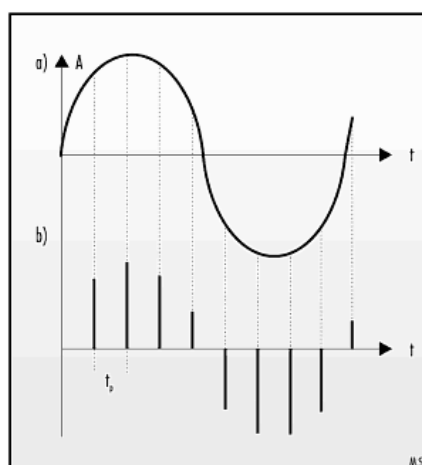
Zwrócić należy uwagę, że przetwarzanie analogowo-cyfrowe powinno spełniać następujące podstawowe warunki:

- proces przetwarzania musi wprowadzać jak najmniejszą utratę informacji,
- przetwarzanie powinno być funkcją wzajemnie jednoznaczną, tzn. odbiornik po przetworzeniu cyfrowo-analogowym (demodulacji) powinien odtworzyć sygnał oryginalny,
- parametry ciągu impulsów sygnału cyfrowego (zwanego także kodowym) powinny być niezależne od charakteru przetwarzanego sygnału.

### 3.2.1. Próbkowanie

Proces **próbkowania** polega na pobraniu wartości sygnału analogowego, tzw. **próbki**, w ściśle określonych odstępach czasu. Te odstępy czasu nazywane są **okresem próbkowania** i określane są częstotliwością pobierania próbek, zwaną **częstotliwością próbkowania**. Próbkowanie jest, więc przekształceniem sygnału ciągłego w ciąg jednakowo odległych od

siebie impulsów o amplitudach równych wartościom chwilowym w momentach pobierania próbek. Najłatwiej jest wyobrazić sobie ten proces jako cykliczne otwieranie na krótki czas bramki, przez którą przepuszczany jest fragment przebiegu próbkowanego. Istotne jest, że zarówno okres próbkowania, jak i szerokość próbki (czas otwarcia bramki) są stałe. Pamiętać należy, że mimo nieciągłości w dziedzinie czasu sygnał spróbkowany jest nadal sygnałem analogowym. Zaznaczyć też należy, że wierność odtwarzania sygnału zależy przede wszystkim od częstotliwości próbkowania i praktycznie nie zależy od czasu trwania próbki. Ideę opisywanego procesu przedstawia rysunek (Rys. 3.6).



Rys. 3.6. Próbkowanie sygnału analogowego z odstępem czasu  $t_p$

Próbkowanie sygnału analogowego we wszystkich systemach cyfrowych opiera się na twierdzeniu Shannona (Rys. 3.7), zwanym **twierdzeniem o próbkowaniu**.



Rys. 3.7. Claude Elwood Shannon

Twierdzenie o próbkowaniu mówi, że w celu zachowania informacji (aby przebieg próbkowany mógł być odtworzony z dostateczną wiernością) częstotliwość próbkowania  $f_p$  powinna być przynajmniej dwukrotnie większa od maksymalnej częstotliwości sygnału próbkowanego  $f_g$  (1)

$$f_{pmin} = 2 \cdot f_g \quad (1)$$

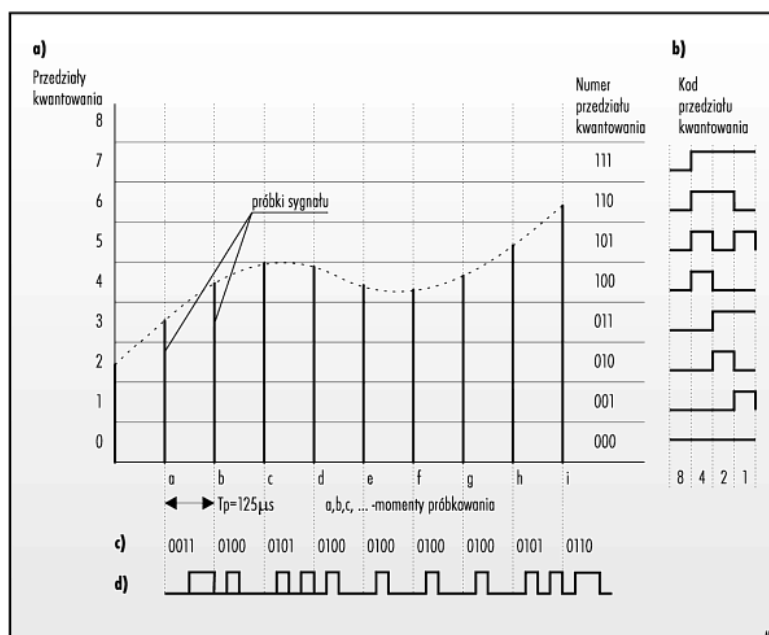
Częstotliwość ta nazywana jest częstotliwością Nyquista. Ponieważ stwierdzono, że dla przesłania ludzkiej mowy poprzez linię analogową (tor miedziany) z należytą zrozumiałością po stronie odbiorczej, wystarczające jest **pasmo podstawowe** z zakresu 300 – 3400 Hz, to dla takiego źródła wystarczającą częstotliwością próbkowania jest 6800 Hz. Jednak w momencie opracowywania pierwszych teletransmisyjnych systemów cyfrowych (koniec lat 50-tych XX w.) istniały problemy z praktyczną realizacją filtrów, służących do eliminacji kopii sygnału wejściowego powstających w procesie próbkowania. Stąd na podstawie międzynarodowych uzgodnień przyjęto ogólnie założenie, że mowa ludzka będzie próbkowana z częstotliwością 8 kHz. Oznacza to, że niezależnie od przyjętego systemu teletransmisyjnego wartość sygnału dla każdego z kanałów rozmównych pobierana jest co okres próbkowania  $T_p = 125 \mu s$ , co wprost wynika z przyjętej częstotliwości próbkowania,  $T_p = 1/f_p$ .

W wyniku próbkowania uzyskujemy ciąg próbek, których wartości amplitud przyjmują dowolną wielkość z całego zakresu zmian przebiegu próbkowanego. Proces ten jest, więc procesem analogowym, mimo że pojawianie się kolejnych próbek w czasie ma charakter dyskretny (skokowy). Ponieważ w wyniku tego procesu powstaje nowy przebieg o odmiennej od pierwotnego naturze (jednak ściśle z nim związany) to proces ten także zaliczamy do modulacji. Nosi on nazwę modulacji amplitudowo-impulsowej PAM (*PulseAmplitudeModulation*).

### 3.2.2. Kwantowanie

Cały zakres zmian amplitudy sygnału wejściowego dzielony jest na skończoną liczbę podzakresów, zwanych **przedziałami kwantyzacji**. Zakwalifikowanie pobranej wartości próbki do jednego z tych dyskretnych (o skończonej liczbie) przedziałów zmian amplitudy nazywamy **kwantowaniem** lub **kwantyzacją**. Ilustrację tego procesu zamieszczono poniżej (Rys. 3.8).





Rys. 3.8. Proces kwantyzacji

W przypadku modulacji PCM stosowane jest 256 takich przedziałów, co wynika bezpośrednio z przyjętej liczby bitów kodowania. Liczba przedziałów kwantowania wynosi, bowiem  $2^n$ , gdzie  $n$  oznacza długość słowa kodowego. Dla modulacji PCM ustalono ją na osiem, więc  $2^8 = 256$  przedziałów kwantyzacji. W modulacji PCM przedziały kwantowania są „ponumerowane” od 1 do 128 w przypadku wartości dodatnich i od 0 do – 127 dla wartości ujemnych.

Zauważmy, że próbka (konkretnie jej amplituda/szczyt) znajdująca się w określonym przedziale kwantyzacji może znajdować się w dowolnym miejscu tego przedziału – tuż na początku, w środku, pod koniec. Za każdym razem próbka taka będzie mieć inną wartość amplitudy, minimalnie ze względu na małą szerokość przedziału kwantyzacji, ale jednak inną. Tymczasem cały czas będzie należeć do tego samego przedziału kwantyzacji. Tym samym przypisana jej wartość dyskretna odzwierciedlana przez przedział, w którym się znajduje, obarczona jest pewnym przybliżeniem. Przybliżenie to jest właśnie wspomnianym na wstępie błędem przetwarzania sygnału z postaci analogowej na cyfrową, zwanym tutaj **błędem kwantowania**. Można go opisać wzorem

$$e[n] = x_q[n] - x[n] \tag{2}$$

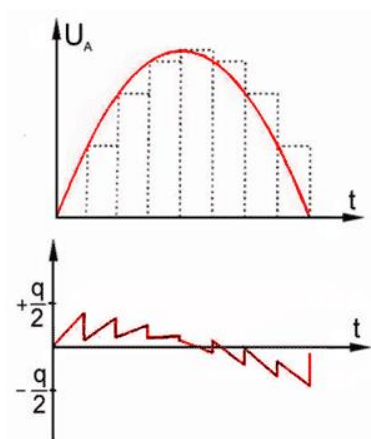
Błąd kwantowania mieści się w zakresie:

$$-\frac{q}{2} < e \leq \frac{q}{2} \quad (3)$$

Wartość średnia tego błędu w całym zakresie przetwarzania sygnałów jest równa zero. Co wynika z:

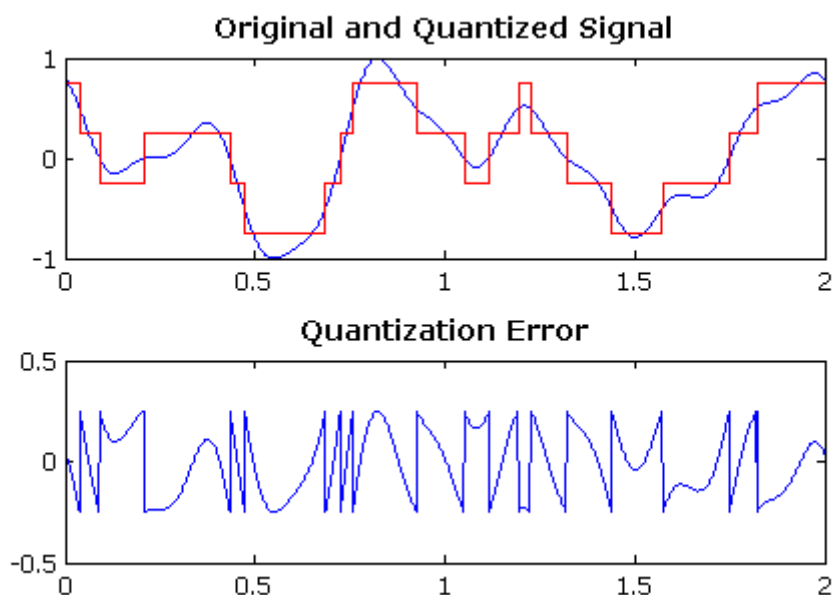
$$e_{sr} = \frac{1}{q} \int_{-q/2}^{q/2} e \, de = 0 \quad (4)$$

Wykazana średnia nie może być używana do reprezentacji błędu kwantowania, gdyż oznacza jedynie to, że średnio połowa wartości próbek jest zaokrąglana w górę, a druga połowa jest zaokrąglana do dolnej wartości przedziału.



Rys. 3.9. K. Szklanny, *Multimedia, materiały do wykładów*, 2004 [źródło: <http://edu.pjwstk.edu.pl/wyklady/mul/scb/index70.html>]

Wprowadzanie błędów kwantowania nierozzerwalnie wiąże się z procesem kwantyzacji i nie ma sposobu na jego całkowite wyeliminowanie. W rezultacie przebieg analogowy odtworzony z przebiegu cyfrowego zawsze będzie się różnił od pierwotnego przebiegu analogowego (sygnału nadanego). Różnica ta nazywana jest **szumem kwantyzacji** (Rys. 3.10).

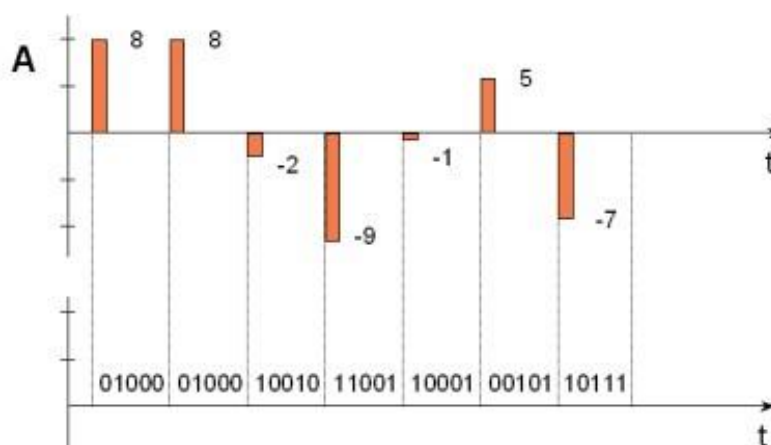


Rys. 3.10. Szum kwantyzacji. Przebieg niebieski – sygnał nadany, przebieg czerwony sygnał [źródło: [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization\\_\(signal\\_processing\)#/media/File:Quanterr.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization_(signal_processing)#/media/File:Quanterr.png)]

Wielkość szumu kwantyzacji zależy od szerokości przedziałów kwantyzacji – im większa szerokość, tym większy błąd. Pozornie, rozwiązaniem będzie tutaj zmniejszenie szerokości przedziałów kwantyzacji. Wymaga to jednak zwiększenia liczby bitów, na których zapisywana będzie próbka (szczegóły w punkcie nt. kodowania), a to wpływa na zwiększenie wymaganej przepustowości pasma transmisyjnego. Wymagany jest, zatem pewien kompromis między liczbą a szerokością przedziałów kwantyzacji. Zauważmy jednak, że waga błędu kwantyzacji jest różna i uzależniona od wielkości próbki. Mała próbka (o małej amplitudzie) będzie obciążona proporcjonalnie znacznie większym błędem niż próbki duże (o dużych amplitudach). Natura tego zjawiska znacznie utrudnia eliminację błędu kwantyzacji w praktyce. Z tego powodu wprowadzono dodatkowy proces obróbki sygnału, którego istota sprowadza się do nierównomiernego podziału poziomów kwantyzacji – małych dla małych próbek i dużych dla próbek o dużych wartościach. Pozwala to na skompensowanie zróżnicowania wpływu błędu kwantyzacji na próbki o różnych amplitudach. W przypadku, kiedy wielkość każdego z przedziałów kwantyzacji jest taka sama proces nazywamy **kwantyzacją liniową**, natomiast, kiedy wielkość przedziałów dla mniejszych wartości próbki jest mniejsza, niż dla większych, to mamy do czynienia z **kwantyzacją nieliniową**. W przypadku drugim szerokość przedziału kwantyzacji może się zmieniać liniowo albo skokowo.

### 3.2.3. Kodowanie

Modulacja PCM należy do modulacji cyfrowych, więc wymaga zamiany wielkości próbki na postać cyfrową, w tym przypadku binarną. Proces przyporządkowania próbki do określonej wartości cyfrowej nazywamy **kodowaniem**. Najłatwiej zrozumieć go, jako zapisanie dziesiętnego numeru przedziału kwantyzacji, do której została zakwalifikowana próbka, w postaci binarnej (Rys. 3.11).



Rys. 3.11. Proces kodowania

Oznacza to, że numerowi przedziału kwantowania, do którego przypisana została chwilowa wartość próbki sygnału analogowego, zostaje przypisana n-bitowa wartość binarna reprezentowana przez ciąg n impulsów o umownych wartościach "0" lub "1". Ponieważ jako podstawę kodowania w systemie PCM przyjęto 8 bitów, to także każda próbka musi być reprezentowana przez odpowiadającą jej sekwencję ośmiu bitów (Tab. 3.1). Widać stąd od razu, że zwiększenie liczby przedziałów kwantyzacji wpływa na wzrost liczby bitów potrzebnych do zakodowania każdej próbki.

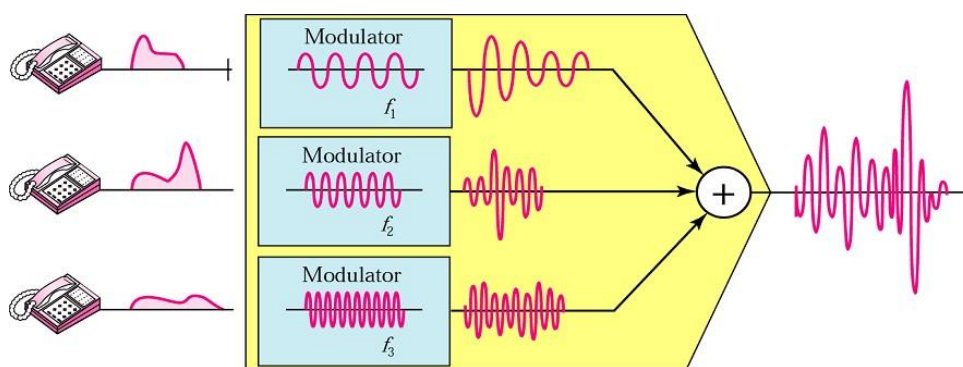
Tab. 3.1. Fragment tablicy kodowania 8-bitowego (uwaga na bit znaku)

Dziesiętnie	Binarnie	Dziesiętnie	Binarnie
-2	10000010	....	.....
-1	10000001	252	11111100
0	00000000	253	11111101
+1	00000001	254	11111110
+2	00000010	255	11111111

W rzeczywistych systemach PCM stosuje się dwa rodzaje nieliniowego kodowania sygnału mowy. Pierwszy wykorzystywany w systemach pracujących na terenie obu Ameryk określany jest mianem **kodowania według reguły  $\mu$** , natomiast w systemach europejskich rozpowszechnione jest **kodowanie wg prawa A**. Dodatkowo wyróżnia się kodowanie **symetryczne i niesymetryczne**.

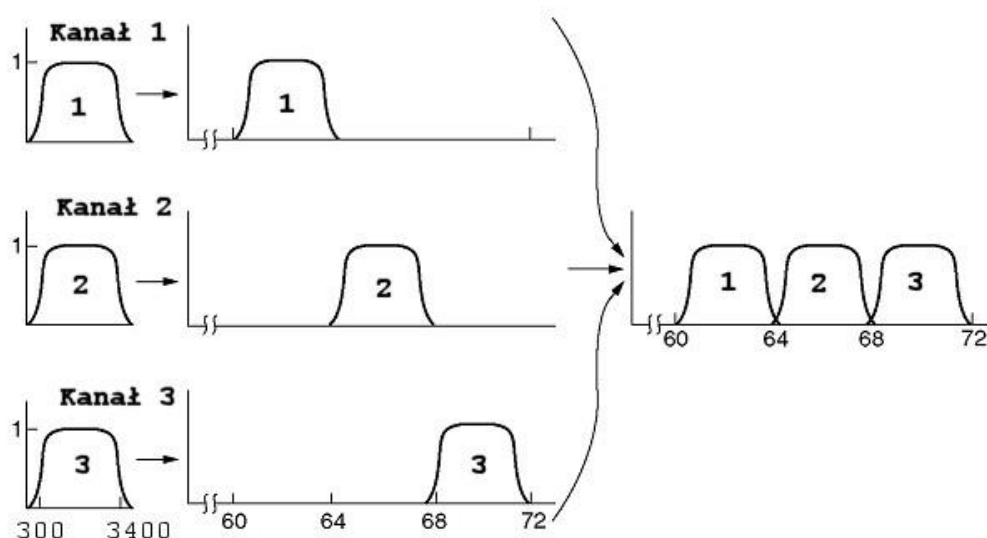
### 3.2.4. Zwiłokrotnienie

Podstawowym problemem telekomunikacji, od samych jej początków i ze względów czysto techniczno-ekonomicznych, był problem przesłania jak największej liczby rozmów we wspólnym łączu telekomunikacyjnym. Zauważmy, że każda „rozmowa” ze względu na parametry elektryczne reprezentujących ją sygnałów jest identyczna – mieści się w paśmie podstawowym, od 300 do 3400Hz. Fizyczne ich połączenie we wspólnym torze telekomunikacyjnym nie jest, więc możliwe – doprowadziłoby do wzajemnego nałożenia i zagłuszenia wszystkich sygnałów. Potrzebne jest, zatem odpowiednie przetworzenie każdego sygnału (rozmowy) w taki sposób, by można je było przesłać wspólnym łączem. Proces, w wyniku którego staje się możliwa transmisja wielu identycznych (z punktu widzenia parametrów elektrycznych) sygnałów we wspólnym torze transmisyjnym nazywamy **zwiłokrotnieniem**. Pierwszym, stosowanym na masową skalę, rozwiązaniem tego problemu było tzw. **zwiłokrotnienie częstotliwościowe** (w pełnej nazwie **zwiłokrotnienie z podziałem częstotliwościowym**). Każde pasmo podstawowe modulowało inną częstotliwością nośną (Rys. 3.12), w wyniku czego powstałe przebiegi zmodulowane zajmują inny wycinek, tzw. **kanal**, podzielonego pasma transmisyjnego. Poszczególne pasma, jak i pasmo transmisyjne, rozpatrywane jest tutaj w funkcji częstotliwości, której graficzne przedstawienie nazywamy **widmem**.



Rys. 3.12. Proces zwiłokrotnienia częstotliwościowego

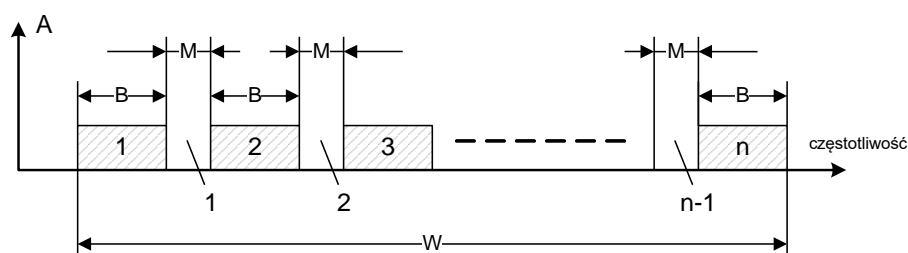
Zwielokrotnienie w systemach analogowych realizowane jest poprzez przesunięcie każdego biorącego udział w zwielokrotnieniu pasma podstawowego (każdej rozmowy) w inne miejsce dostępnego pasma transmisyjnego (Rys. 3.13).



Rys. 3.13. Widmo pasm podstawowych i pasma transmisyjnego przy zwielokrotnieniu częstotliwościowym

Pomiędzy poszczególnymi kanałami musi istnieć przerwa (obszar wolny od sygnałów), zabezpieczająca poszczególne kanały przed wzajemnym nakładaniem i zakłócaniem się. Przerwa ta nazywana jest **odstępem międzykanałowym**. Niezależnie od przyjętych odstępów międzykanałowych możliwe jest przenikanie części sygnału z jednego kanału do innych kanałów. Te częściowe sygnały są głównym źródłem zakłóceń w systemach ze zwielokrotnieniem częstotliwościowym i nazywane są **zakłóceniami międzykanałowymi**.

Przyjmując, że zarówno pasma poszczególnych kanałów  $B$ , jak i występujące między nimi odstępy międzykanałowe  $M$ , są sobie równe, (Rys. 3.14) to całkowite pasmo takiego systemu jest bardzo łatwe do obliczenia (5). Równe jest sumie iloczynu pasm  $B$  i ilości poszczególnych kanałów  $n$  oraz iloczynowi  $n-1$  (na początku i końcu pasma odstęp nie jest potrzebny) szerokości odstępów międzykanałowych  $M$ .



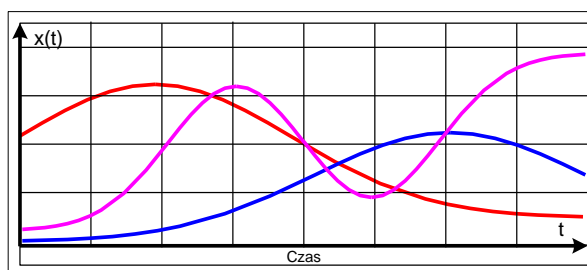
Rys. 3.14. Całkowite pasmo transmisyjne  $n$  kanałów o szerokości  $B$  i odstępie międzykanałowym  $M$ 

$$W = n * B + (n - 1) * M \quad (5)$$

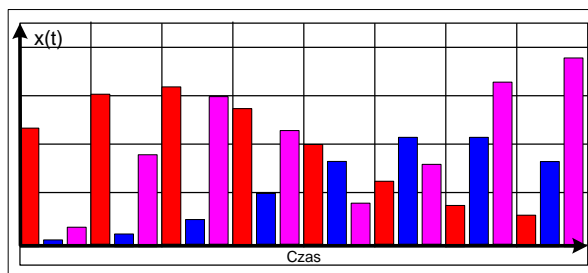
W ogólnej postaci (6) ten wzór, to po prostu suma pasm wszystkich kanałów i wszystkich odstępów międzykanałowych.

$$W = \sum_{i=1}^n B_i + \sum_{j=1}^{n-1} M_j \quad (6)$$

Zwielokrotnienie częstotliwościowe na długie lata stało się podstawą telekomunikacji. Ma jednak szereg wad, przede wszystkim w zakresie słabej odporności na zakłócenia, nie tylko międzykanałowe. Rozwiązaniem tych problemów stała się modulacja PCM, umożliwiającą powstanie nowego rodzaju zwielokrotnienia. Zauważmy (Rys. 3.8 i Rys. 3.11), że szerokość (czas trwania) każdej próbki jest znacznie mniejsza od okresu próbkowania – czasu pomiędzy kolejnymi próbkami. W rzeczywistości te dysproporcje są jeszcze większe. W rezultacie pomiędzy próbkami jest sporo wolnego miejsca, w którym nic się nie dzieje – urządzenie czeka na kolejną próbkę, która pojawi się po czasie wyznaczonym okresem próbkowania. Dlaczego zatem nie umieścić tam (pomiędzy próbkami pierwszej rozmowy) kolejnych próbek z rozmowy drugiej? Znow zostanie trochę miejsca, więc można tak postąpić z próbkami rozmowy trzeciej, czwartej, itd. (Rys. 3.15 i Rys. 3.16). Oczywiście nie w nieskończoność – czas trwania próbek jest większy od zera i w końcu, przy stałym okresie próbkowania, zabraknie miejsca.

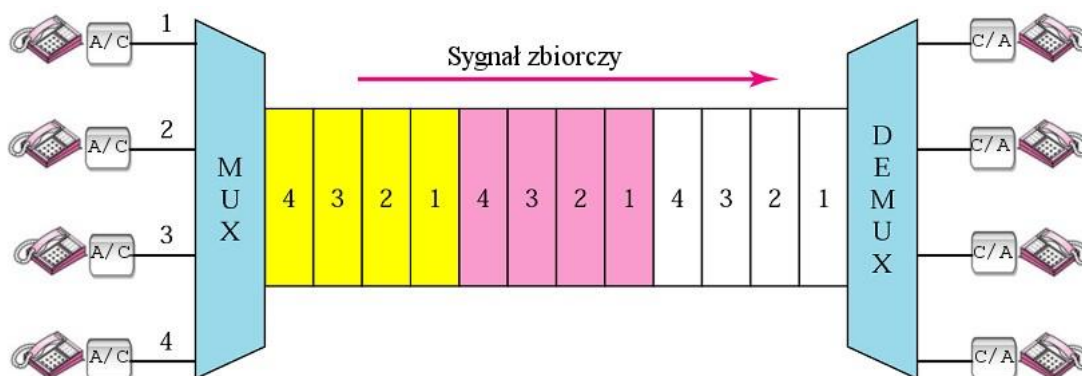


Rys. 3.15. Sygnały trzech kanałów



Rys. 3.16. Próbkki trzech kanałów rozdzielone w czasie

Niemniej, próbki te mogą już wystąpić we wspólnym torze transmisyjnym. Każda z nich występuje jednak w innej chwili czasu, który został podzielony pomiędzy poszczególne próbki (kanały). Z tego powodu proces taki nazywamy **zwielokrotnieniem z podziałem czasowym** lub w skrócie **zwielokrotnieniem czasowym**.

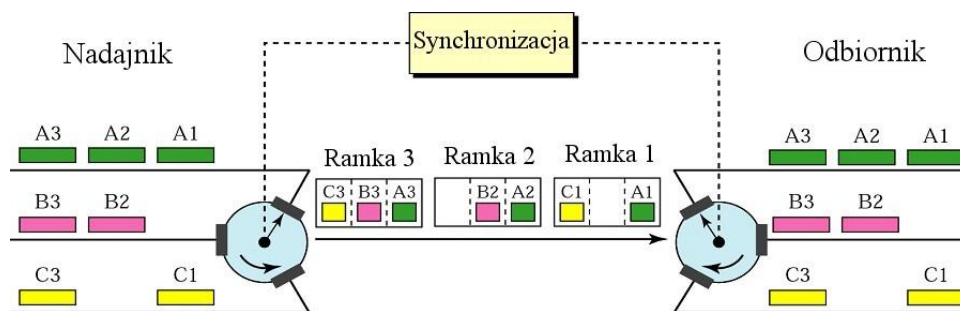


Rys. 3.17. Proces zwielokrotnienia czasowego na przykładzie systemu 4-kanałowego

PCM jest jednak systemem cyfrowym. Dlatego próbki najpierw zamieniane są do postaci cyfrowej na opisanej wcześniej zasadzie i multipleksowaniu podlegają ich 8-bitowe reprezentacje kodowe (Rys. 3.17). Niemniej, proces zwielokrotnienia możliwy jest do zrealizowania także w wersji analogowej na podstawie próbek modulacji PAM.

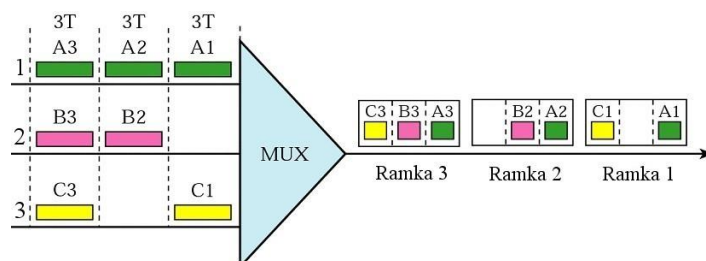
Ideowo zasada zwielokrotnienia czasowego jest prosta. Można ją porównać do pracującego „w kółko” przełącznika (Rys. 3.18), który kolejno przepatruje poszczególne kanały.





Rys. 3.18. Zasada działania multiplexera

Na wyjściu tego przełącznika pojawia się **sygnał zbiorczy**, zawierający kolejno następujące po sobie próbki poszczególnych kanałów (Rys. 3.17). Czas, jaki w sygnale zbiorczym przypada na określoną porcję danych nazywamy **szczeliną czasową**, w przypadku czasu przypadającego na jedną zakodowaną próbkę **szczeliną kanałową**. Urządzenie realizujące proces zwielokrotnienia (*Multiplexing*) nazywamy **multiplekserem** MUX, a realizujący proces odwrotny **demultiplekserem** DEMUX. Na każdy pełny cykl odczytu wszystkich próbek ze wszystkich kanałów (pełny obrót owego przełącznika) przypada proces formowania odczytanych próbek cyfrowych w znormalizowaną porcję danych, tzw. **ramkę danych** (Rys. 3.19). Ramka danych jest znormalizowana, tzn. dla danego systemu ma określony czas trwania i ilość danych binarnych.



Rys. 3.19. Formowanie cyfrowych próbek w ramkę danych

### 3.2.5. Fazowanie i synchronizacja

W najprostszym przypadku długość ramki danych zwielokrotnionych w opisany wyżej sposób  $n$  kanałów podstawowych jest równa sumie wszystkich bitów wszystkich próbek w danym okresie próbkowania  $T$ . Okres próbkowania jest stały i jednakowy dla wszystkich kanałów, więc czas trwania ramki danych wynosi  $n \cdot T$ . Przykładowa ramka danych może wyglądać następująco (kolor żółty zastąpiono niebieskim):

Ramka 3			Ramka 2			Ramka 1		
01101001	11010010	11001001	00000000	01101101	11100100	10101010	00000000	11110001

Na wyjściu multiplexera pojawiają się, więc kolejno wyprowadzane bity:

01101001110100101100100100000000011011011110010010101010000000011110001

Jednak urządzenie odbiorcze nie widzi „kolorów”, a więc nie widzi w strumieniu danych poszczególnych kanałów, podobnie jak nie widzi ich człowiek po usunięciu kolorów:

01101001110100101100100100000000011011011110010010101010000000011110001

Wskazanie np. drugiego kanału w drugiej ramce danych możliwe jest dopiero po odliczeniu odpowiedniej porcji bitów. I tutaj zaczyna się problem. W którym momencie rozpocząć liczenie? Skąd mieć pewność, że dobrze policzyliśmy? Jak utrzymać odpowiednie tempo owego liczenia? Zauważmy, że pominięcie tylko jednego bitu sprawi, że dane ulegną „przesunięciu” i nie będą już miały nic wspólnego z rzeczywistością – danymi nadanymi. Głównym problemem jest tutaj zgranie rytmu pracy nadajnika i odbiornika, tzw. **synchronizacja**. Nie gwarantuje jej praca z taką samą szybkością (zegary nadajnika i odbiornika pracują z tą samą częstotliwością), ponieważ nie ma dwóch idealnie i zawsze tak samo pracujących generatorów. Pozostawione na dostatecznie długi czas muszą się **rozsynchronizować** i identyfikacja poszczególnych kanałów zostanie zakłócona. Szczególnie dotkliwie daje się odczuć tą sytuację przy **długich ciągach zer i jedynek**, czy szeregu następujących po sobie jednakowych bitów. Dlatego niezbędne stało się wprowadzenie do sygnału zbiorczego dodatkowej informacji, tzw. **sygnałówfazowania**, umożliwiającego identyfikację chwili rozpoczęcia się nowej ramki danych. Sygnał fazowania musi mieć ściśle określoną postać, po prostu narzuconą sztywno kombinację bitów. Może to być np. 11111111 lub 01010101, ważne jest jednak to, że taka kombinacja nie może już zostać użyta do kodowania próbek. W przeciwnym wypadku próbka o takiej kombinacji/wartości zostałaby potraktowana jako sygnał fazowania i doszłoby do utraty synchronizacji. W najprostszym przypadku sygnał fazowania dołączany jest na początku każdej ramki danych. Wydłuża tą ramkę, więc zmniejsza użyteczną przepływność danych, ale zapewnia synchronizację.

111111110110100111010010110010011111111100000000110110111100100

Sygnał fazowania wyznacza odbiornikowi moment, od którego ma rozpocząć opisane wcześniej „odliczanie”. Pomiedzy sygnałami fazowania upływa na tyle mało czasu (taktów zegara), że synchronizacja nie zostanie utracona. Mało tego, można sygnał fazowania umieścić, w co drugiej, albo i co trzeciej ramce, jeśli liczba kanałów jest mała lub umieścić ich więcej, jeśli liczba kanałów jest duża, jak ma to miejsce w rzeczywistym systemie PCM.

### 3.2.6. Przepływność

Ilość danych binarnych przesyłanych w ciągu jednej sekundy nazywamy **przepływnością**. W odniesieniu do kanału transmisyjnego maksymalna przepływność, jaką można uzyskać w danym kanale, określa jego **przepustowość**. Zarówno przepływność, jak i przepustowość, wyrażamy w bitach na sekundę (b/s) lub w wielokrotnościach (kb/s, Mb/s, Gb/s). Przepustowość kanału w zastosowaniach cyfrowych jest odpowiednikiem szerokości pasma w zastosowaniach analogowych. Dzięki stosowanym technikom modulacji i kodowania przepustowość jest zwykle kilkakrotnie większa od szerokości pasma wyrażonej w hercach. Maksymalna teoretyczna przepustowość kanału, bez wpływu na przyjętą technikę modulacji, jest ograniczona prawem Shannona, które jest fundamentalnym prawem telekomunikacji (3.6a):

$$P = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (7)$$

gdzie:

P – maksymalna teoretyczna przepustowość,

W – szerokość pasma,

S/N – stosunek mocy sygnału do mocy szumu (parametr charakteryzujący tor).

Ponieważ mówiąc o przepustowości kanału zwykle mamy na myśli maksymalną przepływność, jaką w tym kanale można uzyskać, to przepustowość kanału nazywana jest także **przepływnością kanału**.

Obliczenie przepływności strumienia danych w zastosowaniach opartych na zwielokrotnieniu i modulacji PCM jest bardzo proste (7). Wystarczy obliczyć ilość bitów przypadających (transmitowanych) w czasie jednej sekundy. Podstawą wyznaczającą tutaj upływ czasu jest okres próbkowania  $T_p$ . To w tym czasie wszystko „musi się wydarzyć”: próbkowanie, kwantowanie, kodowanie, zwielokrotnienie, fazowanie, sygnalizacja. Dlatego ilość bitów przypadająca na okres próbkowania jest właśnie podzielona przez ten czas. Ponieważ okres jest odwrotnością częstotliwości, to wspomniana ilość bitów może być po prostu pomnożona przez częstotliwość próbkowania  $f_p$ . Dodatkowo trzeba uwzględnić (dodać) bity fazowania i sygnalizacji oraz fakt, że nie muszą przypadać na całą ramkę tylko raz, ani występować w każdej ramce.

$$P = \frac{n * b_k + b_f + b_s}{T_p} = (n * b_k + b_f + b_s) * f_p \quad (8)$$

gdzie:

P– przepływność wyrażona w b/s,

n– ilość kanałów,

$b_k$ – ilość bitów użyta do kodowania każdej próbki,

$b_f$ – ilość bitów fazowania przypadająca na ramkę,

$b_s$ – ilość bitów sygnalizacji przypadająca na ramkę,

$T_p$ – okres próbkowania,

$f_p$ – częstotliwość próbkowania.

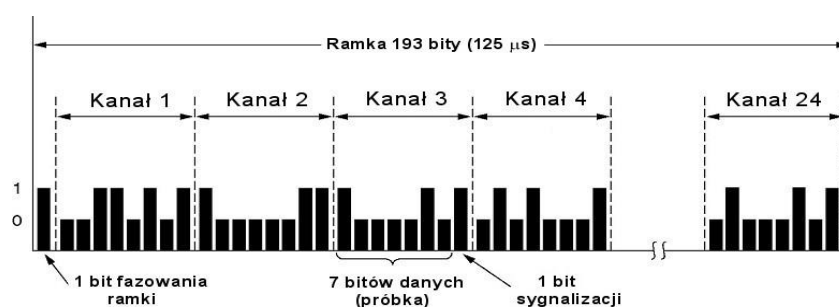
### 3.3. Praktyczne systemy PCM

Istnieje kilka praktycznych realizacji systemów PCM. Niezależnie jednak od wersji, występują w nich dwie cechy wspólne. Pierwsza, to standard pasma kanału rozmównego zawierający się w granicach 300 – 3400 Hz, druga to częstotliwość próbkowania takiego sygnału wynosząca 8 kHz. Różnice między poszczególnymi systemami polegają natomiast na różnych metodach kodowania, przepływności sygnału zbiorczego, szybkości oraz rodzaju fazowania i dodatkowych kodów sygnalizacji transmitowanych przez łącze.

#### 3.3.1. System T1 (D1)

System T1, obecnie częściej nazywany D1, opracowany w laboratoriach Bella i wprowadzony w roku 1962 był pierwszym systemem teletransmisyjnym wykorzystującym

technikę cyfrową w łączu teletransmisyjnym. W systemie tym ramka transmisyjna (Rys. 3.20) tworzona jest przez 24 kanałowe szczeliny czasowe, po których przesyłany jest 1 bit fazowania ramki, dając łączną przepływność 1544 kb/s.



Rys. 3.20. Ramka danych w systemie T1

W każdym kanale (szczelinie czasowej) przesyłanych jest 8 bitów, z czego 7 jest wykorzystywanych do kodowania sygnału mowy, natomiast ostatni bit używany jest do celów sygnalizacji dla tego kanału. Oznacza to, że w systemie T1 została zastosowana sygnalizacja skojarzona z kanałem realizowana z szybkością 8 kb/s. Przy kodowaniu sygnału mowy wykorzystana jest zasada  $\mu=100$ . System T1 był standardem dla Ameryki Północnej zanim nie został zastąpiony przez system D2. Przepływność, będąca sumą iloczynów częstotliwości próbkowania i przyjętej liczby bitów kodowania dla wszystkich kanałów wykorzystana w tym systemie wynikała z naleciałości historycznych i chęci wykorzystania istniejących torów miedzianych, na których co 1830 metrów instalowane były tzw. cewki pupinizacyjne. W miejsce cewek chciano zainstalować regeneratory, stąd, aby odległości między nimi zostały zachowane liczbę bitów kodowania ograniczono do 7-miu. Wymagało to zastosowania kompresji liczby bitów, do poziomu akceptowalnego z punktu widzenia zajętości pasma transmisyjnego, ponieważ wcześniej na podstawie subiektywnych badań dokonanych podczas wstępnych studiów ustalono, że zadowalającą transmisję zakodowanych sygnałów mowy można osiągnąć przy 12-bitowym kodowaniu liniowym. Aby to osiągnąć zastosowano kwantowanie nieliniowe.

### 3.3.2. System D2

Pierwotnie system T1 przewidywany był do zastosowań lokalnych i na krótkich łączach międzycentralowych. Postęp technologiczny w obszarze produkcji układów scalonych zaowocował pojawieniem się coraz szybszych i wydajniejszych układów. Umożliwiło to gwałtowną ekspansję cyfrowych systemów teletransmisyjnych, nie tylko pod względem

ilości, ale i obszaru zastosowań. Szybko okazało się, że wykorzystane 7-bitowe kodowanie nie gwarantuje dostatecznej jakości przy wielostopniowym przetwarzaniu na połączeniach dalekosiężnych. Występuje tam, bowiem wielokrotnie przetwarzanie sygnału z postaci analogowej i cyfrowej oraz odwrotnie, za każdym razem obarczone coraz większym błędem. Błąd ten jest oczywiście większy dla systemu 7-bitowego, niż 8-bitowego. Kolejnym problemem było stosowanie cyfrowej komutacji (zestawiania połączenia), o której projektanci systemu T1 mogli nawet jeszcze nie myśleć.

System D2 opracowano jako udoskonalenie systemu D1. Jest on także 24-kanalowym systemem ze 193 bitem fazowania ramki. Ilość bitów użytych do kodowania wynosi jednak 8. Ponieważ dążono do maksymalnej zgodności z systemem D1 (m.in. tej samej przepływności), to pojawiła się potrzeba poprawy parametrów (szybkości) sygnalizacji skojarzonej z kanałem. Wprowadzono pojęcie tzw. **wieloramki**, składającej się z 12 ramek i wyróżnionej 193 bitem, co drugiej ramki, będącym **sygnałem fazowania wieloramki**. Dla zachowania jednakowej przepływności w obu systemach, w ramach 6 i 12 stosowano tylko 7 bitów do kodowania, a 8 bit stał się bitem sygnalizacji skojarzonej z kanałem.

W systemie D2, podobnie jak w D1, zastosowano zasadę kodowania  $\mu$ , ale dla wartości 255. Skorygowano ją nieco dla ramki 6 i 12 w celu zminimalizowania zniekształceń kwantyzacji, wynikającej z 7-bitowego kodowania.

### 3.3.3. System 24-kanalowy UK

System UK był pierwszym, wzorowanym na systemie amerykańskim, systemem PCM wprowadzonym poza USA. Wprowadziła go *British Telecom* w 1968 r. W systemie tym pierwszy bit 8-bitowego kanału zarezerwowano do sygnalizacji oraz fazowania ramki i wieloramki, a pozostałe 7 bitów dla kodowania mowy, czyli jak w systemie T1/D1. Wprowadzono jednak wieloramkę sygnalizacyjną, która umożliwiła rozszerzenie pojemności sygnalizacyjnej i zapewniła fazowanie bez potrzeby stosowania 193 bitu. W rezultacie osiągnięto przepływność 1536 kb/s.

### 3.3.4. System 30-kanalowy CEPT

Omówione wcześniej trzy systemy PCM projektowane były jedynie z myślą o zastosowaniach transmisyjnych. Tymczasem wspomniany postęp technologiczny umożliwił powstanie i produkcję szeregu nowych, złożonych układów elektronicznych. Dzięki nim możliwa stała się nie tylko sama transmisja, ale także i komutacja. Z tego powodu podjęte

przez organizację CEPT prace normalizacyjne dla systemów PCM objęły zagadnienia cyfrowej komutacji. Od razu stało się jasne, że wielkim ułatwieniem będzie przyjęcie systemu opartego na zwielokrotnieniu binarnym (potędze 2), a nie duo-decymalnym, jak w przypadku systemów 24-kanałowych.

Pierwszy uwzględniający zagadnienia komutacji system telefonii wielokrotnej PCM 30/32 został wprowadzony w roku 1965 we Francji. W chwili obecnej jest przyjmowany jako standard w większości krajów świata. W systemie tym strumień zbiorczy tworzony jest przez 30 kanałów rozmównych i 2 kanały przeznaczone do celów sygnalizacyjno-sterujących (z tego powodu określany jest mianem „30/32”) o łącznej przepływności 2048 kb/s. Szczelina o numerze 0 jest zarezerwowana dla sygnałów fazowania ramki i wieloramki. W tej samej szczelinie przesyłane są też komunikaty o błędach i uszkodzeniach występujących w systemie. Natomiast kanał 16 wykorzystywany jest do sygnalizacji.

Parametry systemu PCM 30/32 są następujące (Tab. 3.2):

Zakres częstotliwości	300 – 3400 Hz
Częstotliwość próbkowania	8000 Hz
Liczba bitów kodowania	8
Liczba szczelin kanałowych w ramce	32
Liczba kanałów rozmównych w ramce	30
Liczba bitów w ramce	256
Przepływność	2048 kb/s
Zasada kodowania	A, A=87,6

Tab. 3.2. Parametry systemu PCM 30/32

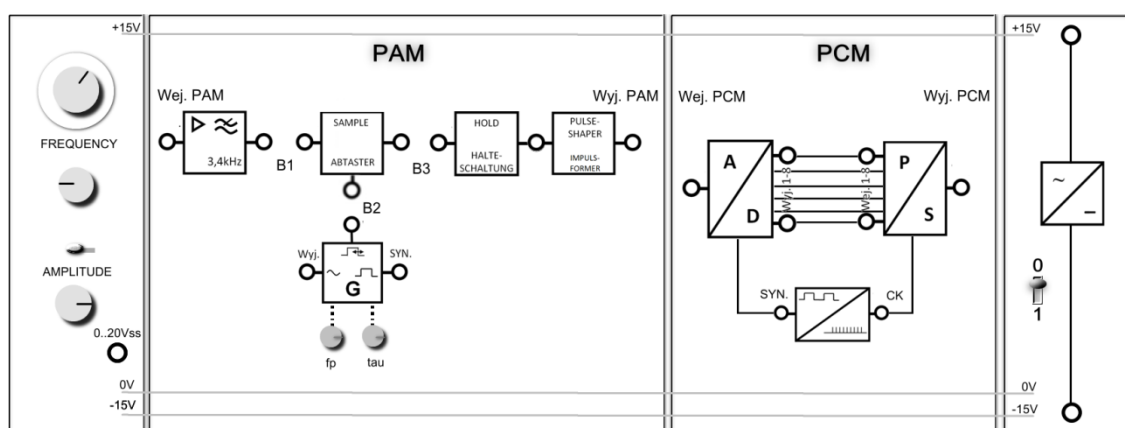
#### 4. Budowa stanowiska laboratoryjnego

Podczas ćwiczenia badany będzie jednokanałowy model systemu PCM. Z uwagi na fakt, że przedstawiana jest obróbka tylko jednego kanału niemożliwe staje się pokazanie procesu zwielokrotnienia. Ten aspekt zostanie przedstawiony przy wykorzystaniu oprogramowania, symulującego (dla zadanych parametrów) proces zwielokrotnienia i fazowania wraz z obliczeniem przepływności sygnału zbiorczego. Należy też pamiętać, że istniejące w modelu sygnały synchronizacji (SYN) i taktowania (CLK), które są przesyłane niejako „z boku”

sygnału transmisyjnego, są dalekie od rozwiązań rzeczywistych, ale kompensują brak sygnału fazowania i pozwalają przedstawić proces synchronizacji i jej zaniku. Niemniej, model jednokanałowy prezentuje wszystkie główne aspekty modulacji impulsowo-kodowej PCM:

- próbkowanie sygnału analogowego,
- wpływ częstotliwości próbkowania na jakość sygnału,
- modulacja PAM,
- kwantyzacja, wpływ kwantyzacji na jakość sygnału,
- kodowanie,
- synchronizacja,
- znaczenie i waga poszczególnych bitów.

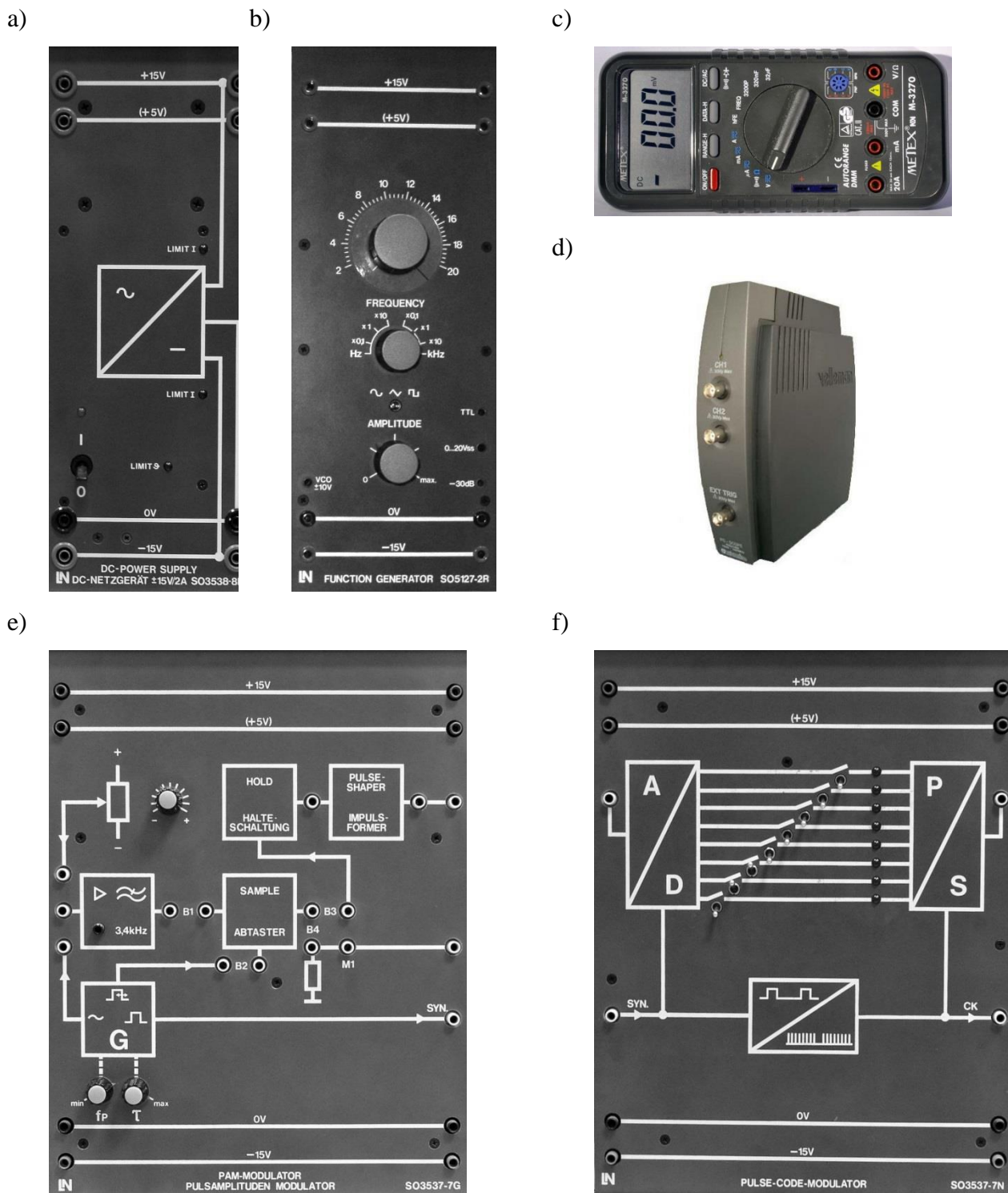
Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rysunku (Rys. 4.1).



Rys. 4.1. Schemat blokowy modelu PCM

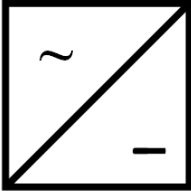
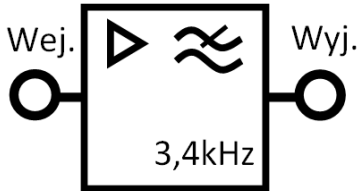
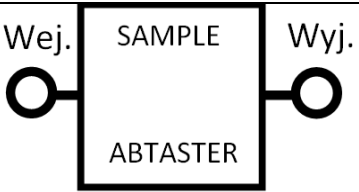

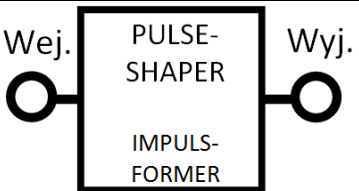
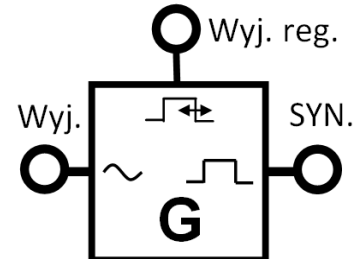
Rzeczywisty widok modułów i przyrządów wykorzystywanych podczas realizacji ćwiczenia przedstawiono na kolejnych zdjęciach (Rys. 4.2).

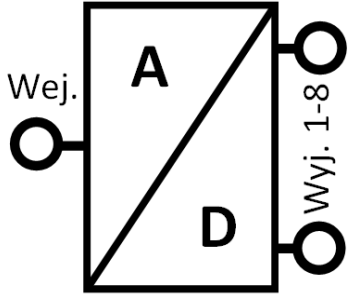
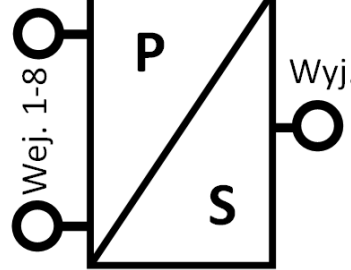
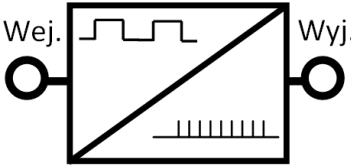




Rys. 4.2. Zestaw wchodzący w skład stanowiska laboratoryjnego PCM a) Moduł zasilacza SO3538-8D, b) Moduł generatora m.cz. SO5127-2R, c) Multimetr elektroniczny M-3270, d) Komputerowa przystawka oscyloskopowa PCSU1000, e) Moduł modulatora PAM SO3537-7G, f) Moduł modulatora PCM SO3537-7N, g) Moduł demodulatora PCM SO3537-7P, h) Moduł demodulatora PAM SO3537-7H

Opis modułów wchodzących w skład stanowiska laboratoryjnego przedstawiono w tabeli Tab. 4.1).

Schemat blokowy	Nazwa	Funkcja
	Zasilacz stabilizowany	Doprowadzenie stabilizowanego napięcia +15V, -15V
	Filtr dolnoprzepustowy 3,4kHz ze wzmacniaczem	Filtracja sygnałów powyżej pasma telefonicznego
	Blok próbkujący	Układ odczytujący wartość napięcia sygnału w chwili t
	Blok bramkujący	Układ wstrzymujący emisję sygnału próbki na czas transmisji innych próbek
	Blok formowania impulsów	Układ nadający właściwy kształt (prostokątny) kolejno transmitowanym próbkom – dogodny do przetwarzania A/C
	Blok regulowanego generatora sygnału synchronizującego system PCM	Generator fali prostokątnej sterującego pracą układu próbkującego oraz sterujący sygnałem synchronizacji

	Blok kodera analogowo – cyfrowego	Układ kodera 8 bitowego
	Blok rejestru równoległe – szeregowego	Układ zamieniający transmisję równoległą na szeregową
	Blok wytwarzania sygnału zegarowego	Układ dzielnika częstotliwości wyzwalany sygnałem synchronizacji służący do generowania sygnału zegarowego

Tab. 4.1. Zestawienie bloków funkcjonalnych wykorzystywanych modułów stanowiska PCM



## 5. Uwagi praktyczne

1. Większość obserwacji i pomiarów dokonywana jest przy wykorzystaniu komputerowej przystawki oscyloskopowej. Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy zapoznać się z instrukcją do tego urządzenia zamieszczoną na stronie internetowej obok ćwiczeń oraz z programem komputerowym PCLab2000LT.
2. Podczas pomiarów przystawką oscyloskopową należy pamiętać, że oglądane przebiegi powstają w wyniku procesu próbkowania, przez co obarczone są pewnym błędem. Błąd ten jest zależny od rodzaju (np. okresowy lub nie) i częstotliwości przebiegu.
3. Dla poprawy przejrzystości opisu przebiegu ćwiczenia zastosowano następujące skróty:
  - a. **DSO** – oznaczający **tryb pracy OSCYLOSKOP** przystawki oscyloskopowej,
  - b. **FFT** – oznaczający **tryb pracy ANALIZATOR WIDMA** przystawki oscyloskopowej.

4. Zarówno w trybie DSO, jak i FFT zaleca się włączenie markerów (*Markers*) umożliwiających precyzyjny pomiar obserwowanych wielkości elektrycznych (użycie markerów zostało opisane w instrukcji do przystawki oscyloskopowej).
5. Przy przełączaniu przystawki oscyloskopowej w tryb **FFT** zwykle należy wyłączyć przycisk wyzwalania **OFF**. Przełączenie wyzwalania w pozycję **ON** jest dopuszczalne w trybie **DSO** i ma na celu poprawę obserwacji wyświetlanych przebiegów.

UWAGA: na ogół zwykle wymaga korekty poziomu wyzwalania. Jej zaniechanie skutkuje brakiem odświeżania wykresu przebiegu i prowadzi do błędnych odczytów.

6. Rejestracja obserwowanych przebiegów (.bmp lub .jpg) jest dostępna w oprogramowaniu przystawki oscyloskopowej. Szczegółowe informacje na temat metody postępowania zamieszczono w instrukcji do przystawki oscyloskopowej.
7. Pod żadnym pozorem nie należy „upraszczać” ćwiczenia i próbować wykonywać pomiarów/obserwacji jednocześnie z kilku punktów instrukcji. Jest to najszybsza droga do pomyłki w identyfikacji przebiegów, co skutkuje odrzuceniem sprawozdania.
8. Dla uproszczenia i zwiększenia przejrzystości instrukcji wprowadzono poniższe symbole, które zostały wykorzystane w tekście.:

-  zapisz przebieg na dysku,
-  pytanie, na które odpowiedź musi znaleźć się w sprawozdaniu,

9. Ustawienie generatora należy przeprowadzić wykorzystując trzy potencjometry:
  - a. najniższy – służy do nastawiania wartości amplitudy sygnału wychodzącego z generatora – wartość tego napięcia określamy korzystając z przystawki oscyloskopowej,
  - b. środkowy (skokowy) – powiązany z najwyższym – służy do nastawiania mnożnika częstotliwości sygnału ustawianego z użyciem najwyższego potencjometru.

PRZYKŁAD:

mnożnik: x10 Hz – mnoży wartość wskazaną na najwyższym potencjometrze o 10 Hz.

- c. najwyższy – umożliwi płynną regulację wartości częstotliwości od 2 do 20

**PRZYKŁAD:**

najwyższy potencjometr: wartość 4, mnożnik: x1kHz – na wyjściu: 4 kHz

UWAGA: wyjście sygnałowe generatora funkcyjnego zostało oznaczone Vss 0..20V



## 6. Wykonanie ćwiczenia

### Prace przygotowawcze:

1. Zapoznać się z budową stanowiska laboratoryjnego. Zidentyfikować wszystkie przyrządy i moduły badawcze. Określić poszczególne bloki funkcjonalne modułów badawczych. Uruchomić program sterujący przystawką oscyloskopową. Wybrać właściwy model przystawki na etapie uruchamiania programu. W trybie DSO włączyć markery napięcia i okresu (*View ->Markers*). Ustalić „masę układu”. Odpowiedź uzasadnić. Podłączyć do kanału pierwszego (CH1) przystawki oscyloskopowej kabel **niebieski**, a kabel **czerwony** do kanału drugiego CH2. Takie podłączenie odpowiada kolorom przebiegów na ekranie komputera. Do wejścia multimetru podłączyć dwa kable: czerwony (sygnałowy) i czarny (masa). W modulatorze PAM ustawić potencjometry regulacji częstotliwości próbkowania  $f_p$  i regulacji położenia impulsu  $\tau$  w prawych skrajnych położeniach.

2. Podłączyć multimetr do wyjścia generatora funkcyjnego 0...20Vss. Przełączyć na pomiar częstotliwości *FREQ*. W to samo miejsce podłączyć kanał pierwszy CH1 przystawki oscyloskopowej. W programie przystawki oscyloskopowej włączyć tryb DSO ustawiając  $T/D = 0,2 \text{ ms}$ ;  $V/D = 2 \text{ V/dz}$ .


Kalibrując generator funkcyjny ustawiony został sygnał sinusoidalny, a markerami zaznaczono okres sygnału oraz wartość napięcia międzyszczytowego  $V_{pp}$ .



Zapoznać się z kształtem uzyskanego przebiegu.  Jaki jest jego kształt (jakość)? Czy występują zakłócenia? Jaka jest częstotliwość i okres sygnału? Jaka jest wartość napięcia międzyszczytowego oraz amplituda sygnału? 

### Modulator amplitudy impulsów PAM:



3. W modulatorze PAM podłączyć zwory (kable) B1, B2 i B3. Połączyć wyjście z generatora funkcyjnego z wejściem filtra dolnoprzepustowego 3,4 kHz modułu PAM.

Połączyć wyjście sygnału synchronizacji SYN modulatora PAM z wejściem SYN następnego modułu (modulatora PCM). Podłączyć drugi kanał (CH2) przystawki oscyloskopowej do wyjścia filtra dolnoprzepustowego. W programie przystawki oscyloskopowej włączyć drugi kanał (CH2) {V/D = 2 V/dz}.



Dokonać obserwacji.  Co różni sygnał na wejściu i wyjściu filtra dolnoprzepustowego?

 Z czego wynika zmiana i jakie zjawisko fizyczne na nią wpłynęło? Jaka jest wartość zmiany?  Odpowiedź i jej uzasadnienie zamieść w sprawozdaniu.



4. Przełączyć drugi przystawki oscyloskopowej (CH2) za blokiem formowania impulsów. Kanał pierwszy przystawki oscyloskopowej (CH1) przełączyć z wejścia do wyjścia filtra dolnoprzepustowego. W programie przystawki oscyloskopowej oba kanały ustawić w tryb DSO: T/D = 0,2 ms; CH1 V/D = 2 V/dz; CH2 V/D = 2 V/dz, wyzwalenie: ON.

Dokonać obserwacji.  Z czego składa się sygnał na kanale drugim (CH2)? Jakie są etapy modulacji i który to jest etap? Na czym polega próbkowanie sygnału? 

5. Delikatnie i powoli dokonać regulacji (od prawej do lewej) częstotliwości próbkowania dzięki potencjometrowi  $f_p$  w pozycji, która zapewni synchronizację przebiegu po próbkowaniu – nie opuszczać drugiej połowy zakresu potencjometru.




Dokonać obserwacji.  Wykorzystując markery zmierzyć odległość między kolejnymi próbkami (Pkt 5 Obserwacja 1, Pkt 5 Obserwacja 2). Porównać wyniki. Ile wynosi częstotliwość próbkowania sygnału? Jaki jest czas trwania jednego impulsu (Pkt 5 Czas trwania jednego impulsu)? Jaki wpływ ma częstotliwość próbkowania dla całego procesu modulacji, a następnie demodulacji sygnału? 

6. Przełączyć kanał pierwszy (CH1) z punktu wyjścia filtra dolnoprzepustowego do punktu B2, wyjścia generatora sygnału próbkowania. W programie przystawki oscyloskopowej w trybie DSO ustawić: T/D = 0,1 ms; CH1 V/D = 2 V/dz; CH2 V/D = 2 V/dz; wyzwalenie ON CH1. Zmieniać powoli ustawienie potencjometru regulacji częstotliwości próbkowania  $f_p$  ze skrajnie prawego do skrajnie lewego.



Dokonać obserwacji.  Z czego składa się sygnał z kanału pierwszego (CH1), a z czego składa się sygnał z kanału drugiego (CH2)? W których momentach (patrz na zbocze impulsów) pobierane są kolejne próbki? Jaka jest szerokość impulsów jak ona wpływa na próbkowanie (Pkt 6 Obserwacja 1, Pkt 6 Obserwacja 2, Pkt 6 Obserwacja 3)? 

### Modulator PCM:

7. Połączyć kablem wyjście modulatora PAM z wejściem modulatora PCM (następny moduł). Przełączyć kanał drugi (CH2) z wyjścia modulatora PAM do wyjścia modulatora PCM (za przetwornikiem analogowo-cyfrowym A/C i zamianie z postaci równoległej na szeregową P/S). W programie przystawki oscyloskopowej w trybie DSO ustawić: T/D = 0,2 ms; CH1 V/D = 2 V/dz; CH2 V/D = 2 V/dz; wyzwalenie ON CH1. Zmieniając poziom wyzwiania podjęto próbę zsynchronizowania przebiegu zakodowanego na oscyloskopie.

Dokonać obserwacji.  Dlaczego występują takie trudności w synchronizacji?  Z czego „zbudowany” jest ten zakodowany sygnał ? 

8. Obserwując diody LED modulatora PCM, sygnalizujące kolejne wartości binarne ośmiu bitów próbki, zmniejszyć częstotliwość generatora m.cz. 100 razy wykorzystując do tego celu potencjometr mnożnika.

Dokonać obserwacji.  Czy świecenie diod LED uległo zmianie? Zmniejszono jeszcze wartość częstotliwości o kolejne 10 razy i znów 10 – do minimum. Jak zmienia się i dlaczego wartość binarna kolejnych próbek? Co się dzieje z diodami LED? 



Przywrócono wartość częstotliwości 1 kHz na generatorze funkcyjnym.

9. Odłączyć przewód łączący wyjście modulatora PAM z wejściem modulatora PCM. Do wejścia przetwornika A/D modułu modulatora PCM podłączyć napięcie stałe z dzielnika napięcia oraz multimetr. Przełączyć multimetr w tryb pomiaru napięcia stałego VDC. Włączyć wyzwalenie ON na kanał pierwszy CH1. Podłączyć kanał pierwszy z wyjściem sygnału zegarowego CK, a na kanał drugi CH2 z wyjściem modulatora PCM, za przetwornikiem równoległo-szeregowym P/S. W programie przystawki oscyloskopowej w trybie DSO ustawić: T/D = 1  $\mu$ s; CH1 V/D = 2 V/dz; CH2 V/D = 2 V/dz. Przeszukując





suwakiem pod ekranem oscyloskopu odnaleźć porcję ośmiu impulsów zegarowych CK na kanale pierwszym CH1 i wypośrodkować.

Ustawiać na dzielniku napięcia kolejne wartości napięć +10, +4, +2, 0, -2, -4, -10 [V] na wejściu przetwornika A/C.

Dokonać obserwacji.  Który z bitów reaguje na najmniejsze zmiany napięcia? Który z bitów ma najmniejszą, a który największą wagę? Który z bitów opisuje znak (+/-) napięcia/próbki? Odczytać wartość binarną dla wszystkich zmierzonych napięć (Pkt 9 Obserwacja 1,2,3,4,5,6,7). 

## 7. Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie należy wykonać wg następujących zaleceń:

Nie należy umieszczać w sprawozdaniu podstaw teoretycznych, ani opisów stanowiska laboratoryjnego. Sprawozdanie musi zawierać wszystkie wyniki pomiarów/obserwacji i wszystkie zarejestrowane przebiegi , prezentowane wg kolejności ich wykonania. Każdy wynik i przebieg musi być opatrzony numerem punktu instrukcji wg, którego został zarejestrowany. Każdy przebieg musi być opatrzony opisem, wyjaśniającym, co przedstawia i gdzie (miejsce układu lub stanowiska pomiarowego) został zarejestrowany. W sprawozdaniu muszą się znaleźć odpowiedzi na wszystkie postawione w instrukcji pytania , ponumerowane wg punktów, w których zostały postawione. Zarówno opisy, jak i odpowiedzi, mają być zwięzłe, ale przedstawione pełnymi zdaniami.

Wnioski powinny zawierać podsumowanie przeprowadzonych pomiarów. Szczególny nacisk należy położyć na zaprezentowanie różnic i podobieństw pomiędzy wynikami pomiarów i obserwacji w zależności od określonych czynników, parametrów lub wielkości, które ulegały zmianie podczas realizacji ćwiczenia.

## 8. Literatura

- [1] Dąbrowski A., Dymarski P., Podstawy transmisji cyfrowej, Warszawa, skrypt PW 2004
- [2] Haykin S., Systemy telekomunikacyjne, Warszawa, WKiŁ 2004
- [3] Ronayne J., Wprowadzenie do komutacji cyfrowej, Warszawa, WNT 1991
- [4] Wesołowski K., Podstawy cyfrowych systemów telekomunikacyjnych, Warszawa, WKŁ 2003