

## LABORATORIUM – POMIARY W AKUSTYCE

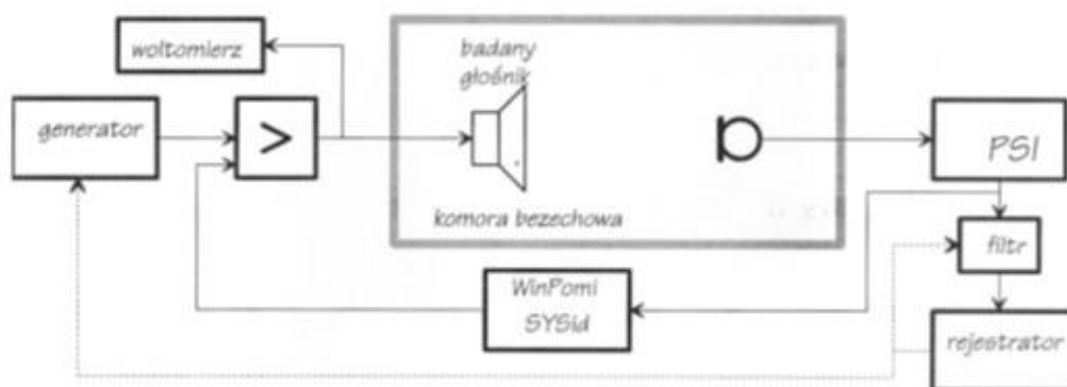
### ĆWICZENIE NR 14

### Pomiar zniekształceń nieliniarnych głośnika

#### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych metod pomiaru zniekształceń nieliniarnych, przyrządów wykorzystywanych w tych pomiarach oraz metod obliczeń współczynników zniekształceń na podstawie widma sygnału odpowiedzi.

#### 2. Układ pomiarowy



#### 3. Zadania laboratoryjne

- 3.1. Pomiar poziomu poszczególnych harmonicznych dla różnych częstotliwości podstawowych sygnału – analiza programem WinPomi.
- 3.2. Pomiar napięć poszczególnych harmonicznych dla różnych częstotliwości podstawowych sygnału – analiza z wykorzystaniem oscyloskopu cyfrowego.
- 3.3. Obliczenie całkowitego współczynnika zniekształceń nieliniarnych harmonicznych na podstawie pomiaru poszczególnych harmonicznych.
- 3.4. Pomiar współczynnika zniekształceń nieliniarnych harmonicznych z wykorzystaniem miernika zniekształceń nieliniowych.
- 3.5. Porównanie wyników otrzymanych różnymi metodami.

#### 4. Zagadnienia do przygotowania

- 4.1. Zniekształcenia nieliniarne głośników – przyczyny powstawania
- 4.2. Definicje współczynników zniekształceń nieliniarnych harmonicznych.

#### Literatura

- [1] Dobrucki A., Przetworniki elektroakustyczne, WNT W-wa 2007, s.581-593
- [2] Żyszkowski Z., Miernictwo akustyczne, WNT, W-wa 1987, rozdz.9.11
- [3] Polska norma PN-EN 60268-5: 2005 – Urządzenia systemów elektroakustycznych. Część 5: Głośniki

Tabela 1. Wyniki pomiarów

<b>P</b>	<b>f</b>	<b>U<sub>1</sub></b>		<b>U<sub>2</sub></b>		<b>U<sub>3</sub></b>		<b>U<sub>4</sub></b>		<b>THD+N</b>
		<b>[V]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[V]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[V]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[V]</b>	<b>[dB]</b>	

Tabela 2. Wyniki obliczeń

<b>P</b>	<b>f</b>	<b>h<sub>2</sub></b>		<b>h<sub>3</sub></b>		<b>h<sub>4</sub></b>		<b>THD obl. [%]</b>	<b>THD+N zm. [%]</b>
		<b>[%]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[%]</b>	<b>[dB]</b>	<b>[%]</b>	<b>[dB]</b>		

## Dodatek A

### ZNIEKSZTAŁCENIA NIELINEARNE

#### SKAŻENIA SYGNAŁU FONICZNEGO

Skażeniami nazywamy niepożądane zmiany sygnału transmitowanego w torze, zachodzące w różnych jego ogniwach. W torze transmisyjnym skażenia naruszają zasadę wierności transmisji.

Skażenia dzielą się na zniekształcenia i zakłócenia.

Zniekształcenia są to zmiany sygnału istniejącego, użytecznego. W przypadku braku sygnału nie ma oczywiście zniekształceń.

Zakłócenia są to niepożądane przebiegi o bardzo różnej strukturze pochodzące z zewnątrz toru bądź wytwarzane przez urządzenia toru, które nakładają się na sygnał użyteczny.

Zniekształcenia możemy podzielić na:

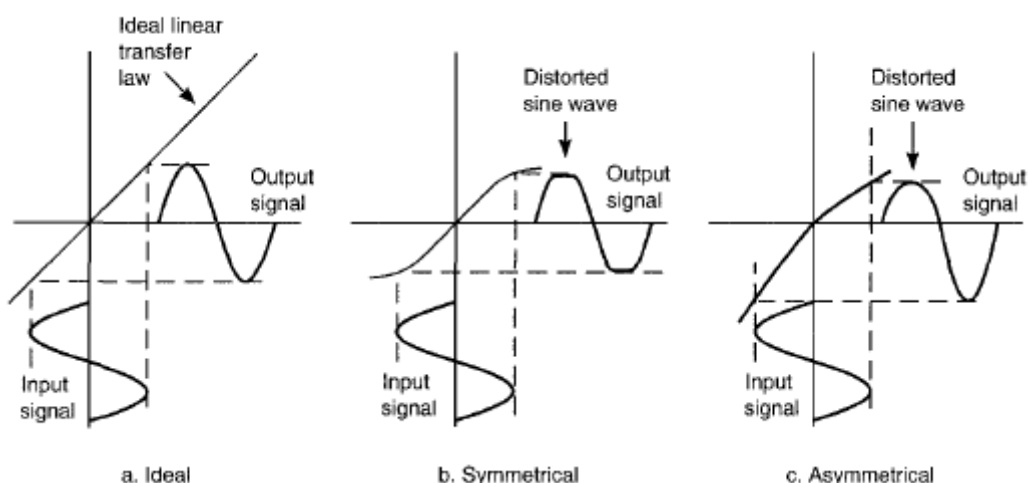
- zniekształcenia liniowe (amplitudowe i fazowe),
- zniekształcenia dynamiki,
- zniekształcenia nieliniowe,
- zniekształcenia transjentowe (TIM).

Zakłócenia obejmują:

- szумы (termiczne i inne),
- przydźwięk sieciowy,
- przesłuchy,
- zakłócenia atmosferyczne, przemysłowe, od środków transportu itp.

#### 1. Przyczyny powstawania zniekształceń nieliniarnych

Zniekształcenia nieliniarne to pojawianie się na wyjściu danego urządzenia składników częstotliwościowych, których nie było w sygnale wejściowym. Powstają one w wyniku nieliniowości funkcji przenoszenia elementów toru fonicznego.



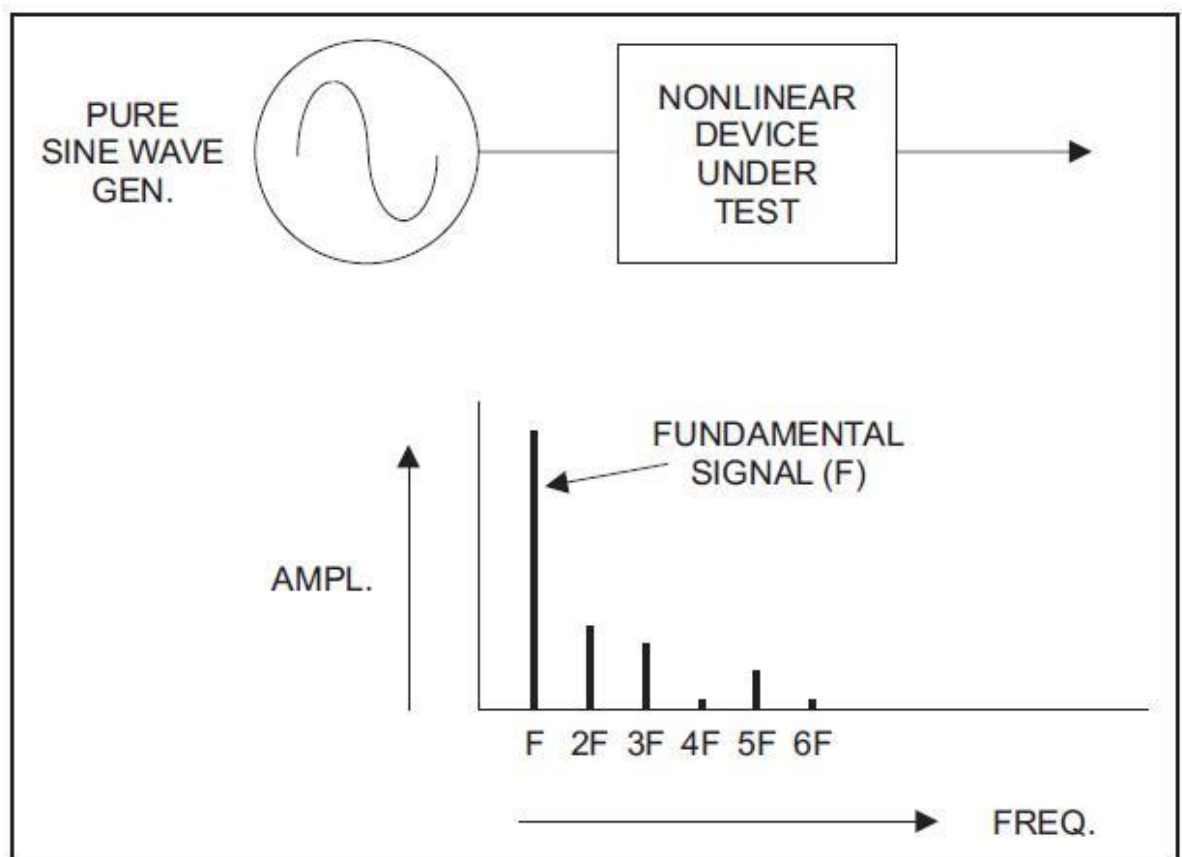
Rys.1. Liniowa charakterystyka przenoszenia (a) i charakterystyki nieliniowe (b – symetryczna, c – niesymetryczna).

Zniekształcenia nielinearne głośnika decydują o jakości odtwarzanego dźwięku i są jednym z czynników ograniczających największą moc przetwarzaną przez głośnik. Wartości tych zniekształceń mierzy się zgodnie z przyjętymi definicjami, ponieważ charakteryzują one w pewnym stopniu pracę głośnika i zachowanie jego elementów. Jak dotąd nie udało się ustalić związku między zniekształceniami nieliniarnymi odczuwanymi subiektywnie a wartością zniekształceń wyznaczoną według przyjętych definicji obiektywnych.

## 2. Metoda pomiaru zniekształceń nieliniarnych harmonicznych

W przypadku pomiaru zniekształceń nieliniarnych harmonicznych sygnałem pomiarowym jest ton

$$u_{we} t = u_{we} \sin \omega t$$

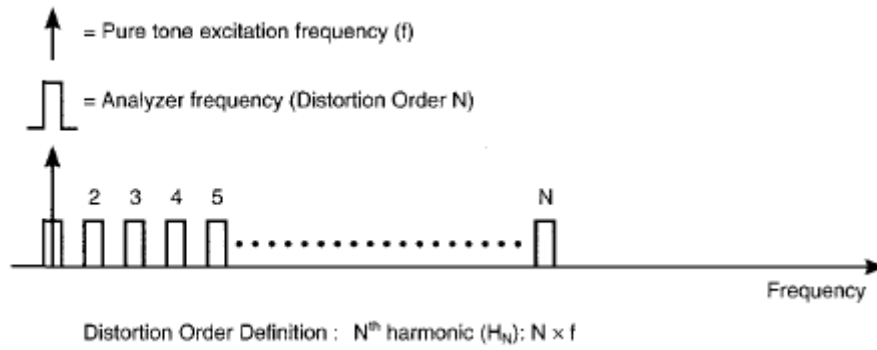


Rys. 2. Idea pomiaru zniekształceń nieliniowych harmonicznych.

W wyniku nieliniowości charakterystyki przenoszenia sygnał wyjściowy ma postać:

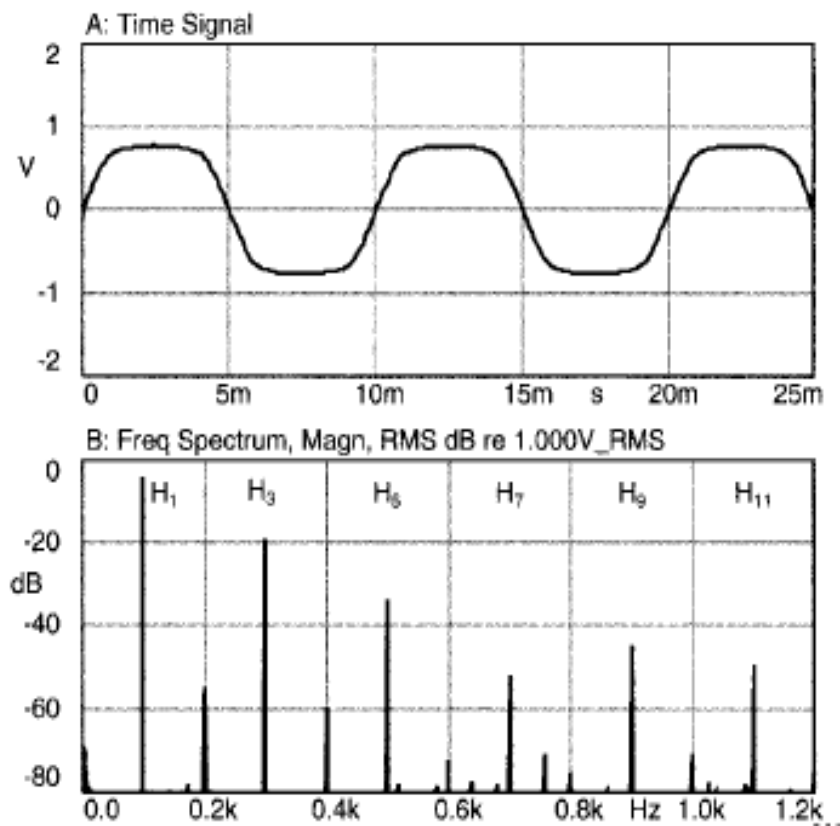
$$u_{wy} t = u_1 \sin \omega t + u_2 \sin 2\omega t + u_3 \sin 3\omega t + \dots + u_n \sin m\omega t$$

W sygnale wyjściowym obok składowej podstawowej o częstotliwości  $\omega$  pojawiają się składowe o częstotliwościach harmonicznych, będących całkowitą wielokrotnością częstotliwości podstawowej ( $n\omega$ ,  $n \in \langle 2, m \rangle$ ) (patrz rys. 2).



Rys.3. Zniekształcenia nieliniowe harmoniczne.

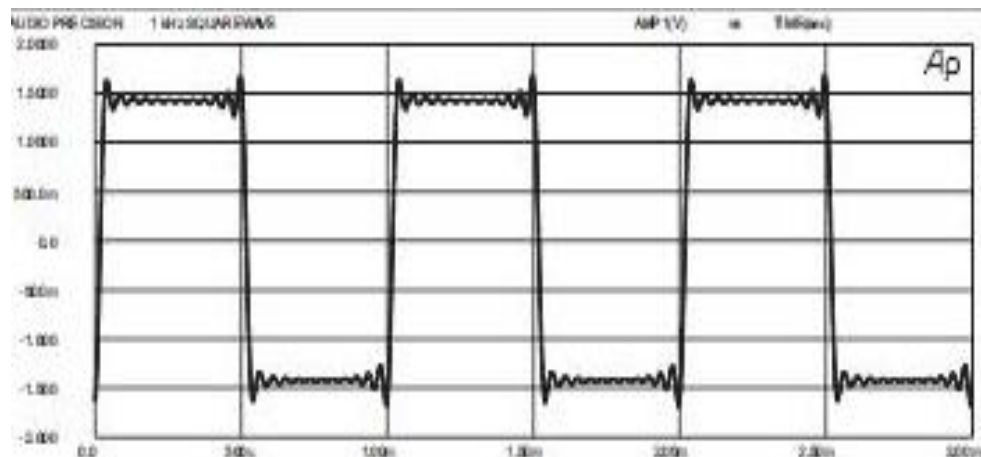
W przypadku nieliniowej symetrycznej charakterystyki przenoszenia (por. rys.1b) w sygnale wyjściowym będą dominować nieparzyste harmoniczne.



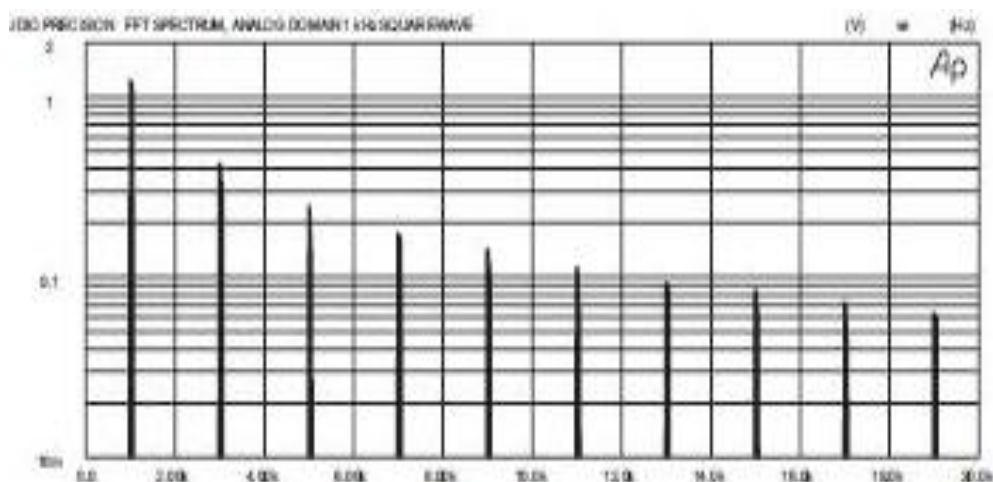
Rys.4. Nieliniowa symetryczna charakterystyka przenoszenia (symetryczne ograniczenie dodatnich i ujemnych amplitud) skutkuje dominującymi nieparzystymi harmonicznymi.

W przypadku bardzo dużego ograniczania, gdy sygnał wyjściowy stanie się symetryczną falą prostokątną, sygnał wyjściowy obok składowej podstawowej będzie zawierał tylko nieparzyste harmoniczne (patrz rys. 5).

a)

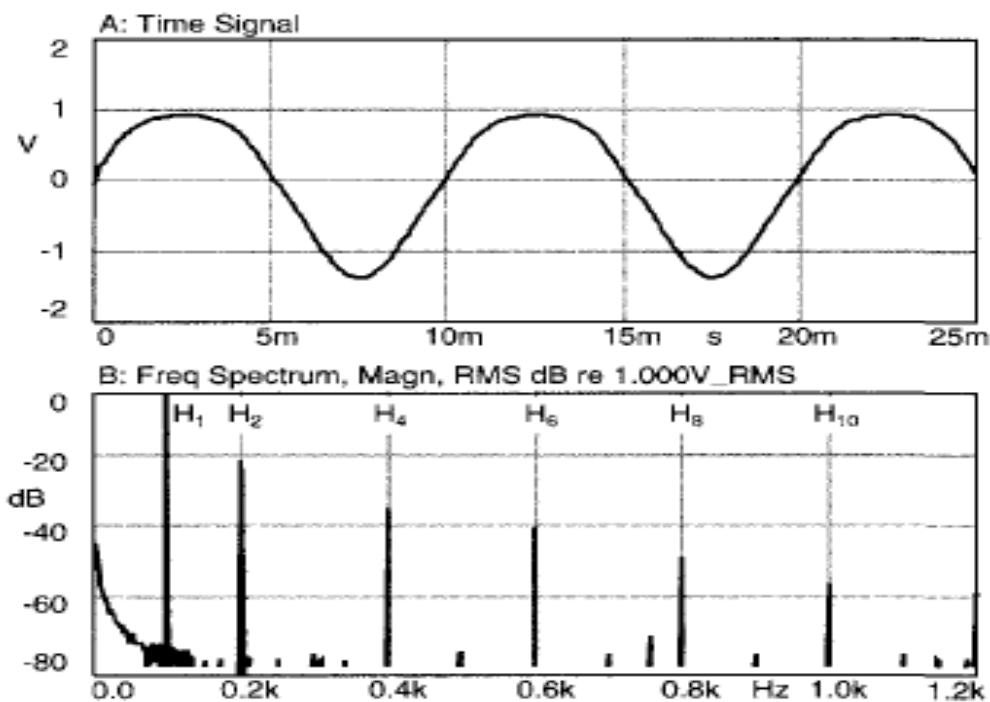


b)



Rys.5. Przebieg czasowy (a) i widmo (b) symetrycznego sygnału prostokątnego o częstotliwości  $f = 1$  kHz.

W przypadku nieliniowej niesymetrycznej charakterystyki przenoszenia (por. rys.1c) w sygnale wyjściowym będą dominować parzyste harmoniczne. Wszystkie przetworniki elektroakustyczne charakteryzują niesymetryczne nieliniowości. Wynikają one z asymetrii pola magnetycznego lub elektrycznego, którego wartość zmienia się zależnie od położenia membrany.



Rys.6. Nieliniowa niesymetryczna charakterystyka przenoszenia skutkuje dominującymi parzystymi harmonicznymi.

### 3. Miary zniekształceń nieliniowych harmonicznyc

#### 3.1. Całkowity współczynnik zniekształceń harmonicznyc

Całkowity współczynnik zniekształceń harmonicznyc THD (Total Harmonic Distortion) definiowany jest następującym wzorem:

$$THD = h = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} u_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} u_n^2}} 100 \quad [\%] \quad (1)$$

lub

$$L_h = 20 \lg \frac{h}{100} \quad [dB]$$

Metoda pomiarowa pozwalająca na wyznaczenie całkowitego współczynnika zniekształceń harmonicznyc THD zgodnie ze wzorem (1) nazywa się metodą eliminacji składowej podstawowej.

Dla małych zniekształceń ( $h < 20 \%$ ) wzór (1) można zastąpić wzorem (2):

$$h_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} u_n^2}}{u_1} 100 \quad [\%] \quad (2)$$

lub

$$L_{h_1} = 20 \lg \frac{h_1}{100} \quad [dB]$$

Metoda pomiarowa pozwalająca na wyznaczenie całkowitego współczynnika zniekształceń harmonicznym THD zgodnie ze wzorem (2) nazywa się metodą kompensacji składowej podstawowej.

Tak definiowane współczynniki całkowitych nieliniowych zniekształceń harmonicznym są związane ze sobą zależnością (3):

$$\frac{h}{h_1} = \frac{1}{1+h_1^2} \quad (3)$$

Większość obecnie produkowanych mierników zniekształceń nieliniowych harmonicznym pracuje w oparciu o metodę eliminacji składowej podstawowej.

Współczynnik THD jest to w ogólności stosunek wartości napięcia harmonicznym do wartości napięcia częstotliwości podstawowej lub całego sygnału. Szerokopasmowy pomiar napięcia sprawia, że obok harmonicznym mierzymy także wszystkie sygnały zakłócające takie jak szum, czy też przydźwięk sieciowy. Stąd prawidłowe oznaczenie tego współczynnika podczas pomiarów szerokopasmowych, to THD+N (Total Harmonic Distortion + Noise).

Celem sprawdzenia istotności napięcia szumów podczas pomiaru zniekształceń nieliniowych harmonicznym należy porównać napięcie wywołane zniekształceniami  $u'_{wy}$  (po odfiltrowaniu składowej podstawowej) z mierzonym napięciem wyjściowym, gdy SEM źródła zostanie zmniejszona do zera,  $u''_{wy}$ . Powinien być spełniony warunek, że:

$$u''_{wy} < \frac{u'_{wy}}{3}$$

W przeciwnej sytuacji na wynik pomiaru wpływają szумы i takie wyniki należy odrzucić. W takiej sytuacji należy posłużyć się metodą bardziej czasochłonną, ale pewniejszą, mierzącą zniekształcenia harmoniczne n-tego rzędu.

### 3.2. Zniekształcenia harmoniczne n-tego rzędu

Zniekształcenia harmoniczne n-tego rzędu mogą być określone wzorem:

$$h_n = \frac{u_n}{\sum_{n=1}^{\infty} u_n^2} 100 [\%] \quad \text{lub} \quad h_n = \frac{u_n}{u_1} 100 [\%] \quad (4)$$

lub w mierze decybelowej

$$L_{h_n} = 20 \lg \frac{h_n}{100} \quad [dB]$$

### 3.3. Wyznaczanie całkowitego współczynnika zniekształceń nieliniowych harmonicznym na podstawie współczynników udziału poszczególnych harmonicznym

Znając współczynniki udziału poszczególnych harmonicznym, całkowity współczynnik zniekształceń nieliniowych harmonicznym jest wyznaczany ze wzoru:



$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^m h_n^2} \quad [\%] \quad (5)$$

przy czym:  $h_n$  - współczynnik udziału poszczególnych harmonicznnych w [%].

Znając wartości poszczególnych harmonicznnych w mierze decybelowej, całkowity współczynnik zniekształceń nieliniowych harmonicznnych jest wyznaczany ze wzoru:

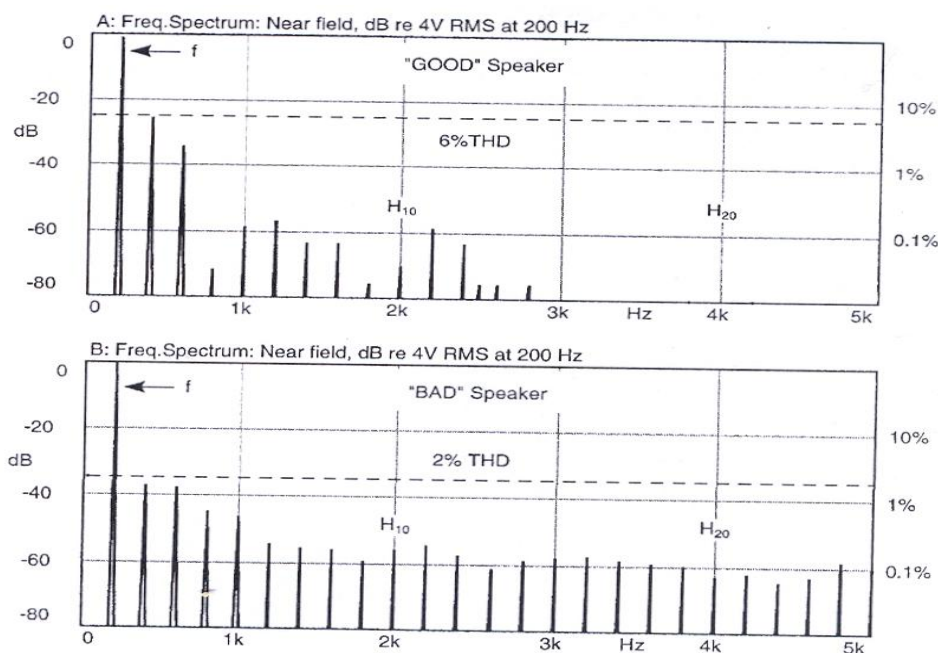
$$L_h = 10 \lg (10^{0,1 \cdot L_{h_2}} + 10^{0,1 \cdot L_{h_3}} + \dots + 10^{0,1 \cdot L_{h_m}}) \quad [dB] \quad (6)$$

#### 4. Uwagi na temat pomiarów zniekształceń nieliniowych harmonicznnych

Wartość THD+N może zmieniać się w sposób znaczny w zależności od częstotliwości i amplitudy sygnału. Specyfikacja lub porównywanie tylko dla pojedynczego parametru może być bardzo błędne, bo oczywistym jest, że producenci będą wybierać najlepsze warunki pracy swoich urządzeń. Zniekształcenia THD+N powinny być obrazowane jako szereg wykresów przedstawiających zależność od amplitudy i częstotliwości.

Pomiary zniekształceń nieliniowych w funkcji amplitudy wymagają właściwego doboru częstotliwości testowej. Jest ona związana z szerokością pasma badanego urządzenia. Mierząc THD+N z częstotliwością testową powyżej 20 % szerokości pasma możemy popełnić błąd, gdyż znaczące harmoniczne mogą być usunięte.

Sama wartość współczynnika THD+N, bez znajomości widma sygnału, może czasami być bardzo myląca. Na rys. 7 przedstawiono widma sygnałów odtwarzanych przez głośniki pobudzane tonem o częstotliwości 200 Hz. Głośnik z rys. 7A był oceniany jako dobry w porównaniu z głośnikiem z rys. 7B, pomimo tego, że współczynniki THD+N wynosiły dla dobrego głośnika 6 %, a dla złego tylko 2 %. W widmie głośnika dobrego dominują druga i trzecia harmoniczne, natomiast głośnik oceniany jako zły ma bardzo dużą zawartość harmonicznnych wyższych rzędów. Te harmoniczne wysokich rzędów percypowane są jako osobne dźwięki w stosunku do składowej podstawowej i stąd taka ocena subiektywna głośnika.



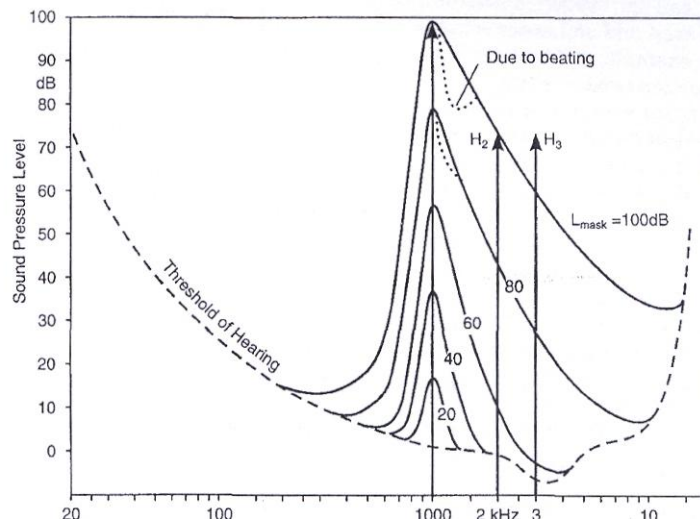
Rys. 7. Widma sygnałów odtwarzanych przez głośniki pobudzany tonem o częstotliwości 200 Hz. Głośnik z rys. A THD+N = 6 %; głośnik z rys. B THD+N = 2%;

## 5. Percepcja zniekształceń

Czułość organu słuchu zależy zarówno od poziomu sygnału, jak i częstotliwości. Jak wynika z tych krzywych, tony o małych i wysokich częstotliwościach z krańców pasma słyszalnego są mniej słyszalne niż tony o tej samej częstotliwości z zakresu średnich częstotliwości. Ma to również zastosowanie do produktu zniekształceń nieliniowych. Wg badań zniekształcenia nieliniowe harmoniczne poniżej 400 Hz są znacznie trudniejsze do detekcji niż powyżej 400 Hz.

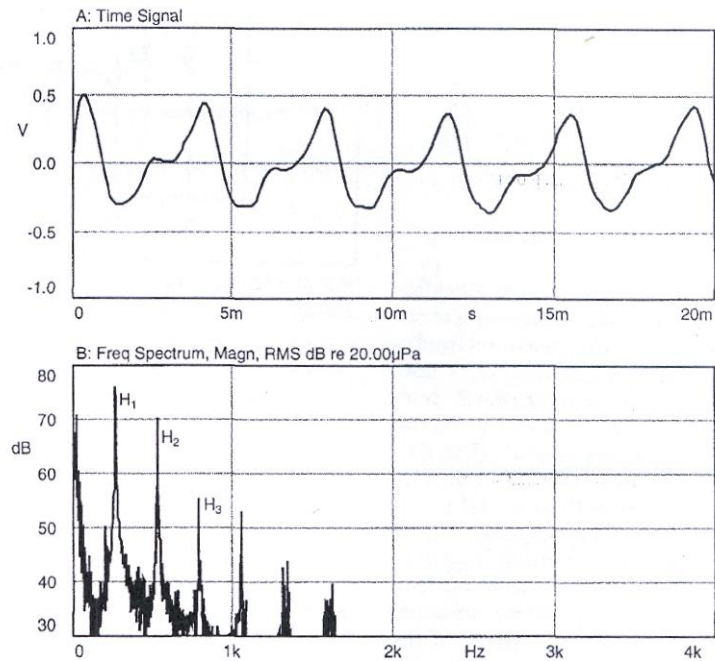
Słyszalność zniekształceń jest również funkcją czasu trwania. Z badań psychoakustycznych wynika, że zniekształcenia związane z ograniczaniem sygnału typu tone burst o czasie 4 ms muszą osiągnąć wartość ok. 10 %, by były zauważone, ale wzrost długości impulsu do 20 ms redukuje ten próg detekcji do ok. 0,3 %.

Innym ważnym zjawiskiem psychoakustycznym jest maskowanie. Dźwięki w środowisku rzadko występują jako czyste tony. Na rys. 8 przedstawiono przebiegi progów maskowania tonu w obecności szumu wąskopasmowego o częstotliwości środkowej 1 kHz. Maskowanie jest największe, jeżeli częstotliwości sygnału i maskera są jednakowe lub bardzo zbliżone. Ponadto z rys. 8 wynika, że silniejsze maskowanie występuje dla częstotliwości powyżej tonu maskowanego niż poniżej. W przypadku zniekształceń nieliniowych harmonicznych, maskowanie drugiej harmonicznej będzie większe niż trzeciej, ale bardzo małe dla wyższych harmonicznych.

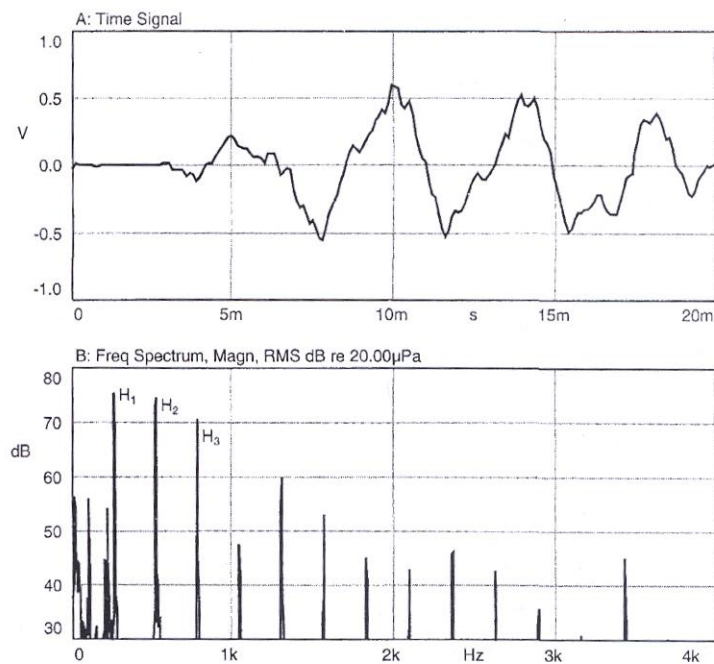


Rys. 8. Próg maskowania tonu szumem wąskopasmowym o częstotliwości środkowej 1 kHz. Przy poziomie maskera 100 dB, druga harmoniczna jest maskowana dla poziomów poniżej 70 dB, a trzecia harmoniczna dla poziomów poniżej 60 dB SPL.

Struktura harmoniczna instrumentów muzycznych może również maskować powstające w torze fonicznym zniekształcenia harmoniczne. Wielkość maskowania zmienia się w zależności od typu instrumentu i rodzaju muzyki. Porównując dźwięki fletu i gitary (patrz rys. 9 i 10) można zauważyć, że flet ma nieliczne i względnie niskie harmoniczne niż gitara. Dźwięk fletu jest bardziej „czysty”, podczas gdy gitary bardziej bogate. Konsekwentnie zniekształcenia harmoniczne wprowadzane przez głośnik, który odtwarza muzykę gitarową będą trudniejsze do zauważenia niż przy odtwarzaniu dźwięku fletu.



Rys. 9. Dźwięk C<sup>1</sup> (261,63 Hz) grany przez flet.



Rys. 10. Dźwięk C<sup>1</sup> (261,63 Hz) grany przez gitarę.

Panuje przekonanie, że elektronika lampowa daje dźwięk „bogatszy” lub „cieplejszy”. Nieliniowości w układach lampowych są typowo bardziej asymetryczne niż symetryczne, występują bardziej stopniowo ze zmianą poziomu sygnału niż w układach tranzystorowych i stąd bardziej łagodne ograniczanie. Stąd układy lampowe mogą mieć względnie duże zniekształcenia harmonicznego drugiego rzędu, ale bardzo małe zniekształcenia harmonicznego wyższych rzędów. Ponadto parzyste rzędy zniekształceń, szczególnie o mnożnikach 2, 4, 8, 16 itd. współgrają z interwałami oktawowymi skali muzycznej. Dodawanie określonej

zawartości parzystych harmoniczných do oryginalnego sygnału muzycznego jest najczęściej całkiem tolerowane i czasami nawet przyjemne.

Zniekształcenia harmoniczne nieparzystych rzędów, wynikające z symetrycznego ograniczania, dają dźwięk „rozwichrzony” i „ziarnisty”. Ucho ludzkie mniej toleruje tego typu zniekształcenia.

## Dodatek B

### **Pomiary współczynnika zniekształceń nieliniowych harmonicznych z użyciem automatycznego miernika zniekształceń nieliniowych typ PMZ-11**

1. Do wejścia przyrządu (gniazdo *INPUT*) dołączyć wyjście badanego urządzenia lub toru pomiarowego.
2. Dokonać wymaganych podczas pomiaru nastaw parametrów badanego urządzenia lub toru pomiarowego.
3. Wykonać kalibrację miernika zniekształceń. W tym celu należy:
  - 3.1. Przełącznik *KALIBRACJA (CALIBRATION)* ustawić w pozycji 300 V
  - 3.2. Przełącznik *ZNIEKSZTAŁCENIA (DISTORTION)* ustawić w pozycji 100%
  - 3.3. Wcisnąć i puścić klawisz *KALIBRACJA (CALIBRATION)*
  - 3.4. Przełącznik i potencjometr *KALIBRACJA (CALIBRATION)* ustawić tak, aby na skali miernika przyrządu uzyskać pełne wychylenie (wskazówka w pozycji „1”)
  - 3.5. Ustawić prawidłowo zakres częstotliwości podstawowej sygnału za pomocą przełącznika *CZĘSTOTLIWOŚĆ (FREQUENCY)* znajdującego się pod wskaźnikiem częstotliwości podstawowej sygnału. Wartości opisujące poszczególne pozycje tego przełącznika (x1; x10; x100; x1000), to mnożnik zakresu wskazań miernika częstotliwości podstawowej sygnału. Dla pozycji „x1” zakres ten wynosi 20 Hz – 200Hz; dla pozycji „x10” zakres ten wynosi 200 Hz – 2000 Hz itd.
4. Wcisnąć i puścić klawisz *POMIAR (MEASURE)*
  - 4.1. Przy malejących wskazaniach miernika (gdy osiągają one wartość „1” na skali „3”), należy przełącznik *ZNIEKSZTAŁCENIA (DISTORTION)* przełączać kolejno na podzakresy o większej czułości aż do ustalenia się wskazania miernika.
  - 4.2. Wynik pomiaru odczytać ze skali miernika uwzględniając zakres pomiarowy określony wciśniętym klawiszem przełącznika *ZNIEKSZTAŁCENIA (DISTORTION)*
5. Powtórzyć czynności przedstawione w punktach 3 i 4 dla kolejnej częstotliwości podstawowej.