

„Wybitny kabel w swojej klasie cenowej. Podnosi klasę dźwięku systemu o 2 poziomy. Daje więcej, niż zakup droższych komponentów elektronicznych” – czytamy na stronie internetowej producenta kabla sieciowego o długości 1,5 m. To przykład bzdur, którymi cyniczni marketingowcy karmią skołowanych audiofilów. Są bardziej bezczelni od cwaniaków warszawskich potrafiących sprzedać kolumnę Zygmunta. A może to ignorancja... O nieprostych prawdach i zwykłym kuglarstwie wokół parametrów sprzętu audio jest ten artykuł, kończący „letni” Kurs Audio.

Parametry technika i kuglarstwo

Przed miesiącem doszliśmy do wniosku, że zagadnienia dotyczące akustyki pomieszczeń oraz percepcji dźwięku przez człowieka są wyjątkowo skomplikowane i bardzo trudno ująć matematycznie wszystkie ich aspekty. Nasze rozważania zakończyliśmy stwierdzeniem, że wniosków dotyczących bardzo złożonych właściwości akustycznych pomieszczeń odsłuchowych oraz specyfiki ludzkiego słuchu nie należy bezkrytycznie przenosić na właściwości i parametry elektronicznego sprzętu audio. „Elektroniczne” właściwości sprzętu audio są bowiem zdecydowanie mniej skomplikowane. Dużo łatwiej poddają się matematycznemu opisowi i łatwiej można wyznaczyć parametry, związane z jakością sprzętu i wiernością reprodukcji dźwięku.

W zasadzie sprawa jest jasna: **system elektroakustyczny powinien wiernie reprodukować sygnał dźwiękowy.**

Co to jednak znaczy „wiernie”?

To bardzo szerokie zagadnienie, ale my w ramach tego artykułu ograniczymy się do aspektów technicznych związanych z niedoskonałością sprzętu audio. Z technicznego punktu widzenia oznacza to, że kształt przebiegu na wyjściu wzmacniacza mocy powinien być idealną, ewentualnie „powiększoną” – wzmocnioną kopią oryginału.

Nietrudno się domyślić, że tak nie jest i że kształt sygnałów wyjściowych mniej lub więcej odbiega od wejściowych. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że sygnały akustyczne, zarówno muzyki, jak i mowy są dynamiczną mieszaniną składowych o rozmaitych częstotliwościach.

Jak ująć charakter i stopień różnego rodzaju niedoskonałości?

Przed takim dylematem już w latach 20. i 30. ubiegłego stulecia stanęli profesjonaliści zajmujący się telekomunikacją oraz radiofonią. Z uwagi na ówczesne możliwości techniczne, trzeba było znaleźć w miarę proste sposoby obiektywnego określania stopnia wierności. Później, w latach 60. do 80. popularne było pojęcie Hi-Fi (*High Fidelity*, czyli wysoka wierność). Powstały normy Hi-Fi, w tym słynna niemiecka DIN 45500 czy międzynarodowa IEC-268. Producenci, często żądali wygórowanych cen za sprzęt spełniający normy Hi-Fi. Postęp sprawił, że w latach 90. pojęcie Hi-Fi zupełnie straciło znaczenie, ponieważ nawet bardzo tani sprzęt spełniał normy Hi-Fi. Pojawiło się wprawdzie określenie Hi-End, dotyczące sprzętu znacznie przekraczającego wymagania Hi-Fi, ale nie powstały żadne normy „hajendowe”. Obecnie zagadnienie wierności i jakości sprzętu audio jest jeszcze bardziej skomplikowane, a to głównie z uwagi na fakt upowszechnienia się cyfrowych urządzeń i sposobów zapisu dźwięku, wykorzystujących kompresję stratną. Kompresja stratna oznacza, że już „oryginalny” sygnał jest w jakimś sensie zubożony i niedoskonały. Fakt ten utrudnia ocenę jakości i wierności systemu audio, w którym taki sygnał jest odtwarzany. Niemniej problem wierności przekazu i jakości sprzętu audio nadal jest aktualny, zwłaszcza w związku z licznymi nadużyciami,

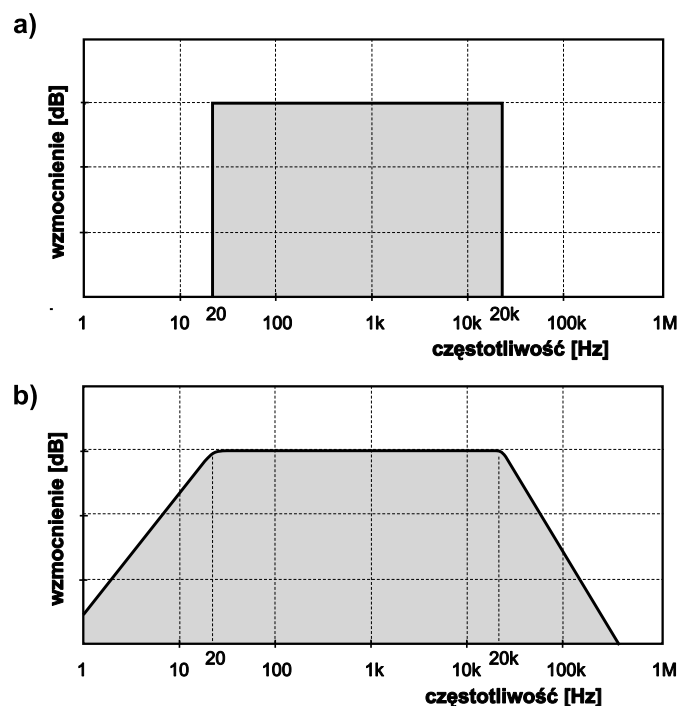
związanymi z upowszechnianiem się techniki cyfrowej. Choć pojawiły się nieznane wcześniej czynniki i problemy, wierność przekazu nadal zależy od pewnych podstawowych właściwości i parametrów. Te podstawowe właściwości to:

- pasmo przenoszenia,
- szumy i dynamika,
- zniekształcenia.

Warto bliżej przyjrzeć się parametrom sprzętu audio pod kątem ich związku z jakością i wiernością, choćby dlatego, że związek ten wcale nie jest tak oczywisty, jak mogłoby się wydawać. Zacznijmy od podstaw.

Pasma

Pasma przenoszenia. Zwykle przyjmuje się, że człowiek słyszy dźwięki o częstotliwościach 20 Hz...20 kHz i ten zakres częstotliwości nazywa się pasmem akustycznym. Dla porządku można dodać, że w niektórych źródłach podaje się pasmo dźwięków słyszalnych 16 Hz...16 kHz, a według innych sięga 22 kHz. Nietrudno więc zrozumieć powszechne oczekiwania, by system audio reprodukował dźwięki z zakresu 20...20000 Hz, albo na-



Rys. 1.

wet 16 Hz...20 kHz. Rys. 1a pokazuje teoretyczną charakterystykę idealną. Urządzenie o takiej charakterystyce doskonale przenosiłoby sygnały o częstotliwościach pasma akustycznego i zupełnie nie przenosiłoby sygnałów spoza tego pasma. Jednak takiej charakterystyki nie ma żadne urządzenie. I wbrew wyobrażeniom niektórych – nie powinno mieć. Można wprowadzić zastosować filtry o bardzo stromych zboczach i uzyskać taką charakterystykę, ale to nie dałoby żadnych korzyści, a mogłoby nawet spowodować kłopoty. W większości praktycznych urządzeń charakterystyka amplitudowa na krańcach pasma opada łagodnie – patrz przykład na rys. 1b.

Niektórzy twierdzą, że jeszcze lepiej, gdy system przenosi sygnały począwszy od częstotliwości zero, czyli nawet bardzo wolnozmiennie, łącznie ze składowymi stałymi (DC). Twierdzenia, że wzmacniacz powinien przenosić także składową stałą, nie mają żadnego sensownego uzasadnienia i w sumie są kaprysem niektórych hobbystów i producentów sprzętu, chcących w ten sposób zwrócić uwagę na swój sprzęt. **Po pierwsze**, dźwięków „muzycznych” o częstotliwościach poniżej 40 Hz praktycznie nie spotyka się w muzyce wytwarzanej przez klasyczne instrumenty muzyczne (z wyjątkiem organów). W praktyce nie sposób więc rozróżnić systemów o częstotliwościach granicznych 20 Hz i 40 Hz. **Po drugie**, dźwięki o częstotliwościach poniżej 40 Hz to raczej vibracje i ludzki słuch ledwo je odbiera. **Po trzecie**, w wielu sytuacjach, głównie przy nagraniach na żywo, wręcz obcina się najniższe częstotliwości, poniżej 70...100 Hz, które w praktyce okazują się zakłóceniami. **Po czwarte**, kondensatory sprzęgające kolejne stopnie, obarczane winą za pogorszenie dźwięku, mogą mieć parametry zapewniające niekwestionowaną „przezroczystość” dźwięku. **Po piąte**, żadne źródła dźwięku nie dostarczają sygnałów ze składowymi zaczynającymi się od zera. I wreszcie **po szóste** – klasyczne głośniki o przeciętnych rozmiarach, w tym nawet subwoofery, nie są w stanie prawidłowo reprodukcować przebiegów o częstotliwościach niższych niż 30...40 Hz.

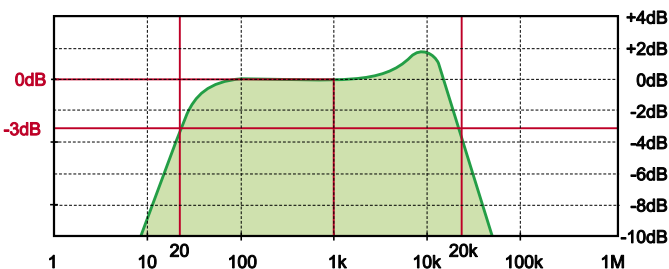
Podobnie niektórzy twierdzą, że z uwagi na harmoniczne wysokich częstotliwości, górna granica pasma powinna leżeć znacznie powyżej 20 kHz. Badania naukowe nie potwierdziły takich twierdzeń. Owszem, jeśli chodzi o harmoniczne, to pasmo musi być dużo szersze niż 20 kHz, ale w instalacjach przeznaczonych dla... nietoperzy, natomiast ludzie nie zauważają obecności czy braku składowych o częstotliwościach powyżej 20 kHz.

Owszem, jest pewien merytoryczny argument na rzecz poszerzenia pasma powyżej 20 kHz: przesunięcie w górę górnej granicy pasma oznacza, że urządzenie jest bardzo szybkie, a to w układach z ujemnym sprzężeniem zwrotnym jest korzystne ze względu na tzw. zniekształcenia TIM. Ponadto rozszerzenie pasma spowoduje przesunięcie ewentualnych zniekształceń fazowych poza zakres akustyczny. Inna sprawa, że zniekształcenia fazowe mają znikomy wpływ na jakość dźwięku – o tym dalej w artykule.

Podczas dyskusji na temat wymaganej szerokości pasma warto cały czas pamiętać, że tylko niektóre dzieci i nastolatki słyszą dźwięki o częstotliwościach powyżej 16 kHz (co można łatwo sprawdzić choćby za pomocą generatora sprzętowego, czy programu komputerowego). Z wiekiem górna granica niestety się obniża i już osoby w średnim wieku słyszą jedynie sygnały poniżej 10...13 kHz. Wynika stąd nieprzyjemny wniosek, że tylko w młodym wieku można naprawdę rozkoszować się pełnią muzyki. Osoby w starszym wieku wolą jednak o tym nie pamiętać, a tak na marginesie, to przede wszystkim one kupują najdroższe systemy...

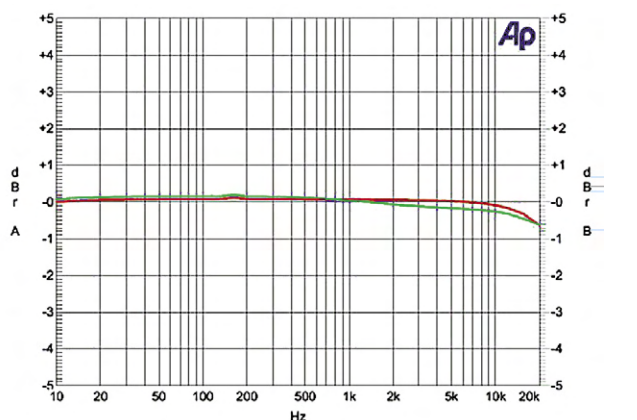
Cóż, znów w grę wchodzi czynnik pozatechniczny i psychologia.

Równomierność charakterystyki. Oprócz kwestii szerokości pasma, istotne też jest uzyskanie równomiernej charakterystyki amplitudowej. Zniekształcenia charakterystyki amplitudowej nazywamy **zniekształceniami liniowymi**. Miarą niedoskonałości jest podawana w decybelach odchyłka od wartości nominalnej, środkowej, zazwyczaj określanej dla częstotliwości 1 kHz. Generalnie przyjmuje się, że odchyłki o ± 3 dB są dla ucha ledwo zauważalne i właśnie spadek o 3 dB, czyli do 71% wartości nominalnej to najczęściej przyjmowana granica pasma przenoszenia – mówimy wtedy o paśmie 3-decybelowym (rys. 2). W przypadku wielu

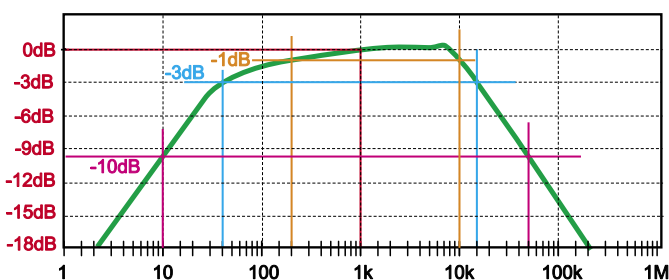


Rys. 2.

współczesnych urządzeń podkreśla się, że liniowość charakterystyki jest lepsza niż ± 1 dB czy $\pm 0,5$ dB – patrz przykład na rys. 3. Niestety, podkreślając idealną wręcz liniowość odtwarzacza i wzmacniacza, często przemilcza się kluczowy fakt, że dla głośników i kolumn szerokość pasma podaje się dla odchyłki i nierównomierności charakterystyki co najmniej ± 6 dB, często ± 10 dB, a nawet, o zgrozo, jeszcze większej. Nie należy więc bezkrytycznie fascynować się dużą szerokością pasma podanego w materiałach reklamowych. Po pierwsze, warto sprawdzić, przy jakiej tolerancji je określono. Na przykład urządzenie o teoretycznej charakterystyce z rys. 4 przy tolerancji spadku o 1 dB ma pasmo 200 Hz...10 kHz, przy spadku 3-decybelowym 40 Hz...15 kHz, a przy spadku o 10 dB imponujące 10 Hz...50 kHz. Po drugie, trzeba wziąć pod uwagę nierównomierność pasma najgorszego urządzenia w systemie. Okazuje się wtedy, że równomierność pasma wzmacniaczy i odtwarzaczy ± 1 dB czy $\pm 0,5$ dB tak naprawdę nie ma istotnego znaczenia, ponieważ wszelkie głośniki i kolumny nieuchronnie mają zafalowania w paśmie rzędu co najmniej kilku decybeli. Po trzecie, warto pamiętać o nierównomierności charakterystyki ucha u poszczególnych ludzi. Jak wiadomo, „z wiekiem traci się słuch”. Na przykład mężczyźni generalnie tracą wrażliwość na wyższe częstotliwości. Nie ma jednak wzoru czy przepisu określającego szczegóły. Konkretnie informacje dotyczące danej osoby można uzyskać podczas wizyty u audiologa, który przeprowadzi badanie ubytku słuchu. Nierzadko okazuje się, że w pewnych zakresach pasma akustycznego nastąpiła utrata słuchu rzędu kilku, a nawet kilkunastu decybeli. Czy jest sens walczyć o równomierność wzmacniacza $\pm 0,5$ dB, jeżeli wielu ludzi w średnim wieku ma ubytki słuchu w różnych zakresach pasma rzędu



Rys. 3.



Rys. 4.

kilku, czy kilkunastu decybeli. Problem dotyczy też młodzieży, która często ma słuch uszkodzony przez słuchanie zbyt głośnej muzyki. Zastanówmy się, czy słuszny jest wniosek, że jeśli ktoś chciałby być prawdziwym purystą w tym zakresie, to powinien za pomocą equalizera dostosować przebieg charakterystyki amplitudowej swego zestawu audio do wyników badania audiologicznego?

Oczywiście takich zabiegów nikt nie przeprowadza, niemniej widać tu sens użycia equalizera i dopasowania charakterystyki zestawu nie tyle do do wskazań jakichś przyrządów, tylko do właściwości słuchu i upodobań słuchacza, który zapewne przy takiej indywidualnej regulacji uwzględni ewentualne ubytki własnego słuchu. Sprawa jest jednak dyskusyjna, bo nasuwa się pytanie, czy system audio ma korygować nieuchronne ubytki słuchu właściciela, niczym wysokiej klasy aparat słuchowy, czy też ma być absolutnie „neutralny” i zapewniać słuchaczowi takie wrażenia, jak słyszy on w naturze. Odpowiedź wcale nie jest oczywista...

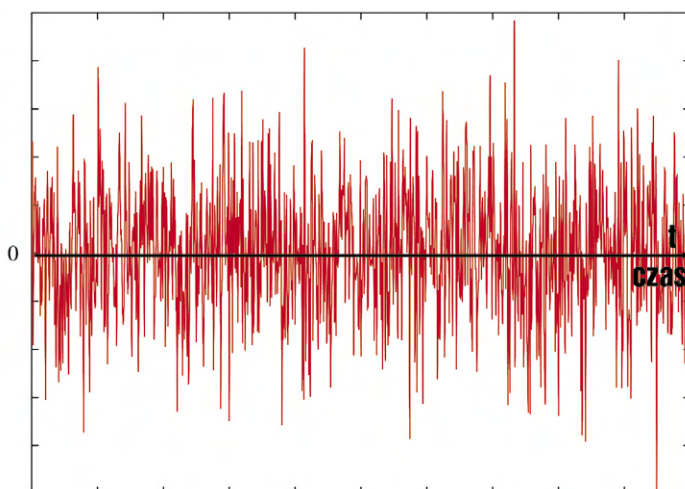
W każdym razie, informacja o szerokości, a zwłaszcza równomierności pasma przenoszenia (o zniekształceniach liniowych), ma w sumie niezbyt duże znaczenie. Na przykład wiele bardzo wysoko ocenianych wzmacniaczy lampowych ma pasmo znacznie węższe niż kanoniczne 20 Hz...20 kHz i do tego znaczną nierównomierność charakterystyki, rzędu kilku decybeli. I nie przeszkadza to subiektywnie odczuwanej, znakomitej jakości dźwięku.

Szumy i dynamika

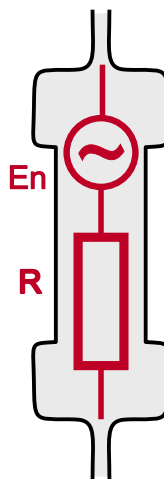
Drugi parametr, a właściwie grupa pokrewnych, związanych ze sobą parametrów to **szumy i dynamika**. Za ideał można uważać „przezroczysty”, bezszumny system reprodukcji dźwięku. Wtedy w chwilach ciszy, z głośnika nie dochodzi żaden dźwięk czy szum, a krystaliczna muzyka pojawia się jakby „znikąd”. Wiele współczesnych instalacji audio bliskich jest tego ideału, niemniej trzeba też pamiętać, że szumy, a także zniekształcenia są nieuniknione. Niektórzy mówią: nieuniknione jak śmierć i podatki.

Szumy. We wszystkich systemach rejestracji i odtwarzania dźwięku występują jakieś większe czy mniejsze szumy. Są to najróżniejsze przypadkowe przebiegi o różnych częstotliwościach (rys. 5). Wprawdzie zazwyczaj szumy są nieduże, jednak w związku z logarytmiczną czułością ucha, często dają o sobie znać. Szumy można minimalizować na rozmaite sposoby, ale nie ma możliwości ich całkowitej eliminacji. W potocznym pojęciu szumy to wszystkie składniki „obce”, zakłócające. Należy tu jednak odróżnić zakłócenia przychodzące z zewnątrz, których wpływ można minimalizować, oraz szumy własne układów elektronicznych, wynikające z właściwości ich elementów składowych.

Okazuje się, że wielu domorosłych specjalistów od sprzętu audio nie posiada nawet podstawowej wiedzy o szumach, a efektem tego są wypowiedzi i dyskusje, wskazujące na zupełnie nierealistyczne oczekiwania co do szumów.



Rys. 5.



Rys. 6.

Tymczasem trzeba wiedzieć, że zależnie od przyczyny powstawania, rozróżniamy kilka rodzajów szumów własnych. Są to m.in. szumy: termiczne, śrutowe, strukturalne czy migotania (nadmiarowe). I tu ważna informacja dla mniej zorientowanych: we wszelkich układach elektronicznych występuje szum cieplny (termiczny) i praktycznie nie ma sposobów na pozbycie się go, ponieważ w grę wchodzi tu nieprzekraczalne, elementarne prawa fizyki. Można natomiast walczyć z innymi rodzajami szumów i zakłóceń, na przykład stosując niskoszumne elementy i redukując wpływ zakłóceń zewnętrznych.

Szumy termiczne są wytwarzane w każdej rezystancji. Każdy rezystor i każdy inny element zawierający rezystancję, jest jednocześnie swego rodzaju „elektrownią cieplną”, wytwarzającą niewielkie, przypadkowe napięcia zmienne (rys. 6). Mówiąc

w uproszczeniu, pod wpływem energii cieplnej w każdej rezystancji wytwarzany jest elektryczny przebieg zmienny, będący sumą składników o „wszelkich” częstotliwościach, przy czym składniki te mają charakter losowy. Dotyczy to nie tylko rezystorów, ale też wszelkich składowych rezystancyjnych w tranzystorach, w tym także w mikrofonach i innych źródłach sygnału.

Energia i moc tak wytwarzanych szumów jest wprost proporcjonalna do temperatury bezwzględnej (wyrażonej w Kelvinach) – stąd nazwa: szumy termiczne. Rezystancja nie szumi jedynie w temperaturze zera bezwzględnego, natomiast napięcie wytwarzanych szumów zależy też od rezystancji, a ponadto w grę wchodzi też szerokość pasma częstotliwości. To dość złożone zagadnienie, w którym pojawia się straszący nie tylko początkujących, tak dziwny parametr jak gęstość szumów wyrażona w nanowoltach na pierwiastek z herca. Szczegółowo zdecydowanie wykraczają jednak poza ramy tego artykułu. O ile można skutecznie walczyć z innymi szumami, o tyle szumu cieplnego zlikwidować się nie da i każde urządzenie elektroniczne szumi. Trzeba jednak przyznać, że chodzi tu o maleńkie napięcia rzędu mikrowoltów i że obecnie parametry szumowe najlepszych elementów i urządzeń są bliskie nieprzekraczalnej granicy szumów termicznych.

Stosunek sygnał/szum i dynamika. W praktyce istotny jest nie tyle bezwzględny poziom szumów (*Noise level*) wyrażony w mikrowoltach. Dla słuchacza ważniejszy jest *stosunek sygnał/szum* – *Signal-to-Noise Ratio*, oznaczany skrótem SNR lub S/N. Chodzi o to, o ile szumy urządzenia są mniejsze od sygnału użytecznego, czyli właśnie o parametr SNR (S/N). Ponieważ szumy są wielokrotnie mniejsze od sygnału użytecznego, stosunek sygnał/szum wyraża się w decybelach:

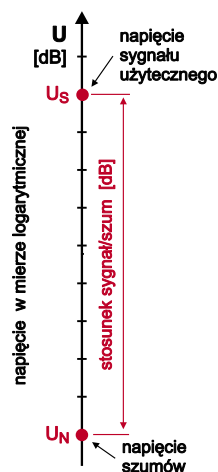
$$S/N \text{ [dB]} = 20 \log(U_s/U_n)$$

Na przykład różnica 100-krotna to 40 dB, przy czym S/N=40 dB to bardzo mizerny wynik. Zadowalające wyniki to S/N powyżej 60 dB – czym więcej, tym lepiej. Można to przedstawić graficznie, na przykład jak na rys. 7.

W opisach parametrów podaje się często wartości rzędu 100 dB, ale wtedy zazwyczaj chodzi o *dynamikę*, czyli różnicę między maksymalnym, najsilniejszym sygnałem, a szumami własnymi. Zasada jest prosta: dynamika to wyrażony w decybelach stosunek poziomu *maksymalnego* (niezniekształconego) sygnału do poziomu szumów. Dynamika jest dobrym, obiektywnym parametrem w przypadku odtwarzaczy i systemów zapisu dźwięku. Ale nie w przypadku wzmacniaczy mocy, które prawie nigdy nie pracują przy sygnałach maksymalnych – tu dynamika może być parametrem wprowadzającym w błąd. Otóż założmy, że mamy dwa wzmacniacze. Jeden ma dynamikę 120 dB, drugi 112 dB. Wygląda, że ten pierwszy ma mniejsze szumy.

Niekoniecznie!

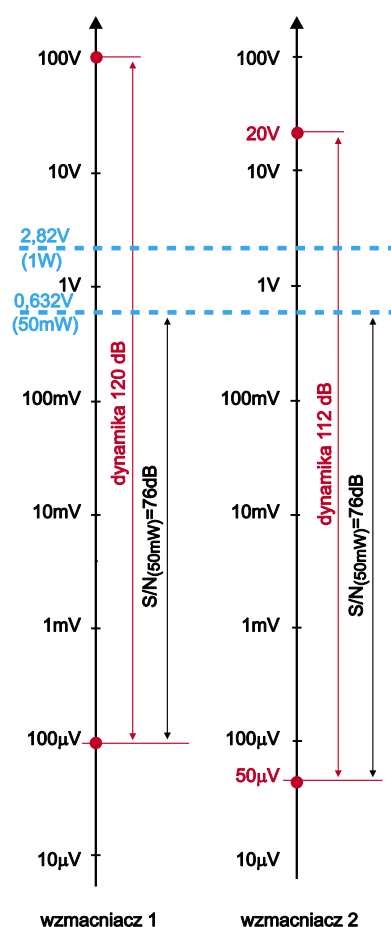
Otóż założmy, że oba wzmacniacze pracują z obciążeniem 8 Ω, moc pierwszego wynosi 1250 W, drugiego 50 W. Nietrudno policzyć ze wzoru



Rys. 7.

dynamiki podaje się stosunek sygnał/szum przy określonej, niewielkiej mocy, zazwyczaj 50 mW, ewentualnie 1 W. Ilustruje to rys. 8. Gdyby przykładowe dwa wzmacniacze scharakteryzować w ten sposób, to pierwszy wzmacniacz dla mocy odniesienia 1 W miałby stosunek sygnał/szum równy 89 dB, a drugi 95 dB, co prawidłowo odzwierciedla poziom szumów. Przy mocy odniesienia 50 mW stosunek sygnał/szum pierwszego wynosi 76 dB, a drugiego 82 dB. Jak z tego widać, nie należy bezkrytycznie podchodzić do katalogowych informacji o szumach, tylko wnikliwie je analizować.

Nietrudno się też domyślić, że o ostatecznym stosunku sygnał/szum łańcucha urządzeń audio zadecyduje najsłabsze ogniwo. Obecnie parametry szumowe najbardziej dotyczą przedwzmacniaczy i wzmacniaczy. W przypadku odtwarzaczy CD i innych sprawa jest bardziej złożona, ponieważ oprócz klasycznych szumów analogowych, w grę wchodzi



Rys. 8.

$P=U^2/R$, że pierwszy wzmacniacz daje na obciążeniu maksymalny sygnał o wartości 100 V, a drugi tylko 20 V. Na razie jeszcze wszystko przemawia na korzyść pierwszego wzmacniacza. Ale liczymy dalej: dynamika 120 dB to dla napięć stosunek 1000000:1, a 112 dB to stosunek około 400000:1. Obliczamy, że pierwszy wzmacniacz ma poziom szumów własnych równy $100\text{ [V]}/1000000=0,1\text{ mV}=100\text{ }\mu\text{V}$, natomiast mniejszy wzmacniacz $20\text{ [V]}/400000=0,05\text{ mV}=50\text{ }\mu\text{V}$.

Okazuje się, że drugi wzmacniacz ma szumy dwukrotnie, czyli o 6 dB mniejsze niż pierwszy!

Trzeba przy tym pamiętać, że dynamika to często nie to samo, co stosunek sygnał/szum, choćby dlatego, że zazwyczaj wzmacniacz nie pracuje przy pełnej mocy. Dlatego zwłaszcza w przypadku wzmacniaczy domowych, zamiast

„szumy cyfrowe”. Parametry szumowe nie dotyczą natomiast głośników. Teoretycznie rezystancja głośnika też wytwarza znikomo mały szum termiczny, jednak z uwagi na ogromne sygnały użyteczne, można spokojnie przyjąć, że głośniki nie wytwarzają szumów własnych, czyli ich dynamika i stosunek sygnał/szum są nieskończenie duże. Tak samo szumów termicznych praktycznie nie wytwarzają żadne kable, ze względu na ich znikomą małą rezystancję.

Filtry ważące. Przy omawianiu parametrów szumowych nie sposób pominąć kwestii filtrów ważących. Otóż cała sprawa ma swoje źródło we właściwościach słuchu ludzkiego. Już wiele lat temu odkryto, że nasz słuch słabiej reaguje na ciche dźwięki o najniższych i najwyższych częstotliwościach. Zbadano dokładnie i opisano te zależności. Do-

wykresy – tak zwane krzywe jednakowej głośności – zagadnienie to było już wspomniane w poprzednim odcinku. Dlaczego o tym mówimy?

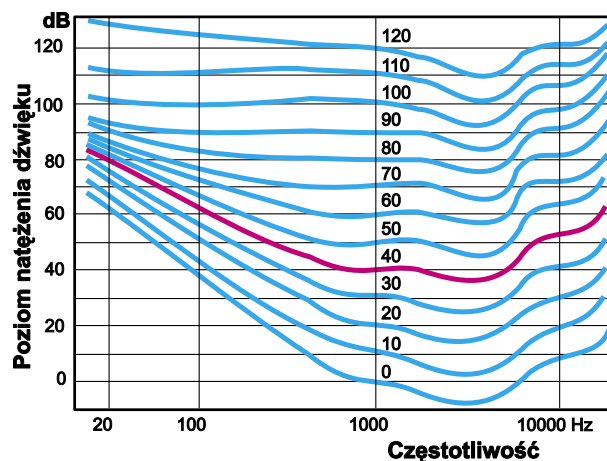
Otóż „zwykle” pomiary napięć nie uwzględniają właściwości ucha. Tymczasem przy określaniu parametrów szumowych wzmacniaczy interesuje nas rzeczywiście odczuwany poziom szumów własnych oraz „prawdziwy” stosunek sygnał/szum, odczuwany przez słuchacza. Szumy są ciche, a więc ucho ludzkie słabiej reaguje na ich najniższe i najwyższe składowe, natomiast na głośne sygnały użyteczne reaguje jednakowo w całym paśmie. Ograniczenie czułości ludzkiego ucha przy cichych sygnałach oznacza, że inny (lepszy) stosunek sygnał/szum otrzymamy porównując głośność sygnału i szumu za pomocą ucha, a inny (gorszy) przy „zwykłym” zmierzaniu napięcia sygnałów elektrycznych sygnału i szumów.

Oczywiście w gruncie rzeczy interesowałby nas pomiar *stosunku głośności*, ale to komplikuje pomiary, ponieważ wymaga użycia głośnika i odpowiedniego „człekopodobnego” miernika głośności. Żeby nie komplikować sprawy, można oprzeć się na pomiarach elektrycznych, ale wtedy przy pomiarach szumów trzeba uwzględnić charakterystykę ludzkiego ucha. Przy dużych sygnałach czułość ucha jest praktycznie niezależna od częstotliwości, więc pomiary dużych sygnałów można przeprowadzać klasycznymi sposobami, szerokopasmowo. Natomiast przy pomiarach małych sygnałów, a konkretnie szumów, można w dobrym przybliżeniu uwzględnić specyfikę ludzkiego ucha przez zastosowanie filtru. W użyciu są różne filtry tego rodzaju – najczęściej mówi się o pomiarach ważonych i filtrach A (*A-weighted*) lub filtrach i pomiarach psfometrycznych. Teoretycznie sprawa jest prosta: mierząc szumy używamy dość prostego filtru. Filtr taki, podobnie jak ucho ludzkie, ma największą czułość dla sygnałów w okolicach od jednego do kilku kHz, natomiast czułość dla niższych i wyższych częstotliwości jest mniejsza. **Filtry takie nazywamy psfometrycznymi.**

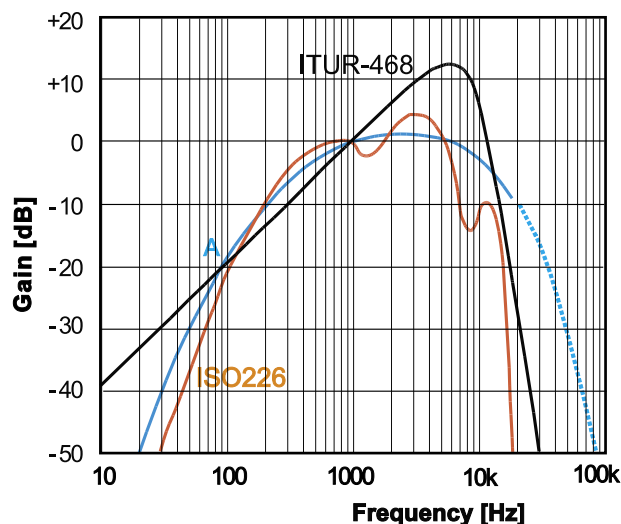
Jaką dokładnie charakterystykę ma mieć taki filtr? Przecież charakterystyka ucha zależy od poziomu dźwięku...

Od wielu lat wykorzystywany był tak zwany filtr A, odpowiadający krzywej głośności 40 dB na wykresie Fletchera–Munsona (rys. 9). W Wielkiej Brytanii i generalnie w Europie zaczęto przeprowadzać pomiary z użyciem nieco innego filtru, znanego dziś jako ITU–R 468, wcześniej jako CCIR (ITU) 468. Aktualnie zalecany jest też nowy „zrewidowany” filtr ISO226 (2003). Rys. 10 pokazuje porównanie tych trzech filtrów ważących szumy – w sumie mają dość podobne charakterystyki i wyniki pomiarów są zbliżone. Temat krzywych ważących jest szeroki, ale akurat w kwestii pomiarów sygnał/szum problem jest znikomy – niewielkie różnice nie są istotne. Więcej problemów występuje przy pomiarach szumów i zakłóceń na potrzeby BHP. Ale to zupełnie inna historia.

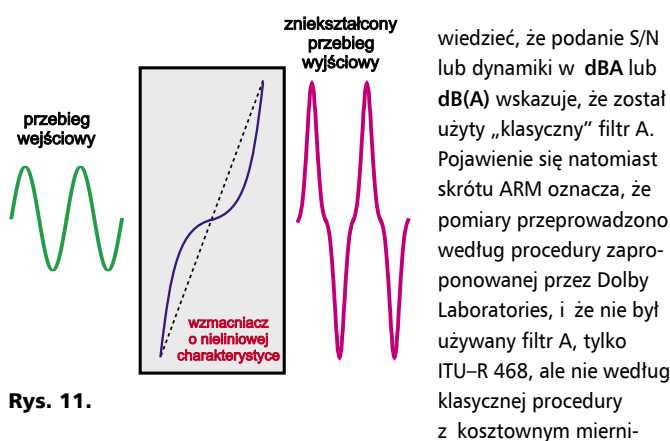
Zazwyczaj w specyfikacji sprzętu audio podane jest, jaki filtr szumów był użyty podczas pomiarów parametrów szumowych. Na marginesie warto wspomnieć, że problem polega nie tylko na kształcie charakterystyki filtru, ale też na rodzaju użytego miernika napięcia (miernik wartości skutecznej, średniej, szczytowej, pseudoszczytowej...). W każdym razie warto



Rys. 9.



Rys. 10.



Rys. 11.

kiem *true quasi-peak*, tylko z tanim miernikiem ARM (*average-response meter*).

W przypadku sprzętu lepszej klasy, z reguły wśród parametrów podaje się zarówno stosunek sygnał/szum lub dynamikę ważoną (z podaniem filtru/procedury), jak też nieważoną, czyli mierzoną bez filtra (*unweighted*). Oczywiście liczbowe wyniki pomiarów ważonych są lepsze od nieważonych. Osoby lepiej zorientowane interesują się różnicą między pomiarem ważonym i nieważonym. Wartość tej różnicy pozwala bowiem zorientować się, jaka jest zawartość „śmieci” o częstotliwości sieci energetycznej i jej harmonicznych, a to w znaczącym stopniu świadczy o jakości wzmacniacza. W przypadku gorszego sprzętu producenci i handlowcy nie podają parametrów nieważonych, a tylko te bardziej optymistyczne – ważne, z filtrem, ponieważ filtr szumów znacznie tłumi brum sieciowy 50 Hz i 100 Hz.

Zniekształcenia

Trzecim kluczowym parametrem, a właściwie grupą parametrów są **zniekształcenia**. Zniekształcenia mogą mieć różne przyczyny i są w różnym stopniu odczuwane przez człowieka. Ogólnie biorąc, zniekształcenia zmieniają kształt sygnału, co w przesadzony sposób pokazane jest na rys. 11. W praktyce nie sposób ich zmierzyć czy ocenić na podstawie zmian kształtu przebiegu – niewielkie zniekształcenia na pewno nie są widoczne gołym okiem na ekranie oscyloskopu.

W przypadku dawnych systemów odtwarzających: gramofonów i magnetofonów, w grę wchodziły takie zniekształcenia jak odchyłki i nierównomierność obrotów płyty i przesuwu taśmy (*wow & flutter, rumble*). W systemach cyfrowych praktycznie nie ma tego problemu. W odtwarzaczach cyfrowych występuje wprawdzie pokrewny parametr – *jitter*, określający niedoskonałość sygnału taktującego, jednak jego praktyczne znaczenie jest znikome, tym bardziej, że można z nim skutecznie walczyć.

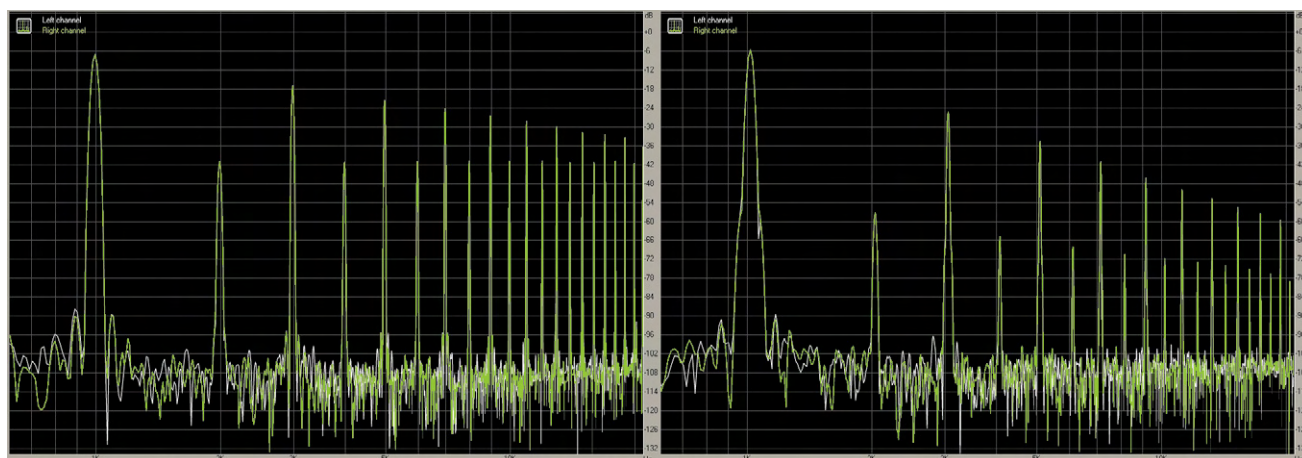
W sumie najbardziej istotne okazują się różne odmiany zniekształceń nieliniowych. Był to istotny problem w przypadku taśmy magnetofonowej, płyt gramofonowych, a także transmisji radiowych. Nie jest natomiast problemem w przypadku płyty CD, która zapewnia poziom zniekształceń nieliniowych poniżej 0,005%. Także współczesne wzmacniacze mają bardzo małe zniekształcenia.

Zniekształcenia nieliniowe i THD

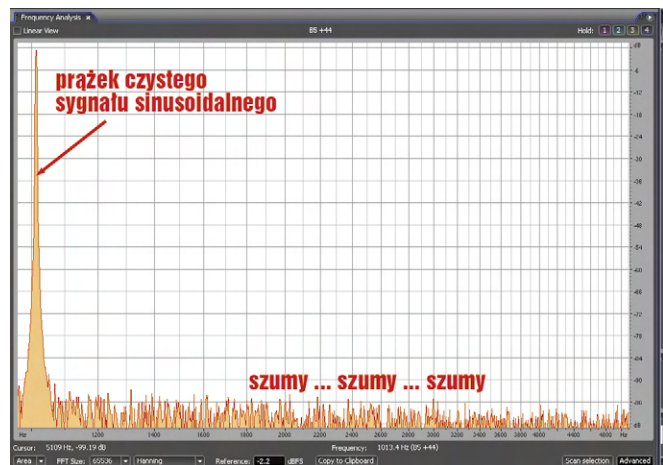
Najwięcej uwagi poświęca się zniekształceniom nieliniowym, które wynikają z nieliniowości charakterystyki przejściowej. Mniej zorientowanym należy jeszcze przypomnieć, dlaczego zniekształcenia nieliniowe nazywa się też **zniekształceniami harmonicznymi**. Otóż podstawą wykorzystywanych do dziś sposobów charakteryzowania i pomiaru zniekształceń jest fakt, że każdy powtarzalny, czyli okresowy przebieg jest w istocie złożeniem przebiegów sinusoidalnych o częstotliwości podstawowej i częstotliwościach harmonicznymi, czyli będących całkowitą wielokrotnością częstotliwości podstawowej. Matematycznie opisuje to tzw. rozkład czy szereg Fouriera.

Podstawowa idea jest dość prosta: „czysty” przebieg sinusoidalny zawiera tylko jedną składową o częstotliwości podstawowej f . Taki czysty przebieg podany na wejście rzeczywistego wzmacniacza zostanie w jakiś sposób odkształcony, co jest równoznaczne z pojawieniem się na wyjściu obok częstotliwości podstawowej f , także częstotliwości harmonicznymi: $2f$, $3f$, $4f$, $5f$, $6f$, $7f$, itd. Czym więcej tych dodatkowych składowych na wyjściu, tym większe zniekształcenia nieliniowe wprowadził wzmacniacz.

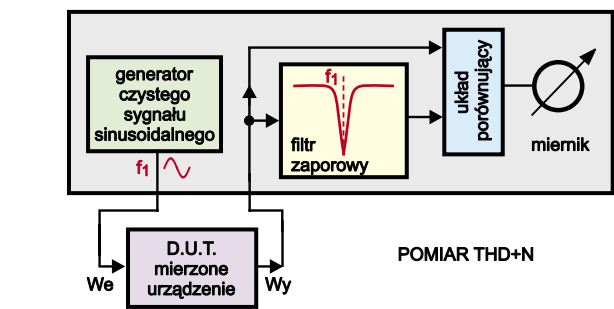
Dziś każda karta dźwiękowa w komputerze i darmowy program (choćby popularny RMAA – *RightMark AudioAnalyzer*), pozwalają przeprowadzić taką analizę. Rys. 12 pokazuje tak zbadaną zawartość widmową, czyli spektralną przebiegów prostokątnego i trójkątnego z pewnego prostego generatora. Z kolei rys. 13 pokazuje zawartość widmową „czystego” sygnału sinusoidalnego z dobrego generatora. Na charakterystyce



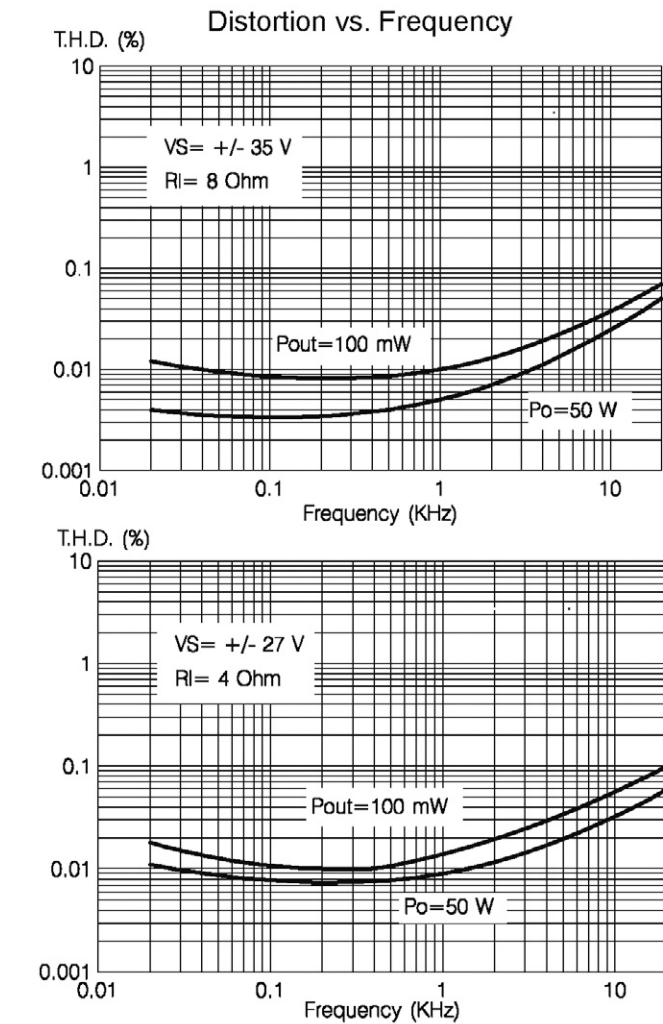
Rys. 12.



Rys. 13.



Rys. 14.



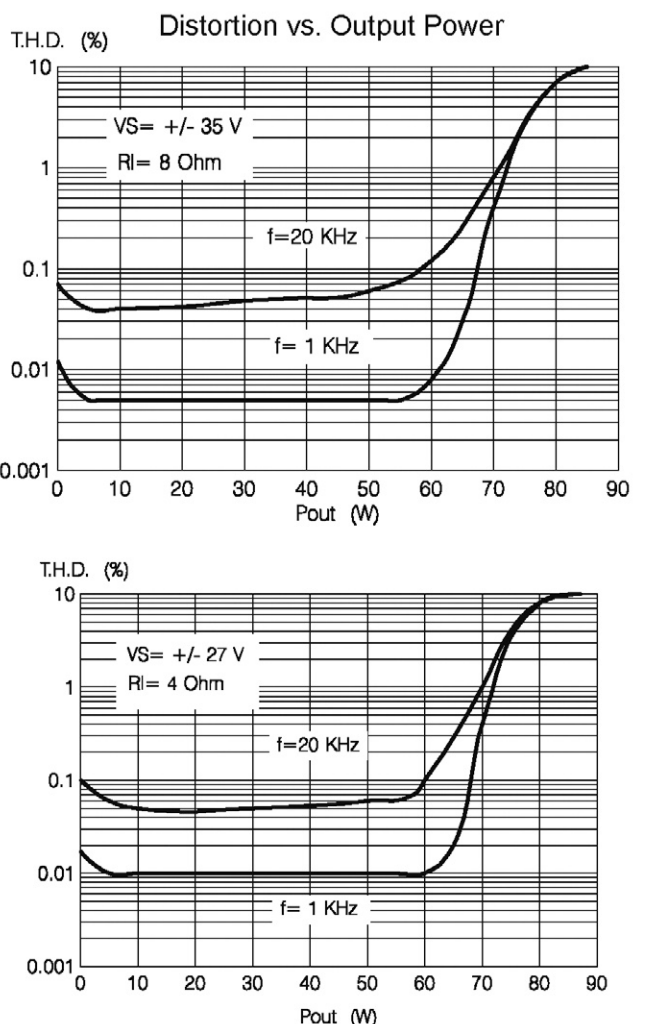
Rys. 15.

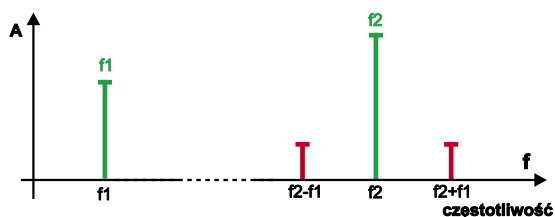
widmowej widać wyraźnie prążek częstotliwości podstawowej, natomiast poziom harmonicznych jest bardzo niski – nie większy niż poziom szumów.

Dziś mając tego rodzaju sprzęt pomiarowy, można precyzyjnie określać zawartość poszczególnych składników występujących na wyjściu urządzenia, np. wzmacniacza. Można mianowicie podawać zawartość poszczególnych harmonicznych, ściślej różnicę między składową podstawową, a danym prążkiem. Pozwala to określić zależność między harmonicznymi parzystymi a nieparzystymi, co daje informację o rodzaju nieliniowości urządzenia i ma wpływ na ocenę jakości dźwięku (przyjmuje się często, iż parzyste harmoniczne są „niegroźne”). Warto nadmienić, że wyniki takich szczegółowych pomiarów zazwyczaj są podawane w decybelach, choć można je łatwo przeliczyć na procenty, na przykład odstęp –40 dB oznacza zniekształcenia 1%.

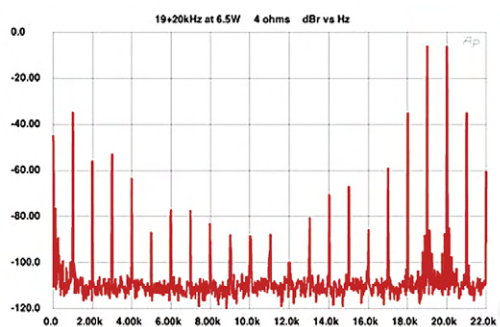
Dawniej tego rodzaju analizatory widma m.cz. były bardzo kosztowne i trzeba było zadowolić się prostszymi metodami pomiarowymi. Sukcesem było jednoczesne zmierzenie wszystkich zniekształceń, czyli całkowitej zawartości harmonicznych – **Total Harmonic Distortion**, w skrócie **THD**.

Stosowana powszechnie od wielu lat nieskomplikowana metoda pomiaru zniekształceń, a właściwie zawartości harmonicznych, polega na tym, że na wejście badanego urządzenia audio podaje się „bardzo czysty” sygnał sinusoidalny, natomiast sygnał z wyjścia jest dodatkowo kierowany na filtr zaporowy, który usuwa składową podstawową. Wszystkie pozostałe składniki są przepuszczane i mierzone. Ideę ilustruje w uproszczeniu rys. 14. Mierniki takie pozwalały zmierzyć stosunek poziomu częstotliwości podstawowej (która przy niedużych zniekształceniach jest niemal identyczna z poziomem badanego sygnału) i poziomu składowych harmonicznych, a wynik podawały od razu w procentach.





Rys. 16.



Rys. 17.

Co bardzo ważne, w przypadku takiej zasady działania, mierzone zakłócenia, oprócz harmonicznych częstotliwości podstawowej, zawierały też wszystkie inne „śmieci”, w tym szumy, a także przydźwięk sieci. Dlatego tak uzyskane wyniki oznacza się skrótem THD+N, gdyż oprócz sumarycznych zniekształceń harmonicznym mierzy się też zakłócenia i szumy (Noise). Można też mierzyć THD, stosując oprócz filtra zaporowego dodatkowe filtry, które przepuszczają tylko harmoniczne, a zatrzymują inne „śmieci”, w szczególności brum sieciowy.

Zazwyczaj jednak pomiary przeprowadza się przy znacznej mocy wyjściowej, i wtedy wartości THD+N i THD są praktycznie takie same. Tylko przy małych sygnałach wartości THD+N są znacząco większe od THD z uwagi na niewielki stosunek sygnał/szum. Wskazuje na to też zależność poziomu zniekształceń od mocy sygnału. Na rys. 15 pokazane są stosowne zależności dla popularnego scalonego wzmacniacza TDA7294.

Zagadnienia związane ze zniekształceniami nieliniowymi i współczynnikiem THD, są w sumie łatwe do zrozumienia. Okazuje się jednak, że opisane właśnie pomiary są w istocie sztuczne i nie odzwierciedlają wszystkich niedoskonałości, ponieważ w warunkach normalnej pracy wzmacniacze przetwarzają nie pojedyncze sygnały sinusoidalne, tylko złożone przebiegi, zawierające dynamicznie zmieniające się składowe o rozmaitych częstotliwościach. Wtedy na wyjściu, oprócz harmonicznych, pojawiają się dodatkowe „obce” składowe o częstotliwościach jeszcze innych niż harmoniczne przebiegów przetwarzanych.

IMD

Nieliniowa charakterystyka przejściowa powoduje, że wzmacniacz audio wykonuje na sygnale wejściowym skomplikowaną operację matematyczną. Można by było stworzyć matematyczny model nieliniowej charakterystyki przejściowej, a także opisać matematycznie przetwarzany

sygnał muzyczny. Wtedy można byłoby matematycznie obliczyć wszystkie niepożądane składniki pojawiające się na wyjściu. Niestety, byłoby to bardzo trudne zadanie, nawet przy dzisiejszym stanie techniki i komputeryzacji. Nadal stosowane są prostsze sposoby określania i pomiaru takich zniekształceń.

W tym celu można przyjąć, że niedoskonały wzmacniacz zachowuje się jak kiepskiej jakości... radiowy modulator AM. Otóż istotą klasycznej modulacji AM jest to, że po procesie mieszania sygnału częstotliwości nośnej f_2 z częstotliwością modulującą f_1 , na wyjściu pojawiają się dodatkowe składniki o częstotliwościach f_2-f_1 oraz f_2+f_1 , co jest przedstawione na rys. 16. Wszyscy radiowcy wiedzą, że rolę modulatorów AM mogą pełnić elementy o silnie nieliniowej charakterystyce, i że oprócz składowych f_2-f_1 oraz f_2+f_1 , na wyjściu pojawiają się też inne składniki, będące kombinacją nie tylko przebiegów wejściowych, ale też ich harmonicznych. Wszystko dlatego, że cały proces mieszania-modulacji polega na przeprowadzaniu matematycznych operacji, między innymi mnożenia przebiegów.

Dla wielu Czytelników dużym zaskoczeniem może być stwierdzenie, że każdy wzmacniacz audio jest też... modulatorem AM. Po podaniu na jego wejście sygnałów o różnych częstotliwościach, na wyjściu pojawiają się liczne nowe sygnały, które są produktami modulacji wzajemnej, czyli intermodulacji. Nic dziwnego, że zniekształcenia takie nazywa się **intermodulacyjnymi** i oznacza albo skrótem **IMD** (*InterModulation Distortion*) albo **IM**.

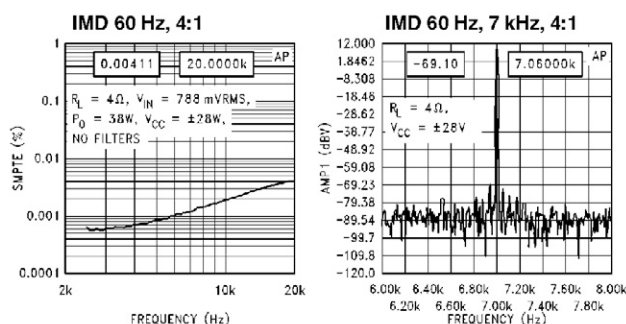
I znów problem w tym, że rzeczywiste sygnały muzyczne są bardzo złożone, a pomiary omawianej niedoskonałości wzmacniacza należałoby przeprowadzać w możliwie prosty sposób. I tak jest: zniekształcenia intermodulacyjne mierzy się z użyciem tylko dwóch sygnałów o różnych częstotliwościach f_1 , f_2 . Na wyjściu pojawiają się liczne składniki o częstotliwościach $kf_1 \pm nf_2$, gdzie n , k to liczby naturalne.

Istnieje kilka norm pomiaru IMD, w tym SMPTE (RP-120), DIN45403 oraz ITU-R (CCIR), ISO. W niektórych wykorzystywany jest silny sygnał o małej częstotliwości wraz z czterokrotnie mniejszym sygnałem wyższej częstotliwości. Mogą to być częstotliwości 60 Hz i 7 kHz albo 250 Hz i 8 kHz. W tym drugim przypadku obok sygnału 8 kHz pojawiają się dodatkowe niewielkie składniki o częstotliwościach $8\text{ kHz} \pm n \cdot 250\text{ Hz}$, a także niewielkie składniki w okolicach 16 kHz. Przy pomiarach według innych norm, wykorzystywane są dwa sygnały o jednakowej amplitudzie i dość wysokich częstotliwościach rzędu kilkunastu kiloherców, różniące się o 1 kHz, np. 13 kHz+14 kHz albo 19 kHz+20 kHz. Wtedy produktem intermodulacji będzie przede wszystkim niewielki ton o częstotliwości 1 kHz i ewentualnie mniejsze o częstotliwościach 2 kHz, 3 kHz, itd. W specyfikacjach często podawany jest sposób pomiaru IMD, na przykład: **IMD (SMPTE 19 kHz, 20 kHz 1:1) [dBV]**.

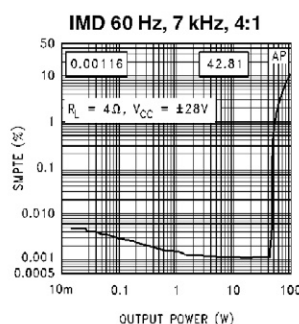
Rys. 17 pokazuje tak zmierzone, duże zniekształcenia IMD pewnego wzmacniacza lampowego, z kolei na rys. 18 pokazane są wyniki pomiarów IMD popularnego wzmacniacza scalonego LM3886.

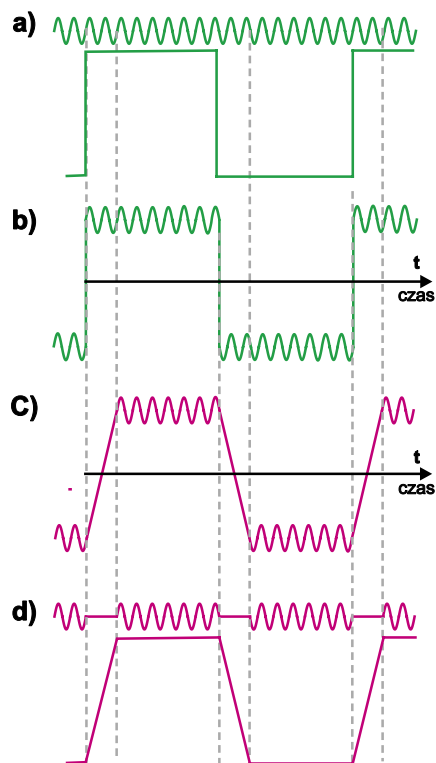
Żebyśmy nie zgubili głównego wątku i zachowali prawidłowy obraz sytuacji przypominam: zarówno całkowite zniekształcenia nieliniowe (THD, THD+N), jak też zniekształcenia intermodulacyjne wynikają z tej samej przyczyny – nieliniowości charakterystyki przejściowej, a ta wynika

z nieliniowości elementów użytych do budowy sprzętu, tranzystorów i lamp. We współczesnych dobrych wzmacniaczach poziom zniekształceń IMD jest porównywalny z poziomem zniekształceń THD. Nie zdarza się więc, że w danym wzmacniaczu np. zniekształcenia THD są bardzo małe, a IMD – bardzo duże. Ani na odwrót. Na rys. 19 podajemy przykład dotyczący kostki LM3886 z rys. 18. I nic w tym dziwnego, ponie-

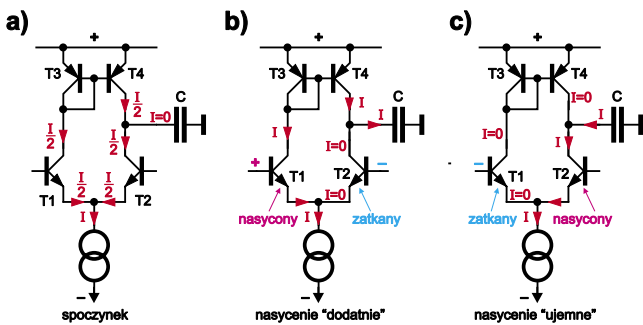


Rys. 18.





Rys. 19.



Rys. 20.

waż oba rodzaje zniekształceń wynikają w sumie z tej samej przyczyny – niedoskonałej liniowości charakterystyki przejściowej. Wspomniane w poprzednich odcinkach zniekształcenia TIM mają natomiast zupełnie inną przyczynę.

TIM

Kilka lat po wprowadzeniu na rynek pierwszych wzmacniaczy tranzystorowych, czyli w latach 60. i na początku 70., rozpoczęły się żywe dyskusje, ponieważ okazało się, że mierzone „klasycznymi” metodami parametry wzmacniaczy tranzystorowych były nawet lepsze, a przynajmniej nie gorsze od lampowych, natomiast dźwięk okazywał się gorszy.

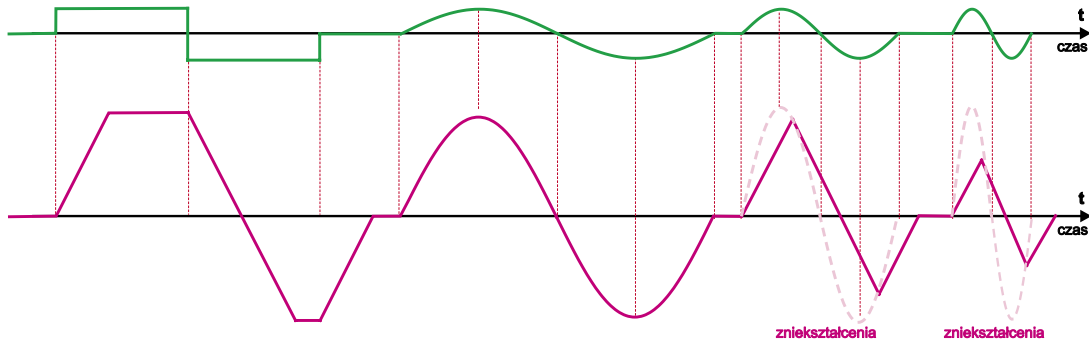
Dyskusje wśród mniej czy bardziej wyedukowanych miłośników audio spowodowały powstanie licznych mitów, dotyczących „dźwięku lampowego” i wpływu silnego globalnego sprzężenia zwrotnego. Mity te do dziś pokutują. W roku 1972 Matti Otała z Finlandii określił i przedstawił przyczynę problemu. Dopiero od tego czasu zaczęto mówić o **zniekształceniach TIM – Transient Intermodulation Distortion**. U nas nazywa się je zniekształceniami transjentowymi, przejściowymi, szybkościowymi, ewentualnie impulsowymi.

Problem polegał na tym, że wcześniej wszystkie „klasyczne” pomiary były przeprowadzane przy użyciu sygnałów sinusoidalnych, natomiast rzeczywiste sygnały muzyczne mają charakter impulsowy, a niewielkie składowe o większych częstotliwościach często bywają nałożone na przebiegi impulsowe o stromych zboczach. Przyczyną gorszego dźwięku w pierwszych, niedoskonałych, niezbyt szybkich wzmacniaczach tranzystorowych z silnym globalnym sprzężeniem zwrotnym było to, że ich stopnie pośrednie i wyjściowe nie były w stanie prawidłowo przenieść jednocześnie i zboczy impulsów i nałożonych na nie słabszych składowych.

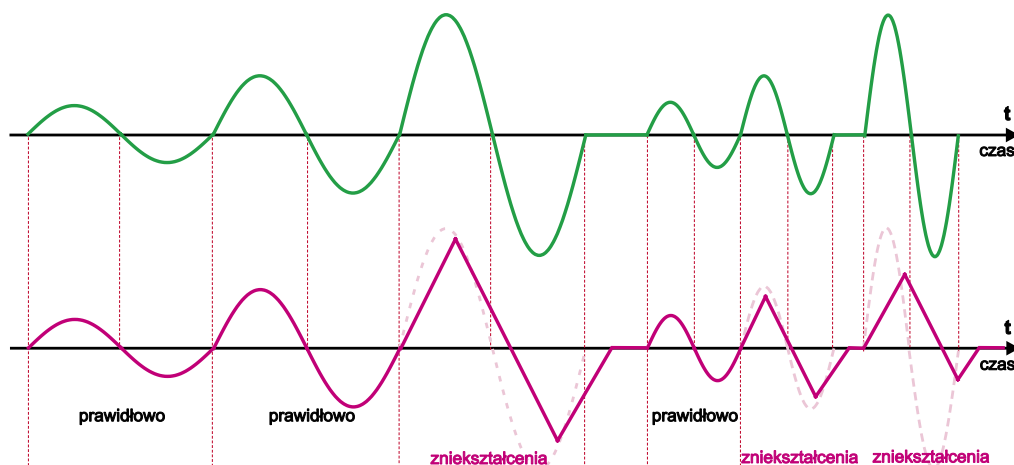
Jest to zilustrowane w uproszczeniu na rys. 19. Zwyczajnie zsumowanie sygnału prostokątnego z niewielkim sygnałem sinusoidalnym daje przebieg pokazany na rys. 19b. Niestety, w realnych wzmacniaczach na wyjściu pojawi się przebieg jak na rys. 19c, który jest złożeniem przebiegów pokazanych na rys. 19d. Mówiąc obrazowo, wzmacniacz męczył się, by w miarę prawidłowo przenieść impuls prostokątny, ale w czasie narastania i opadania zbocza tego impulsu „zapominał” o innych subtelniejszych składnikach.

Ogólnie biorąc, zniekształcenia TIM wynikają z małej szybkości poszczególnych stopni wzmocnienia. Aby zrozumieć przyczynę powstawania zniekształceń TIM, należy omówić pokrewny parametr, a mianowicie...

SR – Slew Rate, czyli **maksymalna szybkość zmian napięcia wyjściowego**, wyrażany w woltach na mikrosekundę (V/μs). Zniekształcenia TIM są nierozłącznie związane z maksymalną szybkością zmian napięcia na wyjściu. Najogólniej biorąc, w torach sygnałowych wzmacniaczy występują rozmaite pojemności. Podczas pracy wzmacniacza występują tam przebiegi zmienne, więc wspomniane pojemności trzeba na przemian ładować i rozładowywać. Problem, na przykładzie typowego wzmacniacza różnicowego (T1, T2) z lustrem prądowym (T3, T4), jest przedstawiony na rys. 20, gdzie pokazana jest sytuacja spoczynkowa i dwie skrajne. Pojemność C przedstawia różne szkodliwe pojemności obciążające wyjście. W przypadku z rys. 20a napięcie na kondensatorze nie zmienia się, bo nie płynie prąd. W obu skrajnych przypadkach jeden z tranzystorów T1, T2 jest nasycony, drugi zatkany. W sytuacji z rys. 20b napięcie na bazie T1 jest dużo wyższe niż na T2, więc T1 jest nasycony. Lustro prądowe „odwraca” płynący przez T1 prąd I, który ostatecznie ładuje kondensator C. W sytuacji z rys. 20c nasycony jest T2, a T1, T3, T4 są zatkane. Kondensator C jest rozładowywany prądem I. Ten maksymalny prąd ładowania/rozładowania jest wyznaczony przez źródło prądowe umieszczone w obwodzie emiterowym T1, T2, a zmiany napięcia w czasie są zgodne ze znaną zależnością $C \cdot \Delta U = I \cdot t$. Nietrudno policzyć, że napięcie na pojemności 1 nF, ładowanej/rozładowywanej prądem 1 mA będzie zmieniać się z prędkością 1 V/μs. Jeśliby do tego stopnia był dołączony stopień (wtórnik) wyjściowy, zmiany napięcia wyjściowego nie mogłyby być szybsze.



Rys. 21.



Rys. 22.

Problem małej wartości SR dla wzmacniacza o wzmocnieniu 4x (12 dB) jest zilustrowany na rys. 21. Szybkość narastania napięcia na wyjściu każdego wzmacniacza jest więc ograniczona, ale nie znaczy to automatycznie, że pasmo przenoszenia jest ograniczone. Przy mniejszych amplitudach sygnałów pasmo może być pełne i sięgać nawet ponad 20 kHz. Problem pojawi się przy większych sygnałach, co dla wzmacniacza o wzmocnieniu 1 (0 dB) ilustruje rys. 22.

Spróbujmy teraz wyjaśnić problem z rys. 19. Załóżmy, że powolny wzmacniacz z wejściem jak na rys. 20, o dużym wzmocnieniu „własnym”, rzędu tysięcy, zostaje objęty pętlą sprzężenia zwrotnego, według rys. 23a. Uzyskujemy wzmacniacz o wzmocnieniu 4 (12 dB). Podczas jego normalnej pracy napięcie sprzężenia zwrotnego w punkcie B będzie nadążać za napięciem wejściowym w punkcie A i będzie równe napięciu wejściowemu. Ale tylko w normalnych warunkach pracy – jeżeli bowiem na wejście zostanie podany duży impuls prostokątny, to po podaniu impulsu, napięcie na wyjściu tego powolnego wzmacniacza zacznie zmieniać się stopniowo, w czasie $t_0 \dots t_1$, jak pokazuje rys. 23b. Dopiero w chwili t_1 napięcie sprzężenia zwrotnego w punkcie B zrówna się z napięciem wejściowym w punkcie A i wtedy napięcie na wyjściu przestanie rosnąć. W czasie $t_0 \dots t_1$ napięcie w punkcie B będzie znacznie mniejsze od napięcia wejściowego, a występujące między punktami A, B duże wejściowe napięcie różnicowe nasyci wewnętrzne tranzystory, albo według rys. 20b, albo 20c. W każdym razie stopień wejściowy z rys. 20 w czasie $t_0 \dots t_1$ zostanie nasycony i wtedy nie będzie reagował na ewentualne zmiany napięcia wejściowego, jak pokazuje wcześniejszy rys. 19. Podobnie w czasie $t_2 \dots t_3$ oraz $t_4 \dots t_5$. W praktyce przebiegi wejściowe nie są prostokątne, ale opisywane zjawisko powoduje utratę delikatnych składników, występujących na stromych zboczach impulsów. I to są właśnie zniekształcenia TIM, jak widać, ściśle związane z obecnością silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego i małą szybkością zmian napięcia wyjściowego.

Z podanego właśnie opisu zdaje się wynikać, że zniekształcenia TIM wystąpią w każdym wzmacniaczu i że winne jest ujemne sprzężenie zwrotne. Nie jest wcale tak źle. Po pierwsze przebiegi impulsowe w rzeczywistych sygnałach audio nie są prostokątne, tylko mają jakiś niezerowy czas narastania i ograniczoną stromość. Jeśli więc wzmacniacz będzie odpowiednio szybki (duża wartość SR), opisane zjawisko nie wystąpi, ponieważ napięcie wyjściowe i napięcie w punkcie B zawsze będzie nadążać za napięciem wejściowym. Ponadto w praktyce wzmacniacze rzadko pracują z pełną mocą, a przy małej głośności, czyli przy niewielkich sygnałach, zniekształcenia TIM nie pojawiają się nawet w powolnym wzmacniaczu, jak wskazują rys. 21 i 22.

Lekarstwem na TIM jest więc odpowiednio duża szybkość wzmacniacza. Jednak kwestia wymaganej minimalnej szybkości narastania jest dość złożona. Generalnie można przyjąć, że dla domowych wzmacniaczy o mocach do 100 W, wystarczająca jest prędkość narastania SR równa 5 V/ μ s. Wiele współczesnych wzmacniaczy ma dużo większą szybkość, znacznie ponad 10 V/ μ s. W takich wzmacniaczach nie trzeba się bać zniekształceń

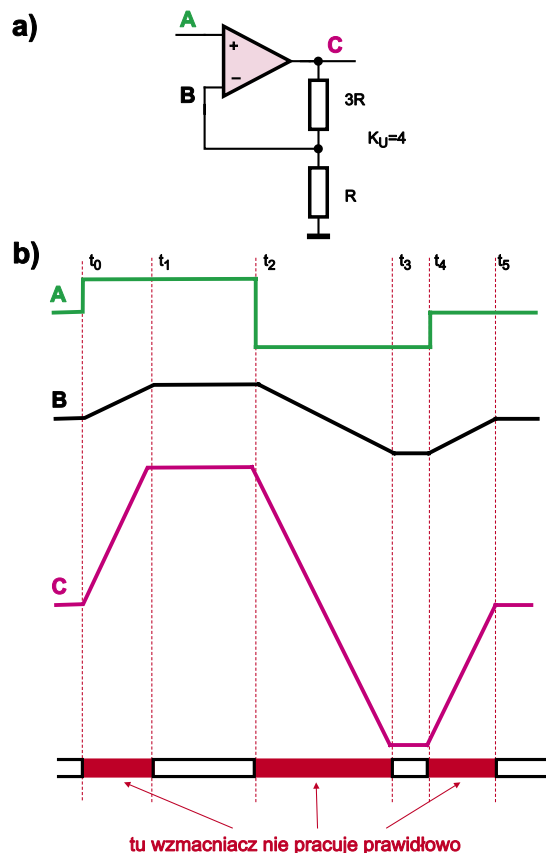
TIM. Należy też podkreślić, że problem zniekształceń TIM dotyczy jedynie wzmacniaczy mocy. Zupełnie nie występuje w odtwarzaczach, przedwzmacniaczach, ponieważ występują tam niewielkie sygnały, a stopnie wzmacniające są odpowiednio szybkie.

Zniekształcenia fazowe

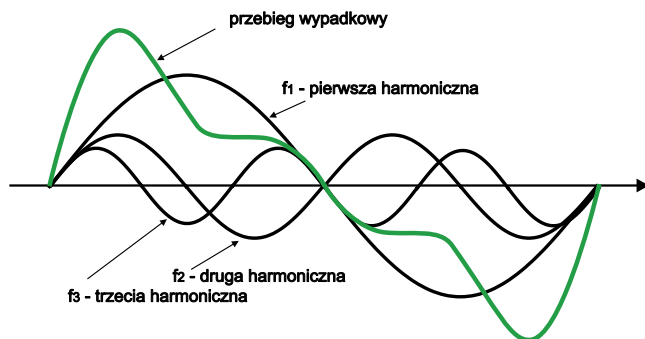
Kolejny słabo rozumiany parametr to **zniekształcenia fazowe**, które należałoby zaliczyć do zniekształceń liniowych. Uprozczone rozumowanie jest następujące. W układach elektronicznych występują liczne pojemności. Pojemność

ma zdolność magazynowania energii (podobnie też indukcyjność), a jeśli energia jest gromadzona i oddawana, to słusznie można mówić o opóźnieniu, czyli przesunięciu w czasie. W elektronice często analizujemy zachowanie przy sygnałach sinusoidalnych i wtedy zamiast o opóźnieniu wyrażanym w jednostkach czasu, mówimy o przesunięciu fazy. Przesunięcie fazy zwykle wiąże się więc z opóźnieniem. Nie wchodząc w szczegóły można powiedzieć, że pojemności, a właściwie obwody RC, powodują w układach przesunięcia fazowe, czyli opóźnienia. Co ważne, **przesunięcia fazowe, czyli opóźnienia są różne dla różnych częstotliwości**. Jeśli potem takie urządzenie przenosi sygnał audio, składowe o różnych częstotliwościach zostają w niejednakowym stopniu przesunięte, czyli opóźnione. W literaturze można znaleźć przykłady ilustrujące problem następująco: *wyobraźmy sobie system audio, w którym basy docierają do słuchacza szybko, a wysokie częstotliwości są opóźnione, na przykład o pięć sekund...*

I już włosy na głowie zaczynają się jeżyć w oczekiwaniu katastrofy. Katastrofy ewidentnie wynikającej z opóźnień, czyli przesunięć fazowych.



Rys. 23.



Rys. 24.

Niestety, przedstawiony przykład jest nie tylko przejaskrawiony, ale wręcz wprowadza w błąd. Tego rodzaju przykłady, czasem podawane zresztą w zupełnie innym, prawidłowym kontekście, powodują u osób początkujących powstawanie i pogłębianie fałszywych wyobrażeń, a nawet brzemiennych w skutki mitów.

Owszem, pojemności istotnie powodują przesunięcia fazy i opóźnienia, jednak problemy, o ile występują, to zwykle nie tam, gdzie spodziewają się ich niedouczeni pseudoaudiofile. Na początek warto byłoby wrócić do właściwości słuchu ludzkiego. W sumie są to bardzo złożone zagadnienia i pomijając kwestie „rozrzu tu parametrów” pomiędzy poszczególnymi osobami, nadal nie znamy wszystkich szczegółów dotyczących percepcji dźwięków. Niemniej znanym faktem jest, że wspaniałe właściwości słuchu ludzkiego, w tym możliwość lokalizacji źródeł dźwięku, w dużej części związane są właśnie z przesunięciami fazy, czyli opóźnieniem sygnałów docierających do obu uszu. I chodzi o niewielkie opóźnienia, rzędu milisekundy lub mniej. O ile jednak kwestia niewielkich opóźnień ma duże znaczenie przy lokalizacji naturalnych źródeł dźwięku za pomocą obu uszu, o tyle niewielkie opóźnienia składowych o poszczególnych częstotliwościach, docierających do każdego ucha, generalnie mają bardzo mały, lub żaden wpływ na subiektywnie odczuwaną jakość dźwięku i wierność. Przeprowadzone zostały rozmaite badania w tym zakresie. Wcześniejsze eksperymenty z jednym źródłem dźwięku nasuwały wniosek, że niewielkie opóźnienia poszczególnych częstotliwości nie mają żadnego wpływu na jakość dźwięku. Późniejsze badania przy rozmaitych specyficznych sygnałach wskazały, że tylko nieliczni mają słuch pozwalający na zauważenie zniekształceń fazowych związanych z pojedynczym źródłem dźwięku. Wiemy już, że każdy okresowy przebieg o częstotliwości f w istocie jest złożeniem harmonicznych. I tak każdy przebieg niesinusoidalny jest złożeniem odpowiednio dobranych harmonicznych (rys. 24). Na przykład, jeśli zostaną odpowiednio dobrane amplitudy i fazy nieparzystych harmonicznych, to otrzymamy sygnał prostokątny. Jeśli jednak fazy poszczególnych składników będą nieodpowiednie, to złożony z nich przebieg wypadkowy nie będzie już prostokątny. I właśnie takie odkształcenie przebiegu nastąpi po przejściu sygnału prostokątnego przez urządzenie, które wniesie duże zniekształcenia fazowe. Fakt, że zniekształcenia fazowe, czyli zmiana fazy poszczególnych harmonicznych, ma wpływ na kształt przebiegu zilustrowany jest na rys. 25. W dalsze szczegóły nie będziemy się wgłębiać, bo musielibyśmy też zagłębić się w sprawę tak zwanego opóźnienia grupowego (*group delay*) i inne złożone kwestie.

Wydawać by się mogło, że zmiana kształtu przebiegu, związana z niejednakowym opóźnieniem harmonicznych, spowoduje radykalną zmianę barwy, ewentualnie innych właściwości dźwięku! Nic z tych rzeczy! Okazuje się, że praktycznie wszyscy słuchacze stwierdzają, że przebiegi o tak różnym kształcie, ale zawierające te same harmoniczne, tylko o różnych fazach, dają identyczny dźwięk!

Tylko na pozór przeczy to logice. Nieprzypadkowo mówi się, że ucho można traktować podobnie jak wielokanałowy analizator widma z prostownikami jednopółprzewodnikowymi. Taki wniosek wynika między innymi z budowy i zasady działania zmysłu słuchu (zwłaszcza roli i działania ślimaka). Poszczególne „kanały” naszego „analizatora” stwierdzają tylko, czy w dźwięku występują składowe o danej częstotliwości. A jeśli ucho

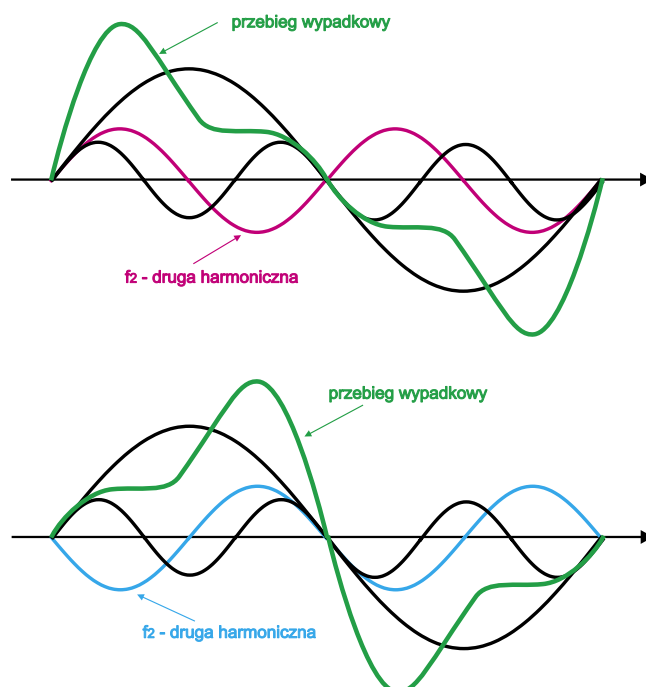
istotnie przypomina analizator widma z wieloma filtrami nastrojonymi na wąskie pasma częstotliwości, to nic dziwnego, że niewielkie w sumie przesunięcia fazowe (opóźnienia) nie mają zauważalnego wpływu na pracę poszczególnych „kanałów”.

Wprawdzie dokładniejsze badania wykazują, że niektórzy są w stanie zauważyć zniekształcenia fazowe, wynikające właśnie z niewielkich opóźnień poszczególnych składników, jednak są to bardzo subtelne różnice, nie mające żadnego wpływu na wierność przekazu dźwiękowego. **Można stanowczo stwierdzić, że słuch ludzki jest bardzo mało czuły na zniekształcenia fazowe.** Chodzi jednak o „czyste” zniekształcenia fazowe, a nie o ich skutki w systemach wielogłosnikowych.

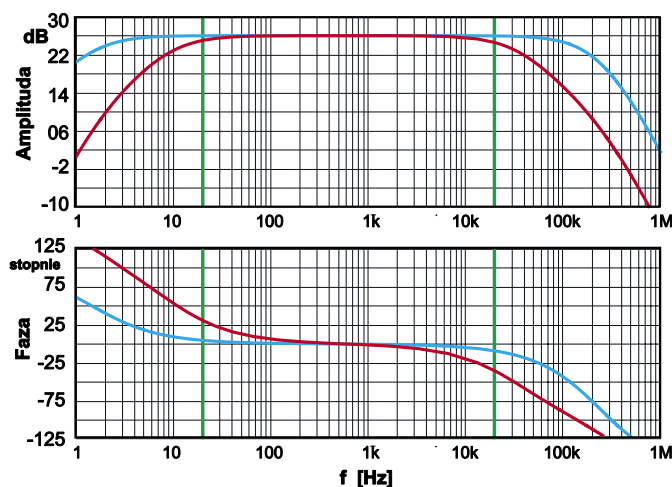
Trzeba tu wyraźnie rozdzielić dwa różne zagadnienia, które niestety często „wrzucane są do jednego worka”. Jedno, to omówione właśnie „czyste”, „zwykłe” zniekształcenia charakterystyki fazowej w funkcji częstotliwości. Drugie, to różnorodne „zjawiska fazowe” w systemach wielodrożnych, owocujące poważnymi konsekwencjami.

Pierwsze zagadnienie związane jest nierozdzielnie z obecnością obwodów RC w torze sygnału. Temat jest dość szeroki i nie będziemy wchodzić w szczegóły. Trzeba natomiast przypomnieć, że pojedynczy obwód RC może przesunąć fazę co najwyżej o 90 stopni, czyli $\pi/2$ radianów. Wprawdzie we wzmacniaczach, przedwzmacniaczach czy korektorach występuje wiele pojemności i obwodów RC, jednak można przyjąć w uproszczeniu, że „pojedyncze urządzenie”, takie jak wzmacniacz czy korektor może przesunąć fazę co najwyżej o pół okresu, czyli 180 stopni, a w praktyce znacznie mniej. Osoby niezorientowane boją się na przykład, że wzmacniacz mocy wprowadzi duże przesunięcia fazowe. Tymczasem wzmacniacze mocy są układami z ujemnym sprzężeniem zwrotnym i choćby dlatego w paśmie przenoszenia przesunięcie fazy na pewno nie będzie tam wynosić 180 stopni, ponieważ wzmacniacz stałby się wtedy generatorem. Owszem, w torze sygnałowym wzmacniacza występują liczne pojemności, które powodują przesunięcie fazy i opóźnienie. Ogólnie biorąc, czym większa częstotliwość, tym większe przesunięcie fazy. Dla bardzo wysokich częstotliwości to przesunięcie fazy może być i jest o wiele większe od 180 stopni, niemniej jednocześnie pojemności te powodują zmniejszanie wzmocnienia. W efekcie przy częstotliwościach, przy których przesunięcie jest większe od 180 stopni, wzmacniacz nie jest już wzmacniaczem, tylko „osłabiaczem” – tłumikiem.

Zagadnienie jest dość skomplikowane, niemniej omawiając zniekształcenia fazowe możemy je znacznie uprościć. Otóż zwykle za granicę pasma



Rys. 25.



Rys. 26.

przenoszenia przyjmujemy częstotliwość, przy której wzmocnienie spada o 3 dB poniżej nominalnego – i w uproszczeniu można przyjąć, że dla tej górnej częstotliwości przesunięcie fazy wynosi 45 stopni – jedną ósmą okresu. Rys. 26 pokazuje charakterystyki amplitudowe i fazowe dwóch klasycznych wzmacniaczy audio.

Warto też pamiętać, że częstotliwość 20 kHz to okres 50 μ s, więc przesunięcie o jedną ósmą okresu, to opóźnienie o nieco ponad 6 μ s.

Dzisiaj bez większych problemów można wykonać wzmacniacz o częstotliwości granicznej dużo wyższej od 20 kHz. Przykładowo, jeśli częstotliwość graniczna wynosi 100 kHz, to dla tej częstotliwości przesunięcie wyniesie 45°, co oznacza znikome opóźnienie tylko 1,25 μ s (10 μ s/8), natomiast dla całego zakresu pasma akustycznego przesunięcie fazy jest bardzo małe, bliskie zeru, jak pokazują niebieskie krzywe na rys. 26. Także związane z tym znikome opóźnienie wyższych harmonicznych, rzędu jednej mikrosekundy, na pewno można spokojnie pominąć.

Przedstawione uproszczone rozważania pokazują, że nie trzeba bać się zniekształceń fazowych we współczesnych wzmacniaczach. Są one po pierwsze znikome, a po drugie „czyste” zniekształcenia fazowe, czyli wzajemne niewielkie opóźnienia poszczególnych składników widma nie pogarszają jakości dźwięku.

Niemniej problem fazy i fazowania, a także przesunięć fazy istnieje, i bywa poważny, ale nie dotyczy wzmacniaczy i korektorów barwy, tylko głośników i kolumn. Zajmiemy się tym za chwilę. Najpierw omówimy podstawowe parametry głośników i kolumn.

Parametry głośników i kolumn

W przypadku fabrycznych kolumn najważniejsze parametry podawane przez producenta to:

- pasmo przenoszenia,
- moc,
- efektywność.

Już tu istnieje ogromne pole do niepewności i nadużyć. Weźmy choćby **pasmo przenoszenia**. Dla wzmacniaczy i innej „elektroniki” podaje się szerokość pasma przy nierównomierności charakterystyki amplitudowej ± 3 dB, a coraz częściej ± 1 dB, a nawet $\pm 0,5$ dB. W przypadku głośników często przyjmuje się tolerancję ± 6 dB. Aby jednak „poprawić” parametry, wystarczy podać dużo szersze pasmo zmierzone przy nierównomierności ± 10 dB, ± 15 dB czy nawet ± 20 dB. Niezorientowany klient zostanie po prostu oszukany.

Z podawaniem **mocy** głośników i kolumn bywa jeszcze gorzej. Istnieje kilka bardziej lub mniej liberalnych norm. Na przykład wg DIN45573 sygnał jest przez minutę włączony, przez dwie wyłączony. Czyli głośnik pracuje z przerwami. Maksymalna moc, nie powodująca jego uszkodzenia, wyznaczona w ten sposób będzie dużo wyższa, niż wyznaczona zgodnie z surowszą normą IEC...268-5, określającą czas nieprzerwanego testu równy 100 godzin. Co gorsze, dla wielu niemarkowych głośników podaje

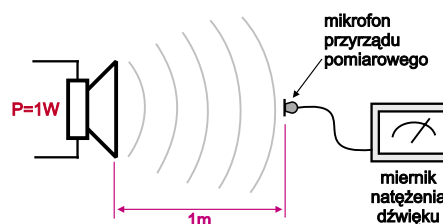
się **dużą** moc wyjściową, dosłownie „wziętą z sufitu”, nie mającą oparcia w żadnych normach.

Z kolei **efektywność** często okazuje się zupełnie lekceważonym parametrem. Tymczasem przy doprowadzeniu do różnych głośników tego samego sygnału, wytworzą one dźwięk o znacznie różniące się głośności. I właśnie efektywność, nazywana też niezbyt poprawnie **skutecznością** i **sprawnością** wskazuje, jak efektywnie głośnik/kolumna zamienia moc elektryczną na dźwięk. Efektywność to wyrażony w decybelach poziom natężenia dźwięku w odległości 1 m od głośnika, przy zasilaniu głośnika mocą 1 W (rys. 27). Jednak czasem poziom mierzy się przy zasilaniu napięciem o wartości skutecznej 2,83 V, co tylko przy oporności 8 Ω daje moc 1 W, natomiast w przypadku głośników 4 Ω wartość efektywności jest zawyżona o 3 dB. Efektywność jest o tyle ważna, że to właśnie ona, bardziej niż moc, decyduje o maksymalnej głośności dźwięku.

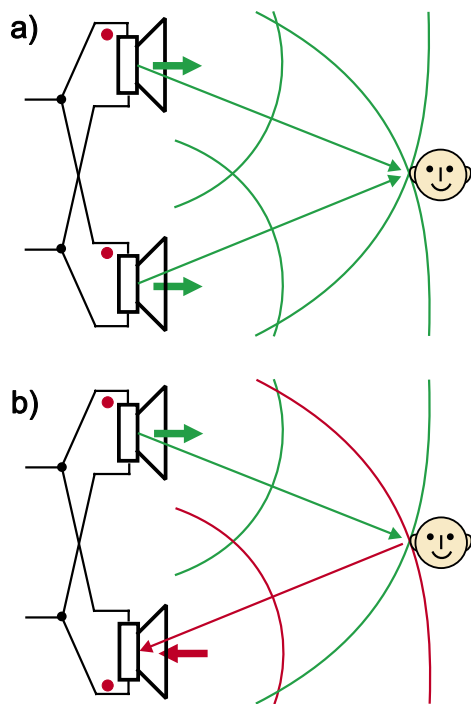
Nie będziemy wchodzić w szczegóły, ponieważ głównym tematem artykułu jest problem wierności i jakości, a w tym aspekcie omówione trzy podstawowe parametry mają nieduże znaczenie. Warto natomiast wspomnieć o podawanych w katalogach licznych „tajemniczych” parametrach głośników, takich jak V_{AS} – **objętość ekwiwalentna** wyrażana w litrach, F_s – **częstotliwość rezonansowa** w Hz i Q_{ts} – (bezwymiarowa) **dobroć całkowita**. Te parametry głośników, zwane **parametrami Thiele-Smalla**, są absolutnie niezbędne przy projektowaniu kolumn. Przy bardziej zaawansowanym projektowaniu kolumn wykorzystywane są też inne parametry: Q_{ms} – **dobroć mechaniczna**, Q_{es} – **dobroć elektryczna**, S_d – **powierzchnia membrany** w cm^2 , B – **indukcja magnetyczna w szczeliny**, L – **indukcyjność cewki**, X_{max} – **maksymalne wychylenie membrany** czy M_{ms} – **masa układu drgającego**. Parametry te przede wszystkim pozwalają określić charakterystykę w zakresie niskich częstotliwości, zależnie od zastosowanej obudowy, np. **zamkniętej (compact)**, **z otworem (bass reflex)**, czy innej. Pozwalają też wnioskować o jakości przenoszenia przebiegów impulsowych przez kolumnę. Jednak w sumie to także są „proste”, „elementarne” parametry i niewiele mówią o wierności i jakości dźwięku, ponieważ w grę wchodzi mnóstwo innych skomplikowanych czynników. Nieprzypadkowo producenci głośników stosują różne rozwiązania i materiały. Wszystkich tych czynników nie sposób omówić. Niektóre należałoby zaliczyć do czynników czysto subiektywnych, jednak inne są jak najbardziej obiektywne i pomimo skomplikowania, poddają się matematycznemu opisowi, jak choćby wspomniane wcześniej „problemy fazowe” w głośnikach i kolumnach, którymi się teraz zajmujemy. Ponieważ zagadnienie to jest słabo rozumiane, musimy omówić je dokładniej.

Fazowanie głośników

Zanim przejdziemy do szczegółów, najpierw przypomnijmy o czymś tak oczywistym jak fazowanie głośników. Każdy głośnik ma jeden zacisk wyróżniony – zazwyczaj kropką czerwonej farby. Tylko zupełnie początkujący dziwnia się temu – głośnik pracuje przecież przy przebiegach zmiennych. Otóż jeśli głośnik nie ma towarzystwa i pracuje samodzielnie, nie ma żadnego problemu. Nie ma żadnej różnicy, jak go podłączymy do wyjścia wzmacniacza. Jeśli jednak dwa lub więcej głośników ma być połączonych równolegle bądź szeregowo, sprawa fazowania nabiera znaczenia. I właściwie nie o samą fazę tu chodzi, tylko o pewne ważne konsekwencje. Mówiąc w skrócie, jeśli dwa głośniki zostaną połączone równolegle i w fazie, jak na rys. 28a, to ich membrany będą pracować zgodnie, jak pokazują grube zielone strzałki i efekt ich działania będzie się dodawać. Jeżeli natomiast zostaną połączone „odwrotnie”, według rys. 28b, to gdy



Rys. 27.



Rys. 28.

membrana jednego głośnika będzie się poruszać w przód, wtedy membrana drugiego będzie się poruszać w tył – nietrudno się domyślić, że będą wzajemnie znosić, a przynajmniej osłabiać swe działanie. Na pierwszy „rzut oka” sytuacja z rys. 28a jest idealna, bo działanie jednakowo pracujących membran powinno się dodawać.

W rzeczywistości sprawa fazowania głośników wcale nie jest tak oczywista. W grę wchodzi bowiem stosunkowo mała prędkość dźwięku (w powietrzu, wynosząca około 340 m/s) i związane z tym opóźnienie. Ze wzoru $\lambda = v/f$ łatwo wyliczyć długość fali. I tak na przykład fala dźwiękowa o częstotliwości 1 kHz ma długość około 34 cm, ale już fala 10 kHz ma długość tylko 3,4 cm.

A co to właściwie znaczy że fala, będąca zaburzeniem ciśnienia powietrza, porusza się z prędkością 340 m/s?

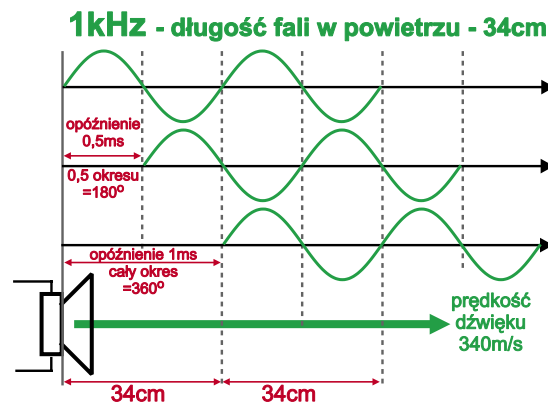
Otóż w ciągu jednej tysięcznej sekundy (1 milisekundy) czoło fali przebiegnie drogę 0,34 m, czyli w odległości 34 cm od głośnika fala pojawi się z opóźnieniem 1 milisekundy. W odległości 17 cm pojawi się natomiast z opóźnieniem 0,5 milisekundy.

Zauważmy, że chodzi tu o opóźnienie transportowe, i że opóźnienie to jest jednakowe dla dźwięków o dowolnej częstotliwości.

Co ważne, dla fali o częstotliwości 1 kHz ta 1 milisekunda to akurat jeden pełny okres, co oznacza przesunięcie fazowe 360 stopni (2π radianów), a 0,5 ms, to połowa okresu. Oznacza to, że w odległości 34 cm (a także 68 cm, 102 cm, 136 cm...) od głośnika, fala 1 kHz ma fazę taką samą, jak tuż przy głośniku, natomiast w odległości 17 cm (a także 51 cm, 85 cm, ...) przesunięcie fazy będzie równe pół okresu, czyli 180 stopni. Ilustruje to rys. 29. Dotyczy to częstotliwości 1 kHz. Dla fali o częstotliwości 100 Hz opóźnienie równe 1 ms to tylko jedna dziesiąta okresu, czyli przesunięcie fazowe o 36 stopni. Dla fali 10 kHz jedna milisekunda opóźnienia to dziesięć okresów, czyli w mierze kątowej 3600 stopni (rys. 30). Jak widać, „opóźnieniowe” przesunięcie fazy wyrażone w mierze kątowej nie jest stałe. Jest liniowo proporcjonalne do częstotliwości.

Czy to są zniekształcenia fazowe? Otóż nie. Mamy tu do czynienia z jednakowym opóźnieniem, które zamiast w jednostkach czasu (milisekundach), możemy wyrazić w mierze kątowej (stopniach lub radianach). Ponieważ czas opóźnienia jest jednakowy dla wszystkich częstotliwości zakresu akustycznego, dlatego nie powinniśmy mówić o zniekształceniach fazowych.

Ponadto, jeżeli pracuje tylko jeden głośnik, w ogóle nie ma problemów z fazą. Po prostu dźwięk jest opóźniony i wszystkie składniki

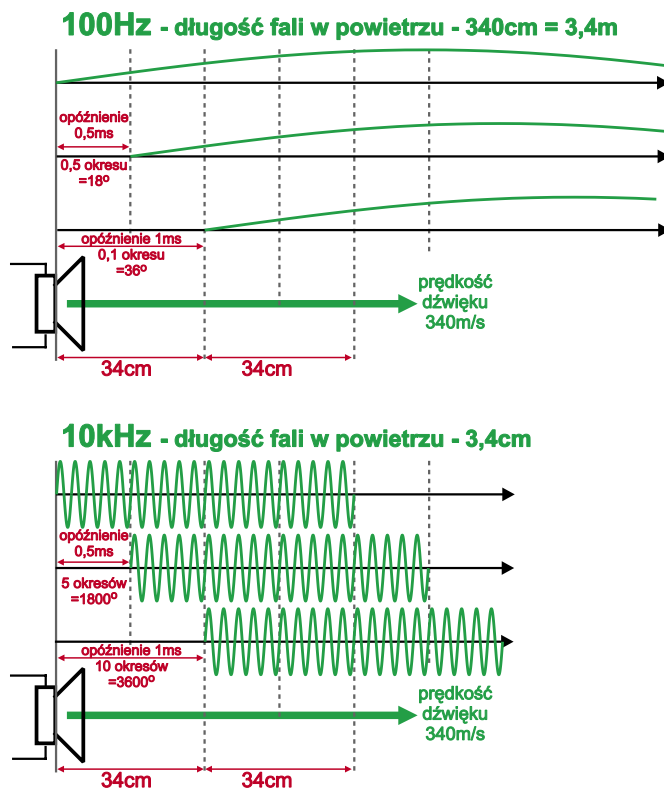


Rys. 29.

docierają z jednakowym opóźnieniem. „Problemy fazowe” zaczynają się w przypadku współpracy dwóch lub więcej głośników. Wtedy wszystko zależy od wzajemnego usytuowania głośników i słuchacza. W sytuacji pokazanej na rys. 28a, przy jednakowej odległości ucha słuchacza od obu głośników, do ucha zawsze jednocześnie dotrą sygnały z obu głośników i chwilowe wartości niewątpliwie się dodadzą. A co wtedy, gdy odległości ucha od obu głośników będą różne? I tu zaczyna się problem...

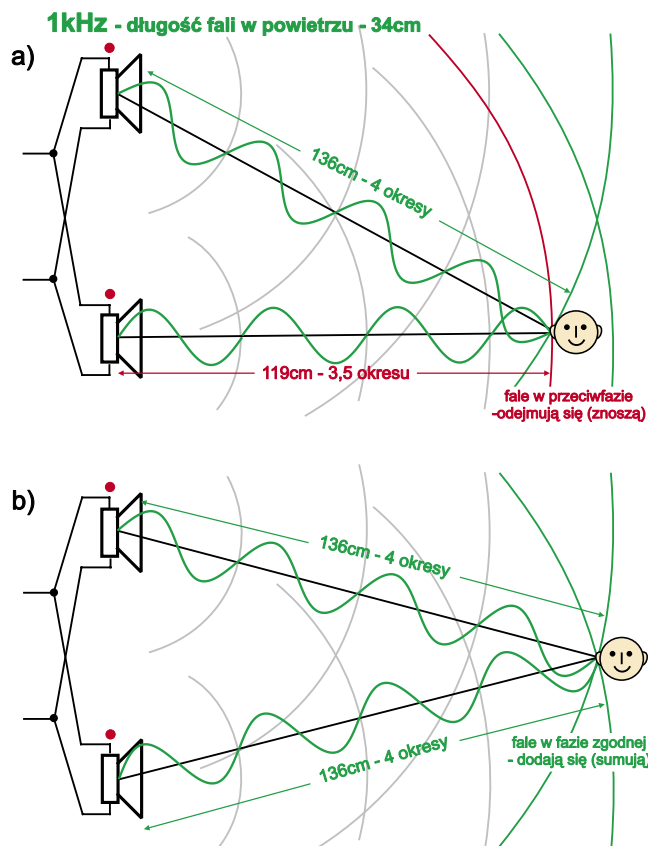
Żałujemy, że głośniki z rysunku 28a wytwarzają dźwięk o częstotliwości 1 kHz, którego długość fali wynosi 34 cm. Jeśli zgodnie z rys. 31a, ucho słuchacza będzie oddalone od jednego głośnika o 17 cm dalej, niż od drugiego, to sygnał z dalszego głośnika zostanie opóźniony o pół milisekundy, co dla dźwięku o częstotliwości 1 kHz daje połowę długości fali, czyli opóźnienie o 180 stopni (porównaj rys. 29). Oznacza to, że z powodu różnicy odległości, przy jak najbardziej prawidłowym fazowaniu głośników według rys. 28a wystąpi sytuacja znoszenia się fal według rys. 28b! Niemniej w tej samej sytuacji, ale dla ucha umieszczonego jak na rys. 31b, znów wystąpi sytuacja dodawania się dźwięków, jak na rys. 28a.

Nie ulega wątpliwości, że w systemie z dwoma (lub więcej) głośnikami, wystąpi zjawisko interferencji. Problem wynika w sumie z różnic odległości ucha od głośników. Żeby nastąpiło znoszenie dźwięków, opóźnienie

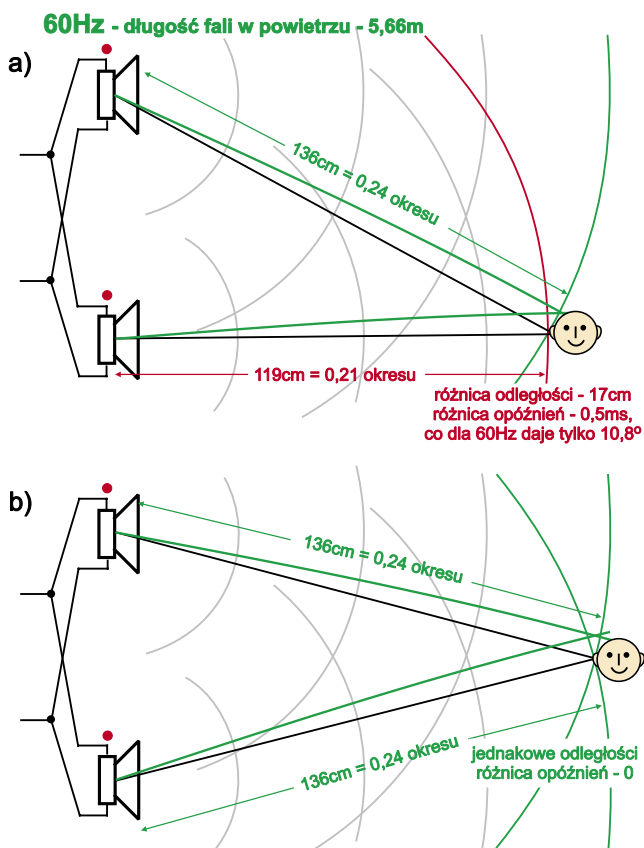


Rys. 30.

musi być zbliżone do połowy okresu. I tu w grę wchodzi długość fali. Jeśli te różnice odległości od głośników będą, jak pokazują rys. 28...31, rzędu kilku centymetrów, to problem dotyczy fal o długościach co najwyżej kilkunastu centymetrów. W przypadku niskich częstotliwości drobne



Rys. 31.



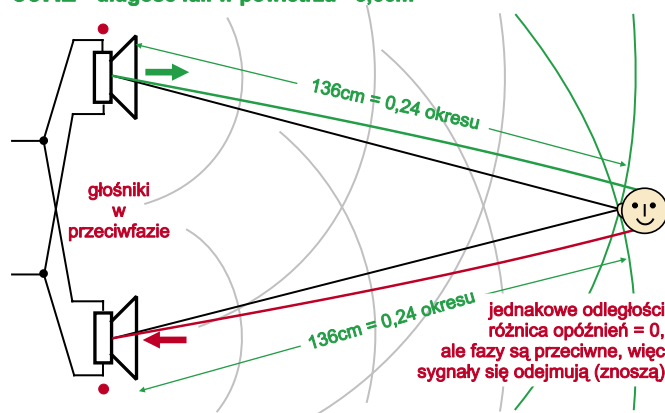
Rys. 32.

różnice odległości i wynikające stąd drobne opóźnienia, mają niewielkie znaczenie. Na rys. 32a pokazana jest sytuacja dla fali o częstotliwości 60 Hz, czyli o długości 5,66 m. Także i tu różnica odległości 17 cm oznacza opóźnienie o 0,5 ms. O ile dla częstotliwości 1000 Hz było to pół okresu, o tyle dla fali 60 Hz będzie to tylko 0,03 okresu, czyli w mierze kątowej niecałe 11 stopni. W efekcie fale się nie zniosą, tylko dodadzą. Przy dużej długości fali sytuacja będzie bardzo podobna, jak przy jednakowej odległości (rys. 32b).

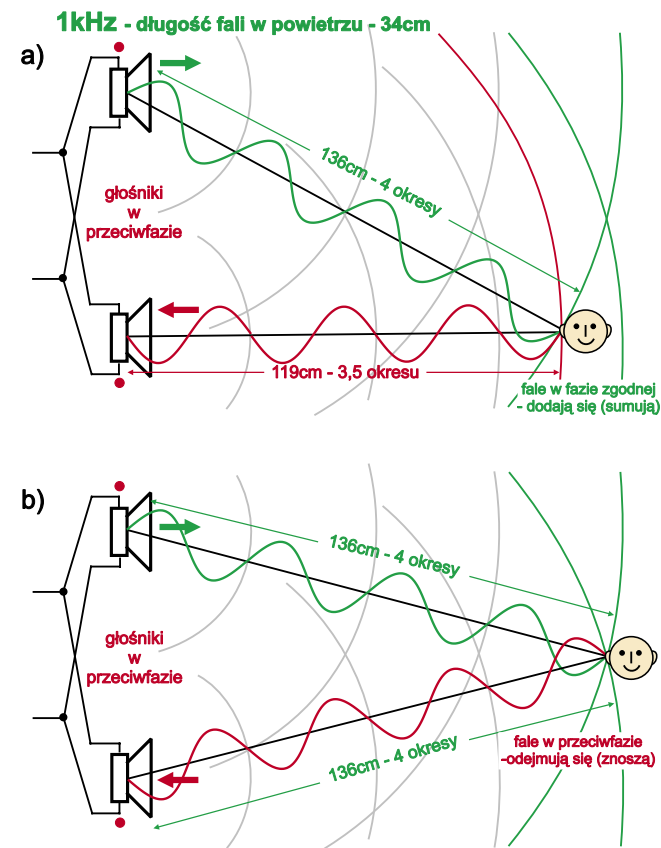
Co jednak ważniejsze, przy małych częstotliwościach, przy odwrotnym połączeniu głośników według rys. 28b, nastąpiłoby odjęcie sygnałów, jak pokazuje rys. 33. I tu widać jasno, że **fazowanie głośników jest konieczne głównie z uwagi na niskie częstotliwości**.

Co ciekawe, jeżeli głośniki nie byłyby sfazowane „odwrotnie”, jak na rys. 28b, to dla większych częstotliwości problem zmiany położenia ucha słuchacza byłby dokładnie taki, jak dla rys. 29 – patrz rys. 33. Oznacza to, że dla wyższych częstotliwości fazowanie głośników, przynajmniej teoretycznie nie ma znaczenia, ponieważ szkodliwe zjawisko interferencji

60Hz - długość fali w powietrzu - 5,66m



Rys. 33.



Rys. 34.

i tak będzie występować (rys. 34). Teoretycznie dla częstotliwości, przy których w danym punkcie opóźnienie jest wielokrotnością połowy ich okresu, powinny wystąpić zjawiska podwójnego wzmacniania i całkowitego tłumienia. W praktyce nie będzie aż tak źle, niemniej problem jest. I dotyczy dwóch zagadnień: kilku głośników w jednej kolumnie, a także systemów stereo i wielokolumnowych. Należy jednak bardzo mocno podkreślić, że omawiane szkodliwe zjawisko to nie są „czyste” zniekształcenia fazowe, tylko występująca w systemach wielogłośnikowych nierównomierność charakterystyki amplitudowej związana z interferencją. Tymczasem omówione zjawisko jest często mylone z prawdziwymi zniekształceniami fazowymi i stąd liczne nieścisłe i mylące stwierdzenia, na przykład, że zniekształcenia fazowe są poważnym problemem przy budowie kolumn. W takim stwierdzeniu jest ziarno prawdy, o czym za chwilę, ale jeszcze raz należy podkreślić, że omawiany teraz problem wcale nie wynika z „prawdziwych” zniekształceń fazowych, tylko z opóźnień w systemach wielogłośnikowych i interferencji. W przypadku „prawdziwych” zniekształceń fazowych mamy natomiast do czynienia z niejednakowym przesunięciem fazy, co odpowiada niejednakowym opóźnieniom poszczególnych zakresów pasma częstotliwości. Z taką sytuacją mamy do czynienia we wszelkich korektorach charakterystyki częstotliwościowej, a w szczególności w wielopasmowych equalizerach – korektorach graficznych. Każdy korektor, czyli układ regulacji barwy dźwięku, przesuwa fazę przebiegów w swoim paśmie roboczym. Rys. 35 pokazuje przykładowe charakterystyki amplitudowe i fazowe wysokiej klasy korektorów graficznych.

Tu należy nadmienić, że określenie „filtry minimalnofazowe”, a ściślej „układy minimalnofazowe” nie dotyczą „cudownych” korektorów, nie wprowadzających przesunięcia fazy. Nie ma „cudownych” regulatorów barwy, nie przesuujących fazy.

Jednak ucho jest praktycznie nieczułe na „prawdziwe” zniekształcenia fazowe. Ponadto „bałagan” wprowadzany przez kolumny i odbicia dźwięku w pomieszczeniu, to zupełny drobiazg w porównaniu z przesunięciami fazowymi w equalizerze. Po drugie tak pogardzany przez „znawców” equalizer, zgodnie z nazwą, ma przecież wyrównać wypadkową charakterystykę pomieszczenia i całego systemu. A skąd biorą się nierównomierności charakterystyki? Ano właśnie z różnorodnych „problemów fazowych” występujących w kolumnach i pomieszczeniu odsłuchowym. Jeśli elektroniczny korektor ma rzeczywiście skorygować takie „problemy fazowe”, to właśnie musi przesuwać fazę, bo między innymi na tym polega korekcja.

Nie takie to proste...

Ocieramy się tutaj o bardzo skomplikowane zagadnienia. Jeszcze raz podkreślmy, że „prawdziwe” zniekształcenia fazowe w torze elektrycznym wynikają w sumie z obecności w torze sygnałowym gromadzących energię pojemności (lub indukcyjności). Ich efektem jest niejednakowe przesunięcie fazy składowych sinusoidalnych z poszczególnych fragmentów pasma, co owszem, skutkuje zmianą kształtu przebiegów, ale co samo w sobie nie powoduje godnych uwagi skutków dźwiękowych. Owszem, słychać różnicę,

ale nie przesunięcie fazy, tylko nierozłącznie z nim związane podbicie czy stłumienie sygnałów z danego zakresu częstotliwości.

Przeciwnikom korektorów należałoby zalecić, żeby dokładniej przyrzekli się problemowi. Czy przypadkiem ich osady i wrażenia nie wynikają z czegoś zupełnie innego, niż „prawdziwe” zniekształcenia fazowe...

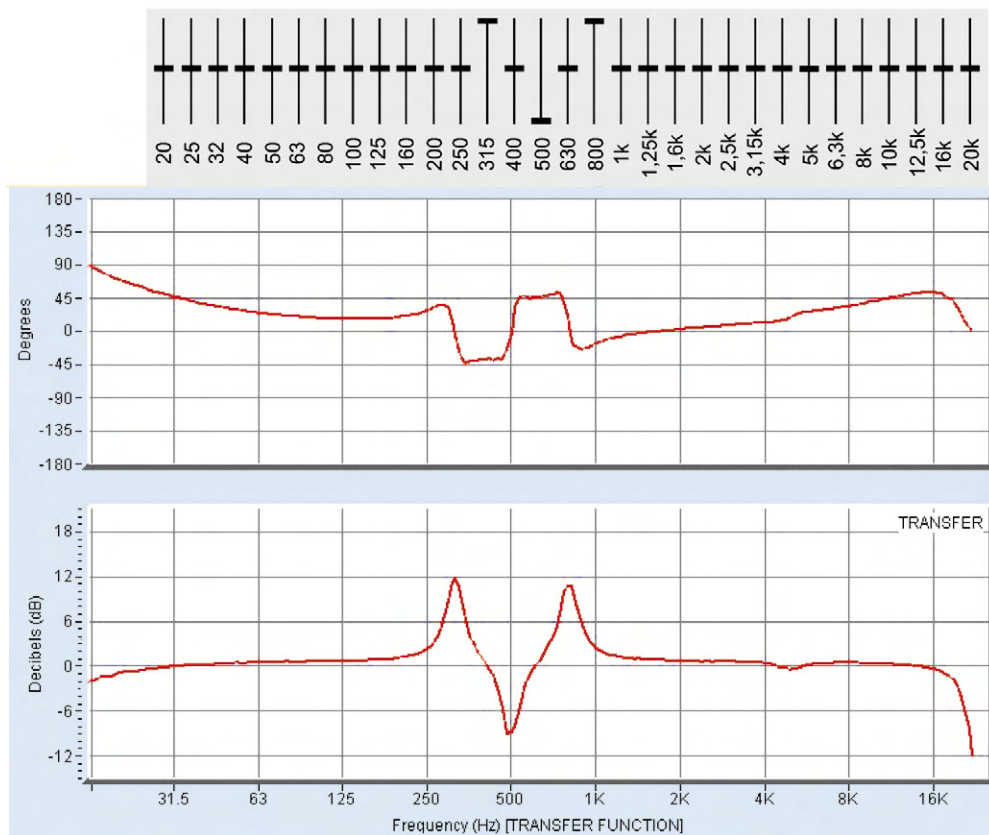
Nie powinny więc być nazywane „zniekształceniami fazowymi” rozmaite zjawiska falowe, rzeczywiście występujące zarówno w samych głośnikach, jak też na drodze od głośnika do słuchacza w systemach wielogłośnikowych. Tam wprawdzie też wchodzi w grę przesunięcie fazowe, ale efektem są, najprościej biorąc, zafalowania w charakterystyce amplitudowej i inne zjawiska – to one są słyszalne.

Sedno omawianych właśnie „problemów fazowych” w kolumnach nie wynika z *niejednakowego* opóźnienia poszczególnych pasm częstotliwości w torze elektroniki, tylko z różnic odległości i opóźnień w propagacji dźwięku w powietrzu (tzw. opóźnienie transportowe).

Na marginesie warto nadmienić, że podobne zjawiska falowe jak najbardziej występują też w torze elektroniki, ale prędkość transmisji sygnału elektrycznego w przewodnikach jest zbliżona do prędkości światła. Wobec tego długość fali przebiegów o częstotliwościach akustycznych jest rzędu (!) kilkuset kilometrów. Zjawiska falowe zachodzą natomiast dla przebiegów, których długość fali jest porównywalna z wymiarami toru sygnałowego. W sprzęcie elektronicznym dotyczy to mikrofal, czyli częstotliwości kilkuset megaherców i więcej.

Problem z kolumnami

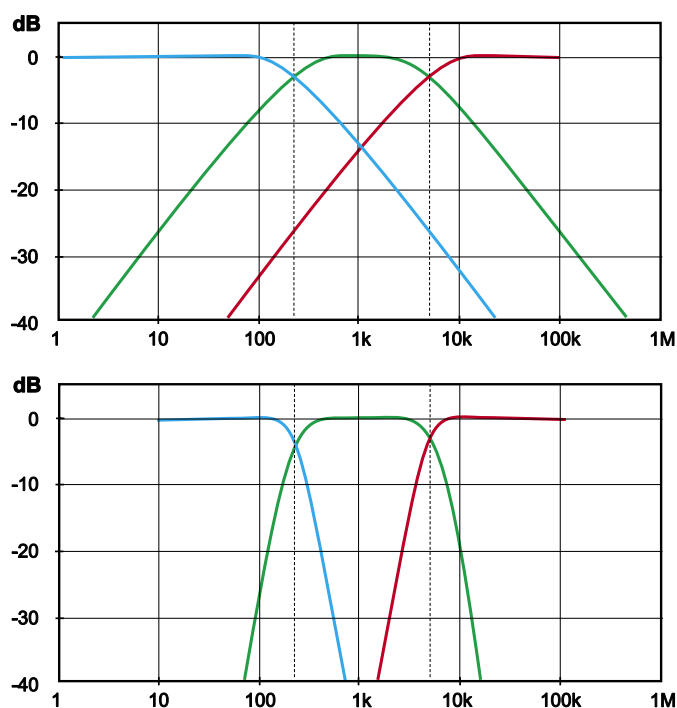
Powyższe rozważania prowadzą do wniosku, że zamiast wielogłośnikowej kolumny należałoby wykorzystać pojedynczy głośnik. Niestety, nie jest możliwe zbudowanie pojedynczego głośnika, który prawidłowo i wiernie przetworzyłby cały zakres akustyczny. Choćby tylko dlatego, że do prawidłowego reprodukcji niskich tonów trzeba „przepompować” dużą ilość powietrza, a więc głośnik powinien być jak największy i jak największe powinny być wychylenia jego membrany. Jeśli jednak membrana będzie duża, z konieczności znaczna będzie też jej masa i bezwładność, a to z kolei jest bardzo niekorzystne przy przetwarzaniu wysokich czę-



Rys. 35.

stotliwości. W grę wchodzi też wiele innych czynników, które powodują kolejne problemy, wyzwania i sprzeczności. W każdym razie nie ma, i prawdopodobnie nie będzie, pojedynczych głośników, przetwarzających wiernie cały zakres częstotliwości. Często stosowane głośniki szerokopasmowe są zawsze wynikiem kompromisu w gąszczu sprzecznych wymagań i uwarunkowań. Stosunkowo łatwo można natomiast specjalizować i optymalizować głośniki do przetwarzania węższego pasma częstotliwości – stąd choćby głośniki nisko–średnio– i wysokotonowe i budowane w oparciu o nie dwu– lub trzydrożne kolumny.

I tu zaczyna się inny problem. Każdy głośnik w kolumnie powinien przetwarzać tylko „swoją” zakres częstotliwości, czyli nie powinny być do niego doprowadzone sygnały elektryczne z „obcego” zakresu pasma. Najczęściej w kolumnach realizuje się to za pomocą zwrotnicy, która jest zestawem filtrów pasmowych. Na przykład w kolumnie trójdrożnej zwrotnica jest zestawem trzech filtrów pasmowych – są to bierne filtry LC. Ponieważ występują filtry, pojawiają się inne problemy. Mianowicie działanie każdego filtru, zawierającego magazynujące energię elementy (LC), nieodłącznie związane jest z „prawdziwymi” przesunięciami fazowymi. Dość dobrze rozumiany jest fakt, że częstotliwości graniczne poszczególnych filtrów muszą być tak dobrane, żeby wypadkowa charakterystyka amplitudowa kolumny była jak najbardziej równomierna, przy czym głośniki powinny pracować zgodnie, syntonizowo, jak na rys. 28a. Dwa przykłady charakterystyk idealizowanych zwrotnic o różnych strościach, pokazane są na rys. 36. Nietrudno się domyślić, że lepsze byłyby strome filtry, ale strome filtry bardziej wykrzywiają charakterystykę fazową. Problem w tym, że właśnie w pobliżu częstotliwości granicznych filtr powoduje znaczne przesunięcie fazy przebiegów elektrycznych, co najmniej o kilkadziesiąt stopni. Okazuje się, że w pobliżu częstotliwości podziału, jeden filtr powoduje przesunięcie fazy w jedną stronę, drugi w drugą, i często okazuje się, iż w tym zakresie przejściowym dwa głośniki pracują w przeciwfazie, jak na rys. 28b. Okazuje się, że w kolumnie, w poszczególnych zakresach częstotliwości głośniki pracują albo zgodnie, albo przeciwnie, albo „pośrednio”. Problem przesunięcia fazy, nierównomierności charakterystyki i oporności wypadkowej kolumny jest zilustrowany na rys. 37.

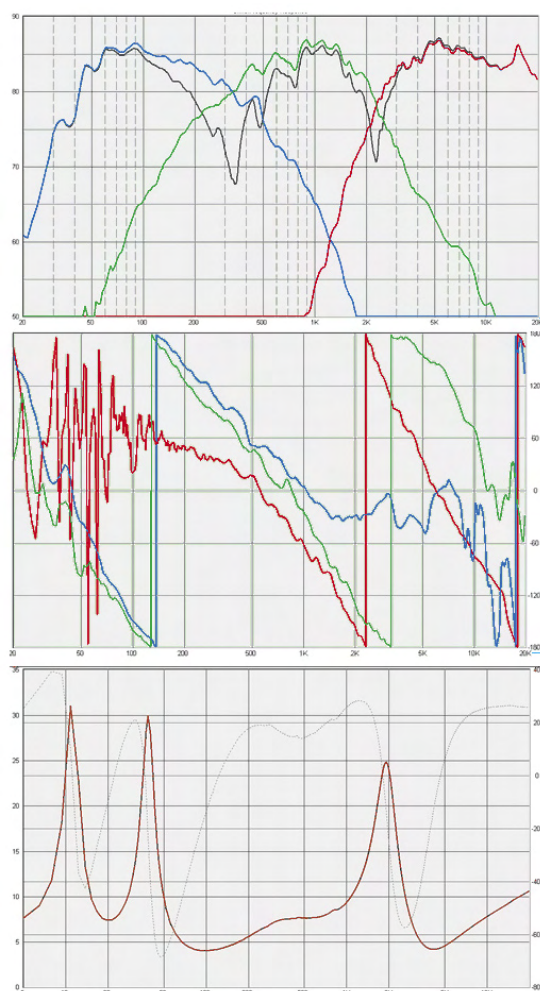


Rys. 36.

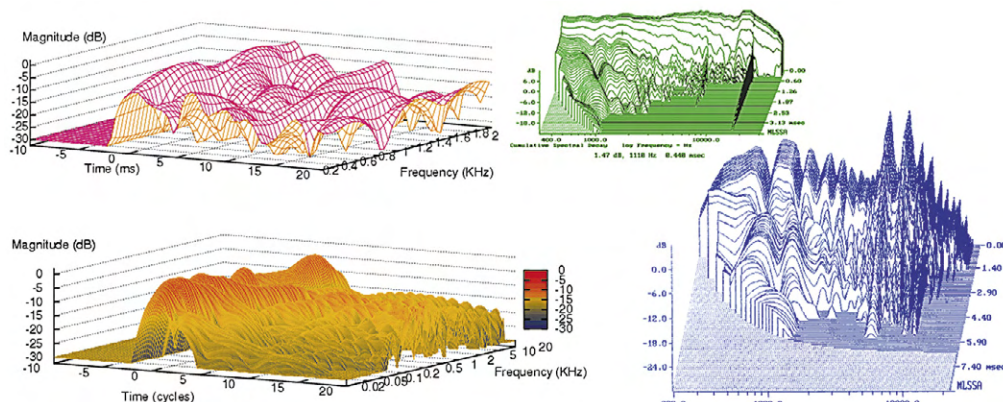
nie ma, i prawdopodobnie nie będzie, pojedynczych głośników, przetwarzających wiernie cały zakres częstotliwości

I to jest wierzchołek potężnej góry lodowej. Na drodze między wyjściem wzmacniacza, a uchem słuchacza pojawia się tak wiele czynników, że nie sposób ich wszystkich objąć i ująć matematycznie. Wykorzystywane są jeszcze bardziej zaawansowane metody analizy dźwięku w pomieszczeniu, dające charakterystyki jak na rys. 38, ale i takie charakterystyki nie obrazują wszystkich subtelności wynikających z właściwości kolumn i pomieszczenia. Problem też w tym, że w warunkach naturalnych mamy

wiele pojedynczych źródeł dźwięku, natomiast w systemach audio, zarówno stereofonicznych, jak i wielokanałowych, wytwarzamy pozorne źródła dźwięku za pomocą co najmniej dwóch głośników. I nic dziwnego, że pojawiają się rozmaite kłopoty z lokalizacją pozornych źródeł dźwięku. Przecież wtedy w grę wchodzi wspomniane interferencje i inne zjawiska, których nie ma w przypadku pojedynczego, rzeczywistego źródła dźwięku. **Wytwarzając pozorne źródła dźwięku próbujemy oszukać nasz zmysł słuchu, ale nie udaje się to w pełni.** I oto doszliśmy do kolejnego, ważnego problemu, z którym walczą projektanci kolumn: problemu precyzyjnego odtwarzania sceny dźwiękowej i lokalizacji na niej źródeł dźwięku. Tu warto nadmienić, że wszystkie programy komputerowe do projektowania i symulacji kolumn ciągle są, i jeszcze długo będą, jedynie dzieciennymi zabawkami, uwzględniającymi tylko elementarne właściwości. Ponadto także i tu trzeba wziąć pod uwagę gusty i upodobania. Są grupy zagorza-



Rys. 37.

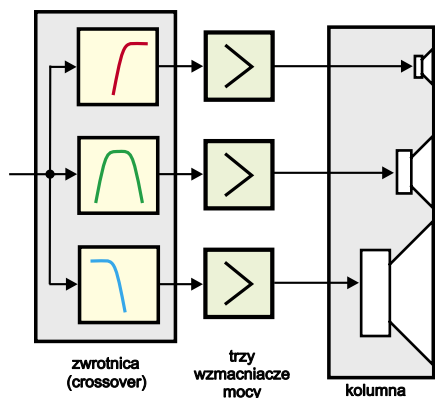


Rys. 38.

tych zwolenników głośników szerokopasmowych, ceniący spójność uzyskiwaną z pojedynczego źródła dźwięku. O ile można mówić o spójności w przypadku takiej kolumny, o tyle problem pozostaje w systemie stereo. Większość wykorzystuje kolumny wielogłośnikowe, gdzie każdy głośnik przetwarza „swoje” pasmo częstotliwości. Głównie z uwagi na omawiane problemy fazowe, dość często zamiast wykorzystywać zwrotnicę bierną LC w kolumnie, stosuje się tri- czy biamping, a zwrotnica (crossover) jest umieszczona przed wzmacniaczami, według rys. 39. Zwrotnica nie zawiera filtrów LC, tylko filtry aktywne, zbudowane w oparciu o wzmacniacze operacyjne i elementy RC, oferujące niepomiarne szersze możliwości. Właśnie wtedy można stosować najróżniejsze rodzaje filtrów o specyficznych właściwościach amplitudowych i fazowych, między innymi tak zwane filtry wszechprzepustowe (*all-pass filters*), których charakterystyka amplitudowa jest płaska, a które zmieniają tylko fazę, jak pokazuje przykład na rys. 40. Nic więc dziwnego, że trwają i będą trwać nieskończone dyskusje nad właściwościami filtrów w zwrotnicach: czy powinny być łagodne, 6 dB/okt lub 12 dB/okt, czy jak najbardziej strome, np. 24 dB/okt lub jeszcze ostrzejsze. Obecnie, zamiast filtrów aktywnych, stosuje się filtry cyfrowe, zrealizowane na szybkich procesorach DSP, dające jeszcze większe możliwości precyzyjnego ustalenia charakterystyk amplitudowych i fazowych.

Jednak nadal nie ma i nigdy nie będzie jednego jedynego, najlepszego rozwiązania – zawsze w grę wchodzi jakiś kompromis. Likwidacja jednych wad wprowadza inne. Ponadto, oprócz problemu indywidualnych upodobań, w grę wchodzi też: tyrania autorytetu i nie do końca prawdziwe wyobrażenia. Na przykład na pozór bardzo logiczne jest dążenie do zachowania koherencji (spójności) i kształtu impulsów, by kształt wytworzonego przez kolumnę impulsu ciśnienia akustycznego odpowiadał kształtowi przebiegu elektrycznego. Liczne badania wskazują jednak, że w związku ze znikomą, śladową wrażliwością ludzkiego słuchu na zniekształcenia fazowe, znakomicie mogą brzmieć też kolumny nie spełniające takich warunków.

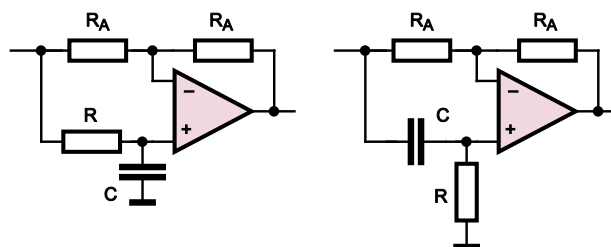
Nic dziwnego, że prawdziwi znawcy problemu, rzeczywiście stosujący wysokiej klasy elementy i rozwiązania, eksperymentalnie dobierają roz-



Rys. 39.

dziedzinie ogromne znaczenie mają kwestie finansowe i marketingowe. Nic dziwnego, że nie tylko hobbysci, ale także wielu producentów kosztownego sprzętu bez zrozumienia szczegółów, wykorzystuje techniczne i pseudotechniczne słownictwo, by podkreślić rzeczywiste czy domniemane zalety swego sprzętu.

Podsumujmy: omawiamy niesamowicie złożone zagadnienie, gdzie nie sposób wszystkiego ująć w reguły czy wzory. Dotyczy to jednak głośników, kolumn oraz uzyskiwanej z nich wierności i jakości dźwięku. W przypadku elektronicznych ogniw toru audio sprawa jest nieporównanie prostsza, niemniej warto wiedzieć o pewnych specyficznych właściwościach i parametrach niektórych składników systemu audio.

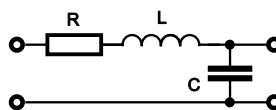


Rys. 40.

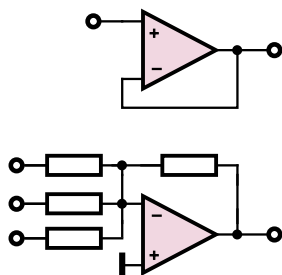
Kable

Problem przewodów głośnikowych, kabli połączeniowych (interkonektów) i kabli zasilających (sieciowych) to temat rzeka. Nie sposób omówić problem w ramach niniejszego kursu. Na życzenie Czytelników może powstać oddzielny artykuł na ten temat. Owszem, w zakresie wysokich częstotliwości, w grę wchodzi nie tylko rezystancja kabli, ale też ich indukcyjność i pojemność (rys. 41), a także zjawisko naskórkowości. Jednak ogólnie biorąc, kablom w sprzęcie audio poświęca się zdecydowanie za dużo uwagi. Tak naprawdę, głównym powodem są względy marketingowe. Z jednej strony jest ogromna rzesza niezorientowanych i zdezorientowanych, którym przy użyciu słownictwa technicznego wma- wia się najróżniejsze bzdury. Z drugiej strony są cyniczni producenci oraz inni „wtajemniczeni”, którzy te bzdury powtarzają. Przykładem niech będzie znaleziony na stronie internetowej producenta opis kabla sieciowego o długości 1,5 m: „Wybitny kabel w swojej klasie cenowej. Podnosi klasę dźwięku systemu o 2 poziomy. Daje więcej, niż zakup droższych komponentów elektronicznych”.

Nic dodać, nic ująć: kilometr drutów od stacji transformatorowej do gniazdka sieciowego nic nie znaczy – wszystkie problemy usunie ten „wybitny kabel” o długości 1,5 metra. Dodatkowo taka „wybitna” inwestycja pozwoli na byle jakim sprzęcie z hipermarketu uzyskać „klasę dźwięku” o „2 poziomy” wyższą. Jeszcze lepszą byłaby inwestycja w kabel sieciowy, który podniósłby „klasę dźwięku systemu o 3,



Rys. 41.



Rys. 42.

niezawodności, trwałości, odporności na korozję. Ponadto, dla wielu dużą rolę odgrywają względy estetyczne. I to są sensowne argumenty, żeby stosownie do kosztów pozostałego sprzętu, zakupić też droższe kable, zapewniające niezawodne, trwałe połączenia oraz pożądaną estetykę.

Przedwzmacniacze

Co ciekawe, praktycznie nie dyskutuje się na temat parametrów przedwzmacniaczy w domowych systemach audio. Nie wywołują one emocji. Można uznać, że problemu nie ma, ponieważ parametry są bardzo dobre i nie wpływają na ostateczną jakość dźwięku systemu audio. Przedwzmacniacze są po prostu „przezroczyste” – nie słychać ich obecności. Tylko w przypadku czułych przedwzmacniaczy mikrofonowych występuje problem szumów, ale to oddzielne i szerokie zagadnienie, nie dotyczące domowych systemów audio, tylko kwestii nagrywania i nagłaśniania.

Warto tu jednak zwrócić uwagę na jaskrawy przykład rażącej niekonsekwencji. Otóż audiofile gorąco dyskutują o niekorzystnym wpływie na dźwięk bardzo głębokiego **globalnego sprzężenia zwrotnego** – **NFB**, czyli **Negative FeedBack**. Pomijają jednak fakt, że praktycznie we wszystkich przedwzmacniaczach, stopniach wejściowych i buforach, pracują wzmacniacze operacyjne i to często przy wzmocnieniu napięciowym rzędu 0 dB, czyli są objęte globalną pętlą wyjątkowo silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego, na przykład w popularnych buforach czy sumatorach według rys. 42.

Warto odnotować, że w niektórych przedwzmacniaczach pracują nowoczesne wzmacniacze operacyjne optymalizowane do urządzeń audio: rozmaite kostki o nazwach–oznaczeniach zaczynających się od liter AD, SSM (Analog Devices), OPA (BurrBrown –TI), LT (Linear Technology). Rzetelne testy pokazują jednak, że ich parametrów i dźwięku zazwyczaj nie da się odróżnić od podobnych układów, zawierających popularne i znane od wielu lat wzmacniacze operacyjne NE5532, a nawet TL07x czy TL08x.

Generalnie właśnie przedwzmacniacze i stosowane w nich rozwiązania są przykładami rażących niekonsekwencji zagorzałych dyskutantów,

a nawet 4 poziomy”. Wtedy stare radio z lat 80. zapewniłoby „hajendową” jakość dźwięku. Jeśli tylko producent opracuje takie „jeszcze wybitniejsze kable sieciowe”, nie omieszkamy poinformować o tym Czytelników.

A mówiąc poważnie, to problem jest, ale dotyczy nie tyle kabli, co połączeń: gniazd, wtyczek i zacisków. Ale nie ich rzekomych magicznych właściwości elektroakustycznych, tylko

k którzy dzielą włos na czworo w przypadku wzmacniaczy mocy, a zupełnie przemilczają analogiczne kwestie w przypadku przedwzmacniaczy.

A teraz zwróćmy uwagę na pewne specyficzne parametry wzmacniaczy mocy. Szeroko dyskutowanym parametrem okazuje się tu...

Moc wyjściowa

W przypadku rezystora czy żarówki kwestia mocy jest prosta: moc to iloczyn prądu i napięcia: $P=U \cdot I$. W przypadku sygnałów audio i mocy wzmacniaczy audio sprawa jest zdecydowanie bardziej skomplikowana. W sumie jest to bardzo interesujące, obszerne zagadnienie, obejmujące wiele aspektów, któremu należałoby poświęcić kilka artykułów. My na razie uprościmy sprawę. Generalnie mówi się o tak zwanej mocy ciągłej oraz mocy szczytowej (mocy w impulsie).

Moc ciągła nazywana jest też mocą sinusoidalną lub mocą RMS. Ogólnie biorąc, chodzi o moc, jaką wzmacniacz może dostarczać do obciążenia przez dłuższy czas.

Moc szczytowa, zwana też mocą impulsową, mocą maksymalną czy mocą chwilową, dotyczy mocy, jaką wzmacniacz może oddać do obciążenia tylko w krótkich chwilach maksymalnego wysterowania.

Moc szczytowa jest zawsze większa od mocy ciągłej, czasem nawet kilkakrotnie.

Jest jeszcze tak zwana **moc PMPO (P.M.P.O.)**, ale jest to wartość zupełnie nieistotna. Można powiedzieć, że to „moc marketingowa” lub „moc handlowa”, nie mająca nic wspólnego z rzeczywistymi właściwościami urządzenia, a wartości są wzięte dosłownie „z sufitu”, jak dla małych kolumniek o rzekomej mocy 60 W, zasilanych z transformatora sieciowego o mocy co najwyżej 5 W (fot. 43).

Generalnie, moc wzmacniacza wcale nie jest istotnym parametrem, i to z wielu względów. Wystarczy wspomnieć o będących marzeniem wielu melomanów, kupowanych za bajątkowe sumy audiofilskich wzmacniaczach lampowych o porażająco niskiej mocy wyjściowej od 2x5...2x25 W. Już ten przykład wskazuje, że tak naprawdę moc jest jednym z mniej ważnych parametrów, a tymczasem paradoksalnie poświęca się mu ogromnie dużo uwagi. A oto kolejny godny uwagi parametr...

Damping Factor

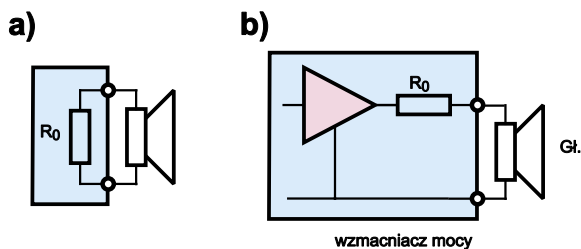
Parametr wzmacniaczy mocy, nazywany **Damping Factor**, w skrócie **DF** lub **D.F.**, w rzeczywistości określa oporność wyjściową wzmacniacza mocy.

Żeby omówić jego sens i znaczenie, warto przypomnieć sobie działanie popularnego wskazówkowego miernika magnetoelektrycznego, szeroko wykorzystywanego w rozmaitych przyrządach pomiarowych. Każdy elektronik starszego pokolenia wie, że jeśli taki miernik, a ściślej sam ustrój magnetoelektryczny, jest niepodłączony, to przy poruszeniu czołoci wskazówka łatwo wychyla się wskutek działania sił bezwładności. Zwarcie końcówek takiego ustroju przynosi zaskakującą zmianę: wskazówka zachowuje się jak przyklejona do położenia spoczynkowego. Ta zadziwiająca zmiana wynika z faktu, że taki miernik zawiera ruchomą cewkę i silny magnes. Przy ruchu cewki w polu magnetycznym wytwarzane jest napięcie, ale jeśli końce cewki są rozwarte, to prąd nie płynie i nic szczególnego się nie dzieje. Zwarcie zacisków tej cewki sprawia natomiast, że ewentualne ruchy cewki powodują nie tylko powstanie napięcia, ale też przepływ przez tę cewkę prądu. Powstaje wówczas pole magnetyczne i siły, których kierunki są takie, że pole i siły przeciwstawiają się zmianom. W efekcie ruchy wskazówki miernika są bardzo silnie tłumione, a wskazówka zachowuje się jak przyklejona w położeniu spoczynkowym.

Takie same zjawiska występują w głośniku, który przecież też zawiera ruchomą cewkę i silny magnes. Wprawdzie sytuacja jest nieco inna, ponieważ głośnik jest połączony do wyjścia wzmacniacza, ale podstawowe zasady są identyczne. Zachowanie głośnika będzie zależało od tego, jaką oporność będzie on „widział”, czyli jaka oporność jest dołączona do jego zacisków. A jest tam dołączone wyjście wzmacniacza mocy (rys. 44). Jeśli wyjście wzmacniacza będzie mieć charakter źródła prądowego, czyli będzie mieć dużą dynamiczną oporność wyjściową, to nie wystąpi zjawie-



Fot. 43.



Fot. 44.

sko tłumienia. Jeśli z kolei wyjście wzmacniacza będzie miało charakter źródła napięciowego o zerowej oporności, to ruchy głośnika będą bardzo silnie tłumione. Na pierwszy rzut oka może to wydawać się dziwne, bo przecież to wzmacniacz ma powodować ruchy głośnika. I tak jest, ale od oporności wyjściowej wzmacniacza zależy, czy wzmacniacz ma pełną kontrolę nad ruchami membrany głośnika. Można powiedzieć, że przy dużej oporności wyjściowej wzmacniacza, wzmacniacz wysyła sygnał prądowy, który ma spowodować ruch membrany, a potem wzmacniacz już „nie interesuje się”, co się z tą membraną dzieje. A dzieje się sporo, ponieważ w głośniku występują rozmaite rezonanse mechaniczne i inne niepożądane zjawiska. Jeśli natomiast oporność wyjściowa wzmacniacza jest równa zeru, to można powiedzieć, że dzięki wspomnianym wcześniej zjawiskom wzmacniacz niejako pilnuje, czy wychylenie membrany odpowiada wysłanemu sygnałowi – napięciu na wyjściu wzmacniacza.

Inaczej mówiąc, oporność wyjściowa wzmacniacza decyduje o tym, jak silną kontrolę nad głośnikiem ma wzmacniacz. W praktyce w katalogach nie podaje się wyrażonej w omach oporności wyjściowej wzmacniacza, tylko współczynnik DF. Damping Factor, czyli współczynnik tłumienia określa po prostu, ile razy oporność wyjściowa wzmacniacza jest mniejsza od oporności głośnika. Przykładowo $DF=400$ przy głośniku $8\ \Omega$ oznacza, iż oporność (impedancja) wyjściowa wzmacniacza wynosi $0,02\ \Omega$ czyli $20\ m\Omega$, czyli jest znikomo mała, porównywalna z opornością przewodów głośnikowych, które w ostatecznym rachunku też należałoby uwzględnić.

Teoretycznie współczynnik DF powinien być jak największy, ponieważ oznacza to lepszą kontrolę wzmacniacza nad mechaniczną bezwładnością i rezonansami głośnika. Jednak w praktyce do wyjścia wzmacniacza najczęściej nie jest podłączony pojedynczy głośnik, tylko kolumna, zawierająca zwrotnicę. Zwrotnica jest zestawem filtrów i ma znaczącą impedancję. Ta impedancja dodaje się do oporności wzmacniacza i redukuje rzeczywistą wartość DF, często w katastrofalnym stopniu. Między innymi dlatego niektórzy audiofile, świadomi tego problemu, stosują tzw. *biamping* lub *triamping*, czyli zasilanie poszczególnych głośników kolumny wprost z wyjść oddzielnych wzmacniaczy, pracujących w odpowiednich pasmach częstotliwości, przy czym rozdział pasma na poszczególne wzmacniacze jest dokonywany za pomocą tzw. *crossovera*, czyli zestawu filtrów aktywnych, umieszczonych przed wzmacniaczami (rys. 38).

Ponadto, aby utrzymać wysoką wartość DF, czyli znikomą oporność, „widzianą” od strony głośnika, niektórzy do połączenia wyjścia wzmacniacza z głośnikiem stosują bardzo grube kable, zapewniające pomijalnie małą oporność. Znaczenia współczynnika DF nie należy jednak przeceniać. Po pierwsze, jeśli w kolumnie pracuje zwrotnica LC, stosowanie takich grubych kabli traci sens. Ponadto trzeba wiedzieć, że dawniej, w erze wzmacniaczy lampowych, do kwestii oporności wyjściowej wzmacniacza praktycznie nie przywiązywano wagi. Do dziś wzmacniacze lampowe mają zaskakująco niski współczynnik DF. Ich oporność wyjściowa jest duża, nie kontrolują więc precyzyjnie współpracujących głośników, a mimo to ich dźwięk jest uznawany za znakomity. Dlatego niektórzy twierdzą, że problem DF to kolejny paradoks i pole do nadużyć.

Inne ważne właściwości – niedoceniany problem

Wzmacniacz mocy to urządzenie składające się z niedoskonałych elementów, które szumią i w których występują rozmaite inne szkodliwe sygnały – zakłócenia. Trzeba jednak wiedzieć, że w końcówkach mocy problem wspomnianych wcześniej nieuchronnych szumów termicznych

nie ma kluczowego znaczenia. Szumy termiczne mają na tyle niski poziom, że są istotne w przedwzmacniaczach i to głównie w czułych przedwzmacniaczach mikrofonowych. Jeśli chodzi o pomiary szumów wzmacniacza, to pojawia się pytanie o schemat wzmacniacza mocy, w szczególności o miejsce umieszczenia potencjometru i związek tego z poziomem szumów (rys. 45). Czy chodzi nam tylko o pomiar szumów końcówki mocy, czy też całego wzmacniacza, wraz z przedwzmacniaczem? Jak w czasie pomiarów szumów wyjściowych wzmacniacza wg rys. 45a ma być ustawiony potencjometr siły głosu: czy ma być skreślony na minimum, żeby mierzyć tylko szumy końcówki mocy, czy raczej potencjometr ma być ustawiony na maksimum głośności, żeby uwzględnić też szumy własne przedwzmacniacza i ewentualnych innych stopni (korektora)? Oczywiście uczciwość wskazywałaby na pomiar całkowitych szumów, uwzględniających także stopnie wejściowe. Z drugiej strony może to być okazja do nadużyć i zawyżania parametrów.

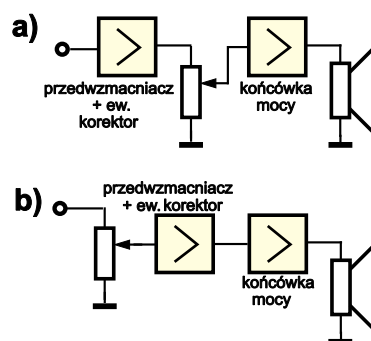
W samych końcówkach mocy na poziom szumów wyjściowych mają wpływ przede wszystkim niedoskonałości tranzystorów, ale przede wszystkim rozmaite „śmieci” przenikające do wzmacniacza. Są to przede wszystkim zakłócenia i szumy przedostające się przez obwody zasilania, a głównie zakłócenia o częstotliwości sieci energetycznej $50\ Hz$. Zakłócenia te przedostają się zarówno przez transformator zasilający i obwody zasilacza, jak też przez pole elektryczne i magnetyczne. W praktyce, zwłaszcza we wzmacniaczach lampowych, głównym problemem okazuje się właśnie eliminacja tzw. brumu sieciowego. Określenie to obejmuje bardzo niskie „buczenie” o częstotliwości $50\ Hz$. Oprócz tego, a właściwie przede wszystkim, na wyjściu wzmacniacza występuje też druga harmoniczna o częstotliwości $100\ Hz$, związana z dwupołkowym prostowaniem przebiegu sieciowego, a także trzecia harmoniczna $150\ Hz$, związana nie tylko z nieliniowością transformatora sieciowego, ale z wszelkimi odkształceniami przebiegu napięcia sieci. Nietrudno się przekonać, że dziś w naszych gniazdkach występuje przebieg znacząco różny od sinusoidalnego, mający spłaszczone wierzchołki, co jest nierozłącznie związane z występowaniem wyższych harmonicznych, które różnymi drogami przenikają do toru wzmacniającego i występują na wyjściu wzmacniacza.

W przypadku scalonych końcówek mocy podaje się ważny współczynnik, zwany **PSRR – Power Supply Rejection Ratio** albo **SVR – Supply Voltage Rejection**. Chodzi o współczynnik tłumienia tętnień zasilania. Wartość współczynnika PSRR, czyli niewrażliwość na zmiany napięcia zasilania, zależy od budowy wewnętrznej wzmacniacza. Parametr ten jest o tyle ważny, że praktycznie wszystkie wzmacniacze mocy są zasilane z zasilaczy niestabilizowanych. Tętnienia o częstotliwości $100\ Hz$ i harmonicznych sieci oraz inne „śmieci” występujące w szynach zasilania, są dość dobrze tłumione przez wzmacniacz. Niestety, czym większa częstotliwość „śmieci” w szynie zasilania, tym słabiej są one tłumione. Rys. 46 pokazuje charakterystykę SVR, czyli PSRR w funkcji częstotliwości dla wzmacniacza TDA7294. W niektórych wzmacniaczach wygląda to o wiele gorzej.

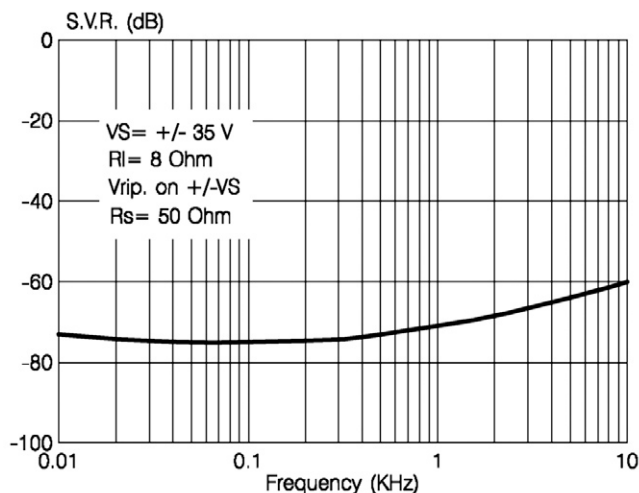
Parametru PSRR widocznego w katalogach scalonych końcówek mocy, praktycznie nie podaje się dla wzmacniaczy tranzystorowych, a generalnie dla kompletnego sprzętu fabrycznego. Trzeba też stwierdzić, że parametr PSRR jest w pewnym sensie „uproszczony”, ponieważ odzwierciedla tylko jeden z aspektów problemu zasilania.

Co bardzo ważne, oprócz PSRR nie ma innego sensownego parametru, który charakteryzowałby wzmacniacz pod względem wpływu rozmaitych niedoskonałości zasilania na wierność i jakość dźwięku.

Owszem, mówi się o zastosowaniu „audiofilijskich” kabli sieciowych i specjalnych wtyczek, kosztujących bardzo ciężkie pieniądze. Jest



Rys. 45.



Rys. 46.

to ewidentne naciąganie naiwnych, jak w przypadku wspomnianego wcześniej „wybitnego kabla sieciowego”. Jednak problem niedoskonałości zasilania istnieje. Jedną sprawą, to nie tyle kable, co „jakość napięcia 230 V” z gniazdka sieciowego. I tu żaden półtorametrowy „wybitny” kabelek nic nie pomoże. Problemem są między innymi wahania napięcia wskutek zmiennego obciążenia. Problem między innymi w tym, że potężne wzmacniacze mocy w szczytach wysterowania mogą pobierać z sieci nawet kilowaty mocy, co oznacza pobór prądu kilkunastu, lub więcej amperów, co może znacząco wpływać na napięcie sieci. W Europie i tak ten problem jest mniejszy, niż w krajach, gdzie napięcie sieci energetycznej wynosi 110...120 V. Jednak wahania napięcia to nie wszystko – poważniejszym wyzwaniem są rozmaite zakłócenia o wyższych częstotliwościach, przenikające z sieci. Dziś w przebiegu sieci, oprócz czystej sinusoidy 50 Hz, znajdziemy mnóstwo harmonicznych 100 Hz, 150 Hz, itd., a także niezliczone ilości drobniejszych składników o dużo wyższej częstotliwości. Niektóre z nich pojawiają się nieregularnie. I wszystkie mogą przenikać z sieci do toru audio, i to nie tylko bezpośrednio, ale też mogą zmieniać punkty pracy, co też zaowocuje zniekształceniami. Rzutniem na to wszystko mają być różne audiofilskie kondycjonery napięcia sieci, nie mówiąc już o listwach „czyszczących” zasilanie. Zależnie od konstrukcji, mogą one rzeczywiście mieć pewien niewielki wpływ na jakość dźwięku. Niestety, nie ma żadnych norm, czy parametrów, pozwalających obiektywnie ująć ich właściwości i skuteczność. W efekcie tematyka kondycjonerów sieciowych też jest żerowiskiem dla różnej maści oszustów.

Problem niedoskonałości zasilania jak najbardziej obejmuje też inne właściwości zasilacza i obwodów zasilania we wzmacniaczu mocy. Nie określa się tu żadnych parametrów, a problem jest. Niewątpliwie w szczytach wysterowania, a także przy gwałtownych przebiegach impulsowych napięcie zasilające końcówkę mocy zmniejsza się. Wprawdzie mówi się w tym kontekście o sztywności transformatora, ale to tylko drobny fragment problemu. W grę wchodzi szereg ważnych szczegółów i zachowanie właściwości zasilacza w pełnym zakresie częstotliwości akustycznych, a nawet szerzej. Duże znaczenie mają właściwości kondensatorów filtrujących, a zwłaszcza ich impedancja wewnętrzna i rezystancja ESR. Wbrew pozorom, mała wartość ESR – szeregowej rezystancji zastępczej, też nie rozwiązuje wszystkich problemów. Niektórzy mówią, że w zasilaczach zamiast, czy raczej obok potężnych kondensatorów elektrolitycznych, powinny być włączone akumulatory kwasowe, zapewniające niezmiennie napięcie podczas pracy wzmacniacza. Inni mówią o konieczności stabilizacji napięć zasilających końcówki mocy.

Potężne impulsy prądowe mają wpływ nie tylko na obwody zasilania. Powodują także powstawanie silnych pól magnetycznych, które różnymi drogami mogą dostawać się do toru sygnałowego i powodować nieoczekiwane zniekształcenia. W końcówkach mocy duże znaczenie ma też prowadzenie masy. Konstruktor może bezkarnie popełnić szereg błędów,

które nie wyjdą na jaw podczas laboratoryjnych pomiarów, a w subtelny sposób dadzą o sobie znać dopiero u końcowego użytkownika w domu. Projektowanie wysokiej klasy wzmacniaczy mocy nawet w XXI wieku pozostaje trudną sztuką między innymi dlatego, że nie wszystkie istotne właściwości są ujęte za pomocą obiektywnie mierzonych parametrów.

Mapa zainteresowań

Kończąc ten cykl artykułów należy jeszcze raz przypomnieć, że w przypadku właściwości sprzętu audio mamy do czynienia z bardzo szerokim i niezmiernie skomplikowanym zagadnieniem, ponieważ ogromne znaczenie mają tu rozmaite czynniki subiektywne. Nie sposób omówić wszystkich szczegółów, jednak warto zwrócić uwagę na „mapę zainteresowań”. Chodzi o to, ile uwagi poświęca się w prasie, na forach internetowych i w prywatnych rozmowach właściwościom i parametrom poszczególnych składników systemu audio. Jest to bardzo pouczająca analiza. Występuje tu bowiem paradoksalna sytuacja. Mianowicie głośniki (kolumny) bezapelacyjnie mają największy wpływ na jakość uzyskiwanego dźwięku, tymczasem o ich parametrach technicznych dyskutuje się niezbyt dużo. Niewiele uwagi poświęca się też właściwościom i parametrom źródeł dźwięku – najróżniejszego rodzaju cyfrowych odtwarzaczy. Paradoksalnie, najwięcej dyskusji i sporów wywołują parametry najprostszych składników systemu, czyli wzmacniaczy mocy i o zgrozo – kabli. Parametry wzmacniaczy mocy i właściwości kabli to także największe pole nadużyć. W przypadku kabli występuje tak silna tyrania autorytetu, że wielu rozsądnych elektroników i miłośników audio boi się zakwestionować pseudotechniczny bełkot, a nawet ewidentne brednie oszustów, żerujących na niewiedzy innych.

Nieco inaczej jest ze wzmacniaczami. Tu niejednemu nasuwa się wniosek, że większość dyskutantów dlatego zajmuje się wzmacniaczami mocy i ich parametrami, że są to urządzenia względnie proste, a ich parametry stosunkowo łatwe do zrozumienia. Wystarczy zdobyć okruciny wiedzy, przyswoić sobie terminologię techniczną lub pseudotechniczną, i już można podejmować gorące polemiki z równymi sobie „ekspertami”. Czy to nie dziwne, że najwięcej dyskutuje się o parametrach najbardziej prymitywnego urządzenia technicznego w torze audio, czyli wzmacniacza mocy? A czym prostszy sprzęt (wzmacniacze lampowe), tym więcej emocji jest w takich dyskusjach.

Niestety, bardzo często są to jałowe dyskusje o takich podstawowych parametrach jak moc wyjściowa, nierównomierność pasma przenoszenia, zniekształcenia fazowe, Damping Factor czy zniekształcenia harmoniczne THD. Dyskusje te, często wyglądające na dzielenie włosa na czworo są o tyle bezsensowne, że niedoskonałości współczesnych wzmacniaczy są znikome w porównaniu ze zniekształceniami wnoszonymi przez głośniki (kolumny). Mało kto wie lub pamięta, że głośniki są też źródłem zniekształceń THD, IMD, a nawet TIM, i to o poziomach radykalnie większych, niż wzmacniacze.

Nie wszystkie właściwości, szczególnie głośników i kolumn, udaje się ująć w postaci parametrów. Liczbowe parametry nie mówią wszystkiego o sprzęcie. Zamiast więc fascynować się cyferkami z prospektu reklamowego, należałoby posłuchać brzmienia i porównać z innym sprzętem. Owszem, można i warto mierzyć parametry poszczególnych składników systemu audio, jednak ostatecznym wykładnikiem jakości całego posiadanego zestawu jest zadowolenie jego użytkownika i właściciela.

Mam nadzieję, że kilkuczęściowy kurs przybliżył szereg ważnych aspektów dotyczących sprzętu audio. Z konieczności niektóre ważne wątki zostały tylko króciutko zasygnalizowane. Na życzenie Czytelników mogą zostać przedstawione dalsze informacje, w szczególności na temat niejasności w określaniu mocy wzmacniaczy, problemów związanych z nowoczesnymi cyfrowymi technikami zapisu muzyki oraz prawdziwych i wymyślonych właściwości kabli.

Prosimy o opinie w tej sprawie.

Piotr Górecki