

Cyfrowe pomiary urządzeń elektroakustycznych

Pomiary w dziedzinie cyfrowej

- Pomiary przetworników A/C i C/A
- Pomiary sygnałów w interfejsach szeregowych
- Pomiary jakości sygnału cyfrowego
- Pomiary za pomocą wielotonów

997 Hz

- W pomiarach analogowych używamy standardowo „równej” częstotliwości 1 kHz.
- W pomiarach cyfrowych zaleca się częstotliwość równą **997 Hz**. Dlaczego?
- Na 24 bitach możemy zapisać 2^{24} różnych wartości.
- Sinus 1 kHz przy częstotliwości próbkowania 48 kHz „zużyje” tylko 48 różnych wartości!
- Sinus 997 Hz pozwala wykorzystać wszystkie możliwe wartości sygnału, zarówno dla cz. próbkowania 48 kHz, jak i dla 44,1 kHz.
- Zarazem jest ona dość blisko 1 kHz.

Pomiary przetworników A/C

Pomiary przetworników analogowo-cyfrowych:

- sygnał z wejścia analogowego generatora podawany na wejście badanego przetwornika,
- sygnał z wyjścia przetwornika podajemy na wejście cyfrowego analizatora.

Testy przetwornika A/C:

- typowe (char. częstotliwościowa, zniekształcenia),
- liniowość (odchyłka od liniowości w funkcji poziomu sygnału testowego) – ocena pracy konwertera dla b. małych poziomów sygnału, ocena *ditheringu*,
- pomiar szumu kwantyzacji.

Dither

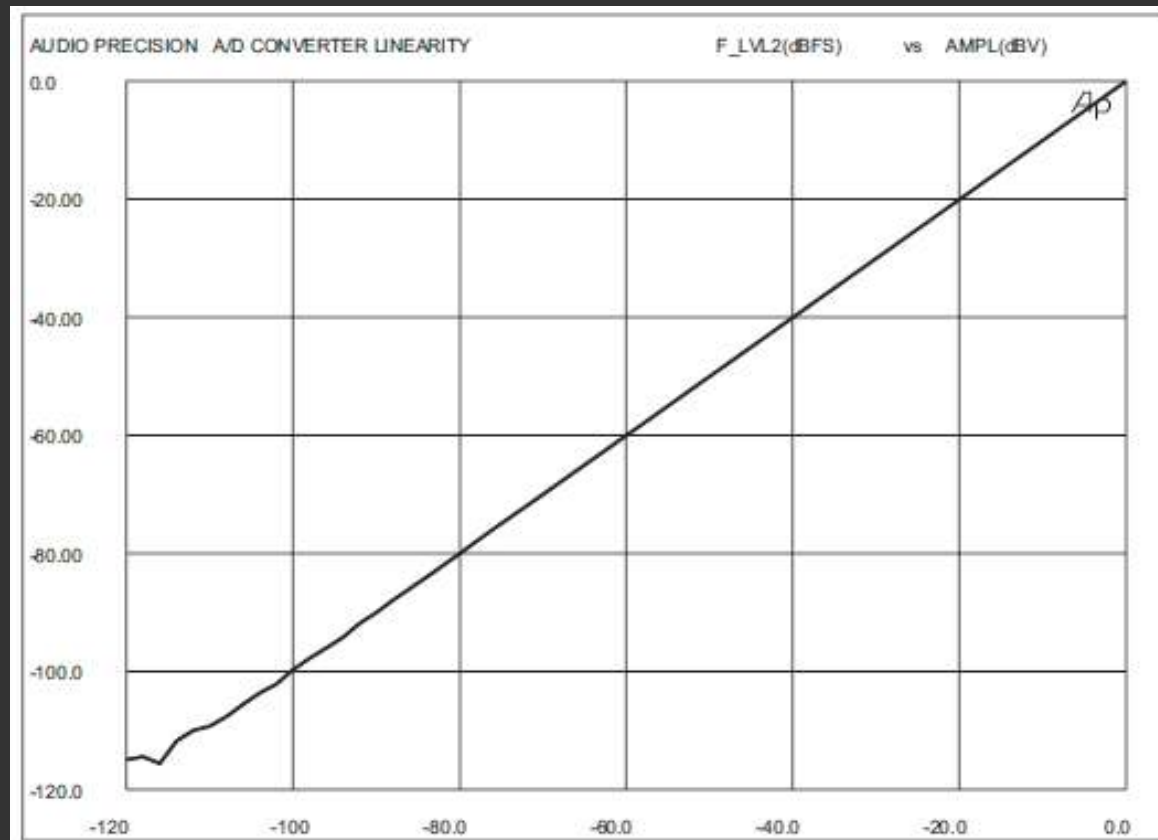
- *Dither* – szum o małej amplitudzie dodawany do sygnału w celu poprawy liniowości charakterystyki przetwornika. Zmniejsza błędy wynikające z zaokrągleń przy kwantyzacji sygnału.
- Generator pomiarowy powinien mieć możliwość wygenerowania sygnału *dither* o określonym rozkładzie (trójkątny, prostokątny).
- *Dither* dodawany jest do sygnału testowego podawanego na wejście badanego przetwornika.
- Wykonuje się pomiary z dodanym *ditherem* i bez niego.

Pomiar liniowości przetwornika

- Pomiar wykonywany przez podawanie na przetwornik sygnału sinusoidalnego, o częstotliwości 1 kHz i zmiennym poziomie.
- Pomiar wykonywany z *ditherem* i bez niego.
- Wynik wykreślany jako poziom wyjściowy w funkcji poziomu wejściowego.
- Oczekujemy liniowej charakterystyki w całym zakresie.
- Szum kwantyzacji w zakresie niskich poziomów ogranicza zakres dynamiki przetwornika.

Pomiar liniowości przetwornika

Wynik pomiaru liniowości przetwornika A/C:
poziom sygnału cyfrowego (dBFS) w funkcji
poziomu sygnału analogowego (dBV), użyty *dither*



Pomiary szumów w przetworniku A/C

- W typowych urządzeniach mierzy się poziom szumu nie podając na wejście żadnego sygnału.
- Jeżeli na wejście przetwornika nie podamy sygnału, przetwornik nie będzie pracował.

Pomiar **szumu kwantyzacji** przetwornika:

- na wejście podajemy sygnał o sinus 997 Hz o małym poziomie, zwykle -60 dBFS,
- częstotliwość ta zostaje odfiltrowana z sygnału wyjściowego,
- mierzony jest poziom pozostałego sygnału, zwykle z użyciem filtra wagowego.

Zakres dynamiki w przetworniku A/C

Zakres dynamiki przetwornika (*dynamic range*) jest równy odstępowi między 0 dBFS a poziomem szumu.

Teoretyczna dynamika przetwornika A/C n -bitowego:

$$SNR = 20 \log \left(2^n \sqrt{\frac{3}{2}} \right) \cong 6,0206 \cdot n + 1,761$$

Np. dla $n = 16$: SNR = 98,09 dB

$n = 24$: SNR = 146,25 dB

Rzeczywista dynamika jest mniejsza, ze względu na szum kwantyzacji.

Szum modulowany

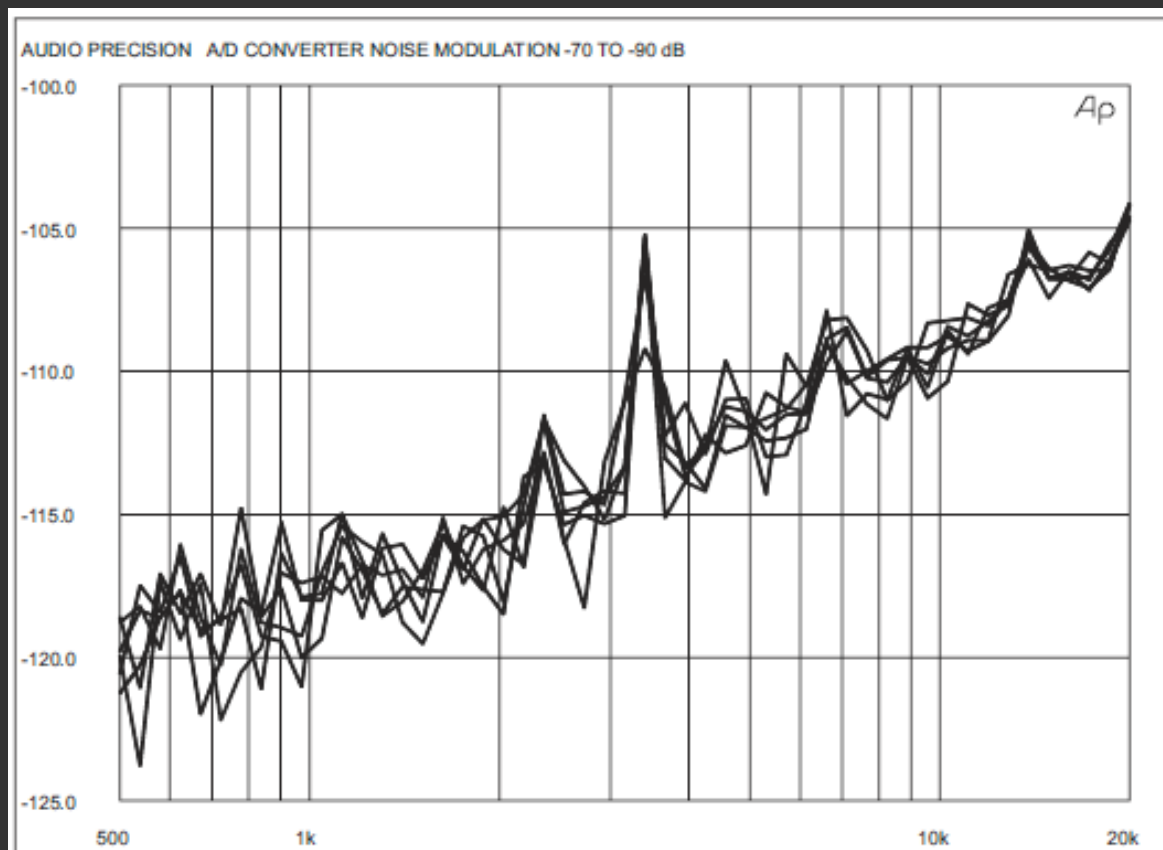
Jeżeli poziom szumu kwantyzacji jest zależny od poziomu sygnału wejściowego, mówimy o szumie modulowanym lub muzycznym (modulacja szumu – *noise modulation*).

Pomiar poziomu szumu modulowanego:

- podaje się na wejście przetwornika sygnał sinusoidalny o małej częstotliwości (50 Hz)
- poziom szumu jest mierzony dla różnych częstotliwości, przy użyciu przestrajanego filtra wąskopasmowego,
- pomiar powtarza się dla zmiennego, ale małego poziomu sinusa testowego (od -90 do -70 dBFS).

Szum modulowany

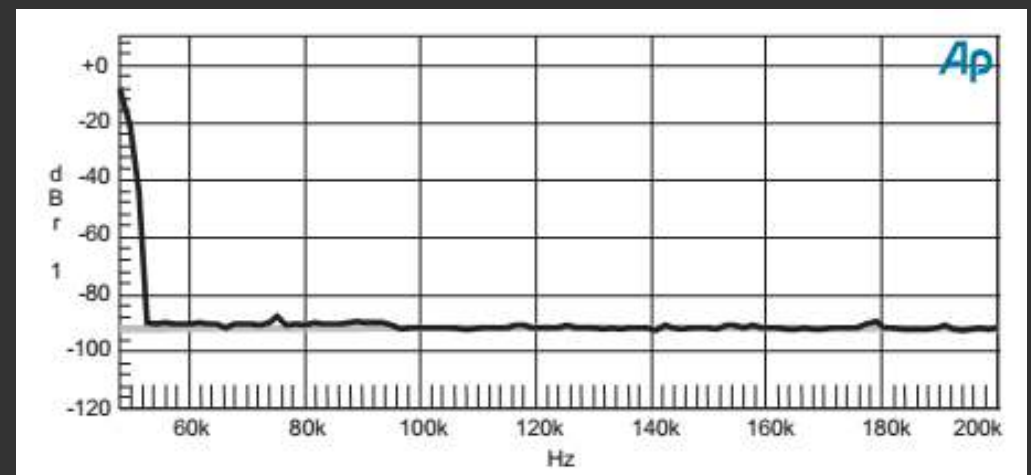
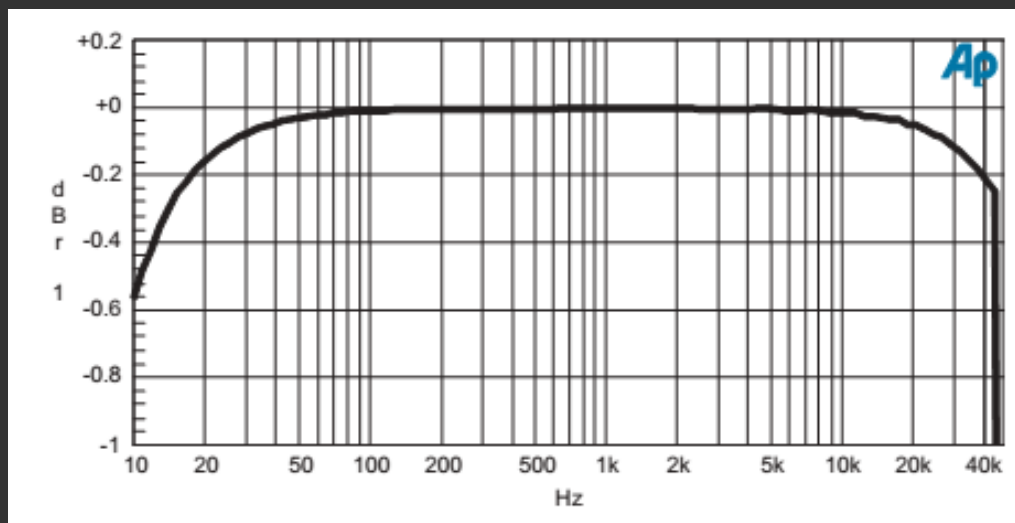
Poziom sygnału testowego nie powinien wpływać na wynik pomiaru – krzywe powinny się pokrywać.



Pomiar charakterystyki częstotliwościowej

Charakterystyka częstotliwościowa przetwornika A/C
- pomiar dotyczy dwóch przypadków.

- Pomiar w paśmie akustycznym (20 Hz – 20 kHz)
- tak jak dla każdego urządzenia.
- Pomiar w szerokim paśmie – pozwala zbadać działanie filtru anti-aliasingowego. Generator musi wytwarzać sygnały testowe o dużych częstotliwościach (np. 200 kHz)



Maksymalny poziom wejściowy

- Maksymalny poziom sygnału analogowego podanego na wejście przetwornika A/C, który nie powoduje cyfrowego przesterowania sygnału na wyjściu ($\text{THD+N} < 1\%$).
- Inaczej: poziom sygnału wejściowego, potrzebny do uzyskania poziomu 0 dBFS na wyjściu cyfrowym (czyli do osiągnięcia pełnej skali).
- Pomiar wykonuje się:
 - zwiększając poziom sygnału sinus na wejściu,
 - obserwując poziom cyfrowego sygnału na wyjściu,
 - aż zostanie osiągnięty poziom wyjściowy 0 dBFS (w praktyce: ok. -0,1 dBFS)

Pomiar zniekształceń nieliniowych

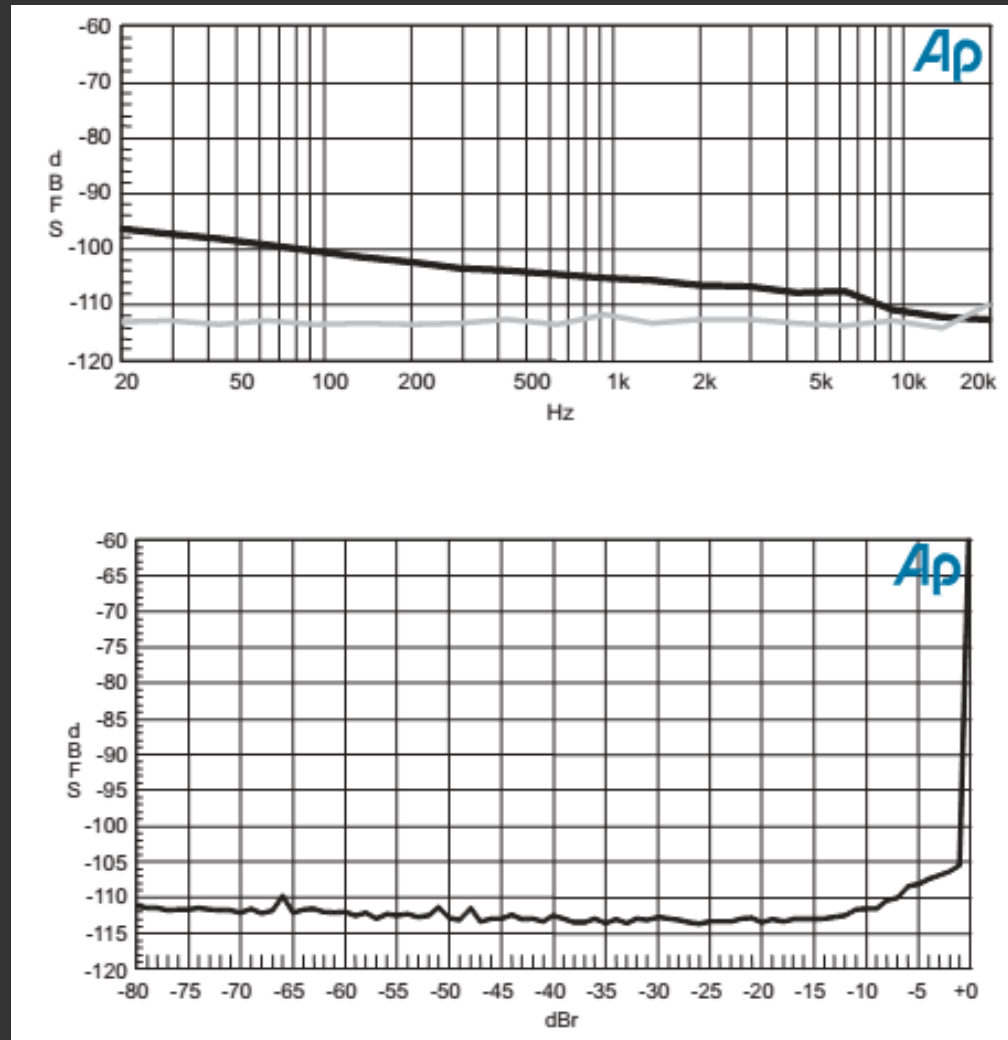
Pomiar THD+N w przetworniku A/C

- Sygnałem testowym jest zwykle sinus o częstotliwości 997 Hz i poziomie -1 dB FS.
- Pasma testowe jest ograniczane filtrem do 20 kHz.
- Charakterystyka THD+N:
 - w funkcji poziomu sygnału wejściowego,
 - w funkcji częstotliwości

Pomiary zniekształceń intermodulacyjnych (IMD) są użyteczne w przypadku przetworników (bardziej niż dla typowych urządzeń audio).

Pomiar zniekształceń nieliniowych

THD+N w funkcji częstotliwości oraz poziomu.



Pomiary przetworników C/A

Dla przetworników cyfrowo-analogowych, sytuacja się odwraca względem przetworników A/C.

- Sygnał z cyfrowego generatora pomiarowego podajemy na wejście przetwornika.
- Sygnał z wyjścia przetwornika podajemy na analogowy analizator.
- Większość pomiarów wykonujemy analogicznie jak dla przetwornika A/C.

Pomiary przetworników C/A

- **Poziom wyjściowy dla pełnej skali:** poziom wyjściowego sygnału analogowego dla sinusa testowego 997 Hz o poziomie 0 dBFS, przy THD+N < 1%.
- **Poziom szumu:** mierzony przy podaniu tonu 997 Hz o poziomie -60 dBFS na wejście przetwornika. Szum filtrowany do pasma 20 Hz – 20 kHz, z usunięciem częstotliwości 997 Hz, zwykle używany też filtr wagowy.
- **Zakres dynamiki przetwornika (*dynamic range*):** różnica tych dwóch wartości decybelowych.

Pomiary odtwarzaczy CD/DVD

- W przypadku odtwarzaczy płyt, nie ma możliwości podłączenia cyfrowego generatora.
- W roli generatora sygnałów testowych występuje **płyta testowa**, zawierająca zbiór typowych sygnałów.
- Najważniejsze sygnały testowe:
 - sinus, 997 Hz, stały poziom 0 / -20 / -60 dBFS
 - sinus przestrajany krokowo, 0 / -1 / -20 dBFS, 11 i 31 punktów
 - sinus o przestrajonym poziomie
 - cisza cyfrowa, z ditherem i bez
 - dwutony do IMD

Pomiary charakterystyk toru cyfrowego

Pomiary w układzie cyfrowe wejście – cyfrowe wyjście:

- charakterystyka częstotliwościowa – zwykle za pomocą sinusa -1 dBFS
- THD+N – sinus -1 dBFS, 997 Hz, także w funkcji amplitudy i częstotliwości
- charakterystyka liniowości
- przesłuch

Pomiary szumu są bezcelowe – w torze cyfrowym szum nie zostanie dodany do sygnału.

Błędy w torze cyfrowym

- Przy poprawnej transmisji sygnału cyfrowego, sygnał na wyjściu powinien być taki sam jak na wejściu.
- Na skutek różnych czynników, mogą nastąpić **błędy bitowe** w sygnale.
- Dane cyfrowe wymieniane między urządzeniami są chronione **kodami korekcyjnymi**, które pozwalają naprawić pewną liczbę błędów bitowych.
- Podstawowa metoda pomiaru błędów bitowych to podanie znanego ciągu bitów na wejście i porównanie go z sygnałem na wyjściu – obliczenie **stopy błędu** w %.

BITTEST

Sygnal BITTEST służy do pomiaru stopy błędów bitowych.

Typowe sekwencje testowe:

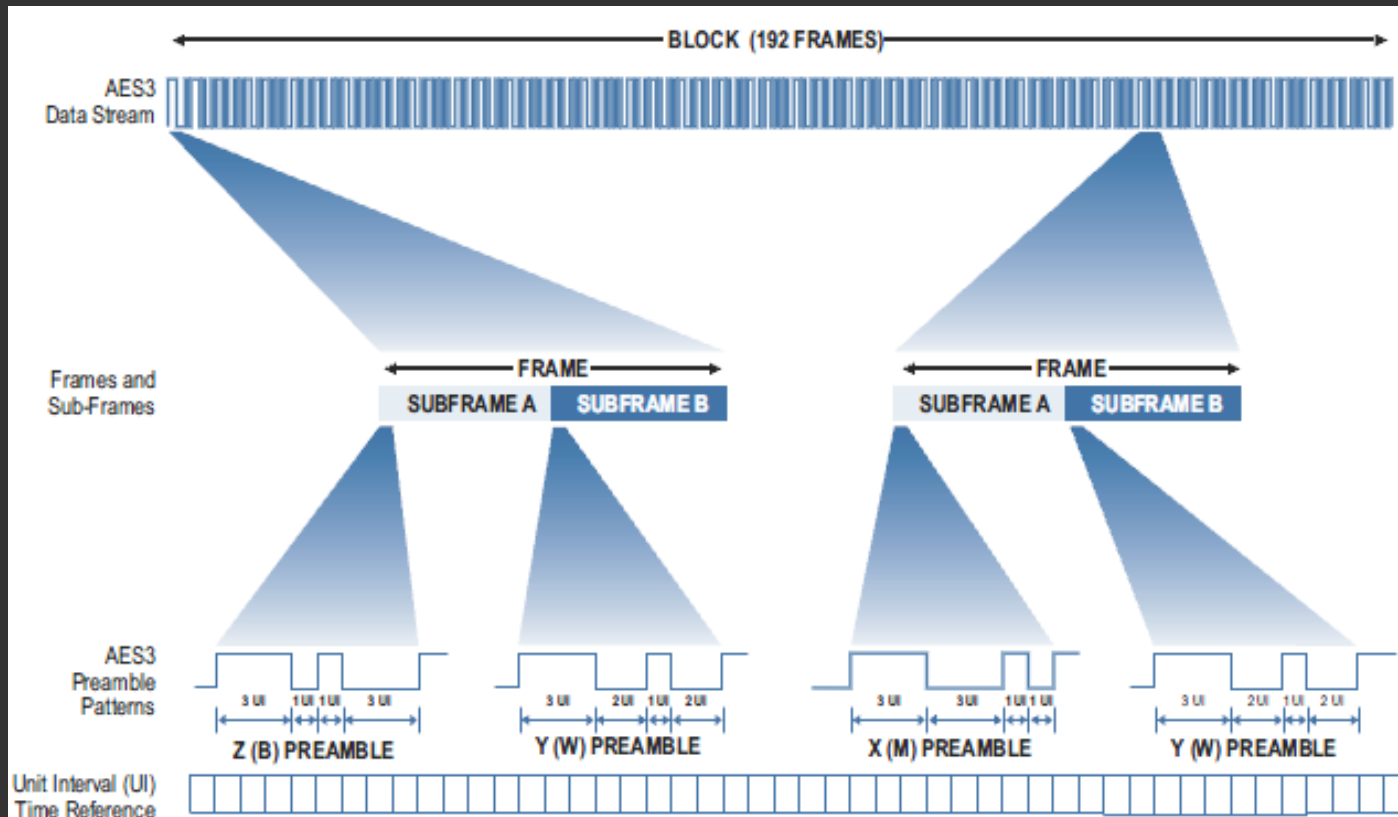
- sygnał stały (ta sama wartość)
- sygnał przypadkowy (rozkład równomierny)
- *walking bit*:
 - wszystkie bity 0, poza jednym (*walking one*), albo
 - wszystkie bity 1, poza jednym (*walking zero*),
 - „odmienny” bit przesuwają się cyklicznie od najmłodszego do najstarszego bitu.

Cyfrowe interfejsy szeregowo

- Sygnał cyfrowy jest przesyłany pomiędzy urządzeniami zazwyczaj przy użyciu interfejsów szeregowych.
- Format danych opisuje sposób organizacji przesyłanych danych w ramki. Każda ramka zawiera:
 - metadane opisujące sygnał,
 - dane samego sygnału - próbki.
- Najważniejsze formaty danych:
 - AES/EBU (**AES3**) – sprzęt profesjonalny,
 - SPDIF/EIAJ – urządzenia powszechnego użytku

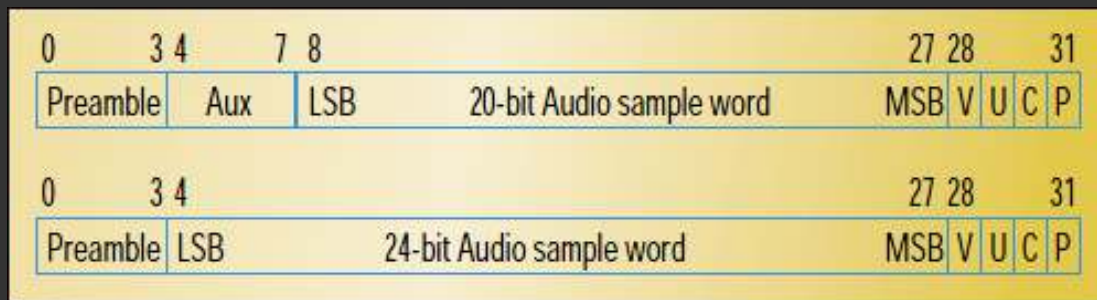
Organizacja danych w AES3

- Blok danych dzielony na ramki (*frame*).
- Podramka (*subframe*) - dane dotyczące jednego kanału.
- Preambuła (*preamble*) – znacznik początku podramki



Organizacja danych w AES3

Struktura podramki danych:



Flagi dostarczają użytecznych informacji o sygnale:

- **V: *validity*** – poprawność danych
- **U: *user data*** – dane informacyjne
- **C: *channel status*** – stan kanału danych (np. CRCC)
- **P: *parity*** – bit parzystości

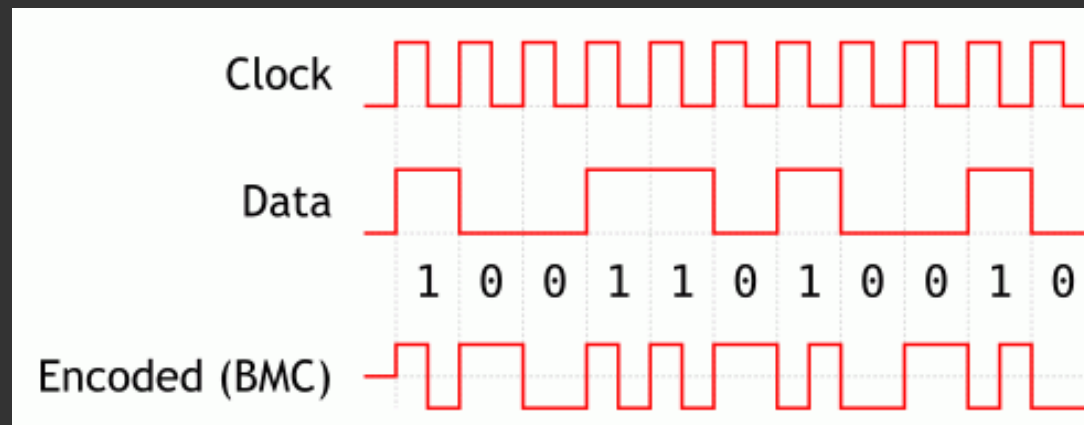
Kodowanie w AES3

Kodowanie *Biphase Mark Coding (BMC)*:

- dwa impulsy zegarowe na bit
- pierwszy: zegar – zawsze zmiana stanu
- drugi: dane – zmiana stanu tylko dla bitu = 1

Dla ramki 2*32 bity, cz. pr. 48 kHz, „szerokość” impulsu zegarowego (UI):

$$1 \text{ UI} = 1 / (2 * 2 * 32 * 48000) = 163 \text{ ns}$$



Pomiary sygnału w interfejsach szeregowych

Przykładowe okno analizy sygnału cyfrowego

The screenshot shows the 'Digital IO Parameters' dialog box, which is divided into several sections for configuring digital signal analysis. The 'Output' section on the left includes settings for Format (XLR (bal)), Int. Sample Rate (48.0000 kHz), Voltage (5.000 Vpp), Resolution (24 Bits), and PreEmphasis (Off). The 'Input' section on the right includes Format (XLR (bal)), Z-In (110 Ohms), Sample Rate (48.0000 kHz), Voltage (4.879 Vpp), Delay from Out (46.89 nsec), Resolution (24 Bits), DeEmphasis (Off), Scale Freq. by (Measured Rate), and Rate Ref. (48.0000 kHz). Below these are checkboxes for Cable Simulation and Send Invalid, and fields for Rise/Fall Time (15.96 nsec) and Interfering Noise (0.000 Vpp). The 'Common Mode Sine' section has Amplitude (9600 Vpp) and Frequency (20.0000 kHz) fields. The 'Jitter Generation' section has a dropdown set to 'Off' and an 'EQ Curve...' button. The 'Jitter Measurement' section has Amplitude (0.0000 UI) and Frequency (998644 kHz) fields. The 'Error Flags' section includes checkboxes for confidence, lock, coding, parity, Ch A invalid, and Ch B invalid. The 'Channel A' and 'Channel B' sections show signal levels of -4.998 dBFS and a 'Mode' dropdown set to 'Neg. Peak'. Below these are bit pattern indicators for Channel A and Channel B, with 'Active Bits' selected. The 'Jitter Measurement' section also includes a 'Jitter' field (385.2 psec), a 'BW' dropdown (700Hz to 100kHz), and radio buttons for UI, Sec, Pk, and Avg. A 'Status Bits...' button is located at the bottom right.

Analiza ramek sygnału cyfrowego

Status Bits – Digital IO

Transmit: A B A & B

Consumer Professional

Normal Non-Audio

Emphasis: None

Freq Mode: Locked

Sample Freq: 48 kHz

Channel Mode: Not Indicated

User Bits: None

Auxiliary Bits: 20-bit not define

Audio Word Len: Not indicated

Ref Signal: Not a ref. signal

Origin: SYS2 Dest: AP

Local Address: Auto

Time-of-day: 0

Reliability Flags: 0-5 14-17
(set = unreliable) 6-13 18-21

CRC Enable

Receive A:
 Mode: Professional
 Audio Mode: Normal
 Emphasis: None
 Freq Mode: Locked
 Sample Freq: 48 kHz
 Channel Mode: Not Indicated
 User Bits: None
 Auxiliary Bits: 20-bit not defined
 Audio Word Len: Not indicated
 Ref Signal: Not a ref. signal
 Origin: SYS2
 Dest: AP
 Local Address: 4856064
 Time-of-day: 4856064

Receive B:
 Mode: Professional
 Audio Mode: Normal
 Emphasis: None
 Freq Mode: Locked
 Sample Freq: 48 kHz
 Channel Mode: Not Indicated
 User Bits: None
 Auxiliary Bits: 20-bit not defined
 Audio Word Len: Not indicated
 Ref Signal: Not a ref. signal
 Origin: SYS2
 Dest: AP
 Local Address: 4852608
 Time-of-day: 4852608

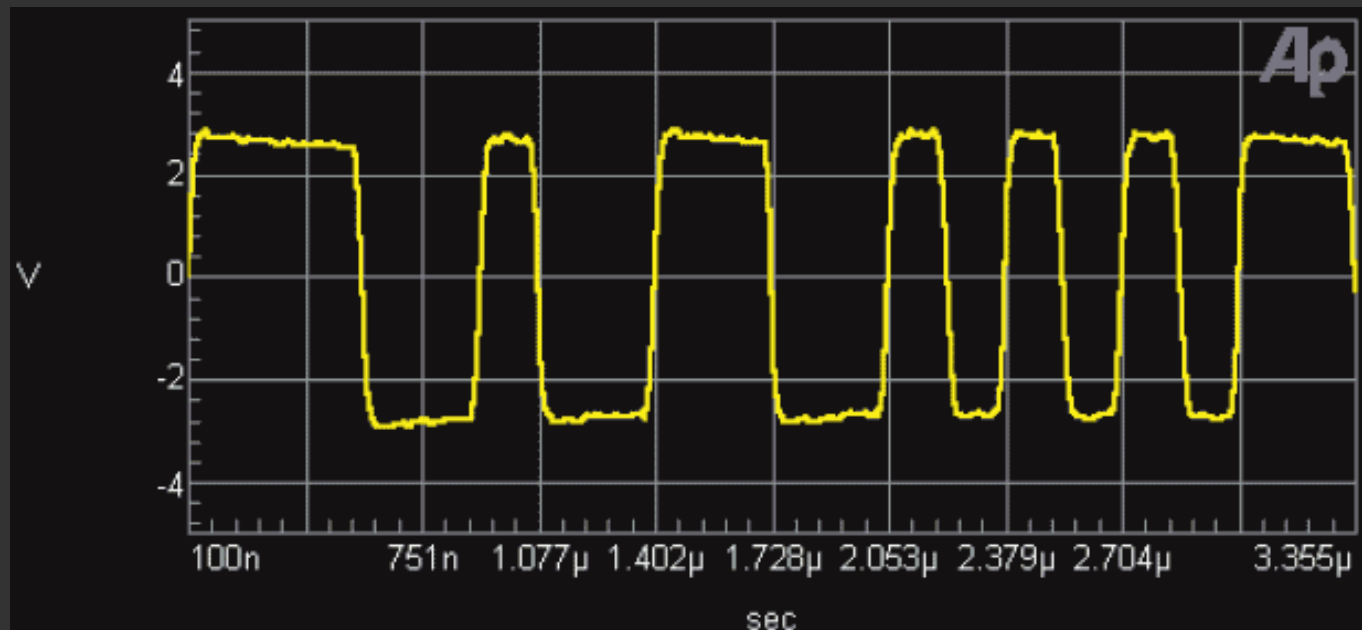
Reliability Flags: 0-5 14-17
(On = unreliable) 6-13 18-21

CRC Valid:

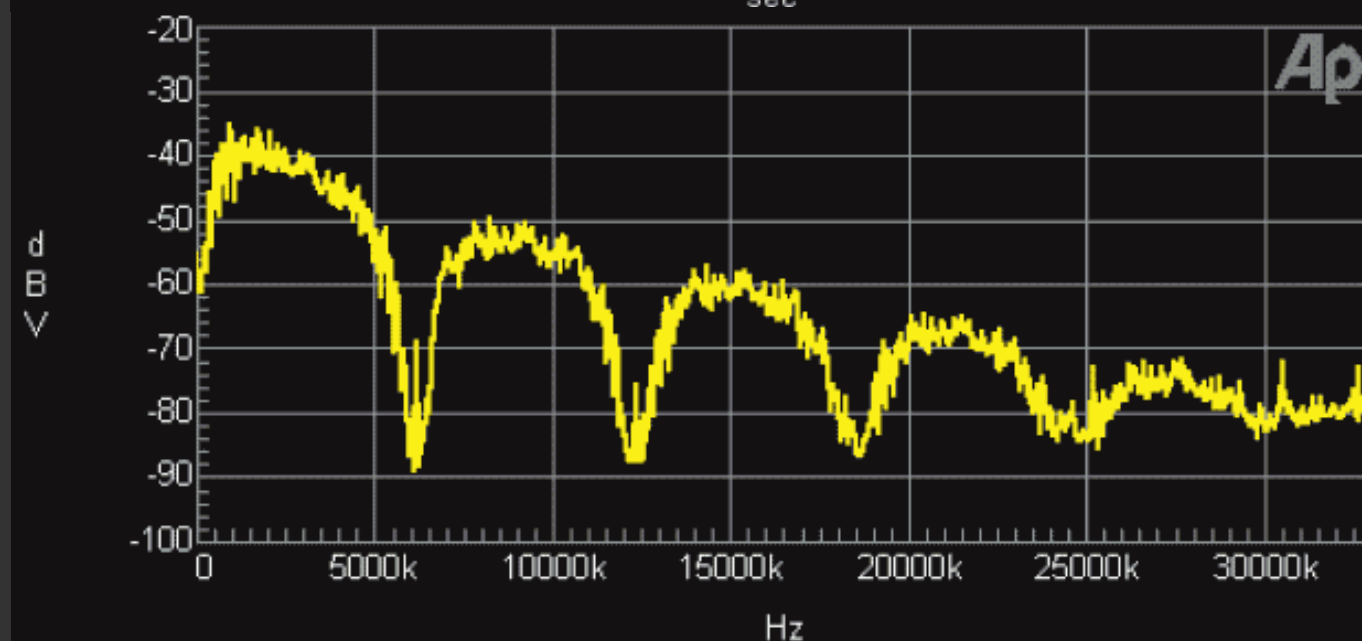
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Transmit A:	85	00	00	00	00	00	53	59	53	32	41	50	20	20	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
Receive A:	85	00	00	00	00	00	53	59	53	32	41	50	20	20	40	BB	49	00	40	BB	49	00	00	0C
Transmit B:	85	00	00	00	00	00	53	59	53	32	41	50	20	20	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
Receive B:	85	00	00	00	00	00	53	59	53	32	41	50	20	20	C0	AD	49	00	C0	AD	49	00	00	73

Pomiary sygnału w interfejsach szeregowych

Postać
czasowa
sygnału:



Postać
widmowa
sygnału:



Parametry sygnału cyfrowego

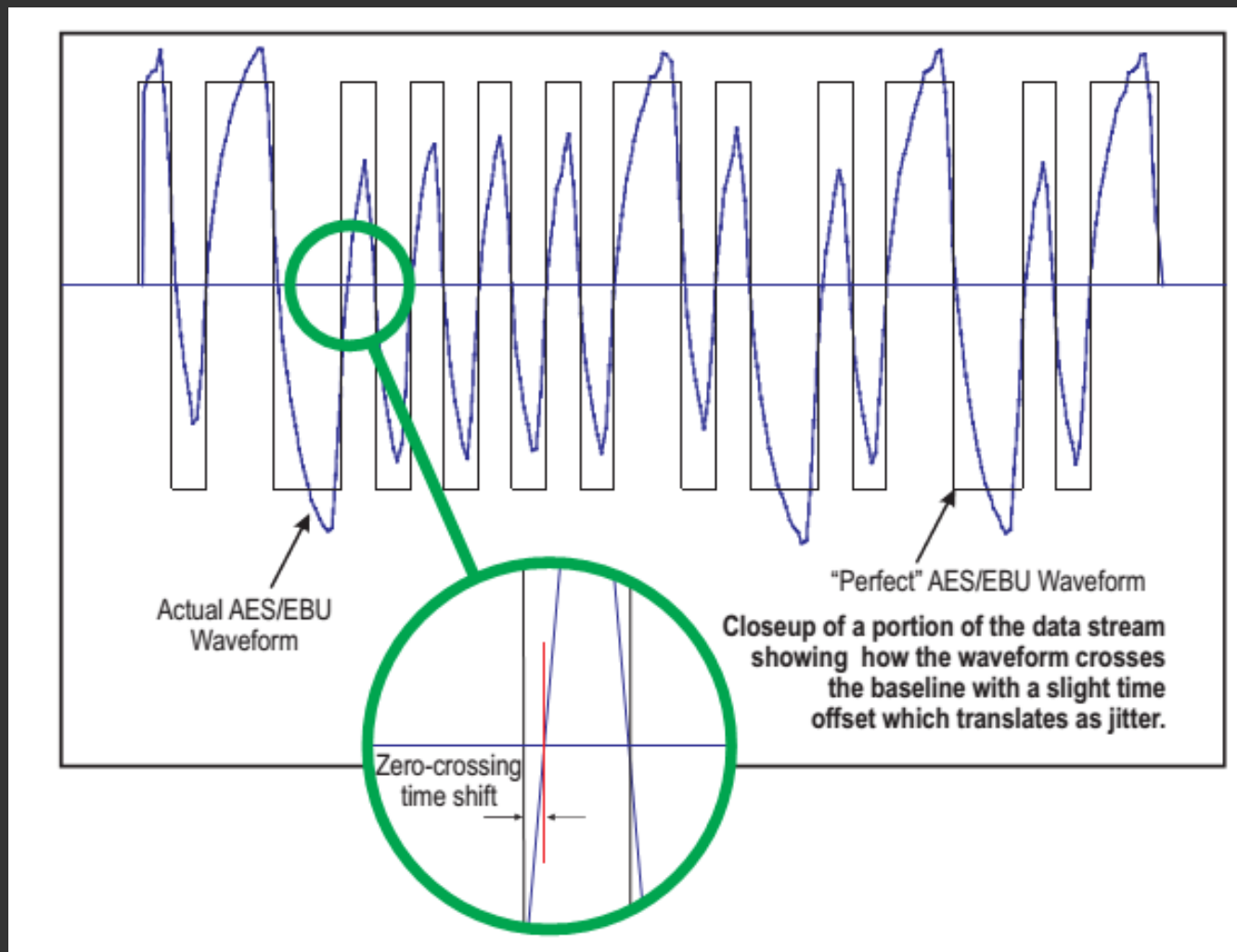
Podstawowe parametry sygnału cyfrowego:

- amplituda impulsów - zniekształcana przez wpływ szumu i zakłóceń,
- początek impulsu, czas narastania i opadania impulsu – zniekształcane przez *jitter*.

Duże zniekształcenia powodowane przez szum i zakłócenia oraz przez jitter mogą spowodować błędy bitowe – urządzenie nie jest w stanie poprawnie rozpoznać czy impuls reprezentuje 0 czy 1.

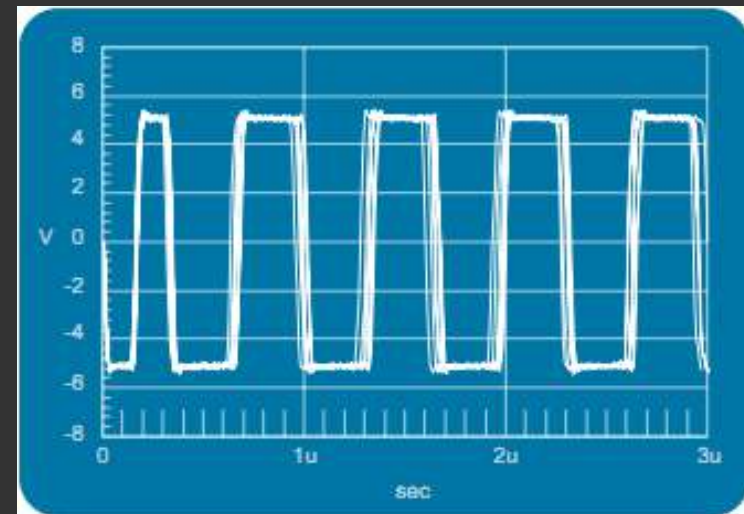
Parametry sygnału cyfrowego

Ilustracja zniekształceń amplitudowych (szumy i zakłócenia) oraz czasowych (*jitter*):



Jitter

- Określenie *jitter* dotyczy wszelkich **zniekształceń czasowych**, objawiających się **odstępstwem od idealnego cyklu zegarowego**.
- Idealne impulsy powinny zaczynać się i kończyć w momentach będących wielokrotnością okresu zegara (w AES3: 163 ns).
- Zniekształcenia typu *jitter* objawiają się wahaniem (zwykle cyklicznymi) wokół oczekiwanej wartości.



Jitter

Rodzaje *jittera*:

- wewnętrzny (*intrinsic*) – powstaje w urządzeniu, między wejściem a wyjściem, w wyniku zakłóceń, niedokładności elementów konstrukcyjnych, itp.
- związany z połączeniami pomiędzy urządzeniami,
- związany z próbkowaniem sygnału analogowego (*sampling jitter*) – dotyczy przetworników
- wprowadzany sztucznie przy pomiarze przez generator, aby sprawdzić jak duży jitter „wytrzyma” badane urządzenie.

Pomiar *jitter*

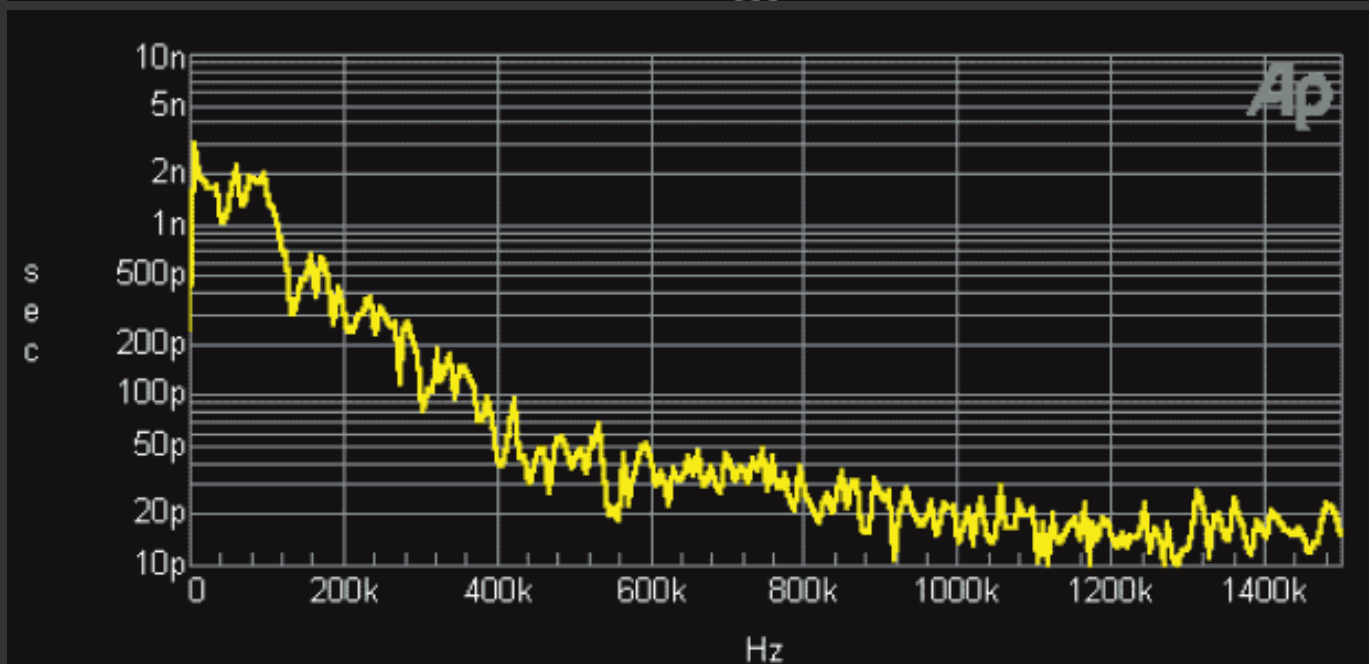
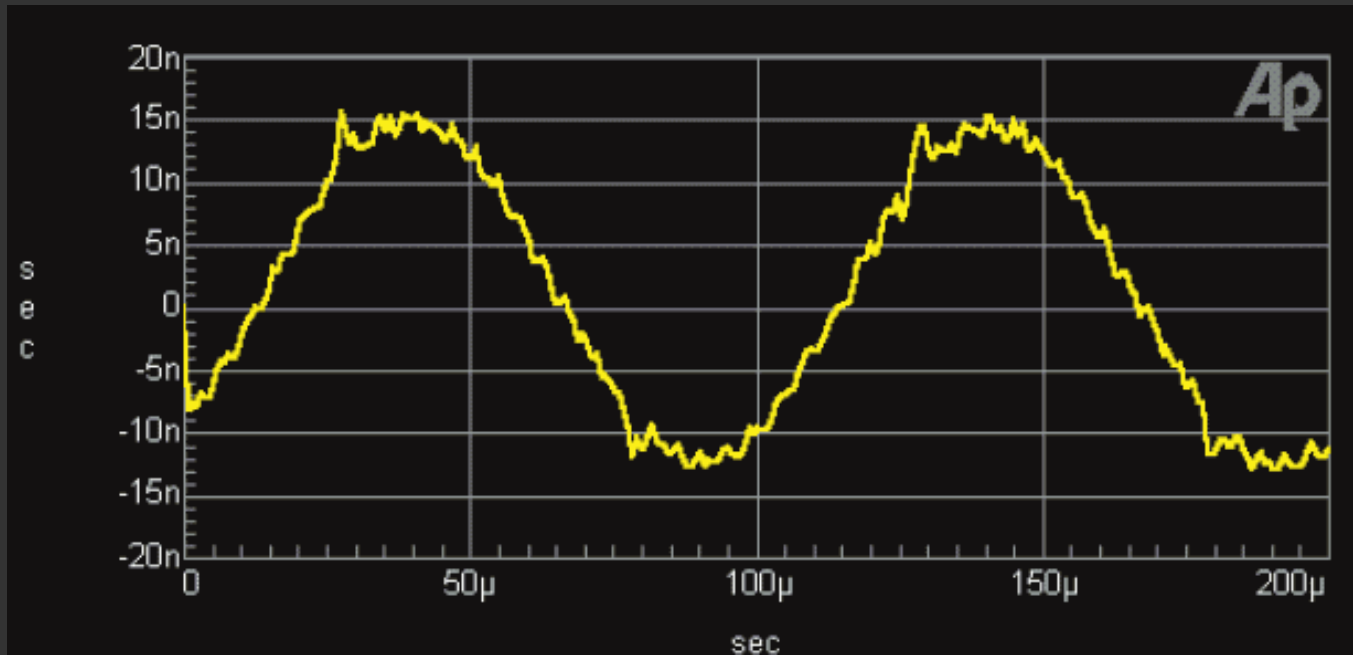
Pomiar zniekształceń *jitter* :

- wykrycie w analizowanym sygnale początku impulsu (analiza zmian amplitudy),
- porównanie z cyklem zegarowym.

Mierzone parametry *jitter*:

- **amplituda** – wielkość odchyłki czasowej od cyklu zegarowego (uwaga: amplituda dotyczy tutaj osi czasu, nie wartości sygnału!),
- **częstotliwość** wahań wokół oczekiwanej wartości

Postać czasowa i widmowa jitter

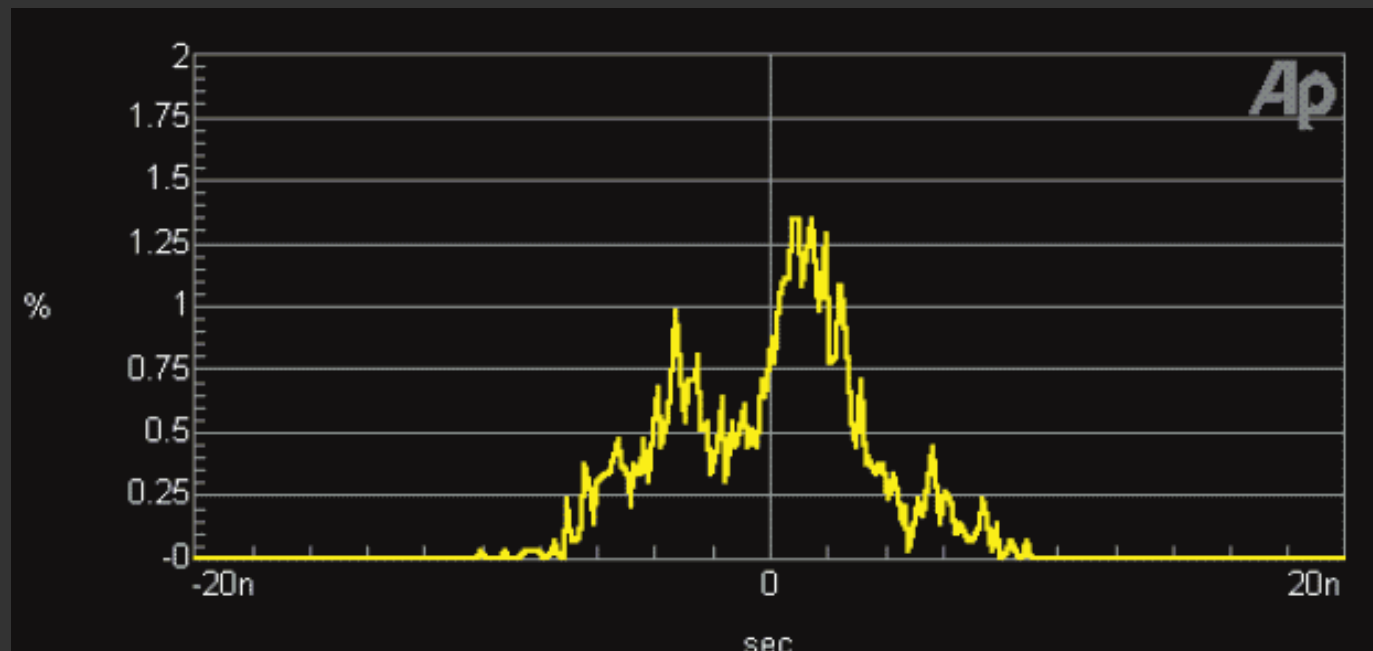


Histogram *jitter*

Wynik analizy statystycznej, przedstawia rozkład amplitud *jittera* w badanym sygnale.

Duży i wąski prążek dla 0 s oznacza mały *jitter*.

Szeroki i niski wykres oznacza duży *jitter*.



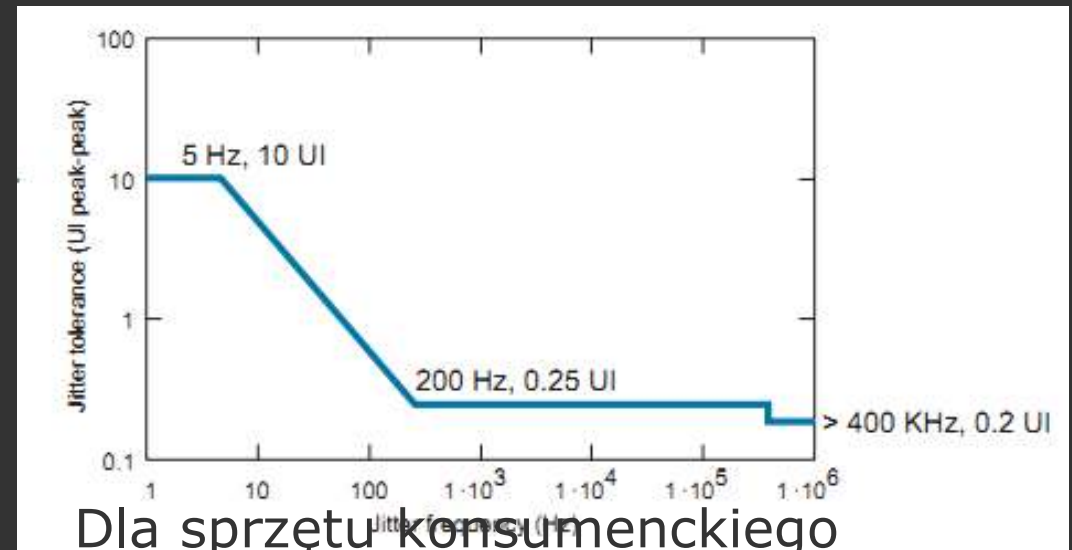
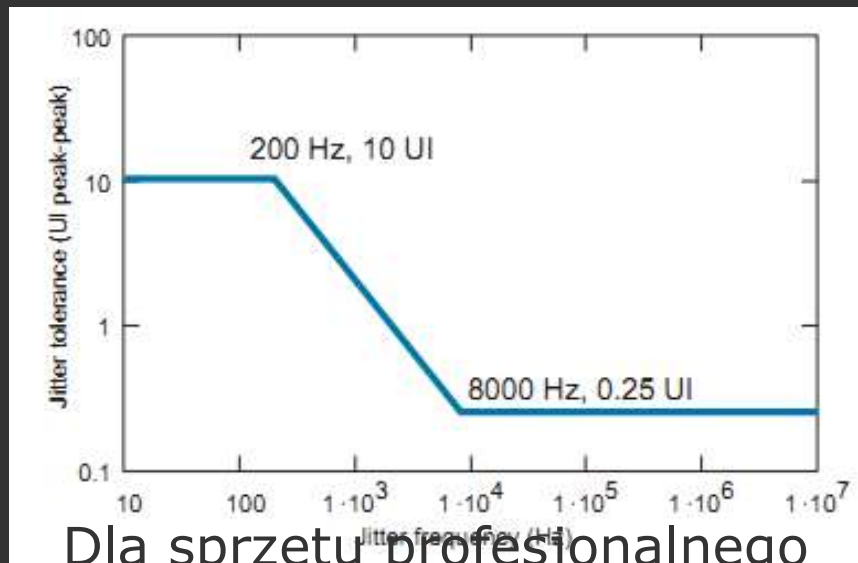
Badanie podatności urządzenia na *jitter*

Badanie wg zaleceń AES3:

- sygnał testowy – sinusoidalny, amplituda 1 FS, częstotliwość 3,456 kHz
- do sygnału dodawany *jitter* w postaci sygnału sinusoidalnego o częstotliwości przestrajanej w zakresie 50 Hz – 100 kHz, amplituda *jitter* wysoka dla małych cz., maleje ze wzrostem częstotliwości
- sygnał + *jitter* podawany na wejście urządzenia
- pomiar zniekształceń THD+N urządzenia
- jeżeli zniekształcenia wzrastają, urządzenie nie potrafi odtworzyć zniekształconego sygnału.

Badanie podatności urządzenia na *jitter*

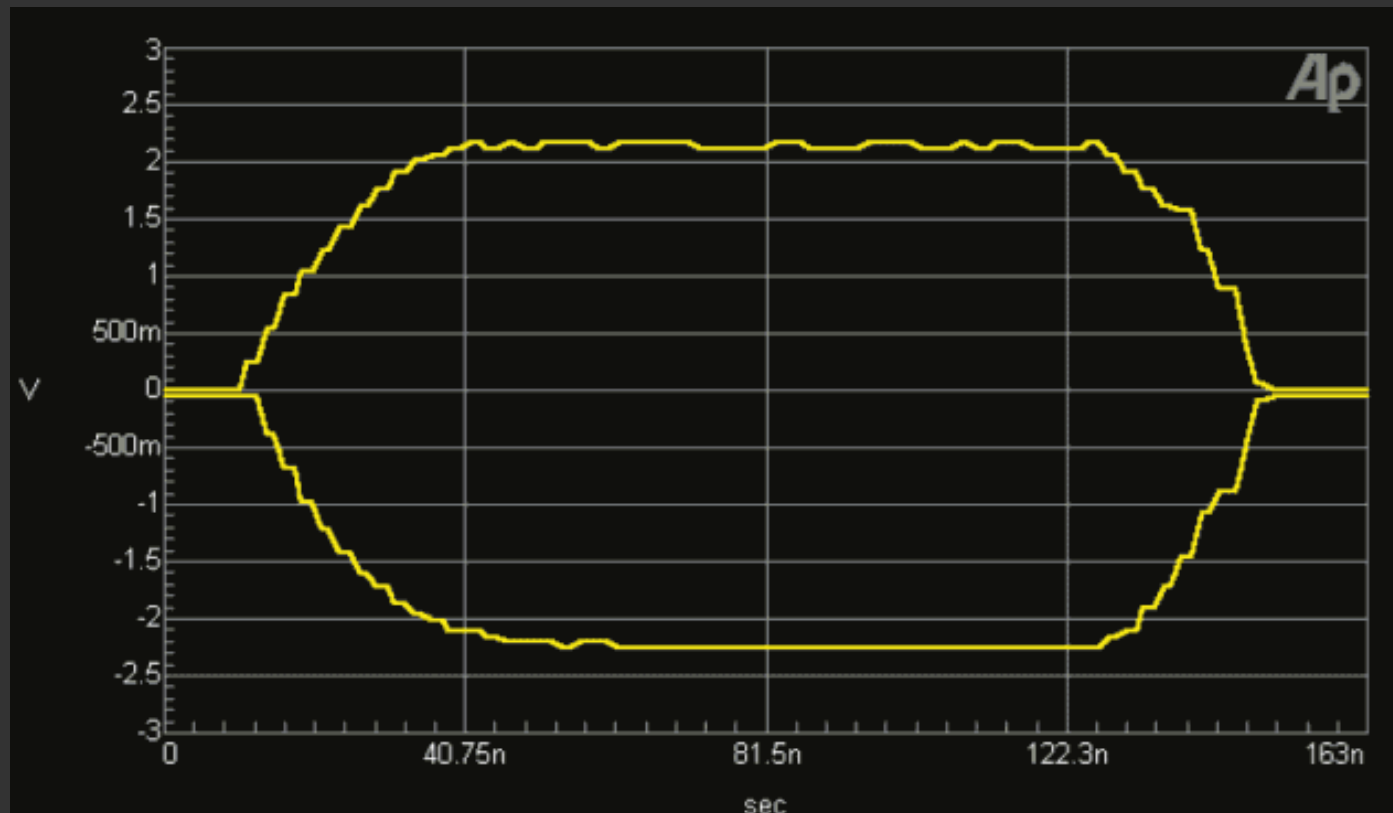
Normy odporności na *jitter* definiują jaka międzyszczytowa (*peak-to-peak*) amplituda *jittera* (wyrażona w jednostkach UI, w AES3: 1 UI = 163 ns) nie powinna powodować błędów bitowych.



Eye pattern

Wykres *eye pattern* to specyficzny sposób przedstawiania wyniku pomiaru sygnału cyfrowego.

Dostarcza informacji o zniekształceniach amplitudowych i czasowych (*jitter*) w sygnale.



Eye pattern

Jak powstaje wykres *eye pattern*:

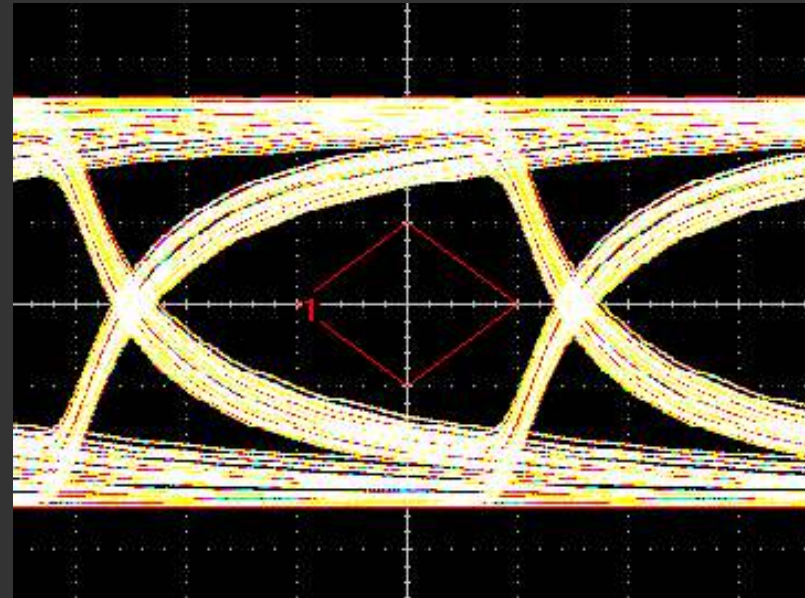
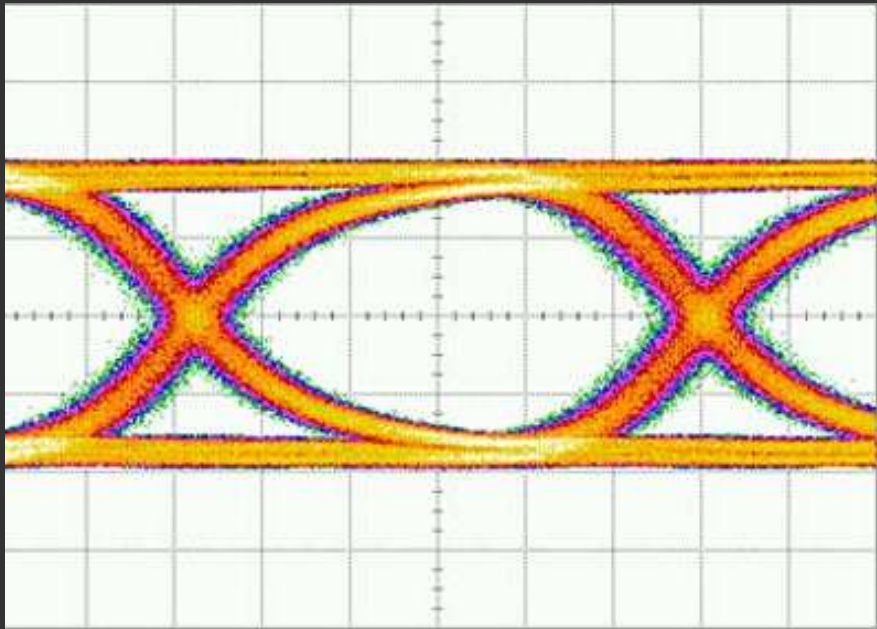
- analizowana jest duża liczba kolejnych impulsów,
- wszystkie impulsy są wykreślane w stosunku do „idealnego” impulsu, jeden na drugim,
- krawędź wewnętrznego obszaru „oka” reprezentuje „najgorszy przypadek”.

Mierzone parametry:

- **rozstęp pionowy** – amplituda, maleje gdy wzrasta poziom szumów i zakłóceń,
- **rozstęp poziomy** – czas impulsu, maleje gdy wzrasta *jitter*

Eye pattern

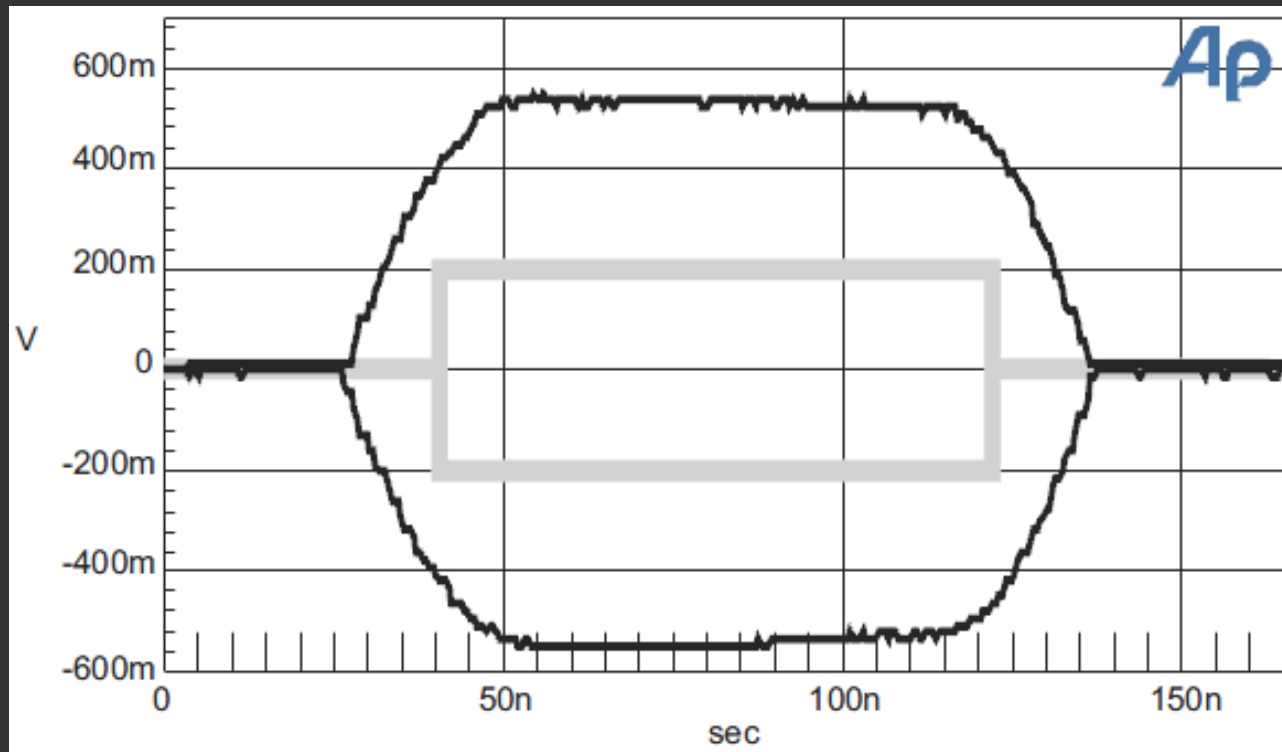
Wykres nałożonych na siebie impulsów



Eye pattern

Szary prostokąt w środku wykresu oznacza dopuszczalne zniekształcenia wg normy AES3 (± 200 mV, 0,5 UI)

Kontur „wewnętrznego oka” nie powinien nachodzić na ten obszar.



Pomiary przy użyciu wielotonów

- Cyfrowe analizatory wprowadziły zupełnie nowe możliwości analizy sygnałów, np. obliczenie widma poprzez FFT i dokładne pomierzenie każdej częstotliwości sygnału.
- Wieloton to specyficzny sygnał testowy.
- Analiza wielotonu pozwala uzyskać kilka podstawowych parametrów toru fonicznego za pomocą pojedynczego pomiaru!
- Pozwala to wykonywać szybkie pomiary kontrolne.
- Można też mierzyć tor analogowy.

Pomiary przy użyciu wielotonów

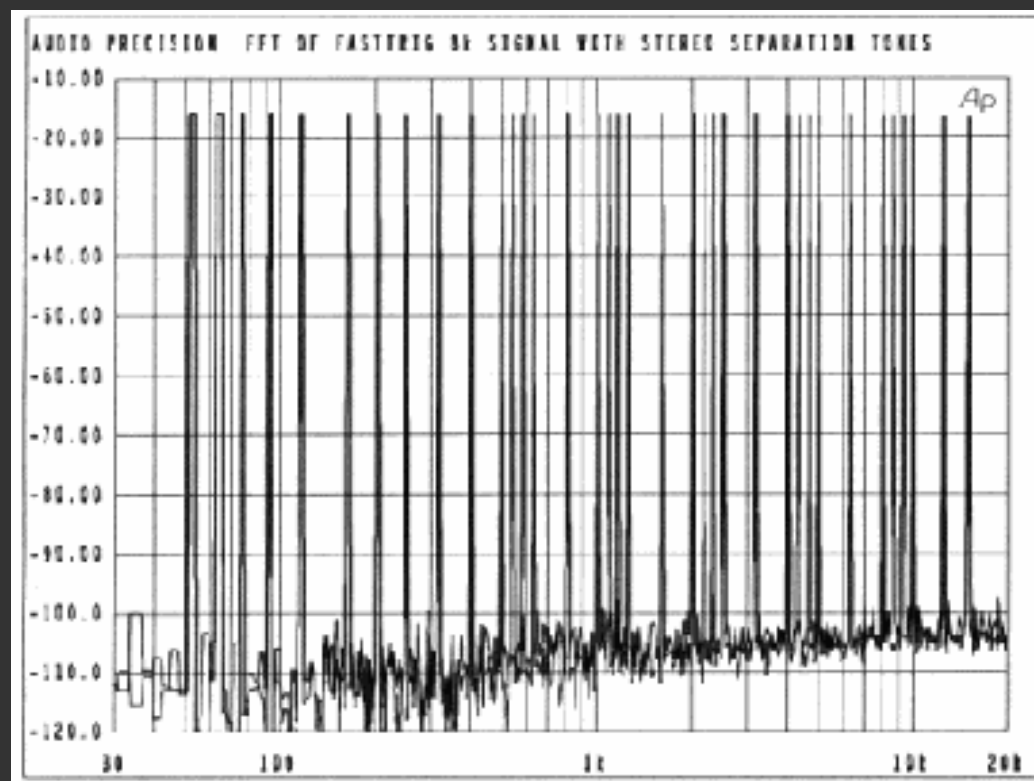
- **Wieloton** (*multitone*) – specjalny cyfrowy sygnał testowy, będący złożeniem wielu (5 – 60) tonów (sinusów).
- Typowa implementacja: ok. 30 tonów.
- Tony są rozłożone w widmie (FFT) sygnału w szczególny sposób:
 - prążki tonów znajdują się w parzystych przedziałach FFT
 - żaden z prążków nie leży w przedziale, w którym może pojawić się składowa harmoniczna lub intermodulacyjna od innych tonów
 - amplituda tonów jest równa

Rozdzielczość analizy

Zaletą metody z użyciem wielotonów jest to, że krótkie czasy trwania sygnału testowego wystarczają do uzyskania zadawalającej rozdzielczości podczas analizy.

Zależność rozdzielczości analizy od czasu trwania impulsu testowego:

DŁUGOŚĆ IMP.	ROZDZIELCZOŚĆ
960 ms	2,93 Hz
480 ms	5,86 Hz
240 ms	11.72 Hz
120 ms	23.44 Hz
60 ms	46.88 Hz



Pomiar z użyciem wielotonów

Przebieg pomiaru:

- generator wysyła wieloton na wejście badanego urządzenia,
- analizator pobiera sygnał z wyjścia urządzenia, pomijając zwykle początek sygnału (np. 200 ms),
- obliczane jest FFT sygnału,
- mierzone są wartości amplitudy (rms) i fazy w poszczególnych przedziałach widmowych,
- obliczane są poszczególne parametry i charakterystyki.

Pomiar charakterystyk z użyciem wielotonów

Charakterystyka częstotliwościowa:

- pomiar amplitudy w tych przedziałach FFT, w których znajdują się tony wysłane z generatora
- naniesienie wyników pomiarowych na wykres.

Charakterystyka fazowa:

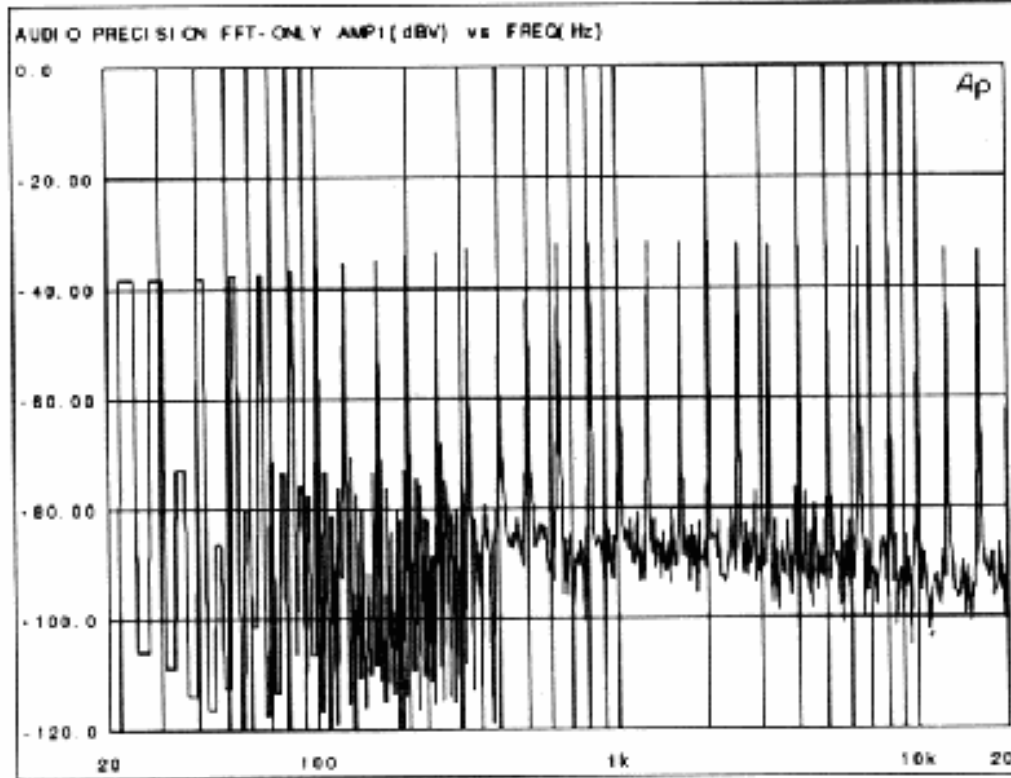
- tak samo, ale mierzy się fazę i porównuje z sygnałem z generatora, lub z sygnałem z drugiego kanału.

Przesłuch:

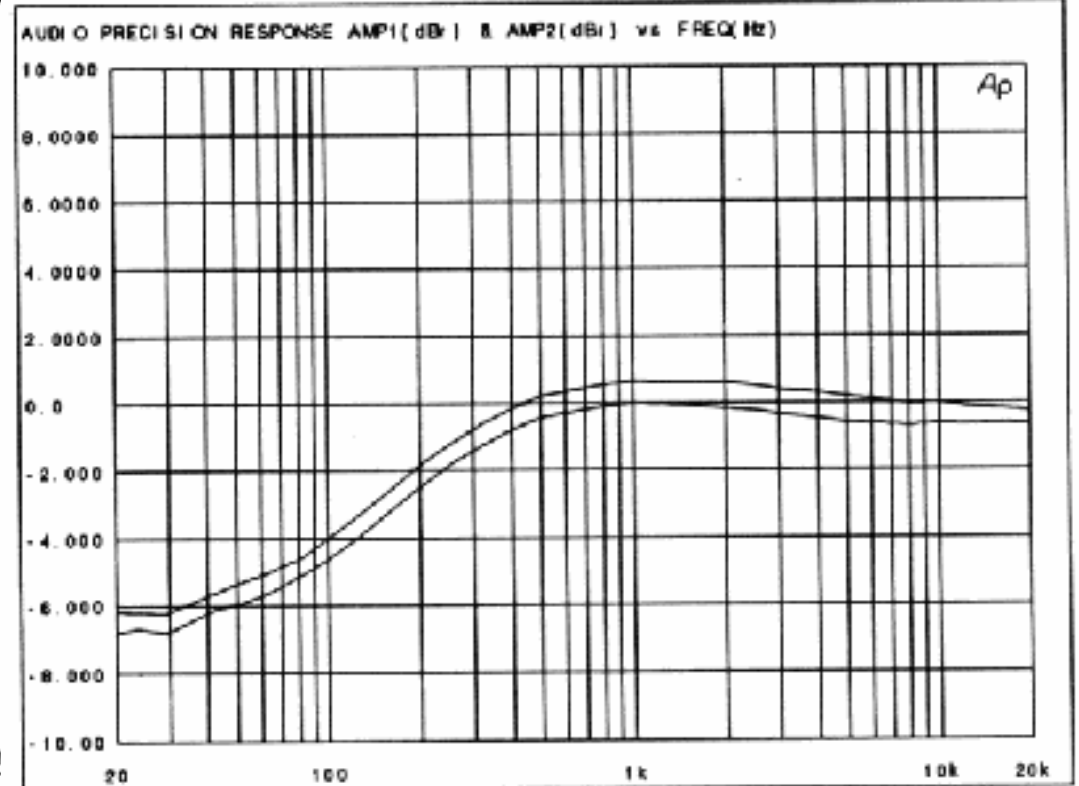
- tak jak dla char. częstotliwościowej, ale wieloton jest wysyłany tylko do jednego kanału jednocześnie

Pomiar charakterystyki częstotliwościowej

Zmierzony sygnał



Uzyskana charakterystyka



Pomiar zniekształceń nieliniowych

Pomiar zniekształceń – współczynnik **TD+N**.

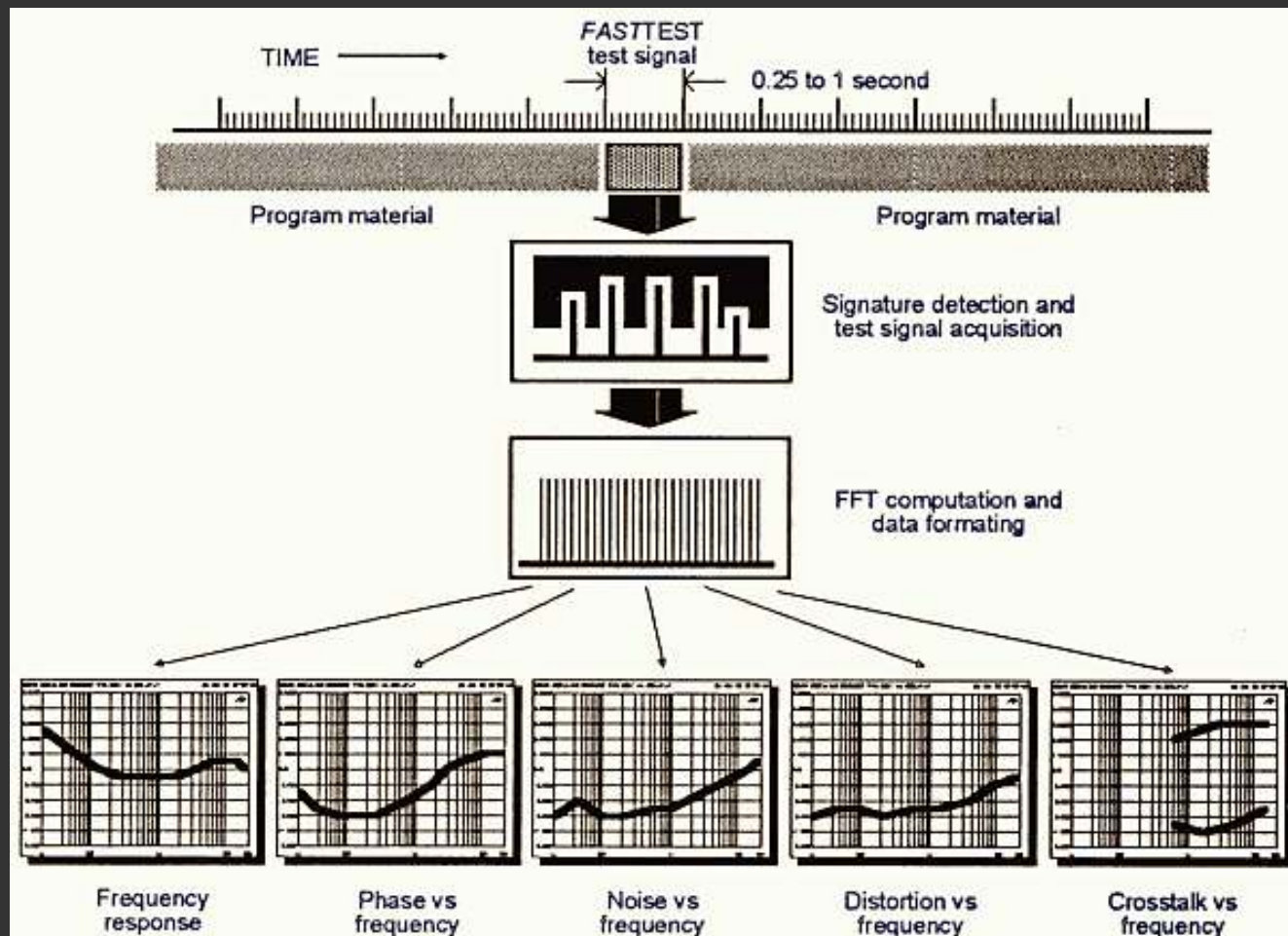
- To nie błąd. *Total distortion + noise*.
- Mierzona jest amplituda we wszystkich przedziałach FFT, za wyjątkiem tych, w których są tony sygnału z generatora.
- Mierzymy więc: prążki harmoniczne, prążki intermodulacyjne i szum.
- Wynik przedstawiany na wykresie oraz jako procent energii całego sygnału.

Pomiar charakterystyk z użyciem wielotonów

- **Poziom wyjściowy RMS** – suma amplitudy wszystkich przedziałów FFT na częstotliwościach tonów z generatora.
- **Poziom szumów** – suma amplitud w nieparzystych przedziałach FFT (w których nie ma żadnych składowych). Dodatkowo, wykreślane jest widmo szumu.
- **Stosunek sygnał-szum (SNR)**: stosunek obliczonej amplitudy całego sygnału (wszystkie przedziały) do zmierzonego poziomu szumu.

Wyzwalanie pomiaru (trigger)

Analizator może zostać uruchomiony automatycznie, po wykryciu wielotonu w monitorowanym sygnale.



Pomiary sygnału radiowego

Chcemy dokonać pomiarów sygnału radiowego.

Za pomocą wielotonów i wyzwiania:

- krótki wieloton (np. 250 ms) – może być „wbudowany” np. w „dżingiel” stacji radiowej
- analizator wykrywa obecność wielotonu, pobiera go i analizuje
- obliczone parametry są zapisywane w raporcie
- operator może zostać powiadomiony o sytuacji, w której parametry nie mieszczą się w normie (*pass/fail*).

Bibliografia

- Bob Meltzer: *Audio Measurement Handbook*. Audio Precision, 1993..
- Wayne Jones: *Measuring Digital Audio*. Broadcast Engineering, 11/2002.
- Richard C. Cabot: *Fundamentals of Modern Audio Measurement*. AES MOA-02, 1997.
- Julian Dunn: *Measurement Techniques for Digital Audio*. Audio Precision Application Note #5.
- Audio Precision: *APx500 User's Manual*.
- *System TWO User's Manual*.
- *Wikipedia*