

# Pomiary analogowych urządzeń elektroakustycznych

# Urządzenia elektroakustyczne

---

Jakie urządzenia mierzymy?

- Wejście – „gniazdo”, analogowy sygnał elektryczny, reprezentujący sygnał dźwiękowy.
  - Możemy podać sygnał z analogowego generatora.
- Wyjście – „gniazdo”, również sygnał elektryczny, reprezentujący „dźwięk” przetworzony przez badane urządzenie.
  - Możemy podać ten sygnał na analogowy analizator.
- Urządzenie może przenosić dźwięk wielokanałowy (stereofoniczny, 5.1, itp.) – sygnały w różnych kanałach są skorelowane.

# Urządzenia analogowe

---

Na razie interesują nas urządzenia analogowe (dokładniej: z analogowymi wejściami i wyjściami, przetwarzanie może być cyfrowe). Główne cechy:

- ciągła wartość amplitudy sygnału elektrycznego, reprezentuje amplitudę dźwięku,
- podatność na szумы i zakłócenia – zniekształcenia amplitudy,
- brak „zakresu”, czyli maksymalnej wartości amplitudy.

# Pomiary urządzeń

---

Nie ma jednego parametru opisującego badane urządzenie. Zwykle wykonujemy zestaw testów pomiarowych.

## Testy podstawowe:

- charakterystyka częstotliwościowa,
- zniekształcenia harmoniczne,
- poziom szumów, dynamika,
- moc (wzmacniacze).

## Testy dodatkowe:

- przesłuch,
- zniekształcenia fazowe,
- inne.

# Pomiar odpowiedzi urządzenia

---

- Z generatora podajemy na wejście urządzenia sygnał sinusoidalny, np. 1 kHz, znany poziom (np. 0 dBV).
- Chcemy pomierzyć poziom sygnału na wyjściu badanego urządzenia. Podłączamy analizator do wyjścia.
- Interesuje nas **tylko** odpowiedź urządzenia na konkretnej częstotliwości (tu: 1 kHz). Dlatego analizator musi użyć filtru wąskopasmowego aby usunąć składowe spoza badanego pasma.
- Mierzymy amplitudę/poziom sygnału po filtracji.
- Wynik daje nam **wzmocnienie** urządzenia na zadanej częstotliwości. Np. generator 0 dBV, wynik +5 dBV → wzmocnienie 5 dB.

# CHARAKTERYSTYKA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA

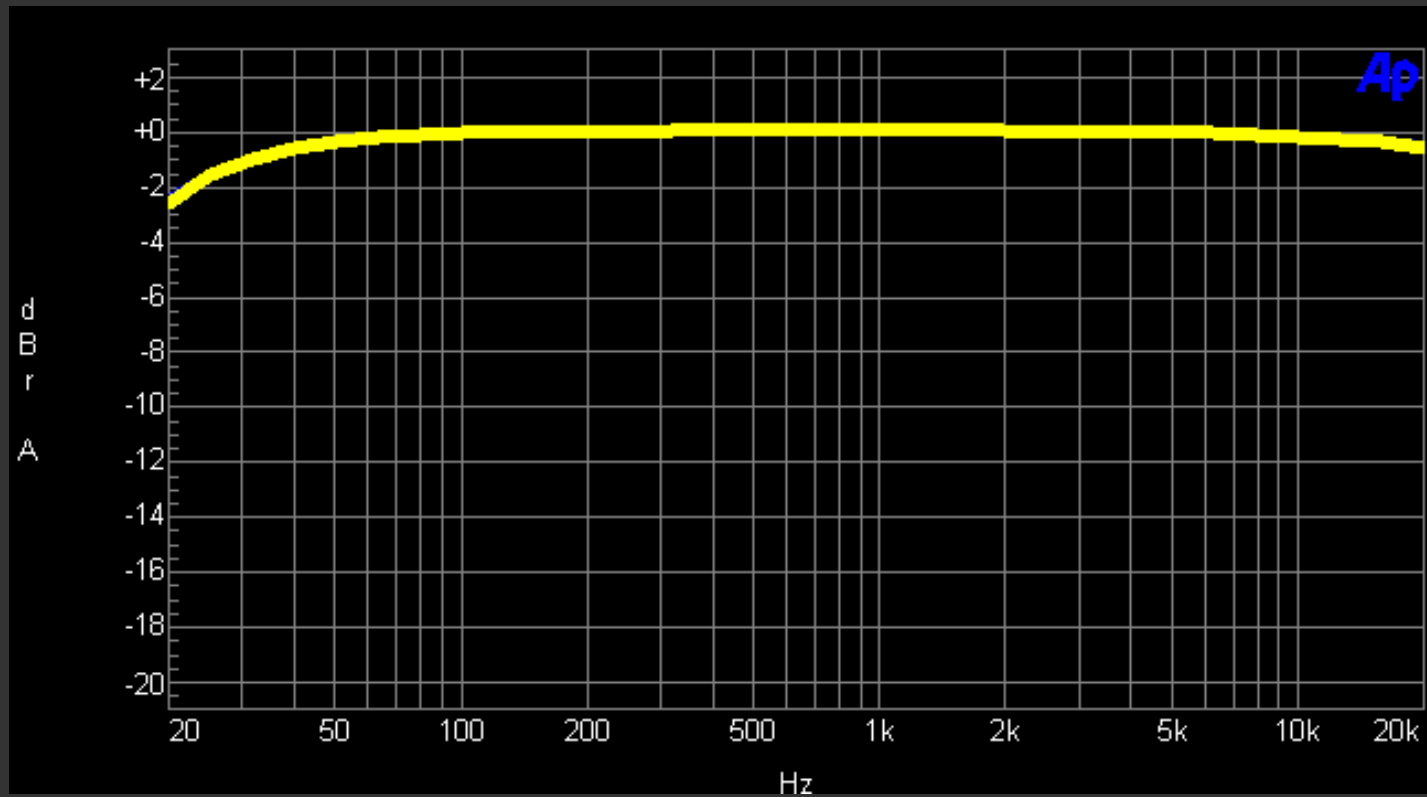
---

- Charakterystyka częstotliwościowa (*frequency response*):  
wynik pomiaru poziomu na wyjściu urządzenia:
  - dla zmiennej częstotliwości sygnału testowego,
  - przy stałym poziomie wejściowym.
- Generator i analizator (!) muszą być przestrajane
  - wygodnie jest użyć systemu zintegrowanego z automatycznie (krokowo) przestrajającym generatorem.
- Liczba punktów na skali częstotliwości – zwykle ok. 30.
- Wynik przedstawiamy w postaci wykresu:  
*poziom wyjściowy vs. częstotliwość*
- Dla sygnałów skorelowanych (np. kanał lewy i prawy):  
wspólny wykres.

# Charakterystyka częstotliwościowa

---

Typowy wynik pomiaru:



# Skala amplitudy

---

Jakie jednostki na osi pionowej?

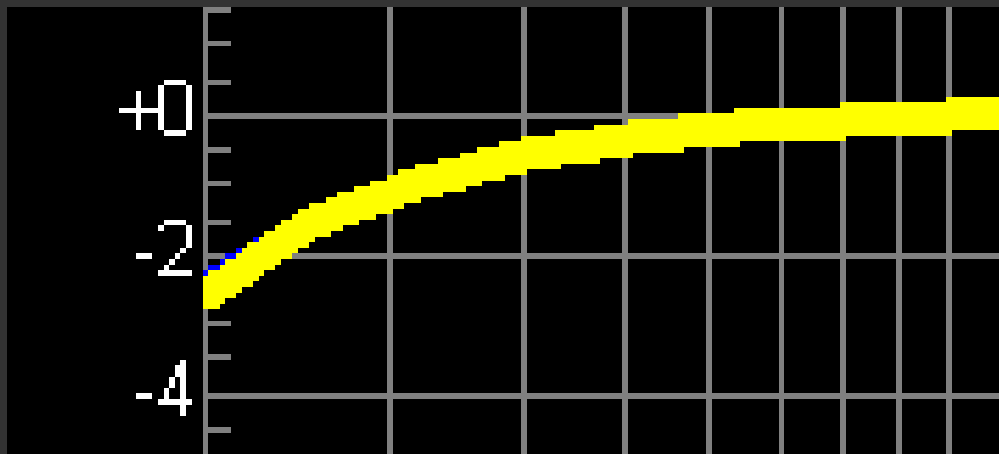
- Prawie zawsze decybele. Można użyć jednostek bezwzględnych (dBu, dBV).
- Nie ma to większego sensu dla urządzeń o regulowanym wzmacnieniu. Przy zmianie wzmacnienia, wykres będzie się przesunął „w górę lub w dół”, ale nie zmieni swojego kształtu.
- Wzmacnienie urządzenia i poziom sygnału wejściowego nie powinny mieć znaczenia. Interesują nas **odchyłki** charakterystyki od idealnej linii prostej.



# Skala amplitudy - normalizacja

---

- Przyjmujemy wartość zmierzoną dla 1 kHz za „zero referencyjne” (0 dBr).
- Wszystkie inne częstotliwości normujemy do niego:  
$$L_{\text{norm}}(f) = 20 \log_{10} (U / U_{1 \text{ kHz}}) = L(f) - L(1 \text{ kHz})$$
- Dzięki temu, wyraźnie widać odchyłki od „zera”.



# Skala amplitudy - zakres

---

Jak dobrać zakres skali pionowej?

- Tak aby dobrze pokazać, że w środku pasma charakterystyka jest płaska, a na krańcach pasma występują odchyłki, bądź ich nie ma.
- Zbyt duży zakres (np. od -120 dB do 10 dB):
  - wykres nieczytelny, nie widać czy są odchyłki.
- Zbyt mały zakres (np. od -2 dB do 0 dB):
  - za duży „zoom”, „krzywy” wykres sugeruje, że z urządzeniem jest coś nie w porządku.
- Używamy zdrowego rozsądku. Zwykle zakres od (-60 ÷ -30 dB) do +10 dB daje czytelny wykres.

# Poziom sygnału

---

Jaki poziom sygnału z generatora? Nie powinien on mieć wpływu na kształt charakterystyki, ale:

- powinien być wystarczająco duży, blisko końca zakresu liniowej pracy urządzenia – zanim wystąpi przesterowanie,
- poziom powinien być podany przy wyniku,
- warto sprawdzić zniekształcenia harmoniczne (omówione dalej w tym wykładzie),
- w praktyce, jeżeli nie ma innych zaleceń:
  - poziom sygnału 0 dBu lub 0 dBV,
  - wzmacnienie urządzenia ustawione na 1:1.

# Zakres przenoszenia

---

- Zakres przenoszenia (*frequency range*): tekstowy opis kształtu charakterystyki.
- Zakres częstotliwości, w którym charakterystyka mieści się w założonym zakresie, zazwyczaj  $\pm 3$  dB, albo od -3 dB do 0 dB.
- W specyfikacjach zwykle podaje się zakres, nie wykres.
- Interpretacja dla urządzeń nie modyfikujących widma sygnału (nie posiadających filtrów):
  - zakres przenoszenia powinien obejmować pasmo częstotliwości akustycznych (20 Hz – 22 kHz).

# Specyfikacja zakresu przenoszenia

---

Przykład prawidłowej specyfikacji:

Zakres przenoszenia: 20 Hz – 20 kHz, 0 dB, -3 dB @0 dBu

- częstotliwość dolna i górna
- maks. odchyłka w górę i w dół
- poziom sygnału testowego lub moc

Przykład niepoprawnej specyfikacji  
(typowy dla taniej chińszczyzny):

Zakres przenoszenia: 20 Hz – 20 kHz

- Jaka odchyłka?  $\pm 3$  dB? A może  $\pm 30$  dB???

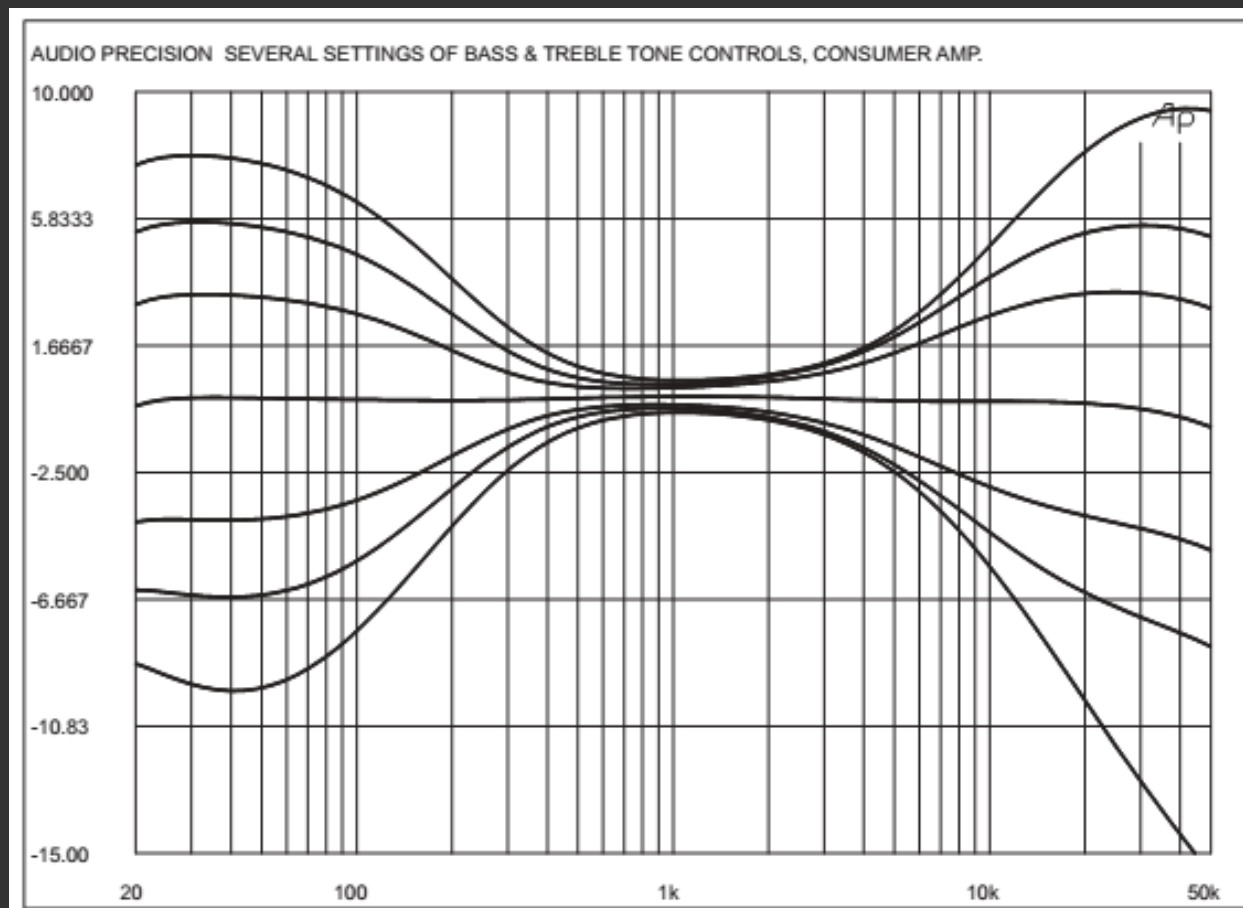
# Urządzenia modyfikujące widmo

---

- Jeżeli urządzenie posiada filtry, to nie oczekujemy płaskiej charakterystyki, ale tego, że będzie ona zgodna z założeniami.
- Przykłady: korektory barwy dźwięku, equalizery, itp.
- Metoda pomiaru jest dokładnie taka sama.
- Zwykle pomiary powtarzamy dla kilku ustawień regulatorów (np. min, zero, max).
- Tutaj już podajemy wykresy, zakres nie ma sensu.
- Wyniki przedstawiamy logicznie na wspólnych wykresach.

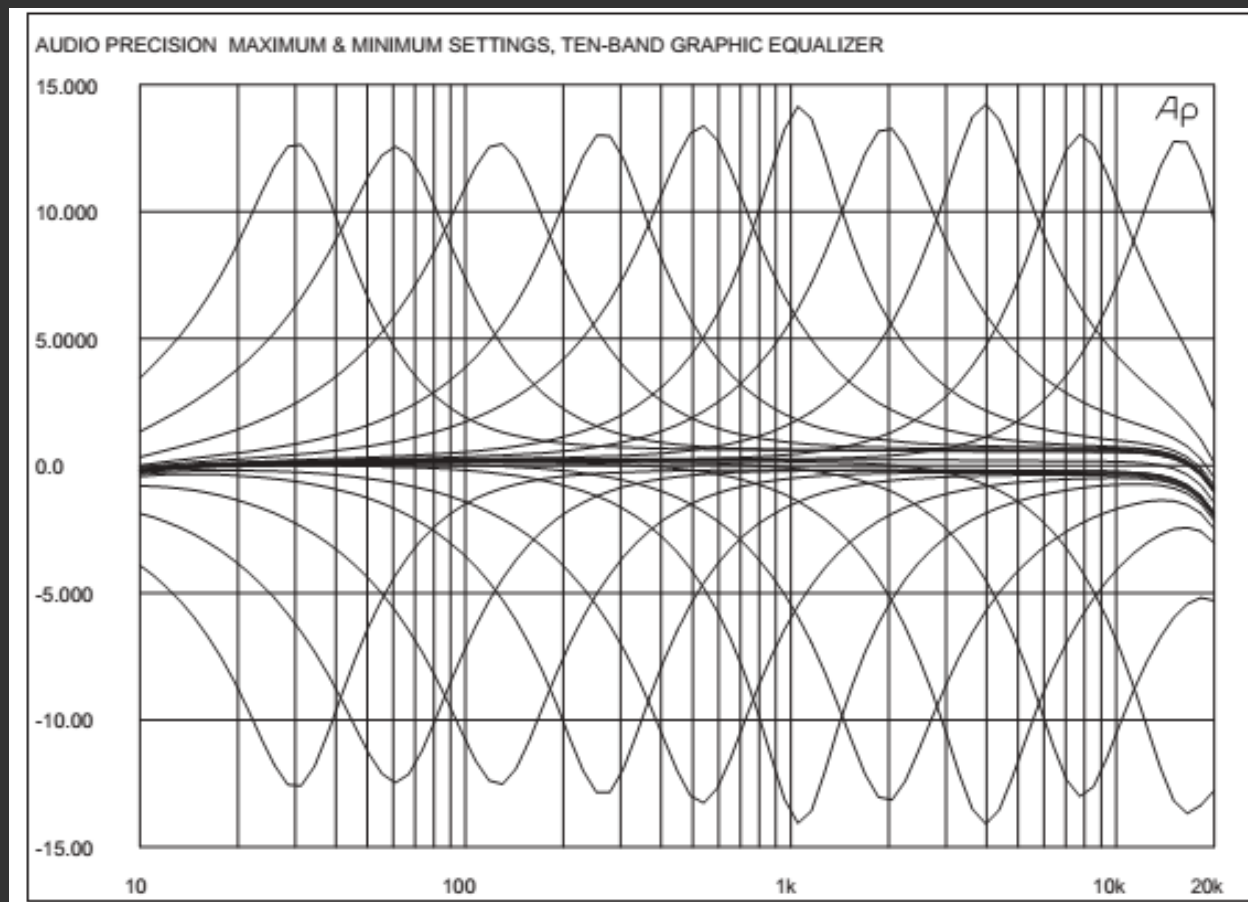
# Pomiar regulatora barwy dźwięku

Przykład wyniku pomiarów dla kilku ustawień regulatorów tonów niskich i wysokich.



# Pomiar korektora graficznego

Wspólny wykres wszystkich filtrów ustawianych na minimum i maksimum (nie badane filtry ustawione na 0)

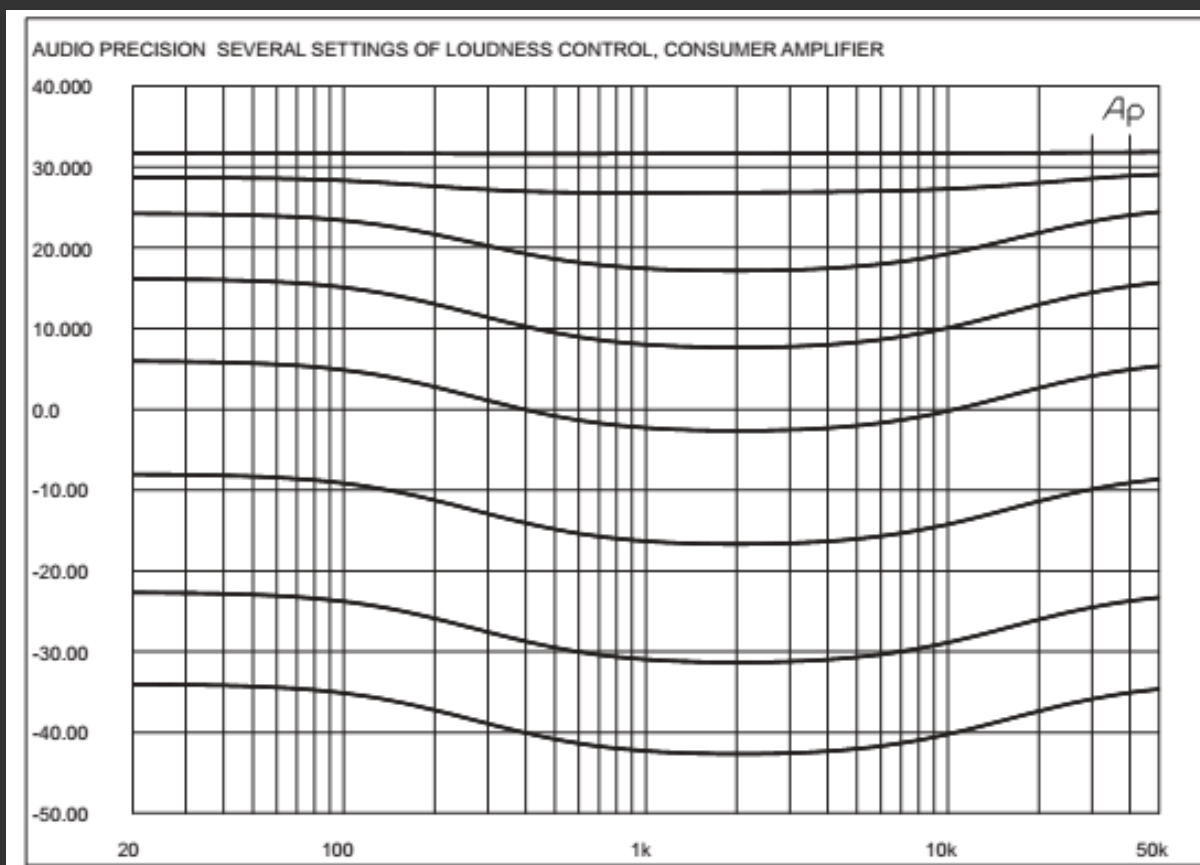




# Pomiar układu *loudness contour*

Charakterystyka zależy od poziomu wejściowego.

Pomiary powtarzane dla zmiennego poziomu sygnału z generatora.



# PRZESŁUCH / SEPARACJA

---

- Przesłuch (*crosstalk*) oznacza niepożądane przenikanie sygnału między kanałami.
- Może występować w urządzeniach oraz w połączeniach.
- W przypadku kanałów przenoszących skorelowane sygnały (np. lewy i prawy kanał stereo), mówimy o separacji (*separation*).
- Słaba separacja może powodować zaburzenia panoramy stereofonicznej.

# Pomiar przesłuchu

---

Zasada podobna jak dla charakterystyki częstotliwościowej.

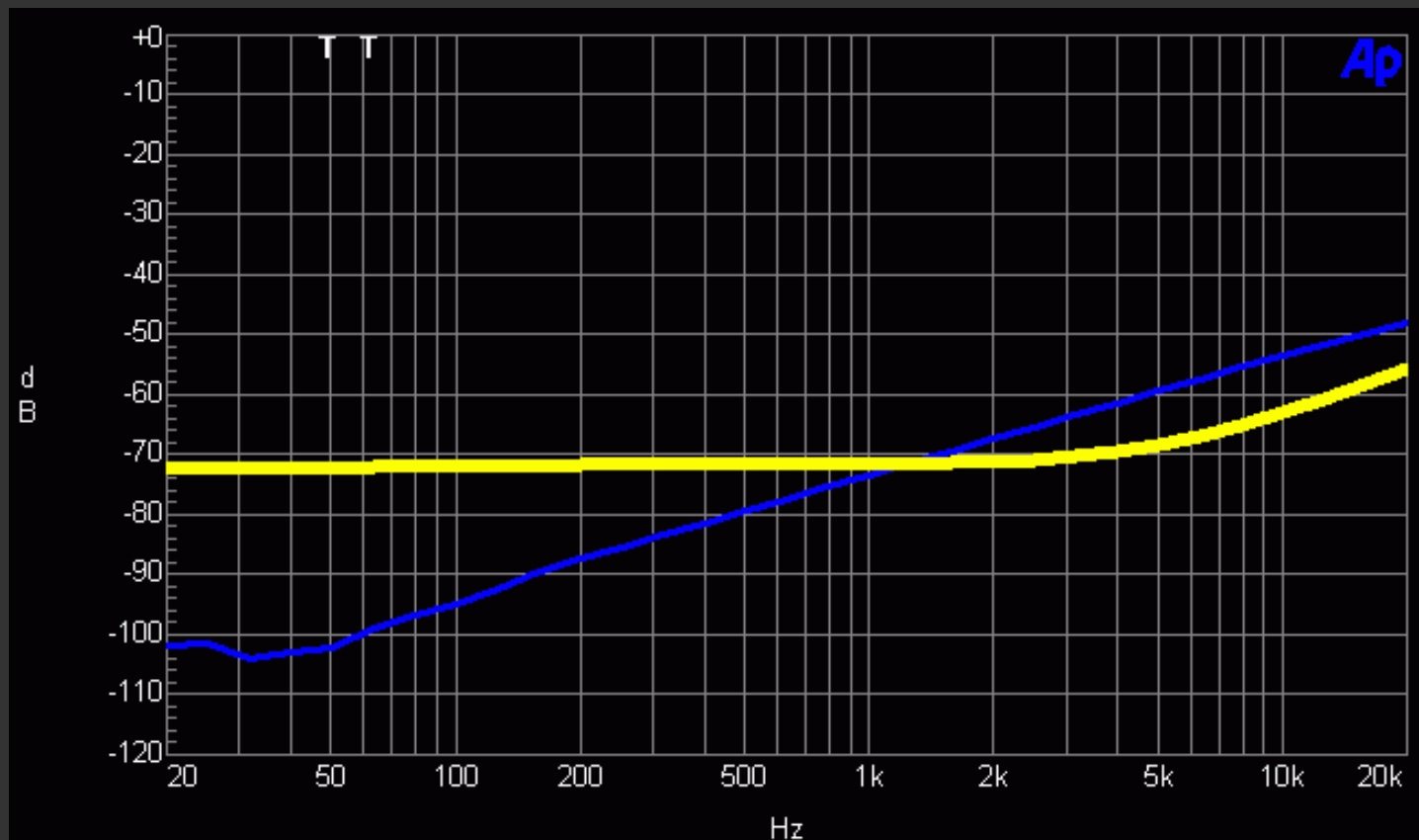
Mierzymy kanały A i B (np. lewy i prawy).

- Sygnał z generatora – na wejście A.
- Generator podłączony do wejścia B, ale nic nie wysyła.
- Pomiar poziomu sygnału  $L_A$  na wyjściu A.
- Pomiar poziomu przesłuchu  $L_B$  na wyjściu B.
- Wartość przesłuchu:  
$$L_X = 20 \log_{10} (U_B / U_A) = L_B - L_A$$
- Powtarzamy pomiar „na odwrót”:  $B \rightarrow A$ .
- Systemy wielokanałowe: pomiary kombinacji „jeden do wszystkich”.

# Pomiar przesłuchu

---

Przykład wyniku pomiarów przesłuchu:



# Pomiar przesłuchu

---

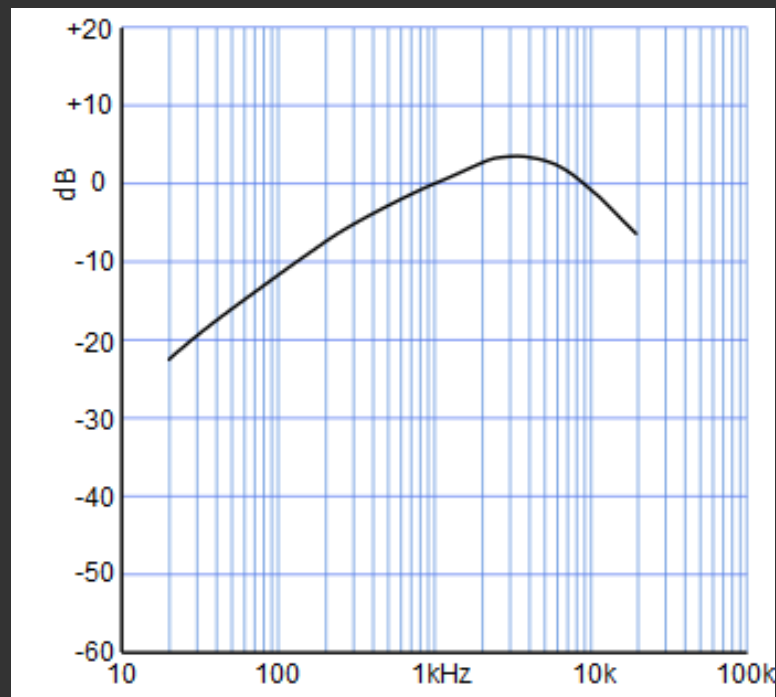
- Interpretacja: im mniej, tym lepiej.
- Przykład prawidłowej specyfikacji:  
Przesłuch: < -60 dB (20 Hz – 20 kHz @0 dBu)
  - maksymalny poziom przesłuchu,
  - poziom sygnału testowego,
  - wynik uzyskany w pełnym paśmie.
- Przykład niepoprawnej specyfikacji:  
Przesłuch: < -60 dB
  - warunki pomiarowe? zakres częstotliwości? poziom?

# Znaczenie separacji

---

- Wpływ złej separacji na percypowane zniekształcenia zależy od częstotliwości.
- Krzywa korekcyjna IBA – korekcja zmierzonej charakterystyki separacji zależnie od uciążliwości (wg krzywych słyszenia). Nie jest to standard.
- Wg. badań, separacja ok. 30 dB jest wystarczająca.

Rysunek: Wikipedia



# ZNIEKSZTAŁCENIA FAZOWE

---

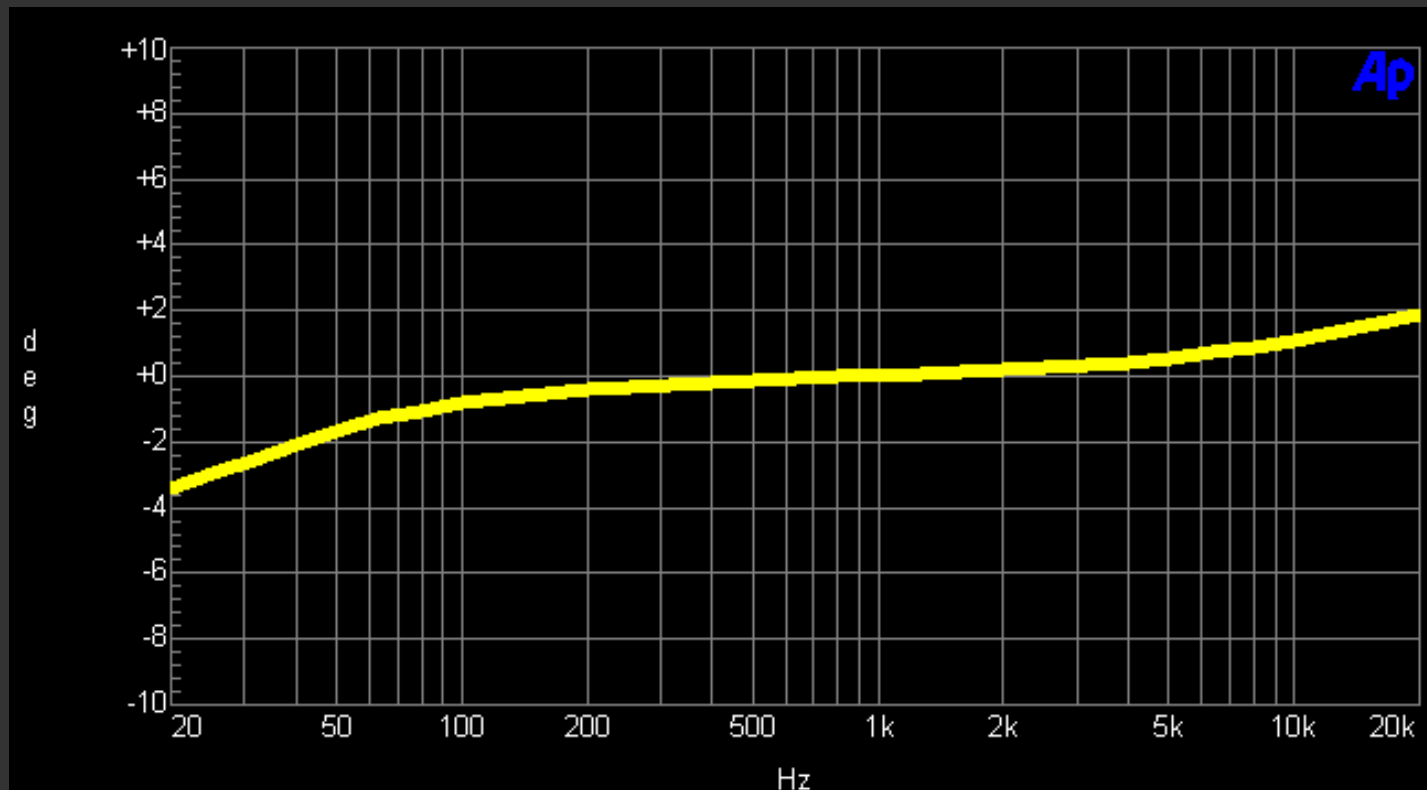
Pomiar zniekształceń fazowych polega na zmierzeniu **przesunięcia fazowego** (*relative phase*) pomiędzy dwoma kanałami AB (np. kanał lewy i prawy).

- Generator podaje ten sam sygnał (sinus) na A i B.
- Analizator mierzy różnicę fazy między sygnałami na wyjściach A i B.
- Pomiar powtarzany dla całego zakresu częstotliwości.
- Wynik przedstawiany na wykresie.
- Parametr rzadko podawany w specyfikacji.

# Zniekształcenia fazowe

---

Przykładowy wynik pomiaru przesunięcia fazowego  
(przesunięcie w stopniach vs. częstotliwość)





# Zniekształcenia fazowe

---

- Interpretacja: przesunięcie fazowe powinno być:
  - najlepiej zerowe,
  - w każdym razie, nie powinno być wyraźnych różnic dla różnych częstotliwości.
- „Krzywa charakterystyka” i duże wartości wskazują na to, że urządzenie może zniekształcać proporcje między różnymi zakresami częstotliwości.
- Stałe przesunięcie ok. 180 stopni wskazuje na to, że gdzieś w mierzonym układzie zamieniono „polaryzację” (występuje przeciwfaza).

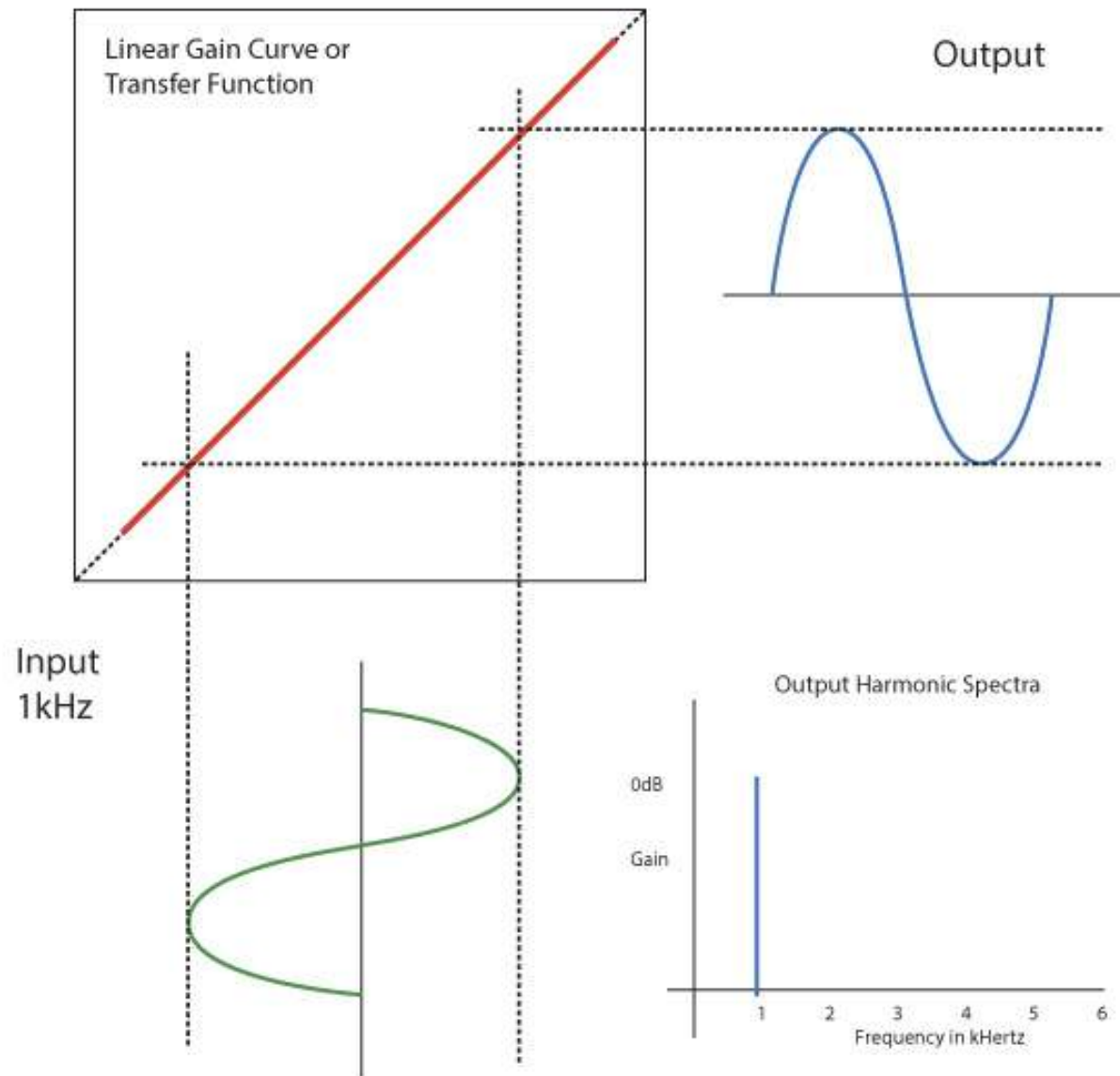
# POMIARY NIELINIOWOŚCI

---

- **Charakterystyka przenoszenia** urządzenia (*transfer function*): zależność sygnału na **wyjściu** urządzenia od sygnału na jego **wejściu**.
- W tym przypadku chodzi nam o zmierzenie charakterystyki przy zmiennym **poziomie** sygnału.
- Charakterystyka przenoszenia idealnego urządzenia jest **liniowa** – tzn.:
  - jednakowym przyrostom poziomemu na wejściu odpowiadają jednakowe przyrosty poziomu zmierzonego na wyjściu,
  - kształt sygnału nie ulega zmianie (sinus na wejściu – sinus na wyjściu).

# Urządzenie o liniowej charakterystyce

Diagram of Basic Linear Transfer Curve



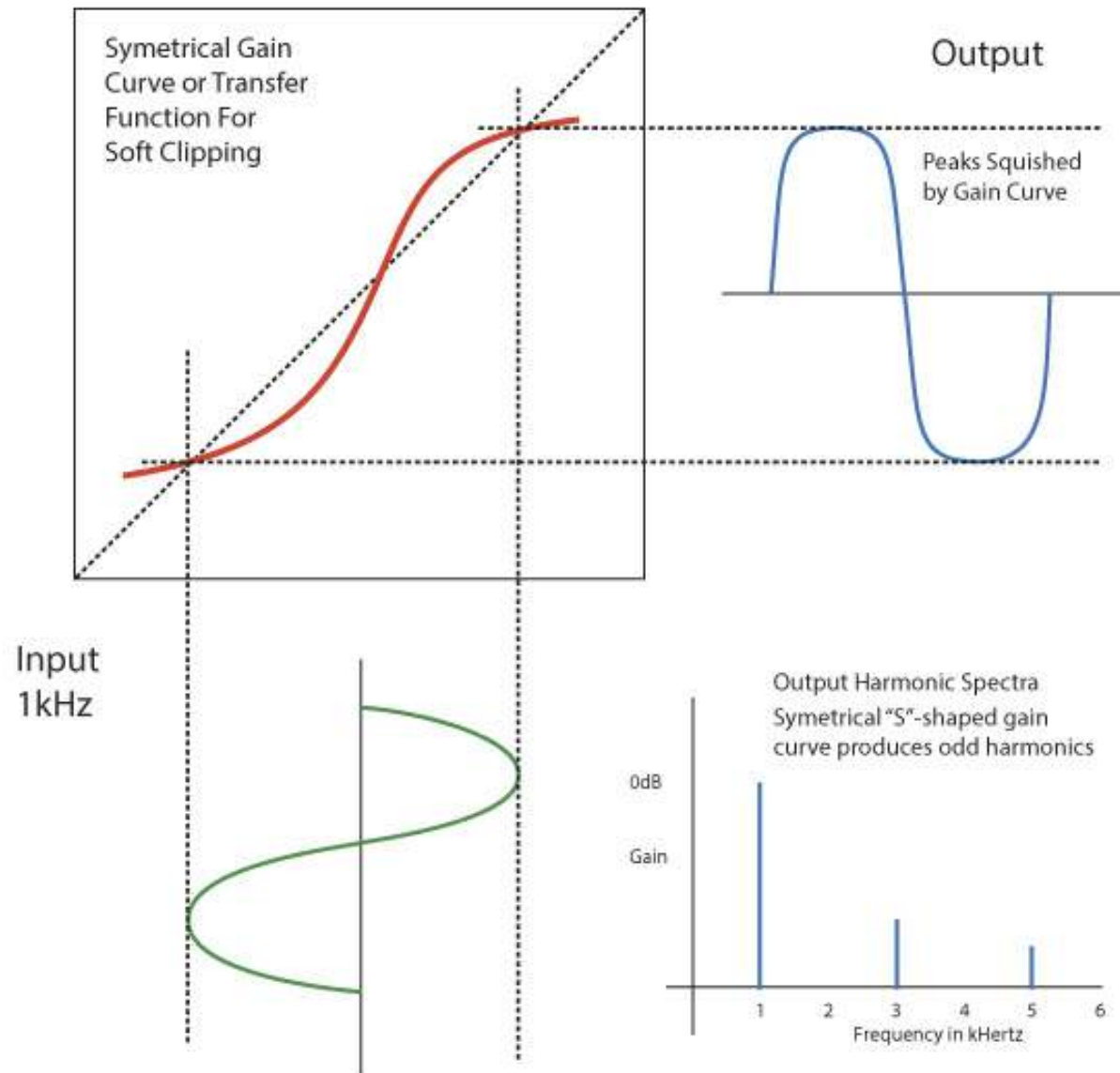
# Nieliniowość charakterystyki

---

- Praktycznie stosowane urządzenia:
  - zakresy nieliniowe na krańcach (niskie/wysokie p.)
  - **zakres liniowej pracy** w środku charakterystyki.
- Oczekujemy że:
  - zakres liniowej pracy będzie jak największy,
  - odchyłki od liniowości w tym zakresie będą jak najmniejsze.
- Nieliniowość charakterystyki:
  - zniekształca postać czasową sygnału,
  - wprowadza do widma **składowe harmoniczne**.
- **Zniekształcenia nieliniowe = zn. harmoniczne**

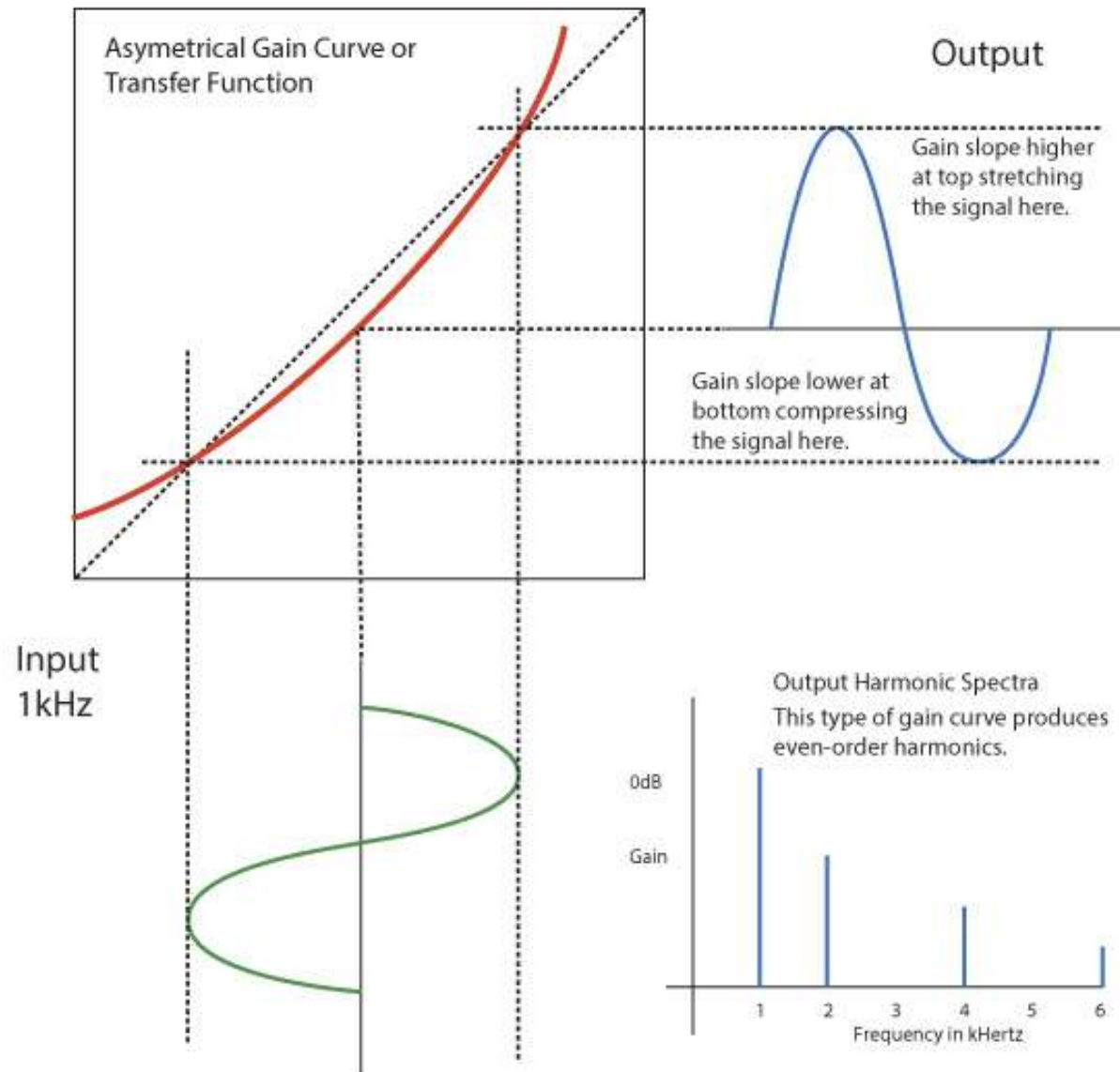
# Przykład charakterystyki nieliniowej (1)

Diagram of Symmetrical or "S"-shaped Transfer Curve



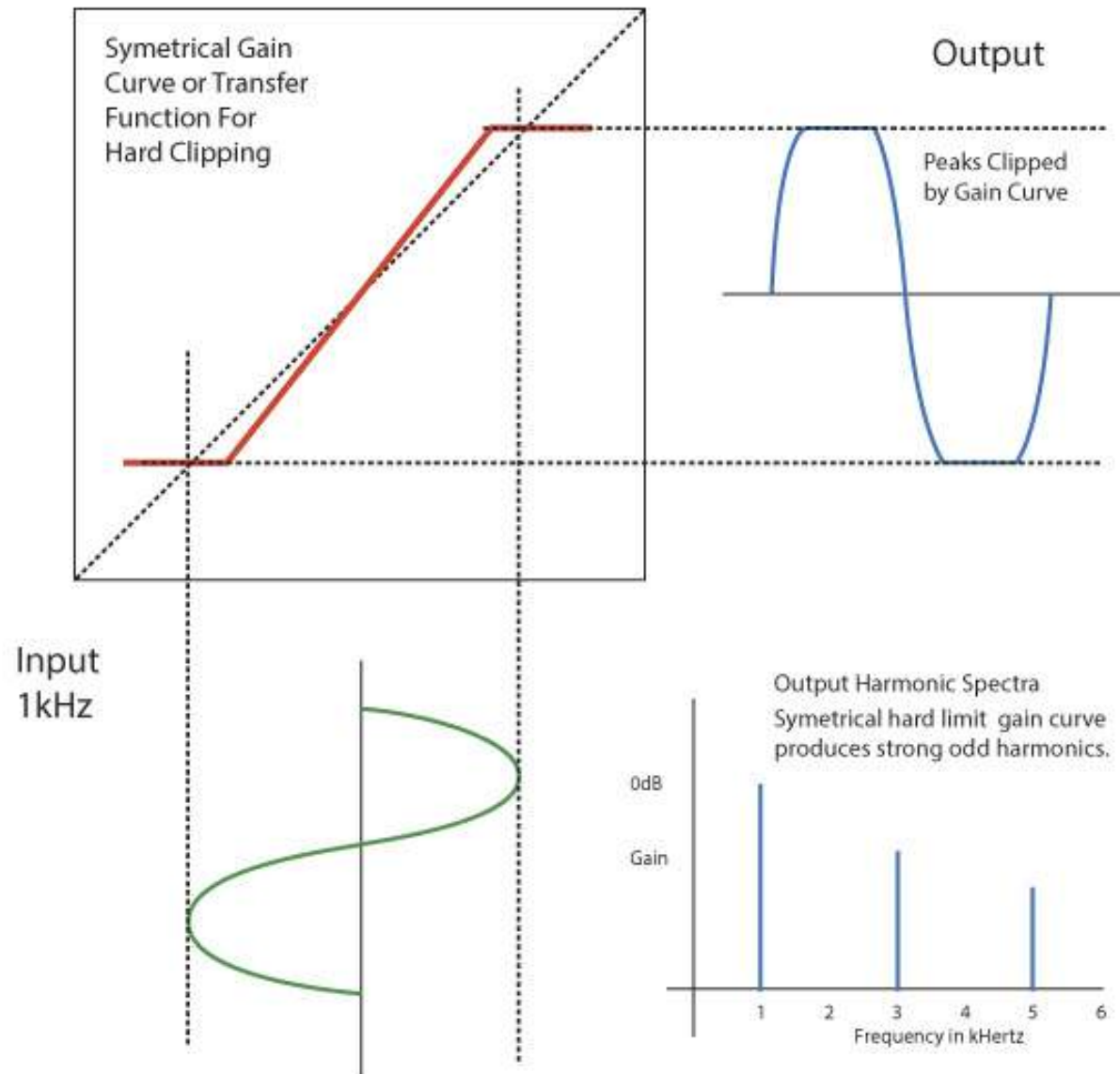
# Przykład charakterystyki nieliniowej (2)

Diagram of Simple, Asymmetrical Transfer Curve



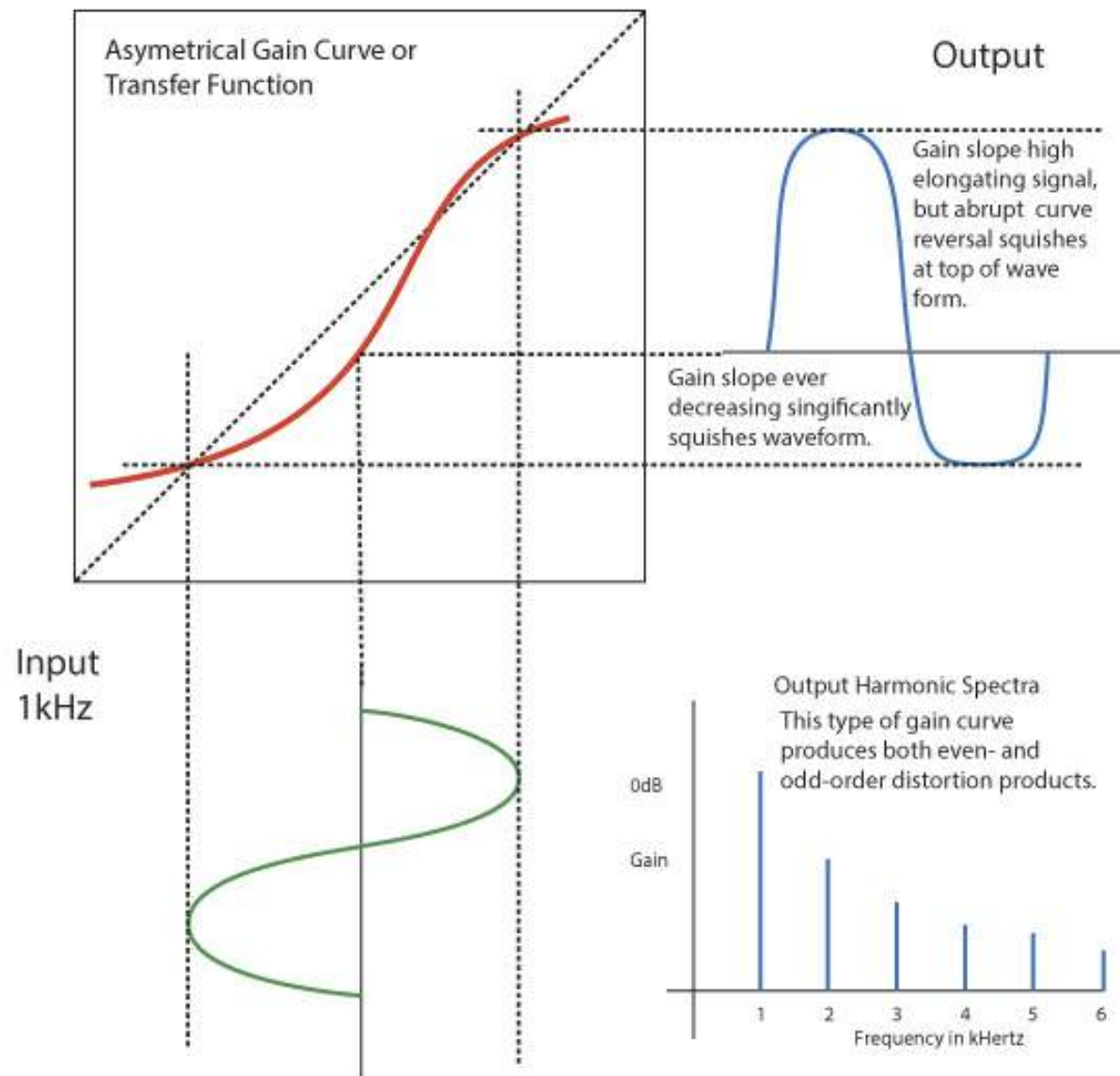
# Przykład charakterystyki nieliniowej (3)

Diagram of a Hard Clipping Transfer Curve



# Przykład charakterystyki nieliniowej (4)

Diagram of Compound Transfer Curve





# Pomiar liniowości charakterystyki

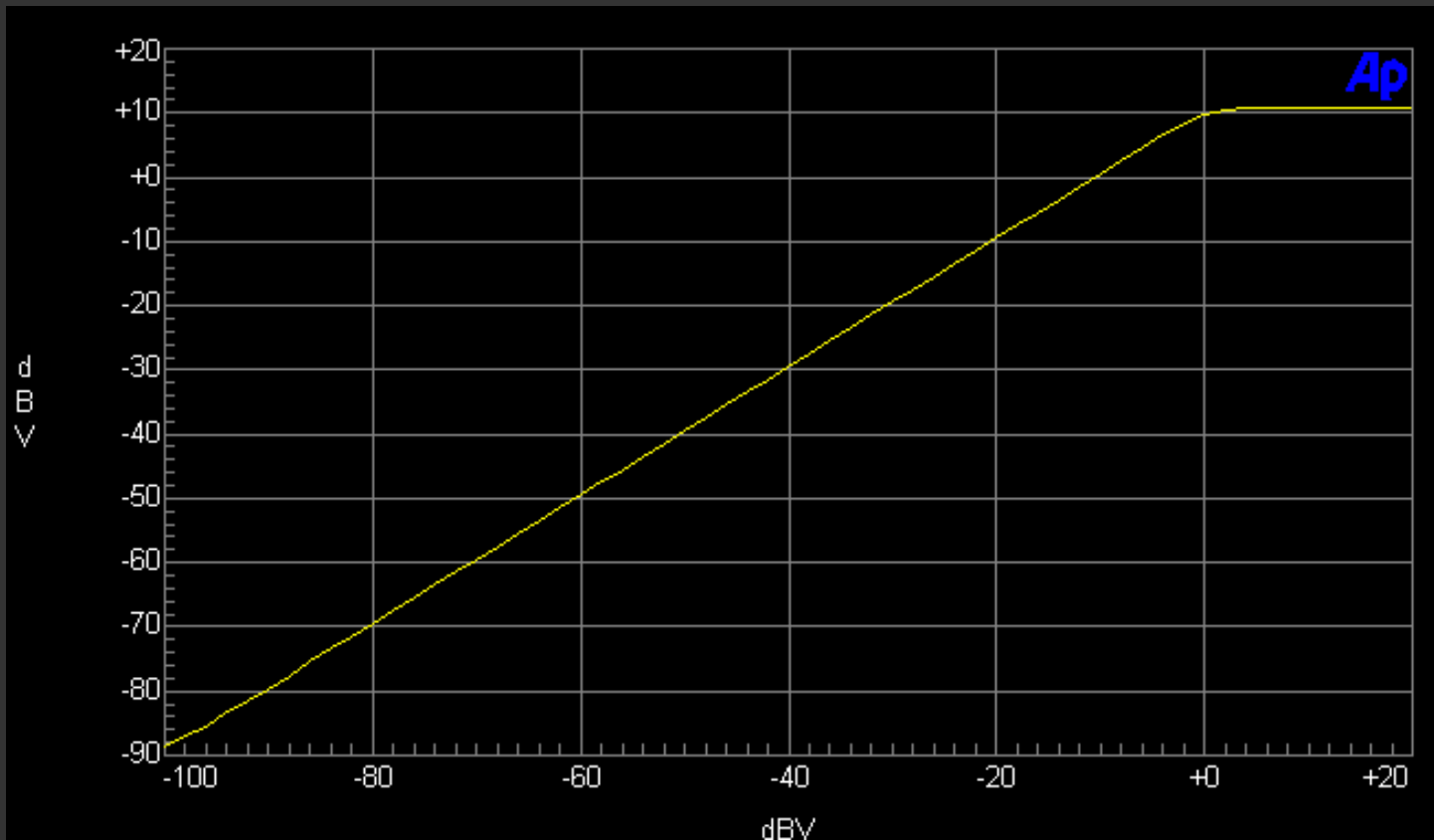
---

- Sygnał testowy – sinus o stałej częstotliwości, standardowo 1 kHz.
- Poziom sygnału testowego na wejściu badanego urządzenia – zmieniany w szerokim zakresie, od bardzo niskiego do wysokiego (np. -100 dB do +20 dB)
  - uwaga – nie podawać zbyt wysokich poziomów jeżeli istnieje ryzyko uszkodzenia urządzenia!
  - automatyczne przestrajanie – *level sweep*
- Pomiar poziomu sygnału na wyjściu urządzenia
  - analizator musi użyć filtru aby pomierzyć tylko pasmo wokół 1 kHz.

# Charakterystyka liniowości

Typowy wykres charakterystyki liniowości  
- poziom wyjściowy vs. poziom wejściowy  
(*input-output linearity*)

$L_{out}$

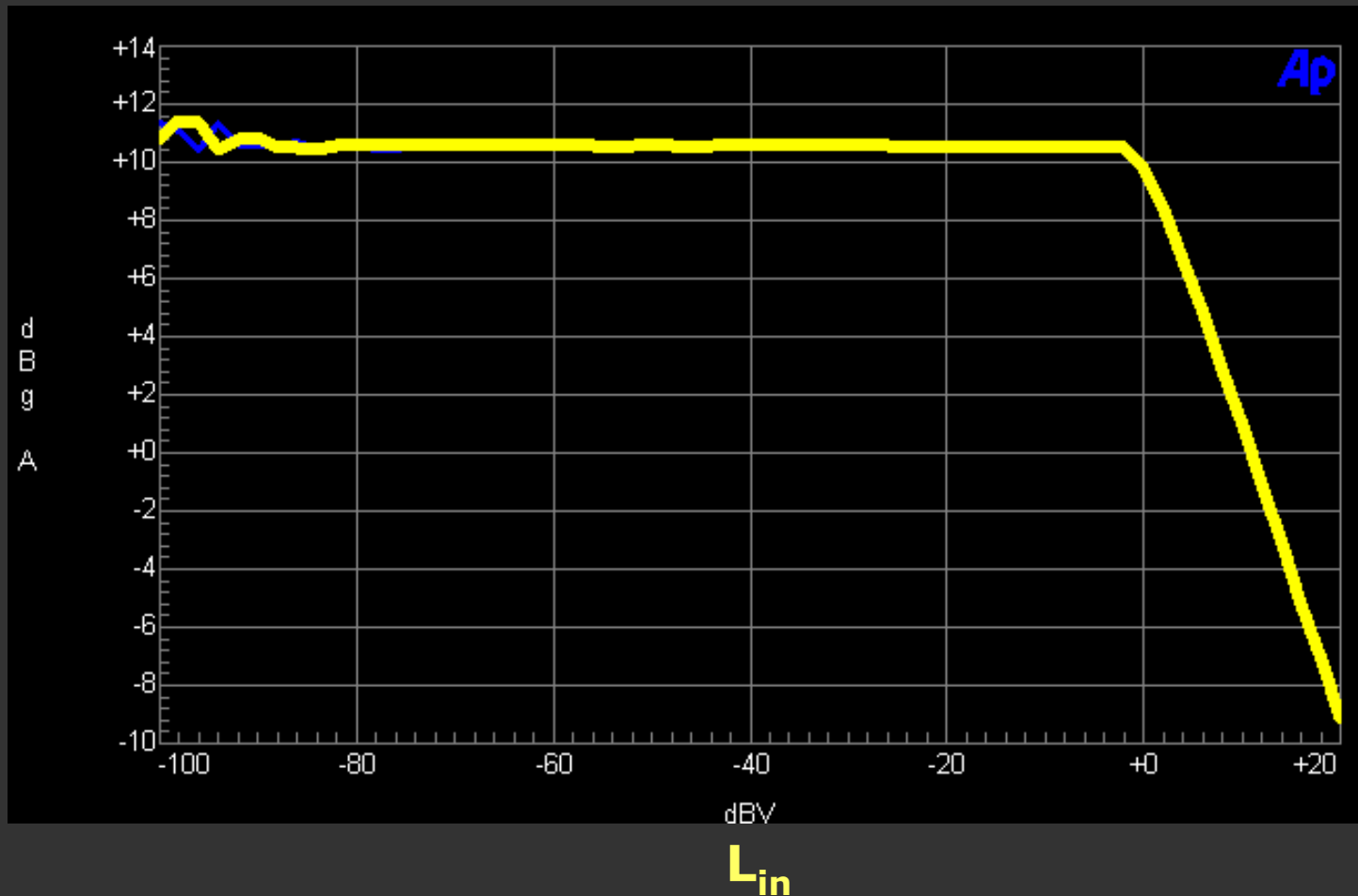


$L_{in}$

# Charakterystyka wzmocnienia

Ten sam pomiar, wynik w bardziej czytelnej formie:  
**wzmocnienie** (poziom wyjściowy – p. wejściowy)  
vs. **poziom wejściowy**. Nieformalna jednostka dBg.

$$L_{out} - L_{in}$$

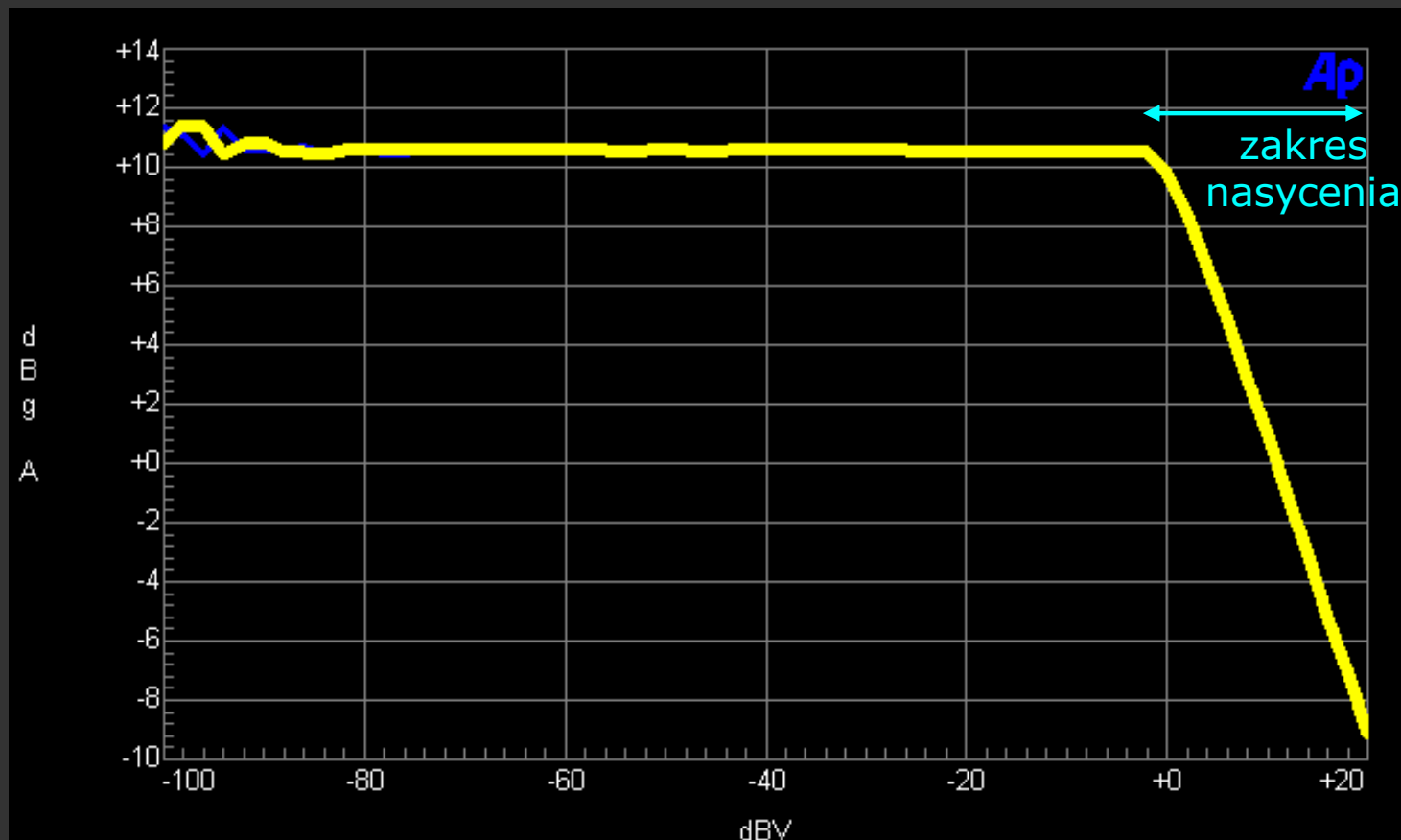


# Przyczyny nieliniowości (1)

Zakres **wysokich** poziomów: przesterowanie (nasycenie).

Brak możliwości przeniesienia tak dużych poziomów.

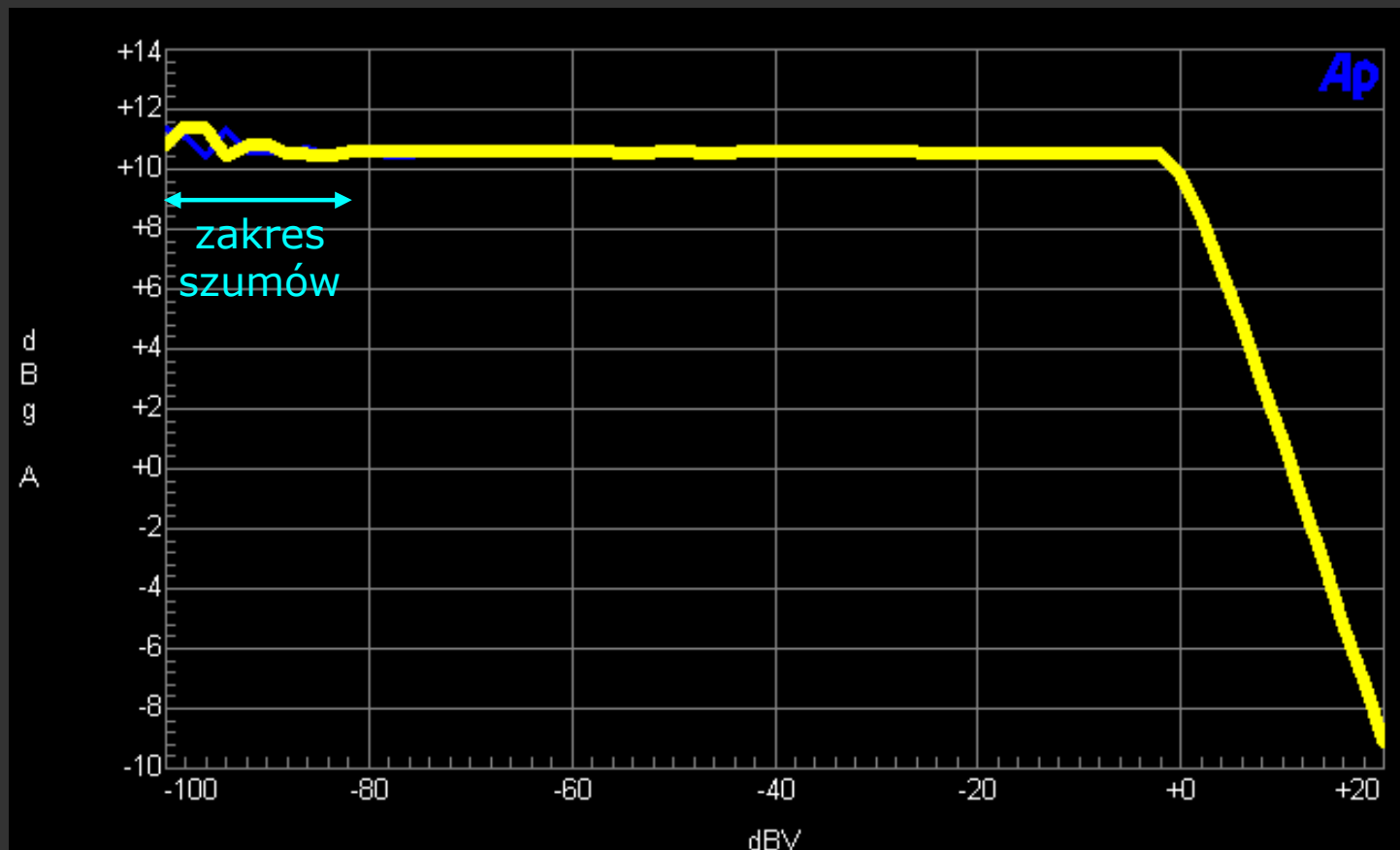
Zwykle: efekt zadziałania ogranicznika poziomu.



# Przyczyny nieliniowości (2)

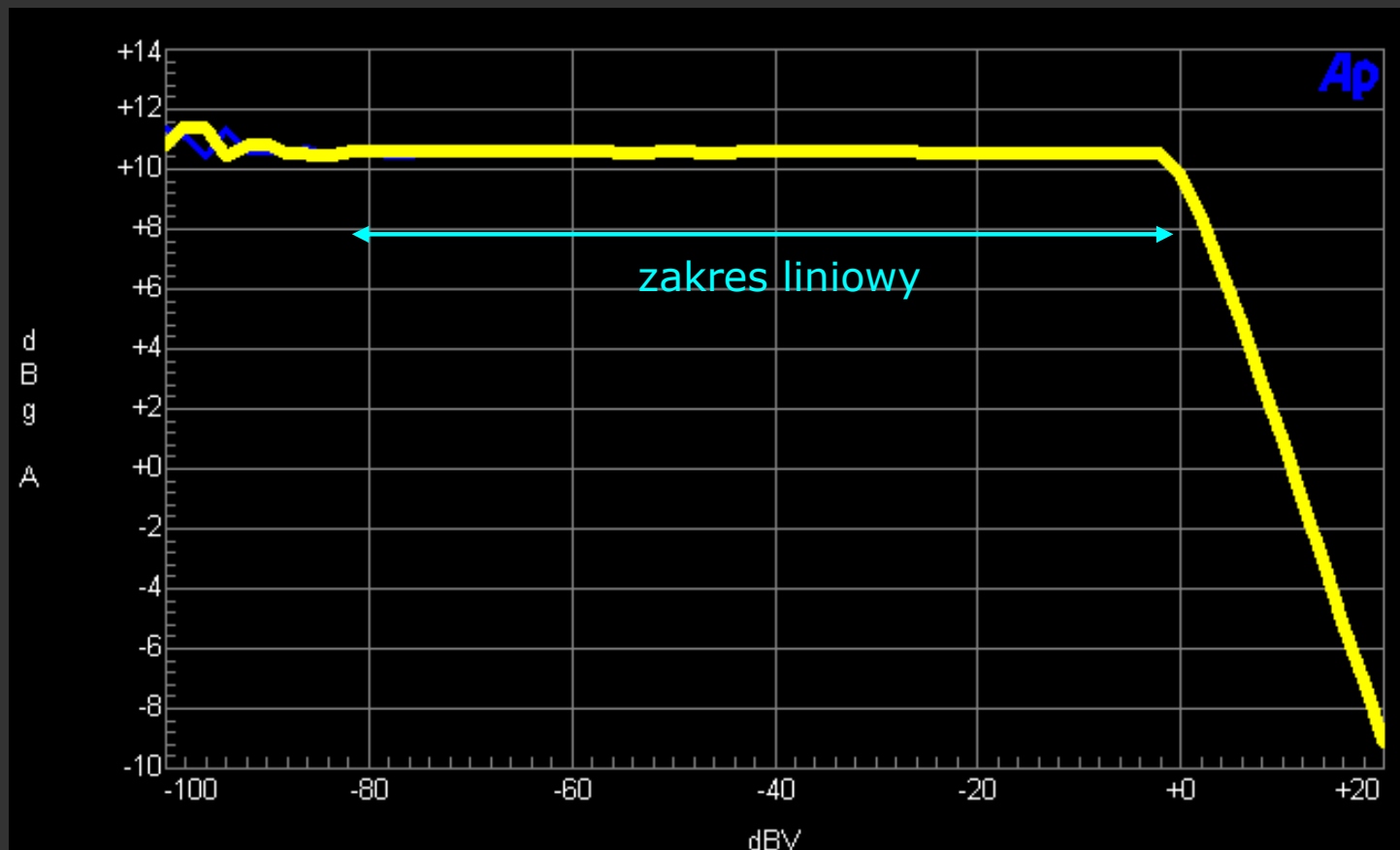
Zakres niskich poziomów: wpływ szumu.

Poziom szumu jest porównywalny z poziomem sygnału.



# Przyczyny nieliniowości (3)

Zakres **liniowy** w środku zakresu – nieliniowości są spowodowane niedoskonałością elementów urządzenia. Zakres liniowy wyznacza **dynamikę** urządzenia.



# Współczynnik THD

---

## Współczynnik zniekształceń harmoniczných THD

(*total harmonic distortion*) – ilościowa ocena zniekształceń.

Stosunek energii wszystkich **harmoniczných** dodanych do sygnału w wyniku nieliniowości charakterystyki, do energii **wszystkich** składowych (w tym na częstotliwości testowej).

$$k_n = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100\%$$

$U_1$  – ampl. składowej widma na cz. sygnału testowego ( $f_0$ )

$U_2, U_3, \dots$  - ampl. harmoniczných na  $2f_0, 3f_0, \dots$

# Współczynnik THD

---

- Czasem używa się innej definicji: w mianowniku jest energia składowej podstawowej (wiele źródeł zaleca tę definicję):

$$k_n = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%$$

- Dla niskich poziomów zniekształceń, obie definicje są równoważne.
- W przypadku obu definicji, należy podać ile składowych harmonicznnych jest branych pod uwagę (zwykle 4-5).



# Pomiar THD

---

Metoda pomiaru THD:

- z generatora wysyłany jest sinus
- analizator musi pomierzyć amplitudę:
  - składowej na częstotliwości generatora,
  - kilku (zwykle 4-5) składowych harmonicznym
- współczynnik jest obliczany wg. definicji.

Skomplikowana analiza – głównie analizatory cyfrowe.

Czasami THD jest podawany w decybelach:

$$\text{THD[dB]} = 20 \log \frac{\text{THD}[\%]}{100}$$

$$\text{THD}[\%] = 100 \cdot 10^{\frac{\text{THD[dB]}}{20}}$$

# Współczynnik zawartości harmonicznej

---

- *Distortion product ratio*
- Dla każdej harmonicznej dodanej do sygnału na skutek nieliniowości można obliczyć współczynnik zawartości.
- Jest to stosunek energii danej harmonicznej do energii wszystkich składowych, lub składowej podstawowej :

$$k_i = \frac{U_i}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100\%$$

$$k_i = \frac{U_i}{U_1} \cdot 100\%$$

- Pomiar tego współczynnika dla kilku harmonicznych może dać informacje dotyczące kształtu (symetryczności) funkcji przenoszenia.
- Może to pomóc w ustaleniu źródła zniekształceń.

# Praktyczny pomiar zniekształceń (THD+N)

---

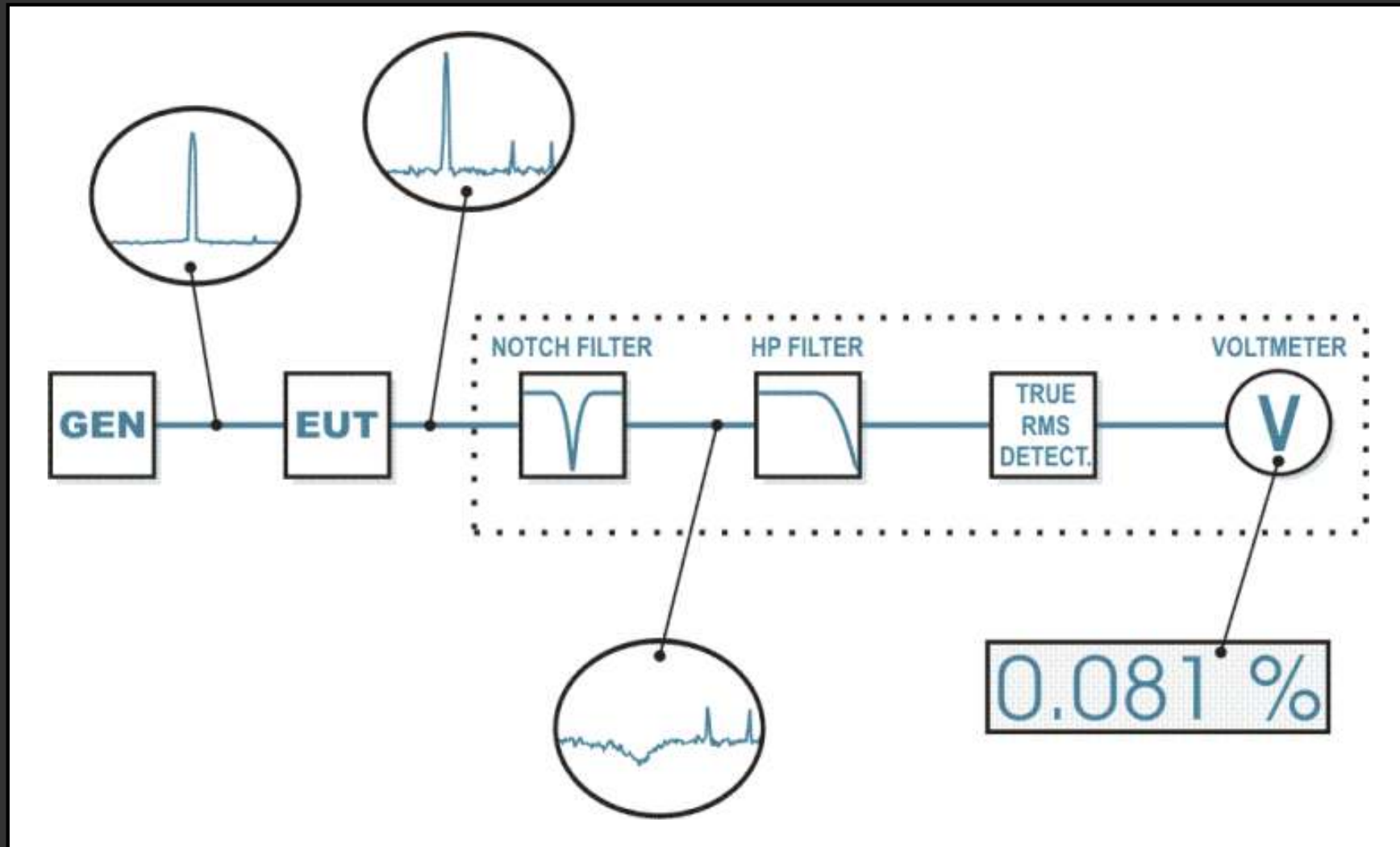
Uproszczona metoda, którą zastosowano w czasach analogowych analizatorów:

- generator wysyła na wejście sinusa,
- pierwszy pomiar: amplituda sygnału na wyjściu badanego sygnału (bez przetwarzania)
- drugi pomiar:
  - odfiltrowanie pasma wokół częstotliwości tonu testowego (filtr typu notch)
  - pomiar amplitudy pozostałego sygnału, zawierającego zniekształcenia harmoniczne i szum
- Stosunek drugiego wyniku do pierwszego – współczynnik zniekształceń harmonicznych THD+N.

# Praktyczny pomiar zniekształceń (THD+N)

## Ilustracja pomiaru

<http://waynejones.net/wayne/techtips/techtip3/index.htm>



# WSPÓŁCZYNNIK THD+N

---

## *Total harmonic distortion + noise*

- Stosunek energii składowych harmoniczných dodanych do sygnału na skutek nieliniowości, wraz z szumem, do całkowitej energii sygnału.
- Interpretacja: jaką część energii sygnału stanowią zniekształcenia harmoniczne oraz szum.
- Znacznie prostszy pomiar niż THD.
- W związku z tym, pomiar THD+N jest standardem pomiaru zniekształceń harmoniczných i podawania wyniku w specyfikacjach.

# THD+N a THD

---

- Wartości THD+N i THD nie są porównywalne ze sobą.
- Wartość THD+N będzie większa ze względu na udział szumu w wyniku.
- THD+N może zawierać również inne zakłócenia, np. od sieci energetycznej.
- Cyfrowy pomiar THD jest prosty, ale należy używać go tylko „do własnych celów” (diagnostyka).
- Określenie „zniekształcenia harmoniczne” w specyfikacji urządzenia jest zawsze interpretowane jako THD+N.

# SINAD

---

- SINAD – *Signal to noise and distortion ratio*
- Jest to odwrotność THD+N.
- Wyraża stosunek energii całego sygnału do energii zniekształceń i szumu.
- Podawany jest w decybelach.
- Stosowany jest głównie w systemach transmisji sygnału radiowego oraz w innych systemach o dużym poziomie szumu w sygnale.
- Miara „jakości” sygnału – im wyższa, tym lepiej.

# Charakterystyka zniekształceń harmonicznych

---

- Wartość współczynnika zniekształceń harmonicznych
  - zawsze zależy od poziomu sygnału testowego (oraz od ustawionego wzmocnienia urządzenia),
  - może zależeć od częstotliwości sygnału.
- Aby uzyskać pełną informację, musimy pomierzyć i wykreślić charakterystykę współczynnika:
  - w funkcji amplitudy (stała częstotliwość, 1 kHz),
  - w funkcji częstotliwości (stały poziom).

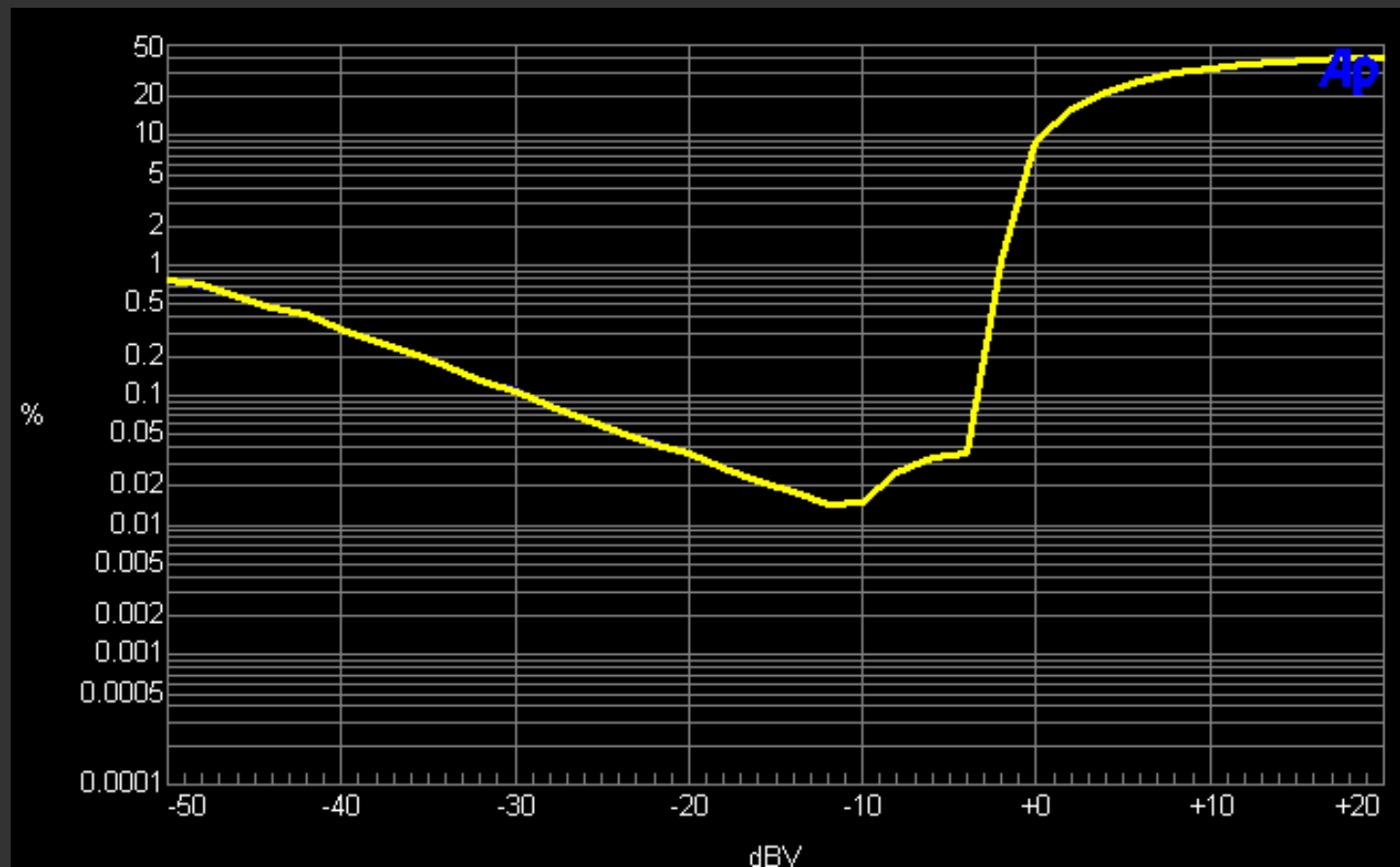


# THD+N w funkcji amplitudy

---

Przykład uzyskanej charakterystyki:

THD+N [%] vs. poziom sygnału 1 kHz na wejściu



# THD+N w funkcji amplitudy

---

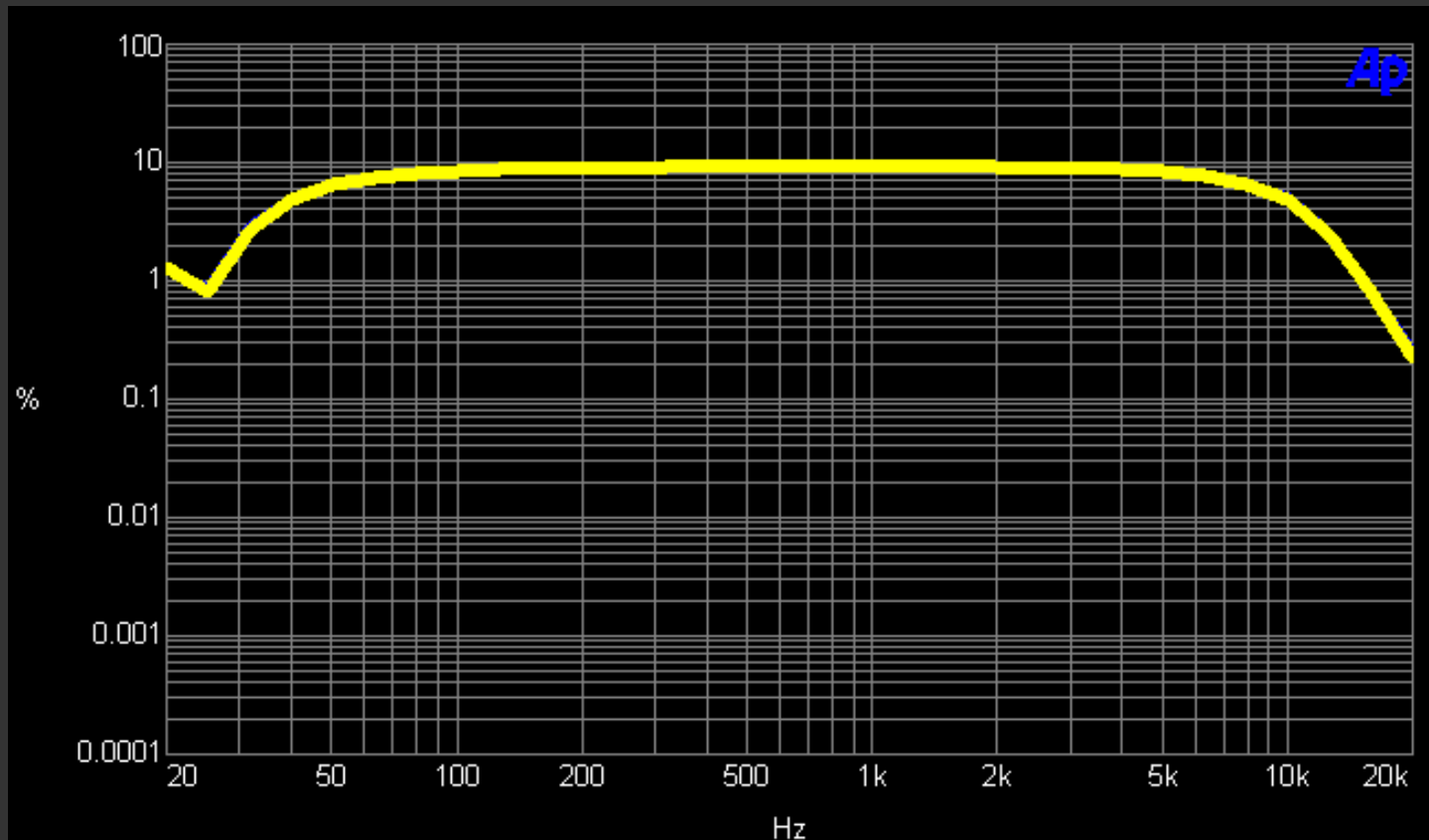
Interpretacja wykresu.

- THD+N rośnie liniowo gdy maleje poziom wejściowy, ponieważ wzrasta udział szumu w energii sygnału.
- Powyżej pewnego poziomu na wejściu, THD+N zaczyna bardzo gwałtownie rosnać – urządzenie wchodzi w zakres nasycenia (przesterowanie).
- Maksymalny poziom wejściowy, dla którego THD+N jest poniżej założonego poziomu (np. 0.1%), wyznacza koniec liniowego zakresu pracy urządzenia.
- Jest to maksymalny poziom wejściowy nie powodujący istotnego zniekształcenia sygnału.

# THD+N w funkcji częstotliwości

---

Przykładowy wynik pomiaru: THD+N [%] vs. częstotliwość.  
Wynik zależy od poziomu wejściowego – należy go podać.



# THD+N w funkcji częstotliwości

---

## Interpretacja wykresu

- Pasma częstotliwości jest ograniczone do 22 kHz.
- Dla wysokich częstotliwości maleje liczba mierzonych harmonicznym – nie mieszczą się one w mierzonym zakresie częstotliwości. Mierzymy tylko szum.
- Dlatego obserwujemy spadek THD+N powyżej pewnej częstotliwości.
- Czy rzeczywiście słyszalne zniekształcenia w tym zakresie są mniejsze?
- Tylko w przypadku gdy sygnałem wejściowym jest sinus!

# Zniekształcenia intermodulacyjne

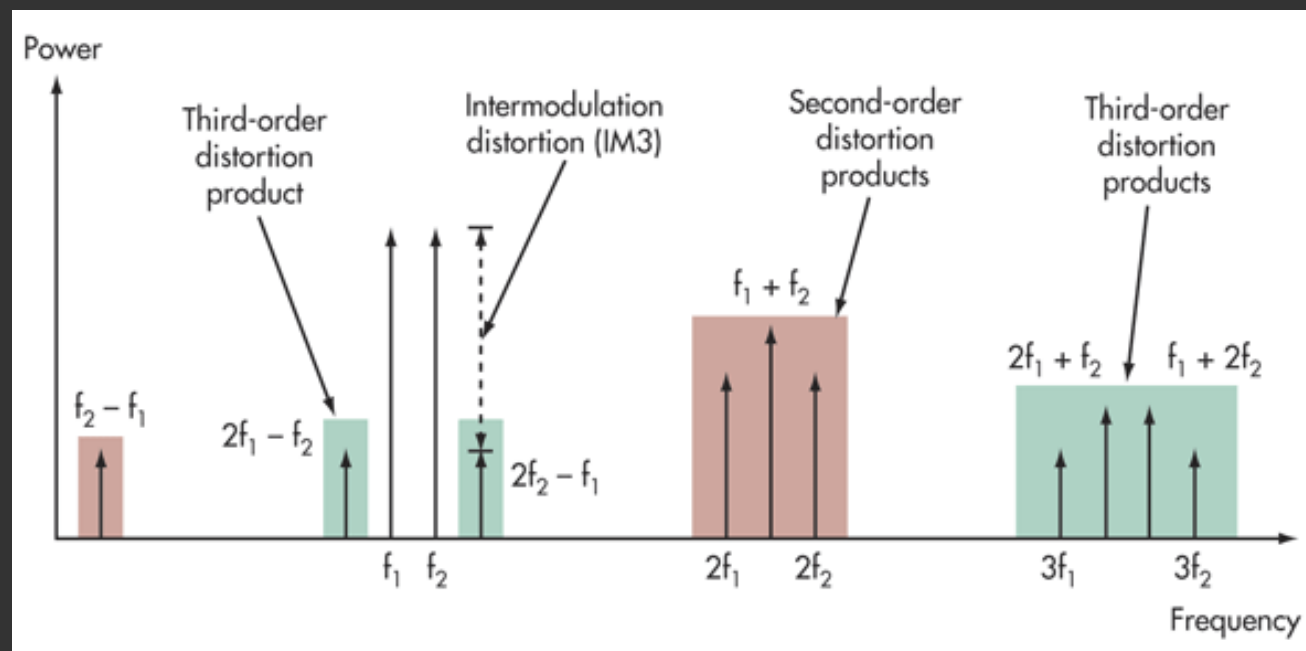
---

- Pomiar zniekształceń sinusami nie oddaje rzeczywistych warunków. Muzyka i mowa to sygnały złożone.
- Co stanie się jeżeli na nieliniowe urządzenie podamy dwa sinusy o częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$  jednocześnie?
- W widmie sygnału wyjściowego powstaną produkty intermodulacji na częstotliwościach:  
 $m * f_1 \pm n * f_2 \quad m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$
- Pomiar THD+N nie bierze tego pod uwagę.

# Zniekształcenia intermodulacyjne

## Ilustracja zniekształceń intermodulacyjnych

<http://electronicdesign.com/communications/understanding-intermodulation-distortion-measurements>



# Układ do pomiaru IMD

---

Pomiar współczynnika **IMD** (*intermodulation distortion*) wymaga:

- generatora, który wytwarza jednocześnie **dwuton** – sumę dwóch sinusów o regulowanych częstotliwościach i amplitudach,
- analizatora, który dokonuje dość skomplikowanej analizy sygnału z wyjścia urządzenia.

Pomiary IMD nie należą do standardowego zestawu testów. Moduły do pomiaru IMD są zwykle dostępne jako opcja, nie wchodzi w skład podstawowej wersji systemu pomiarowego.

# SMPTE IMD

---

Pomiar IMD wg standardu SMPTE (SMPTE RP120-1983)

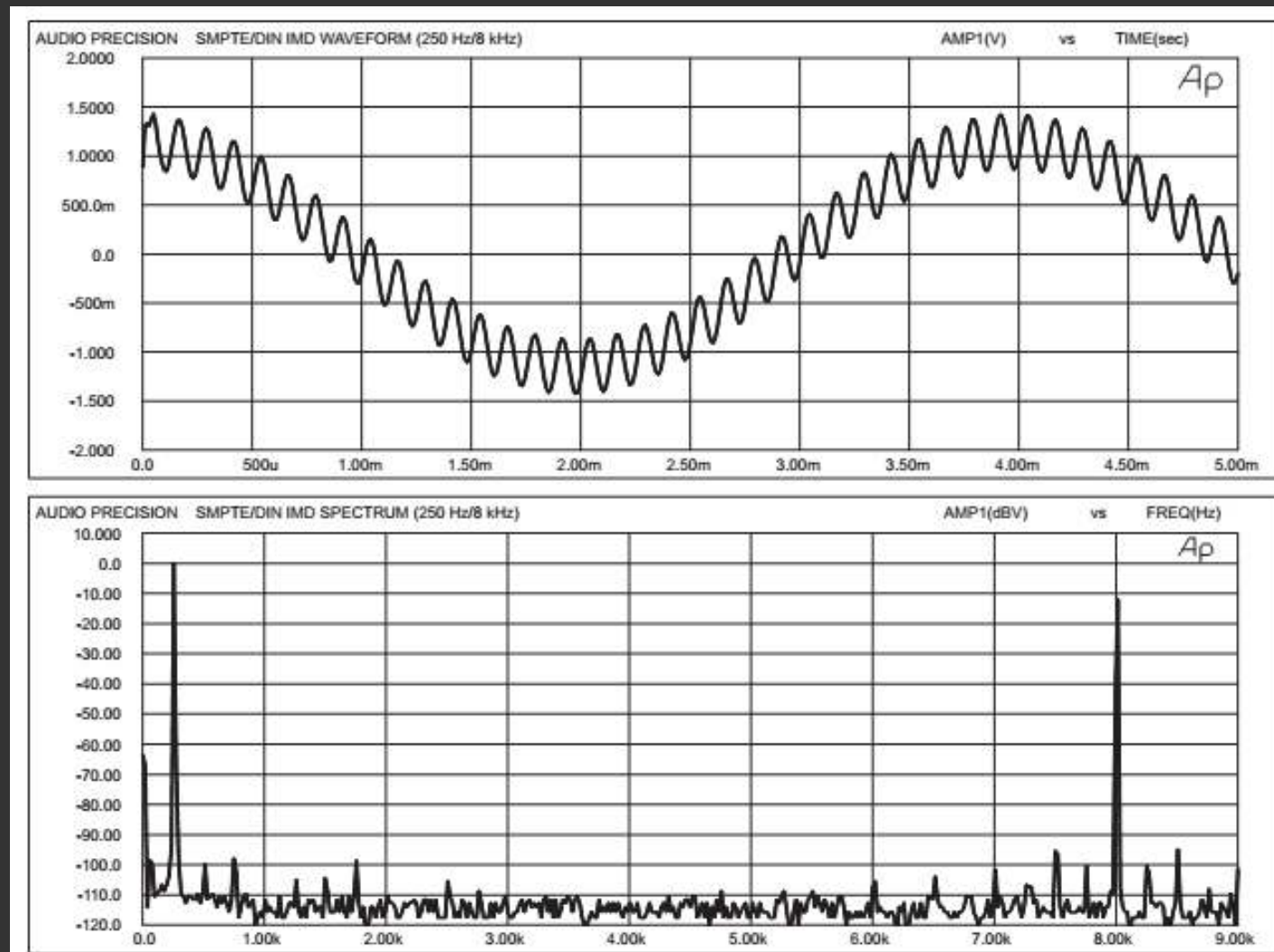
- Sygnał testowy:
  - sinus  $f_1$  o niskiej częstotliwości (typowo 60 Hz)
  - sinus  $f_2$  o wysokiej częstotliwości (typowo 7 kHz)
  - stosunek amplitud  $f_1:f_2$  wynosi 4:1
- Efekt: sygnał zmodulowany amplitudowo (AM)
- Pomiar:
  - usunięcie pasma wokół  $f_1$  – filtr górnop. ok. 2 kHz,
  - demodulacja amplitudy pozostałego sygnału,
  - filtr dolnoprzepustowy ok. 700 Hz
  - wynik: pojedyncza wartość SMPTE IMD



# SMPTE IMD

## Ilustracja zniekształceń SMPTE IMD:

B. Meltzer: Audio Measurement Handbook



# MOD IMD

---

Metoda podobna do SMPTE IMD, taki sam sygnał testowy, ale analiza metodą cyfrową, „z definicji”.

- Mierzy się amplitudy składowych intermodulacyjnych drugiego i trzeciego rzędu.
- Wynik obliczany ze wzoru.
- Metoda daje wyniki porównywalne z SMPTE DIM, jeżeli poziom szumu nie jest zbyt wysoki.

# Zniekształcenia różnicowe DFD IMD

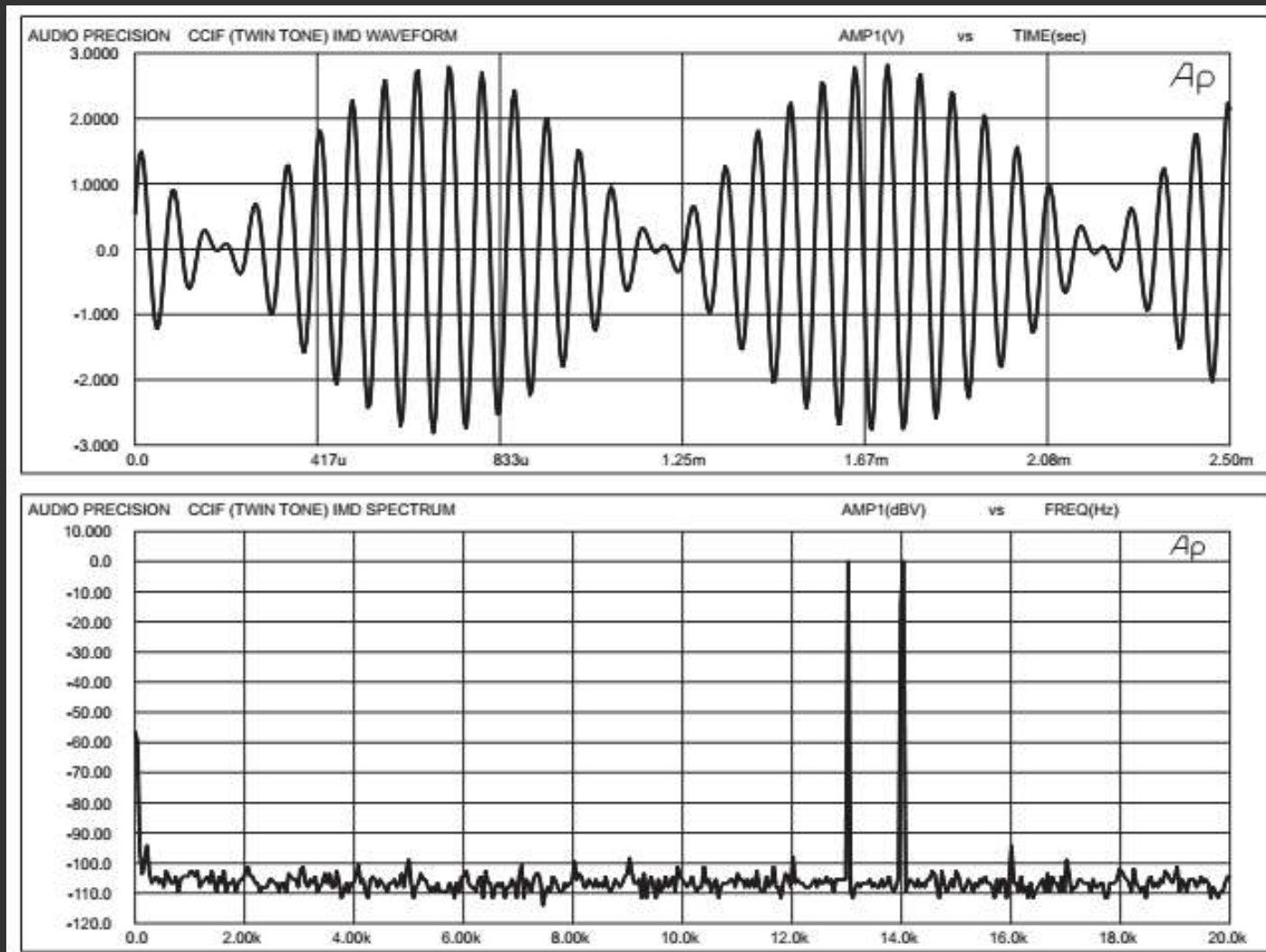
---

- **DFD: *Difference frequency distortion*** (IEC60118, IEC60268)
- Inny rodzaj dwutonu: oba sinusy na wysokich częstotliwościach, w odległości  $d$  wokół średniej częstotliwości  $f_c$ :  
$$f_1 = f_c - (d/2), f_2 = f_c + (d/2)$$
- Typowo:  $f_c = 12,5$  kHz,  $d = 80$  Hz, jednakowe amplitudy
- W sygnale wyjściowym powstają tylko składowe na częstotliwościach  $m * f_1 - n * f_2$  (stąd nazwa)
- Analiza: pomiar amplitud składowych drugiego i trzeciego rzędu, obliczenie wyniku z definicji.
- Standard **CCIF IMD** – taka sama metoda pomiaru, różni się tylko wartościami amplitud.

# Zniekształcenia różnicowe DFD IMD

- Ilustracja zniekształceń różnicowych DFD IMD:

B. Meltzer: Audio Measurement Handbook



# Zniekształcenia różnicowe DFD IMD

---

- Energia sygnału testowego jest skupiona na wysokich częstotliwościach.
- Pomiar jest użyteczny dla urządzeń o ograniczonym paśmie, gdy wartość zniekształceń zależy od częstotliwości.
- Pomiar DFD IMF rozwiązuje problem zaobserwowany przy pomiarze THD+N dla wysokich częstotliwości.
- W takim przypadku można zmienić częstotliwości tonów na leżące na skraju badanego pasma, np. ok. 19 kHz.

# Zniekształcenia dynamiczne (DIM)

---

- W niektórych urządzeniach zniekształcenia liniowe mogą objawiać się wyłącznie przy gwałtownych zmianach poziomu sygnału wejściowego.
- Typowe przykłady: niektóre wzmacniacze, głośniki.
- Pomiar THD+N nie wykryje takich zniekształceń.
- Są to zniekształcenia **dynamiczne** – **DIM** (*dynamic intermodulation*), inna nazwa: transjentowe – **TIM** (*transient intermodulation*).
- Aby je zmierzyć, potrzebujemy sygnału testowego, który zapewni skokowe zmiany amplitudy.

# Zniekształcenia dynamiczne (DIM)

---

Metoda pomiaru (IEC 60268-3):

- Sygnał testowy – suma:
  - sygnału prostokątnego 3,15 kHz,
  - sinusa 15 kHz (czasami 14 lub 8 kHz),
  - stosunek amplitud prostokąt : sinus = 4 : 1
- Ograniczenie pasma sygnału prostokątnego (przed podaniem na DUT) do 30 kHz lub 100 kHz
- Analiza – dwie metody:
  - analogowa – filtracja 0,4 – 2,9 kHz, pomiar rms,
  - cyfrowa – pomiar amplitud na 9 częstotliwościach, obliczenie współczynnika jako sumy tych amplitud podzielonej przez amplitudę testowego sinusa.

# Podsumowanie - zniekształcenia nieliniowe

---

- Pomiar charakterystyki liniowości: ogólny pogląd na charakterystykę przenoszenia, odcinki liniowe i nielin.
- THD+N – podstawowa informacja o ilości zniekształceń.
- Charakterystyka THD+N vs. poziom i częstotliwość – pełniejsza informacja o nieliniowości urządzenia.
- Współczynniki IMD – lepszy opis zniekształceń dla sygnałów o złożonym widmie, zwłaszcza dla wyższych częstotliwościach.
- Współczynnik DIM – pomocny gdy zniekształcenia objawiają się tylko przy skokach amplitudy.
- Pomiar THD (bez N) – tylko do własnych celów.



# Podsumowanie - zniekształcenia nieliniowe

---

- Interpretacja: zawsze im mniej, tym lepiej.
- Przykład prawidłowej specyfikacji:  
THD+N: poniżej 1% dla +4 dBu
  - poziom +4 dBu wyznacza koniec zakresu liniowego,
  - poniżej tego poziomu zniekształcenia nie przekraczają podanej wartości 1%.
- Przykład niepoprawnej specyfikacji:  
Zniekształcenia harmoniczne: poniżej 1%
  - Dla dowolnego poziomu? To znaczy, że urządzenia nie da się przesterować?
  - A może to wynik pomiaru tylko dla jednego poziomu (jakiego?)

# POZIOM SZUMU

---

Pomiar poziomu szumu w torze analogowym:

- generator jest podłączony do wejścia (obciążenie), ale nie wysyła żadnego sygnału testowego
- urządzenie pracuje w normalnych warunkach
- mierzony jest poziom sygnału na wyjściu
- sygnał ten jest wcześniej filtrowany – interesują nas tylko szumy w paśmie akustycznym, typowo 20 Hz – 20 kHz
- uzyskany wynik – poziom szumu urządzenia

# Ważony poziom szumu

---

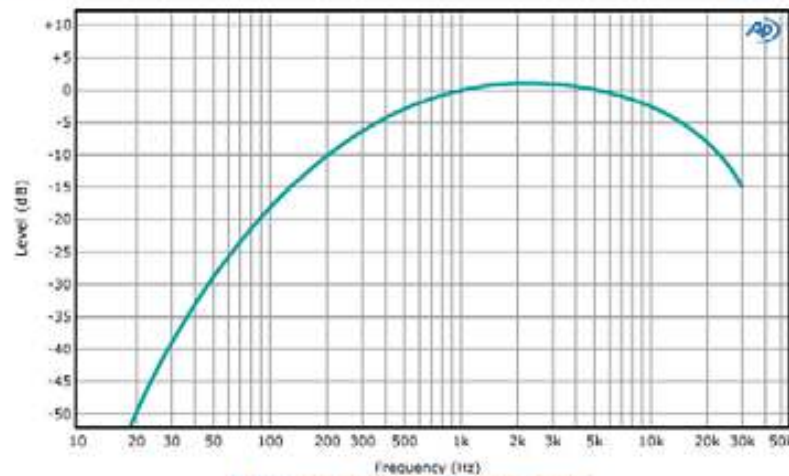
- W przypadku szumów istotna jest ich uciążliwość.
- Szумы mogą być wąskopasmowe.
- Uciążliwość szumu jest większa w paśmie środkowych częstotliwości, gdzie słuch jest bardziej czuły.
- Uciążliwość szumu uwzględnia się stosując dodatkowy filtr ważący – **filtr psofometryczny**.
- Analizatory mają możliwość włączenia filtru ważącego.

# Ważony poziom szumu

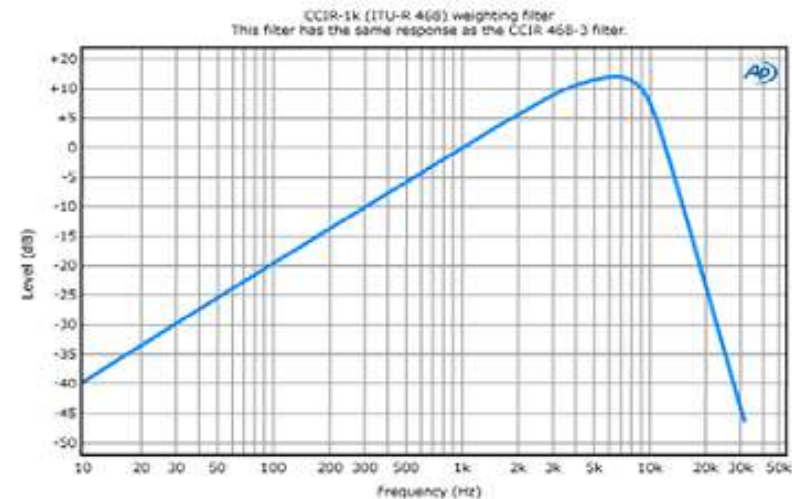
Standardy filtrów ważących:

- **ANSI A** – standard w USA, właściwie słuszny tylko dla tonów sinusoidalnych
- **ITU-R 468 (CCIR-1k)** – standard w Europie, bardziej odpowiedni dla pomiaru szumów

## Weighting filters



"A" weighting filter curve



CCIR-1k (ITU-R 468) weighting filter curve

# MAKSYMALNY POZIOM WYJŚCIOWY

---

## *Maximum / Rated Output*

- Maksymalny poziom sygnału zmierzony na wyjściu urządzenia.
- Zazwyczaj nakłada się ograniczenia, np. na maksymalną wartość THD+N.
- Nie ma ustalonych norm, zwykle przyjmuje się 0,1% lub 1%.
- Chodzi o znalezienie maksymalnego **użytecznego** poziomu sygnału.

# Maksymalny poziom wyjściowy

---

Metoda pomiaru:

- wzmacnienie urządzenia ustawiamy zwykle na maksimum
- podajemy ton testowy 1 kHz o niskim poziomie
- stopniowo zwiększamy poziom i mierzymy THD+N na wyjściu urządzenia
- zatrzymujemy pomiar gdy THD+N przekroczy ustaloną wartość
- mierzymy poziom sygnału na wyjściu – to jest nasz wynik
- wartość poziomu wejściowego w tym punkcie nazywa się **czułością (*sensitivity*)** urządzenia.

# STOSUNEK SYGNAŁU DO SZUMU

---

## *SNR – Signal-to-Noise Ratio*

- Stosunek (liniowej) wartości maksymalnej amplitudy sygnału wyjściowego do amplitudy szumu.
- Inaczej: **różnica** (decybelowa) między **maksymalnym poziomem sygnału** wyjściowego a **poziomem szumu**.
- Inaczej: maksymalny poziom wyjściowy w jednostkach względnych (dBr), względem poziomu szumu.
- Używa się też terminu „dynamika urządzenia”.

# Specyfikacja SNR

---

- Interpretacja: większy SNR to lepszy wynik.
- Przykład prawidłowej specyfikacji:  
SNR: 85 dB, THD+N  $\leq$  0.1%, 20 Hz – 20 kHz, CCIR-1k
  - maksymalna wielkość zniekształceń,
  - pasmo pomiaru szumu, ważenie.
- Przykład niepoprawnej specyfikacji:  
Dynamika: 90 dB
  - Jaki maksymalny THD+N? 0,1%? 30%?
  - Jak mierzone poziom szumu?



# MOC WYJŚCIOWA

---

- Pomiar mocy wyjściowej (*Output power*) dotyczą głównie wzmacniaczy.
- Przypomnienie: nie mierzymy mocy wprost, przeliczamy ją z pomiaru napięcia:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

- R jest impedancją obciążenia. Jeżeli np. mierzymy moc dla wyjścia głośnikowego, zwykle  $R = 8 \Omega$  lub  $4 \Omega$ .
- **Moc znamionowa (*rated power*)** – maksymalna moc, przy której są spełnione określone warunki (np. max. THD+N).

# Moc ciągła

---

Moc ciągła - *averaged continuous power*,  
także moc skuteczna, moc RMS (*rms power*):

- mierzona jest wartość skuteczna (RMS) amplitudy,
- dla maksymalnego poziomu wyjściowego sygnału, przy określonych warunkach, np.  $\text{THD+N} \leq 1\%$ ,
- wartość  $R$  jest zwykle równa  $8 \Omega$ ,
- urządzenie musi być w stanie dostarczać zmierzoną moc w sposób ciągły, np. przez 30 minut,
- należy podać częstotliwość i poziom sygnału testowego.

Jest to jedyna poprawna i wiarygodna metoda pomiaru mocy wyjściowej!!!

# Pomiar mocy ciągłej

---

Przykładowe warunki pomiaru mocy ciągłej

- norma FTA (USA) z 1974 r.:

- pomiar średniej mocy ciągłej w watach,
- obciążenie wyjścia:  $8 \Omega$  albo podać jeśli inna,
- sygnał o tym samym poziomie podawany na wszystkie kanały,
- należy podać zakres mierzonych częstotliwości,
- należy podać wielkość zniekształceń THD+N,
- sygnał o mocy  $1/8$  wartości znamionowej musi być podawany przez urządzenie w ciągu 1 godziny przed pomiarem („wygrzanie” urządzenia).

# Moc szczytowa (muzyczna, chwilowa)

---

Różne określenia:

- moc **szczytowa** (*peak power*)
- moc **muzyczna** (**PMPO** – *peak music power output*)
- moc **chwilowa**

na określenie mocy mierzonej w sposób niestandardowy i praktycznie dowolny, np.:

- pomiar wartości szczytowej zamiast skutecznej,
- maksymalna wartość pomiaru, nawet jeśli jest krótkotrwała (np. kilka milisekund),
- bez brania THD+N pod uwagę (np. 10%),
- czasami przy użyciu niestandardowych sygnałów testowych, np. szumu różowego lub nawet muzyki

# Interpretacja mocy szczytowej

---

Moc szczytowa jest bez znaczenia, ponieważ:

- jest zawsze zawyżona względem mocy ciągłej,
- nie oddaje możliwości urządzenia – nie jest ono w stanie dawać takiej mocy w sposób ciągły i bez istotnych zniekształceń,
- warunki pomiaru są niestandardowe i dobierane dowolnie przez producenta.

Wniosek:

- moc muzyczna nie jest rzeczywistym parametrem urządzenia, a jedynie terminem marketingowym,
- nie należy go mierzyć i podawać,
- należy ignorować ten parametr w specyfikacji.

# Specyfikacja mocy wyjściowej

---

- Przykład prawidłowej specyfikacji:  
Moc ciągła: 100 W na kanał, 8  $\Omega$ , THD+N  $\leq$  0,1%, 1 kHz
  - maksymalna wielkość zniekształceń,
  - impedancja, pomiar w jednym kanale.
- Przykład niepoprawnej specyfikacji:  
Moc wyjściowa: 140 W
  - Zapewne szczytowa?
  - Jaka rzeczywista moc ciągła? 100W? 60W?
  - Jaki maksymalny THD+N?
  - W jakich warunkach mierzona?

# Standard CEA-2006

---

## *CEA-2006: Testing and Measurement Methods for Mobile Audio Amplifiers*

- Standard opisujący metodę pomiaru:
  - mocy wyjściowej,
  - stosunku sygnału do szumu.
- Informacja o tym, że pomiar jest zgodny z CEA-2006, jest podawana w specyfikacji urządzenia.
- Pozwala to na porównywanie rzeczywistej wartości mocy i SNR dla różnych urządzeń.

# Standard CEA-2006

---

## Warunki pomiaru **mocy wyjściowej**:

- pomiar mocy ciągłej RMS,
- $\text{TDH+N} \leq 1\%$ ,
- obliczenie dla impedancji  $R = 4 \Omega$ ,
- w całym paśmie częstotliwości.

## Warunki pomiaru **SNR**:

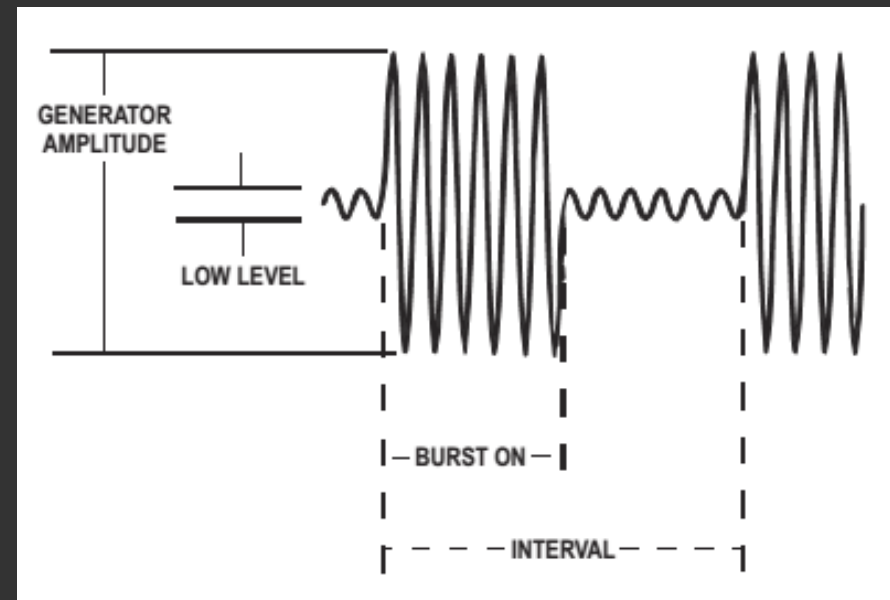
- poziom szumu względem sygnału o amplitudzie 2 V rms (moc 1 W na impedancji  $4 \Omega$ ),
- szum ważony krzywą A.



# Standard CEA-2006

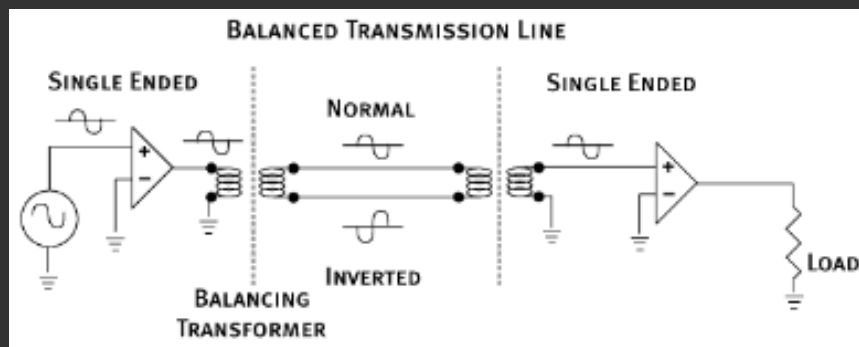
---

- Sygnał testowy – paczki (*burst*) sinusa.
- Podstawowy sygnał (pomiar wzmacniaczy szerokopasmowych) – jeden okres sygnału:
  - 20 okresów sinusa 1 kHz, poziom 100%,
  - 480 okresów sinusa 1 kHz, poziom 10% (-20 dB)
- Dla wzmacniaczy wąskopasmowych: 10 + 20 okr., 50 Hz.
- Przy analizie odrzuca się pierwsze 9 okresów, analizuje się 11 okresów (2/8 w drugim przypadku)



# Pomiar tłumienia trybu wspólnego (CMRR)

- Profesjonalne urządzenia studyjne wykorzystują połączenia symetryczne (*balanced*), np. złącza XLR.
- Sygnał użytkowy przesyłany jest w trybie różnicowym (*differential mode*) – sygnały w dwóch liniach są w przeciwfazie.
- Szum pojawiający się w linii transmisyjnej jest w trybie wspólnym (*common mode*).
- Sygnał na wyjściu jest różnicą sygnału w obu liniach.
- Tryb wspólny (szum) jest wytłumiany.



# Pomiar CMRR

---

Ilustracja działania:

- $X$ : przesyłany sygnał,
- rozdzielenie na sygnały różnicowe:  
 $A = (X / 2) \quad B = -(X / 2)$
- szum dodaje się do sygnału w trybie wspólnym:  
 $A_n = (X / 2) + n \quad B_n = -(X / 2) + n$
- odebrany sygnał:  
 $Y = A_n - B_n = (X / 2) + n + (X / 2) - n = X$

W praktyce, nie cały szum udaje się „odjąć”.

Pomiar CMRR daje informację o tym jak skuteczne jest tłumienie trybu wspólnego.

# Pomiar CMRR

---

Podstawowa metoda pomiaru:

- Poziom wyjściowy **Ld** w trybie różnicowym (normalnym) – ton testowy podany w przeciwfazie na dwie linie.
- Poziom **Lcm** w trybie wspólnym – sygnał podany w zgodnej fazie (powinien zostać wytłumiony).
- Wynik: **CMRR = Ld – Lcm**

Standard CMRR IEC:

- dwa pomiary Lcm, podłączając jedną linię do generatora bezpośrednio, drugą przez rezystor 10 Ω
- wybiera się „gorszy” wynik (niższy CMRR).

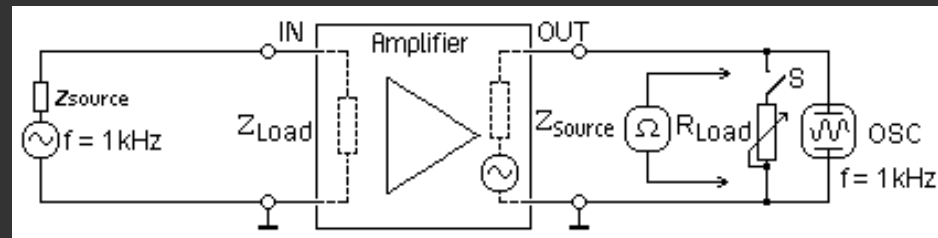
# Pomiar impedancji wyjściowej

Pomiary impedancji są rzadko wykonywane.

Przykładowa metoda pomiaru:

- pomiar napięcia  $V_1$  na nieobciążonym wyjściu,
- dołączenie znanego obciążenia  $R$ ,
- pomiar napięcia  $V_2$  na obciążonym wyjściu,
- obliczenie impedancji ze wzoru:

$$Z_{out} = R \left( \frac{V_1}{V_2} - 1 \right)$$



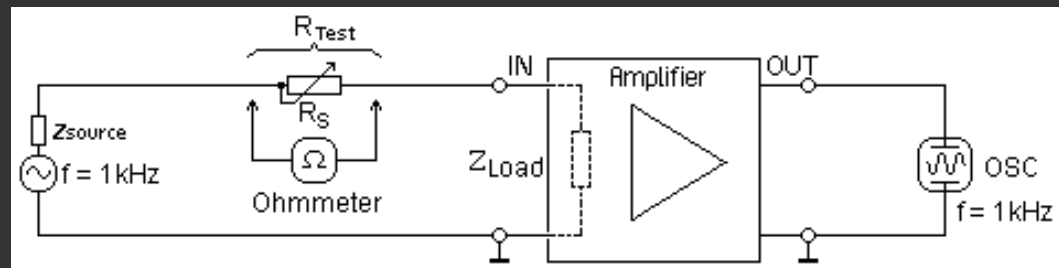
Źródło: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-InputOutputImpedance.htm>

# Pomiar impedancji wejściowej

Przykładowa metoda pomiaru:

- $V_1$  – napięcie podawane z generatora,
- dołączenie znanego obciążenia  $R$  szeregowo,
- pomiar napięcia  $V_2$  na obciążeniu,
- obliczenie impedancji ze wzoru:

$$Z_{in} = R \left( \frac{V_2}{V_1 - V_2} \right)$$



Źródło: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-InputOutputImpedance.htm>

# Współczynnik tłumienia (DF)

---

DF – *Damping factor*

- Parametr podawany dla wzmacniaczy.
- Stosunek impedancji obciążenia do wewnętrznej impedancji wyjścia wzmacniacza.
- Np. impedancja wejściowa głośnika =  $4 \Omega$ ,  
typowa impedancja wyjściowa wzmacniacza =  $0.01 \Omega$   
→ DF = 400.
- Parametr ten jest podawany w specyfikacjach, jednak uważa się, że nie jest to miara „jakości” wzmacniacza (każde DF > 10 jest dobre).

# Podsumowanie - pomiary „czarnej skrzynki”

---

Mamy urządzenie, którego charakterystyki chcemy poznać.

## Krok 0.

Podłączamy je do urządzenia pomiarowego. Jeżeli jest możliwość regulacji wzmocnienia, zwykle ustawiamy na maksimum.

## Krok 1.

Pomiar maksymalnego poziomu wyjściowego.

Zwiększamy poziom na generatorze, mierzymy THD+N. Znajdujemy wartość, dla której THD+N osiąga założony poziom (np. 1%). Notujemy wartość poziomu wejściowego („0 dBg”) oraz poziomu wyjściowego (maksymalny p. w.).



# Podsumowanie - pomiary „czarnej skrzynki”

---

## Krok 2.

Nie zmieniając poziomu na generatorze, wykonujemy pomiary charakterystyk zależnych od częstotliwości:

- charakterystyka częstotliwościowa,
- THD+N w funkcji częstotliwości,
- zniekształcenia fazowe,
- przesłuch,
- ew. IMD

Z charakterystyki częstotliwościowej odczytujemy zakres przenoszenia.

# Podsumowanie - pomiary „czarnej skrzynki”

---

## Krok 3.

Wykonujemy pomiary charakterystyk zależnych od poziomu wejściowego:

- THD+N w funkcji amplitudy,
- liniowość wejście-wyście.

## Krok 4.

Wyłączamy generator, mierzymy poziom szumu.

Obliczamy SNR.

# Testy *Pass/Fail*

---

- Często systemy pomiarowe wykonują zbiór testów w sposób automatyczny, bez nadzoru.
- Pomiar typu „zdał – nie zdał”: dla każdego testu nakłada się zakres dopuszczalnych wartości, np. maks. odchyłka od 0 dB w ch. częstotliwościowej, maks. THD+N, itp.
- System wykonuje pomiary i zapisuje wynik binarny *Pass/Fail*.
- Operator może być powiadomiony jeżeli wynik *Fail* będzie się powtarzał.
- Przykład: monitoring jakości sygnału w stacji radiowej.

# Przykład specyfikacji wzmacniacza

Performance Specifications	1000	2000	4000	6000
Sensitivity (for full rated power at 4Ω)	1.3V	1.3V	1.3V	1.3V
Rated Power Output (per Channel at 4Ω)	500W Stereo	800W Stereo	1200W Stereo	2100W Stereo
Signal to Noise Ratio (below rated 1 kHz power at 8Ω) (below rated 1 kHz power at 8Ω; A weighted)	100dB	100dB	100dB	100dB
Total Harmonic Distortion (THD)	<.05%	<.05%	<.05%	<.05%
Damping Factor (20Hz to 400Hz)	>500	>500	>500	>500
Frequency Response (at 1W, 20Hz to 20kHz)	+0dB, -1dB	+0dB, -1dB	+0dB, -1dB	+0dB, -1dB
Crosstalk (below rated power) 20Hz to 1kHz	>70dB	>70dB	>70dB	>70dB
Input Impedance (nominal)	20kΩ balanced, 10kΩ unbalanced	20kΩ balanced, 10kΩ unbalanced	20kΩ balanced, 10kΩ unbalanced	20kΩ balanced, 10kΩ unbalanced

# Pomiary procesorów dynamiki

---

Procesory dynamiki dźwięku:

- kompresory i ekspandery – zmniejszenie/zwiększenie dynamiki sygnału,
- ograniczniki i bramki szumu – ograniczenie poziomów.

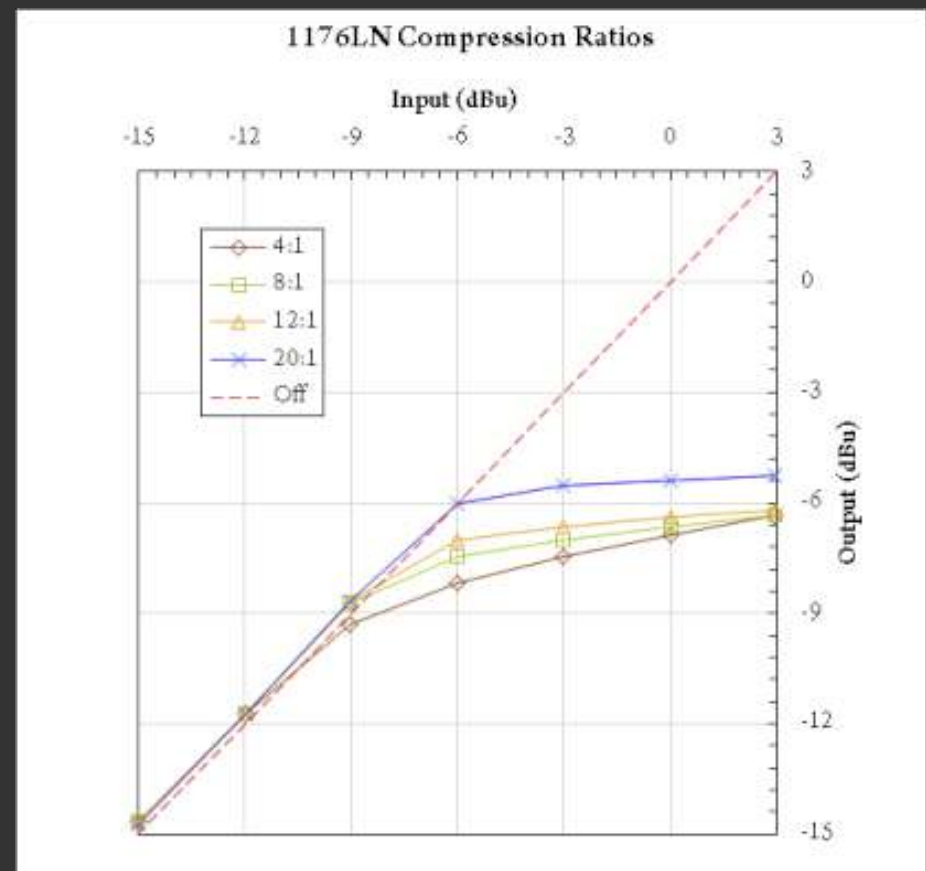
Są to układy o nieliniowej charakterystyce przejściowej („wejście-wyście”), zwykle:

- zakres liniowy,
- próg włączenia,
- zakres działania (np. kompresji)

# Pomiary procesorów dynamiki

Charakterystyka statyczna – mierzona dla sygnału testowego o stabilnej amplitudzie.

- Klasyczny pomiar liniowości – zmienny poziom sygnału wejściowego.
- Częstotliwość – 1 kHz, chyba że jest to układ wąskopasmowy, wtedy częstotliwość środkowa pasma.



# Pomiary procesorów dynamiki

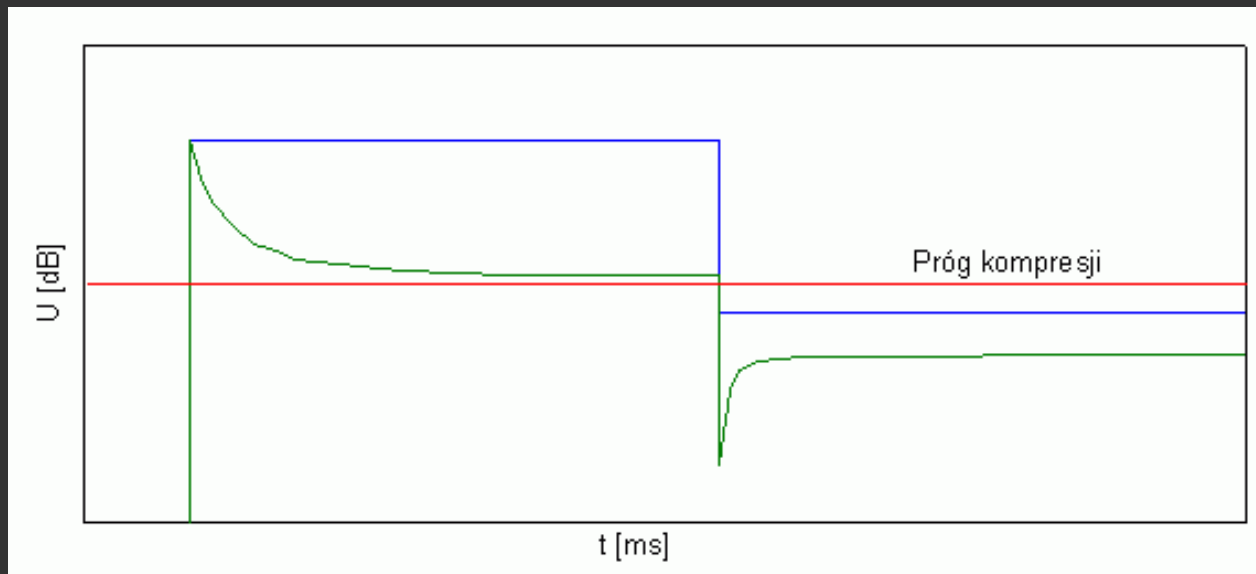
---

- Celem pomiaru jest sprawdzenie czy charakterystyka odpowiada oczekiwanej.
- Można pomierzyć zakres dynamiki, THD+N, itp.
- Pomiary ograniczników i bramek to ten rzadki przypadek, w którym powinniśmy używać **detektora wartości szczytowej**, nie skutecznej. Kompresory i ekspandery mierzymy standardowo, wartością skuteczną.

# Pomiary procesorów dynamiki

---

- Procesory dynamiki mają regulowany czas reakcji (ataku i zwolnienia) na zmiany poziomu sygnału.
- Dlatego musimy też pomierzyć charakterystykę dynamiczną układu.
- Potrzebny jest sygnał testowy o skokowo zmiennym poziomie.

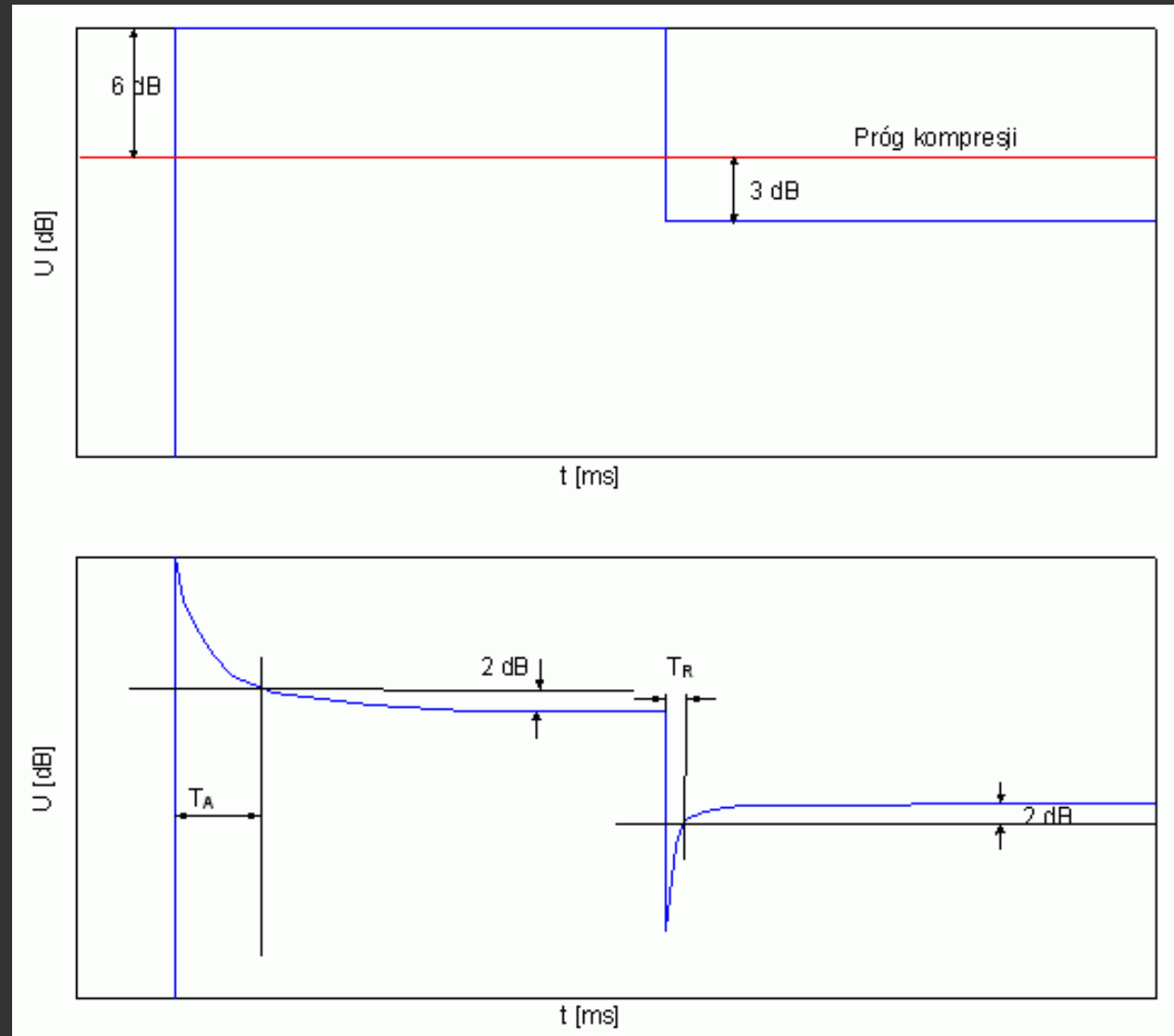




# Pomiary procesorów dynamiki

Pomiar czasu ataku i zwolnienia wg zaleceń IEC

Sygnal testowy



Sygnal z wyjścia kompresora

# Wow & flutter

---

- Nigdy nie wiadomo czy w praktyce nie będziemy musieli pracować ze starymi magnetofonami studyjnymi, projektorami filmowymi, itp. Przykład: archiwizacja i rekonstrukcja starych nagrań.
- Nierównomierności prowadzenia nośnika przez elementy mechaniczne powoduje cykliczne zniekształcenia wysokości dźwięku:
  - kołysanie (*wow*) – modulacje poniżej ok. 4 Hz, dźwięk „pływający” w górę i w dół,
  - drzenie (*flutter*) – modulacje powyżej ok. 4 Hz, szybkie zmiany powodujące „chrypienie” dźwięku.

# Pomiar wow & flutter

---

- Sygnał testowy – sinus, zwykle 3,15 kHz – jest odtwarzany z nośnika, np. taśmy testowej.
- Opisany efekt powoduje częstotliwościowe zmodulowanie dźwięku.
- Metoda pomiaru opiera się więc na demodulacji za pomocą tzw. dyskryminatora częstotliwości.
- Uzyskany sygnał jest filtrowany za pomocą krzywej ważącej, np. IEC 386 (jest ich wiele).
- Mierzy się jego amplitudę – to jest wynik pomiaru, jako procentowa odchyłka częstotliwości.
- Profesjonalne magnetofony miały w&f rzędu 0,02% - takie zniekształcenia są praktycznie niesłyszalne.

# Bibliografia

---

- Audio Precision: *APx500 User Manual*.
- Bob Meltzer: *Audio Measurement Handbook*
- David Mathew: *How to Write (and Read) Audio Specifications*
- Dennis Bohn: *Audio specifications*. Rane. <http://www.rane.com/note145.html>
- Gary Davis, Ralph Jones: *The Sound Reinforcement Handbook*  
Yamaha, 1988
- Audio Precision: *System TWO User's Manual*
- Sengpielaudio Sengpiel Berlin: Measuring input impedance and calculating output impedance. <http://www.sengpielaudio.com/calculator-InputOutputImpedance.htm>
- CEA-2006 Amplifier Power Standards.  
[http://rftech.custhelp.com/app/answers/detail/a\\_id/199/~/cea-2006-amplifier-power-standards](http://rftech.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/199/~/cea-2006-amplifier-power-standards)
- Wikipedia