

5. Przyrządy laboratoryjne wykorzystujące kartę dźwiękową

W ramach laboratorium badane są różnorodne urządzenia CPS realizowane na zestawie uruchomieniowym TMX320C5515 eZdsp, od prostej transmisji sygnału po filtry liniowe i adaptacyjne oraz układy modulatorów i demodulatorów. Badanie laboratoryjne tak szerokiej gamy urządzeń wymaga odpowiednich przyrządów pomiarowych. Niezbędne przyrządy to

- generator sygnałowy generujący między innymi sygnały zmodulowane AM, FSK i PSK oraz generator szumu gaussowskiego,
- oscyloskop lub oscylograf wyposażony w analizator widma Fouriera,
- dodatkowo pożądanym jest szybko działający i prosty w obsłudze przyrząd do pomiaru charakterystyk amplitudowych filtrów.

Zakup dobrej jakości przyrządów jest drogi i przekracza cenę samych zestawów komputer PC plus TMX320C5515 eZdsp. Na szczęście zakup drogich urządzeń nie jest konieczny. Wykonywane przez studentów pomiary laboratoryjne mają na celu obserwację pracy badanych urządzeń, a nie uzyskanie homologacji na te urządzenia, dlatego ważniejsza od legalizacji urządzeń jest jakość wizualizacji wyników, a tą może zapewnić komputer wyposażony w kartę dźwiękową.

TMX320C5515 EZDSP pracuje w zakresie częstotliwości obsługiwanych przez typowe karty dźwiękowe komputera PC i do jego badań można użyć przyrządów wirtualnych wykorzystujących kartę dźwiękową, jako przetwornik A/C i C/A. Oczywiście pojawią się pewne ograniczenia; np. do obserwacji aliasingu czy błędów rekonstrukcji sygnału analogowego wymagane jest, aby pomiary wykonać z szybkością

próbkowania większą od szybkości próbkowania badanego urządzenia, ale kiedy nie można zwiększyć szybkości próbkowania przyrządu można zmniejszyć szybkość próbkowania badanego urządzenia – badane zjawiska można obserwować na niższych częstotliwościach bez uszczerbku, dla jakości obserwacji. W ćwiczeniu 1 zjawisko aliasingu i błędy rekonstrukcji sygnału analogowego w urządzeniu pracującym z szybkością próbkowania równą 8 kHz obserwuje się przyrządem pracującym z maksymalną szybkością próbkowania karty dźwiękowej równą 96 kHz.

Budowa wirtualnych przyrządów wykorzystujących kartę dźwiękową, jako przetwornik A/C i C/A nie jest skomplikowana, podstawowym problemem jest oprogramowanie współpracy programu z kartą dźwiękową. W opisywanych tu przyrządach do tego celu wykorzystano bibliotekę NAudio dostępną w witrynie **CodePlex**. Przyrządy wykonano przy pomocy środowiska programistycznego *MS VisualStudio 2010*. Do wizualizacji wyników wykorzystano *Microsoft Chart Control for .NET Framework*, a do analizy Fouriera i generacji szumu gaussowskiego bibliotekę *MathNet.Numerics*.

Przyrządy mają intuicyjny interfejs i są stale modyfikowane, dlatego nie opisano tu ich obsługi, a tylko zasadę działania i podstawowe właściwości.

Generator

Program wirtualnego generatora Generator pracuje z maksymalną szybkością próbkowania na wyjściu typowej karty dźwiękowej równą 48 kHz. Z uwagi na przeznaczenie, karta dźwiękowa nie musi i w zasadzie nie powinna generować sygnałów z poza pasma akustycznego, dlatego można przyjąć, że generator zbudowany na karcie dźwiękowej powinien

działać poprawnie w paśmie od 20 Hz do 20 kHz. W niektórych kartach górny zakres pasma może wynieść tylko 16 kHz.

W programie Generator częstotliwość sygnałów okresowych można ustawiać z dokładnością 1 Hz w zakresie do 24 kHz. Okresowe przebiegi prostokątny, trójkątny i piłokształtny, składane są z harmonicznym mieszczących się w paśmie podstawowym i nie występuje w nich aliasing. Szum gaussowski jest generowany przez obiekt klasy

```
MathNet.Numerics.Distributions.NormalDistribution
```

pochodzący z biblioteki numerycznej MathNet.Numerics.

Regulacja mocy sygnału wyjściowego, względem umownego poziomu odniesienia 0 dB, odbywa się za pomocą mechanizmu regulacji głośności w systemach Windows. Rzeczywisty poziom mocy szumu może być obciążony błędem, gdyż szum jest „przycięty” do zakresu całkowitych liczb 16-bitowych. Obiektu `NormalDistribution` generuje liczby losowe typu `Double` o rozkładzie normalnym i dla takiego ciągu liczb obliczana jest moc, a konwersja liczb `Double` do wąskiego zakresu liczb całkowitych 16-bitowych częściowo zniekształca rozkład i moc szumu.

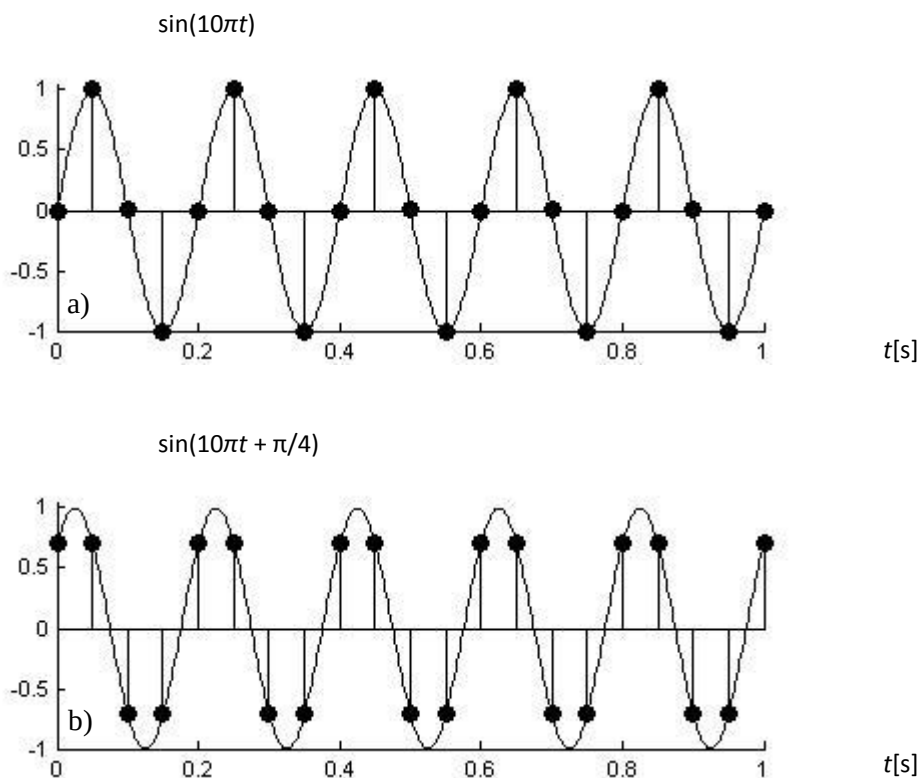
Sygnały AM, DSB–SC, FSK i PSK są generowane na podstawie ich definicji i wpisanych przez użytkownika parametrów. Generowany sygnał FSK ma ciągłą fazę, stałą (nieregulowaną) częstotliwość nośną równą 1500 Hz, dewiację równą 85 Hz i jest zmodulowany ciągiem bitów na przemian 0 i 1.

Sygnały generatorów można sumować uruchamiając jednocześnie kilka programów Generator, co jest wykorzystywane w ćwiczeniach do zaszumiania sygnałów.

Oscylograf

Program wirtualnego oscylografu Oscylograf pracuje z maksymalną szybkością próbkowania na wejściu typowej kart dźwiękowej równą 96 kHz. W oscylografie zastosowano ręczne wyzwalenie poprzez kliknięcie przycisku. Szerokość okna czasowego = 100 ms. Próbki są bezpośrednio (bez żadnej obróbki) zobrazowane na wykresie liniowym, który można dowolnie rozciągać myszką.

Ze względu na pasmo pracy karty dźwiękowej, pasmo poprawnej pracy oscylografu ograniczone jest do pasma akustycznego i zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu szybkość próbkowania równa 48 kHz jest wystarczająca dla odtworzenia sygnału. Przy zobrazowaniu przebiegów czasowych zastosowanie nadmiarowej szybkości próbkowania pozwala poprawić jakość wykresu poprzez zagęszczenie punktów, bez konieczności stosowania skomplikowanej interpolacji. Przy szybkości próbkowania równej 96 kHz, na jeden okres sinusoidy o częstotliwości równej 16 kHz przypada 6 próbek, co pozwala w miarę czytelnie ją zobrazować, przy szybkości próbkowania równej 48 kHz przypadają 3 próbki na okres i wykres staje się mało czytelny. Na rysunku 4 przedstawiono dwa przykłady próbkowania sinusoid o częstotliwości cztery razy mniejszej od szybkości próbkowania, w przykładach na okres sinusoidy przypadają cztery próbki.



Rys. 4. Przykłady próbkowania sinusoid o częstotliwości równej 1/4 szybkości próbkowania; próbkowane sinusoidy mają tę samą częstotliwość i amplitudę, ale różne fazy początkowe.

Próbkowane sinusoidy różnią się jedynie fazą początkową, ale ciągi ich próbek wyglądają zupełnie inaczej. Na podstawie obu ciągów można z łatwością odtworzyć sygnał analogowy, co wynika z twierdzenia o próbkowaniu, ale wygląd na wykresie samych próbek połączonych odcinkami prostej może być mylący. Jeśli szybkość próbkowania jest bliska, ale różna, od czterokrotnej częstotliwości sinusoidy, to układ próbek płynnie przechodzi między wzorami przedstawionymi na rysunku 4.a i 4.b, a sygnał przedstawiony na wykresie w postaci próbek wygląda jakby miał zmienną amplitudę. Korzystając z programu Oscylograf,

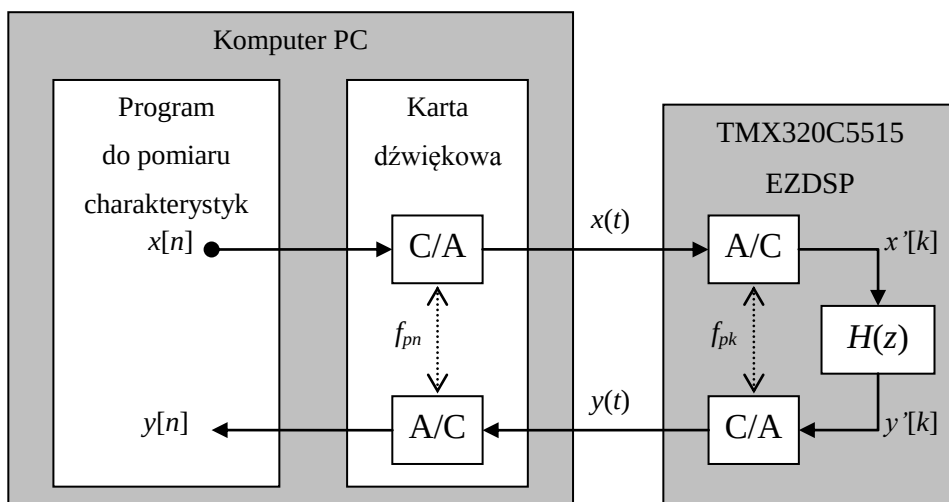
w obecnej wersji, trzeba być przygotowanym na podobne efekty na oscylogramach sygnałów o dużej częstotliwości. Dokładność zobrazowania sygnałów można zwiększyć zwiększając szybkość próbkowania, na co zezwalają tylko niektóre karty lub obliczając wartości sygnału analogowego pomiędzy próbkami, co wymaga sporej ilości obliczeń.

W analizie Fouriera nadmiarowa szybkość próbkowania równa 96 kHz nie poprawia jakości wyniku względem szybkości próbkowania równej 48 kHz, a tylko zwiększa ilość obliczeń, dlatego do analizy Fouriera lepiej pobrać próbki z szybkością równą 48 kHz. W programie Oscylograf, do analizy Fouriera pobiera się co drugą próbkę sygnału próbkowanego z szybkością równą 96 kHz, co odpowiada szybkości próbkowania równej 48 kHz. Liczba próbek danych dla analizy Fouriera wynosi $48 \text{ kHz} \cdot 100 \text{ ms} = 4800$, a prążki obliczonego widma są odległe o 10 Hz. W celu zmniejszenia przecieków widma program umożliwia zastosowanie okna Hamminga.

Z uwagi na trudności ze skalibrowaniem karty, oś napięć wyskalowano w wartościach 16-bitowej próbki, a nie w woltach. W wykonywanych w laboratorium pomiarach nie ma to znaczenia, gdyż istotny jest kształt przebiegu czasowego sygnału i jego widmo amplitudowe. Pomiary sygnałów sinusoidalnych generowanych przez zestaw TMX320C5515 eZdsp Lite pozwoliły ocenić liniowość karty i dokładność częstotliwości próbkowania. Po przebadaniu kilku prostych kart montowanych na płycie głównej okazało się, że wszystkie karty miały poziom zniekształceń harmoniczných znacznie poniżej 1% i dużą dokładność szybkości próbkowania rzędu paru Hz.

Pomiary charakterystyk częstotliwościowych

Na rysunku 5 przedstawiono schemat wirtualnego przyrządu do pomiarów charakterystyk częstotliwościowych układów o analogowym wejściu i wyjściu.



Rys. 5. Schemat układu do pomiaru charakterystyk częstotliwościowych

Program tworzy cyfrowy sygnał $x[n]$ i umieszcza go w buforze wyjściowym karty dźwiękowej. Karta dźwiękowa zamienia sygnał cyfrowy na analogowy $x(t)$, który jest podawany na wejście badanego urządzenia – na schemacie badanym urządzeniem jest filtr cyfrowy zbudowany na zestawie TMX320C5515 eZdsp. Odpowiedź urządzenia $y(t)$ jest podawana na wejście karty dźwiękowej następnie zamieniana na sygnał cyfrowy $y[n]$. Program pomiaru charakterystyk może dowolnie kształtować sygnał $x[n]$, ma dostęp do sygnału $y[n]$ i na ich podstawie oblicza charakterystyki badanego urządzenia.

Pomiaru charakterystyk częstotliwościowych można dokonać mierząc odpowiedź układu na wymuszenia sinusoidalne o różnych częstotliwościach. Pomiar charakterystyki „punkt po punkcie” dla kolejnych częstotliwości, chociaż dokładny, komplikuje kod programu i wydłuża czas pomiaru. Zakładając, że cały tor sygnału od $x[n]$ do $y[n]$ jest liniowy, można skorzystać z zasady superpozycji i obliczyć w jednym kroku odpowiedź układu na sumę K wymuszeń sinusoidalnych o różnych częstotliwościach, następnie rozdzielić składowe odpowiedzi przy pomocy transformacji Fouriera.

Przy budowie opisywanego tu przyrządu (o nazwie Charakterystyki) przyjęto, że sygnał pobudzenia $x[n]$ o okresie T składa się z sumy sinusoid o częstotliwościach $f_k = k/T$, $k = 1, 2, \dots, K < f_p T/2$. Wartości próbek okresowego sygnału $x[n]$ dane są wzorem

$$x[n] = \sum_{k=1}^K X_k \sin(\Omega_k n + \varphi_{xk}), \quad (5.1)$$

gdzie: $\Omega_k = 2\pi f_k / f_p$,

X_k, φ_{xk} – amplituda i faza początkowa k -tej składowej sinusoidalnej.

Aby pomiar był jednakowo dokładny w całym mierzonym paśmie, sygnał $x[n]$ powinien mieć w miarę płaskie widmo amplitudowe i możliwie największy stosunek mocy do wartości szczytowej. Wymogi te najlepiej spełnia sygnał świergotowy (*Chirp*), który generuje się na podstawie wzoru

$$x[n] = A \sin(\phi[n]), \quad (5.2)$$

gdzie

$$\phi[n] = 2\pi \left(F_L n + \frac{F_U - F_L}{2(N-1)} n^2 \right) + \alpha, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (5.3)$$

F_L – unormowana dolna częstotliwość graniczna,

F_U – unormowana górna częstotliwość graniczna,

N – okres sygnału wyrażony w próbkach .

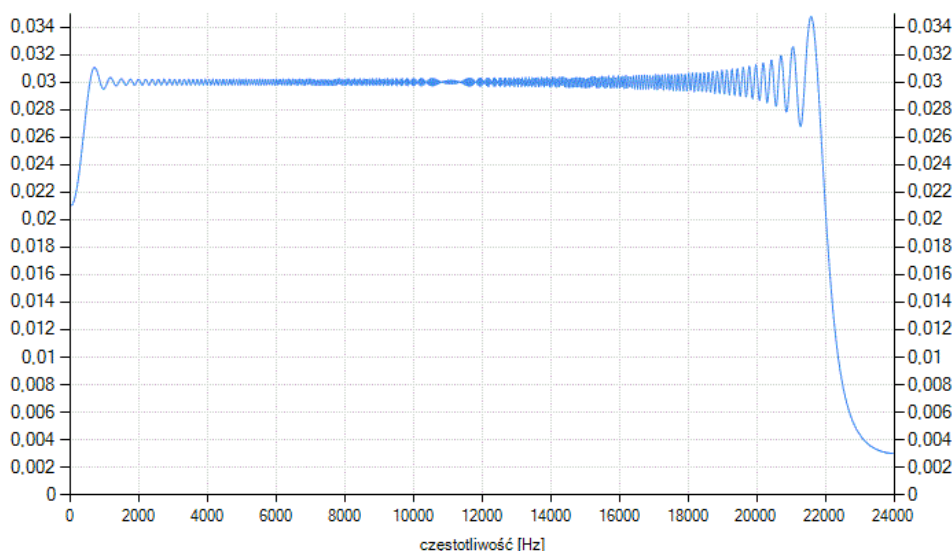
Pomiar wykorzystujący kartę dźwiękową jest ograniczony do częstotliwości akustycznych, na których pracuje karta. Od dołu zakres jest ograniczony przez kondensatory sprzęgające na wejściu i wyjściu karty dźwiękowej, a od góry przez częstotliwość próbkowania i filtry antyaliasingowy i rekonstrukcyjny. Doświadczalnie ustalono, że przy $f_p = 48$ kHz, dla typowych kart dźwiękowych,

górną zakres poprawnego pomiaru wynosi około 22 kHz. W programie Charakterystyki przyjęto okres pobudzenia $T = 50$ ms, co pozwala rozmieścić w paśmie do 22 kHz $K = 1100$ punktów pomiarowych oddległych od siebie o 20 Hz. Parametry sygnału świergotowego wynoszą odpowiednio $F_L = 20 / f_p$, $F_U = 22000 / f_p$, $N = f_p \cdot T = 2400$.

W programie Charakterystyki próbki sygnału świergotowego są obliczane na podstawie uproszczonego wzoru (5.2) instrukcją C#

```
x[n] = Math.Sin(Math.PI * n * n * 0.462/2400);
```

Na rysunku 6 przedstawiono widmo amplitudowe ciągu $x[n]$ generowanego przez program Charakterystyki.



Rys. 6. Widmo próbek generowanego przez program Charakterystyki sygnału świergotowego

Obliczone widmo amplitudowe jest w miarę płaskie, amplitudy poszczególnych składowych sinusoidalnych $X_k \approx 0,03$, a więc są o $20\log(0,03) \approx -30$ dB mniejsze od maksymalnej = 1.

Obliczone próbki jednego okresu sygnału $x[n]$ są umieszczane w buforze wyjściowym karty dźwiękowej, która je cyklicznie odtwarza na wyjściu. Otrzymaną przez program okresową odpowiedź $y[n]$ można przedstawić w postaci

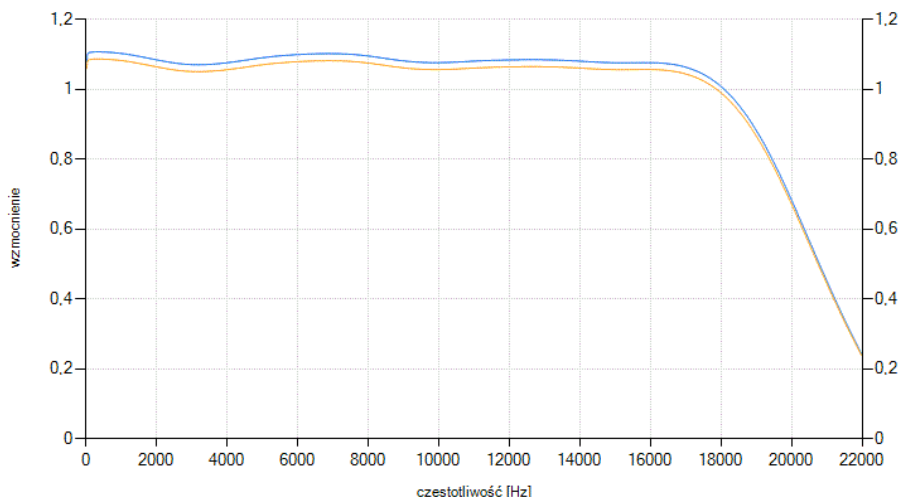
$$y[n] = \sum_{k=1}^K Y_k \sin(\Omega_k n + \varphi_{y_k}), \quad (5.4)$$

gdzie wartości Y_k i φ_{y_k} można obliczyć dokonując dyskretniej transformacji Fouriera jednego okresu ciągu odpowiedni $y[n]$. Mając dane X_k , φ_{xk} i Y_k , φ_{y_k} można obliczyć punkty na charakterystyce częstotliwościowej układu cyfrowego, który „widzi” program, według wzoru

$$H(e^{j\Omega_k}) = \frac{Y_k}{X_k} e^{j(\varphi_{y_k} - \varphi_{xk})}, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (5.5)$$

Tak obliczona charakterystyka jest charakterystyką całego toru sygnału obejmującą transmitancje badanego urządzenia i filtrów karty dźwiękowej.

Aby zbadać wpływ filtrów karty dźwiękowej na wynik pomiaru, można pomierzyć charakterystykę toru sygnału zwartej karty dźwiękowej. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru charakterystyki amplitudowej zwartej karty dźwiękowej (wynik zależy od typu karty dźwiękowej).



Rys. 6. Widmo amplitudowe odpowiedzi zwartej karty dźwiękowej na pobudzenie o płaskim widmie

Widoczna na rysunku 6 charakterystyka amplitudowa nie jest płaska, a jej kształt oddaje kształt charakterystyk amplitudowych filtrów wejściowego i wyjściowego karty dźwiękowej. Poziom wzmocnienia zależy od ustawień karty dźwiękowej. Wyraźne nierównomierności charakterystyk filtrów mają wpływ na wynik pomiaru charakterystyk częstotliwościowych badanych układów.

Pomiar zwartej karty dźwiękowej jest pomiarem sygnału generowanego przez kartę, który po dołączeniu do karty badanego urządzenia będzie jego sygnałem wejściowym. Zapisując odpowiedź zwartej karty dźwiękowej, na pobudzenie $x[n]$ dane wzorem (5.2), w postaci

$$y^0[n] = \sum_{k=1}^K Y_k^0 \sin(\Omega_k n + \varphi_{yk}^0) \quad (5.6)$$

i przyjmując, że odpowiedź układu zawierającego badane urządzenie, na to samo pobudzenie $x[n]$, dana jest wzorem (5.4), charakterystykę częstotliwościową badanego urządzenia (analogowego dołączonego do zacisków karty) można obliczyć wg wzoru

$$G(j\omega_k) = G(j2\pi f_k) = \frac{Y_k}{Y_k^0} e^{j(\varphi_{yk} - \varphi_{yk}^0)}, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (5.7)$$

Wynik pomiaru dany powyższym wzorem nie jest obciążony błędami wynikającymi z wpływu filtrów karty dźwiękowej, a obliczone wartości wzmocnienia odpowiadają rzeczywistym. Przykłady wykresów pomierzonych charakterystyk amplitudowych filtrów zrealizowanych na zestawie TMX320C5515 eZdsp znajdują się w rozdziale *Realizacja i pomiary prostych filtrów cyfrowych*.

Program Charakterystyki, który jest wykorzystywany w laboratorium, pracuje z szybkości próbkowania równą 48 kHz i mierzy charakterystyki amplitudowe w zakresie częstotliwości do 22 kHz. Zakres od 22 kHz do 24 kHz nie jest mierzony, gdyż doświadczalnie ustalono, że w tym zakresie występują zbyt duże błędy pomiaru wynikające z błędów rekonstrukcji sygnału analogowego i aliasingu. Liczbę mierzonych punktów charakterystyki ogranicza okres wymuszenia T . W programie Charakterystyki przyjęto $T = 50$ ms, co pozwala w zakresie częstotliwości do 22 kHz umieścić $K = 1100$ punktów pomiarowych, rozmieszczonych co 20 Hz. Wybór wartości T i liczby punktów pomiarowych jest kompromisem między rozdzielczością częstotliwościową pomierzonej charakterystyki, a dokładnością pomiaru tłumienia filtru.

Amplitudy składowych widma sygnału świergotowego są o 30 dB mniejsze od maksymalnej amplitudy sygnału sinusoidalnego, który może wygenerować karta dźwiękowa. Dla sygnału sinusoidalnego o amplitudzie = 1, zakodowanego w formacie 16-bitowym, *Signal-to-Quantization-Noise Ratio* SQNR = 98 dB []. Maksymalny zakres pomiaru charakterystyki amplitudowej sygnałem sinusoidalnym wynosi zatem 98 dB, a sygnałem świergotowym $98 - 30 = 68$ dB. W praktyce zakres pomiaru jest mniejszy z uwagi na szумы karty dźwiękowej i mniejszy od maksymalnego poziom sygnału na wejściu karty dźwiękowej. Ponadto, jeśli mierzony filtr jest zrealizowany na 16-bitowym procesorze takim jak TMX320C5515, nastąpi dalsza utrata zakresu pomiaru charakterystyki

amplitudowej. Reasumując, praktyczna dokładność pomiaru charakterystyki amplitudowej sygnałem świergotowym wynosi około 60 dB.

Zwiększenie odległości sygnał szum w odpowiedzi można uzyskać sumując kilka okresów odpowiedzi. Sumując dwa okresy odpowiedzi, moc okresowego sygnału, rośnie czterokrotnie, a moc szumów rośnie dwukrotnie, co daje wzrost współczynnika sygnał/szum o 3 dB. W programie Charakterystyki sumowanych jest 16 okresów odpowiedzi co daje redukcję szumów o 12 dB i zwiększa zakres pomiaru charakterystyki amplitudowej do około 70 dB.