

# Kwantyzacja, Próbkowanie Dźwięku i Re-sampling - Sprawozdanie // Title Skipped - assumed already present

## Table of Contents

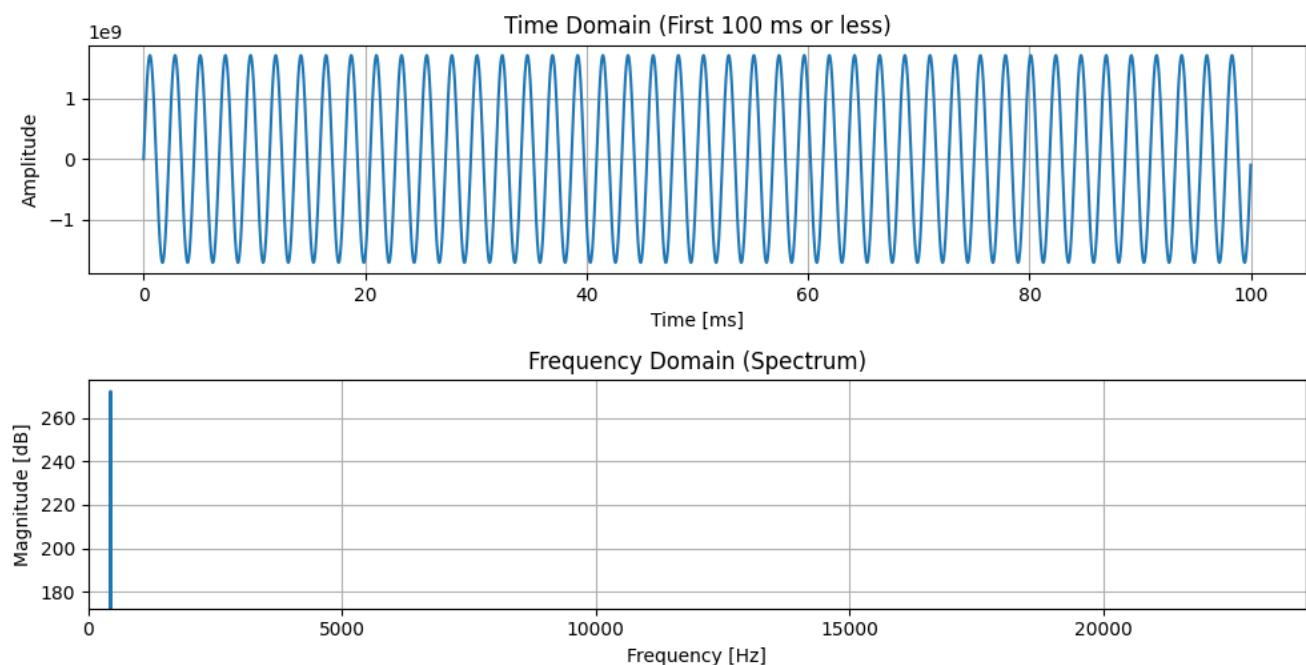
Wykresy dla plików <i>sin_*</i> .wav.....	1
Obserwacje Odsłuchowe ( <i>sing_*</i> .wav).....	53
Podsumowanie / Wnioski .....	56

## Wykresy dla plików *sin\_\**.wav

Plik: *sin\_440*

Oryginał

*sin\_440Hz - original*

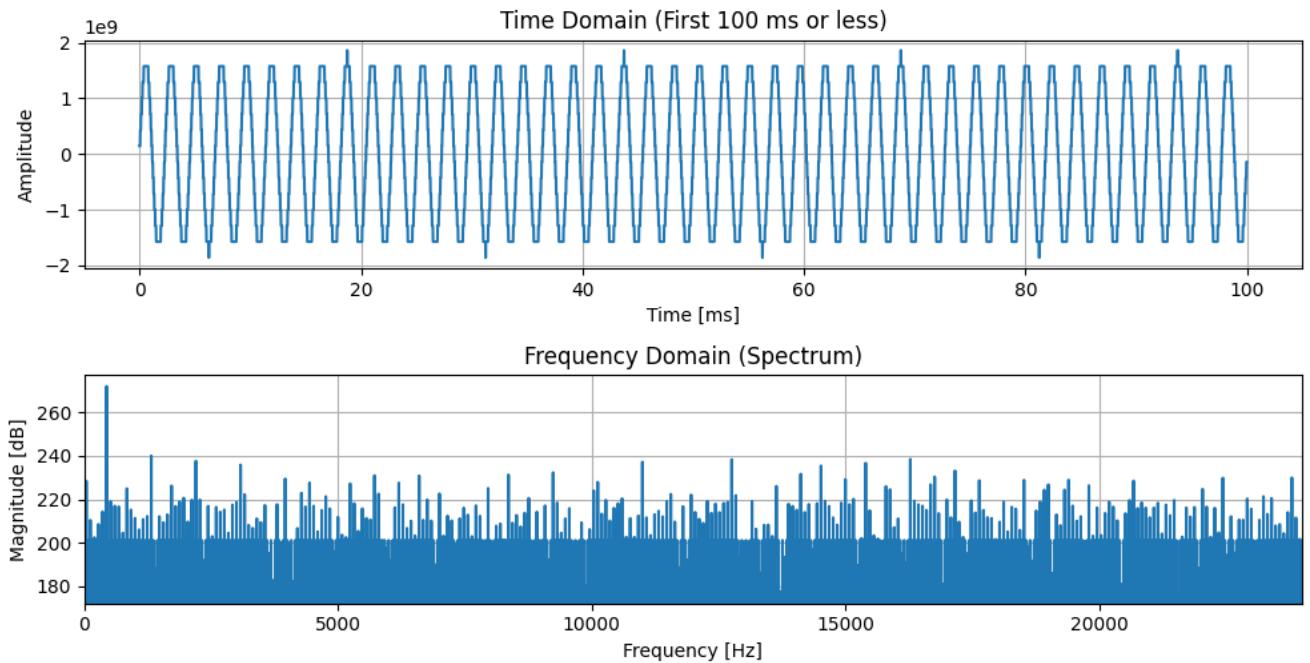


Wykres oryginalnego sygnału *sin\_440*

### Kwantyzacja

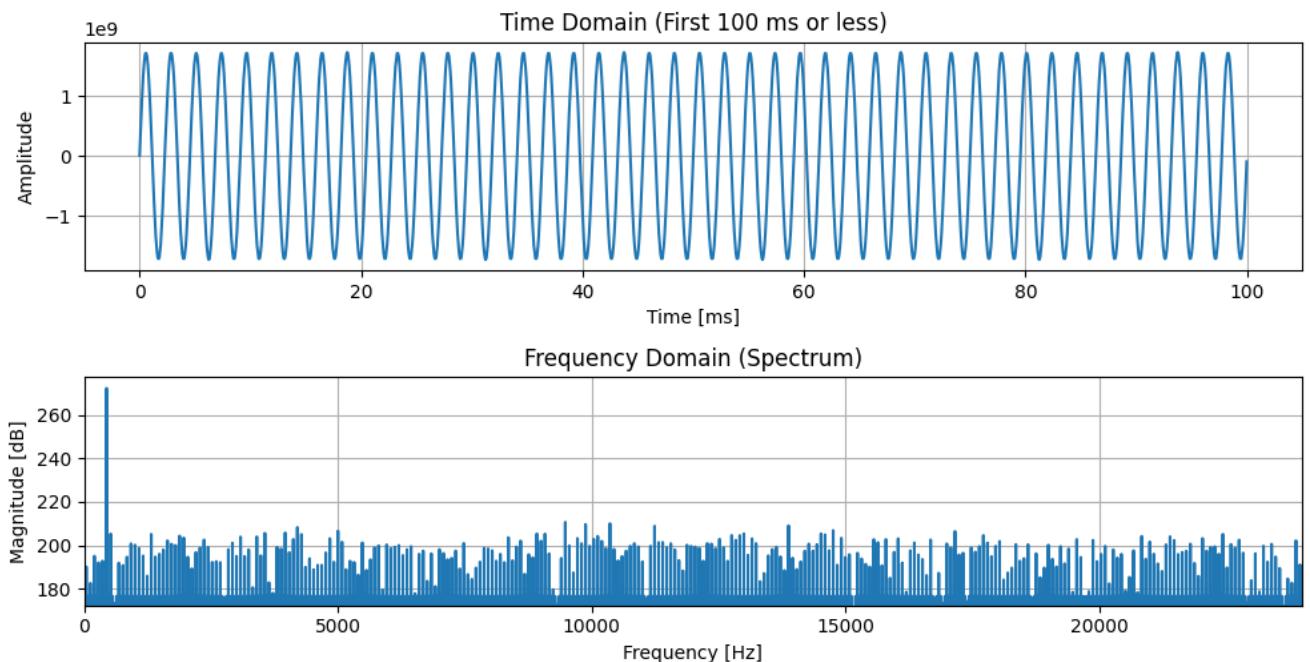
Analiza wpływu kwantyzacji na sygnał sinusoidalny. Wraz ze zmniejszaniem liczby bitów oczekuje się pojawienia się szumu kwantyzacji, widocznego jako dodatkowe składowe harmoniczne w widmie oraz "schodkowanie" sygnału w dziedzinie czasu.

sin\_440Hz - quant\_4bit



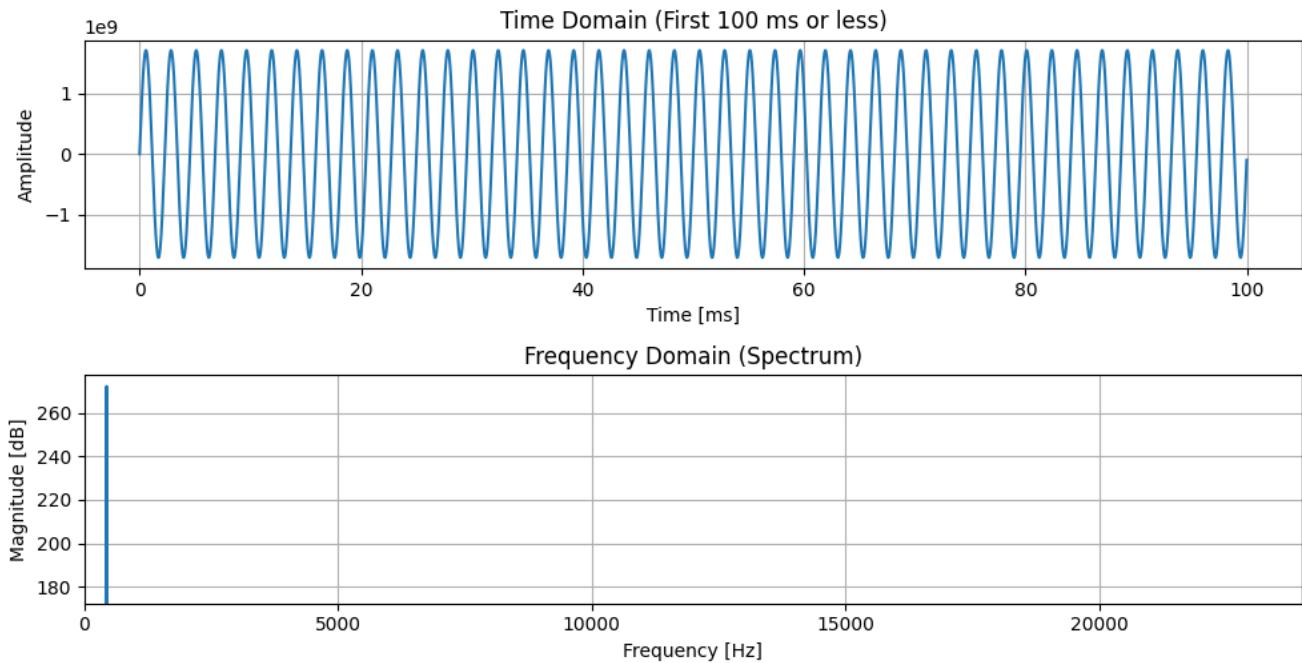
Kwantyzacja sin\_440 do 4 bitów

sin\_440Hz - quant\_8bit



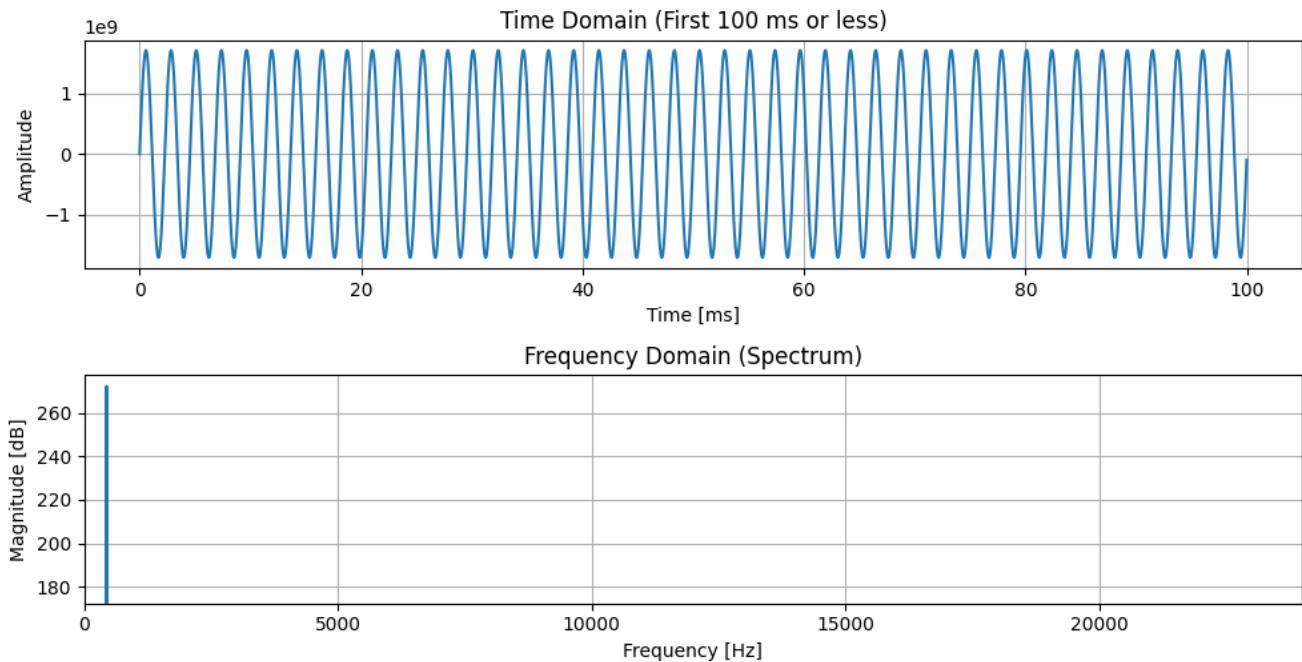
Kwantyzacja sin\_440 do 8 bitów

*sin\_440Hz - quant\_16bit*



Kwantyzacja *sin\_440* do 16 bitów

*sin\_440Hz - quant\_24bit*

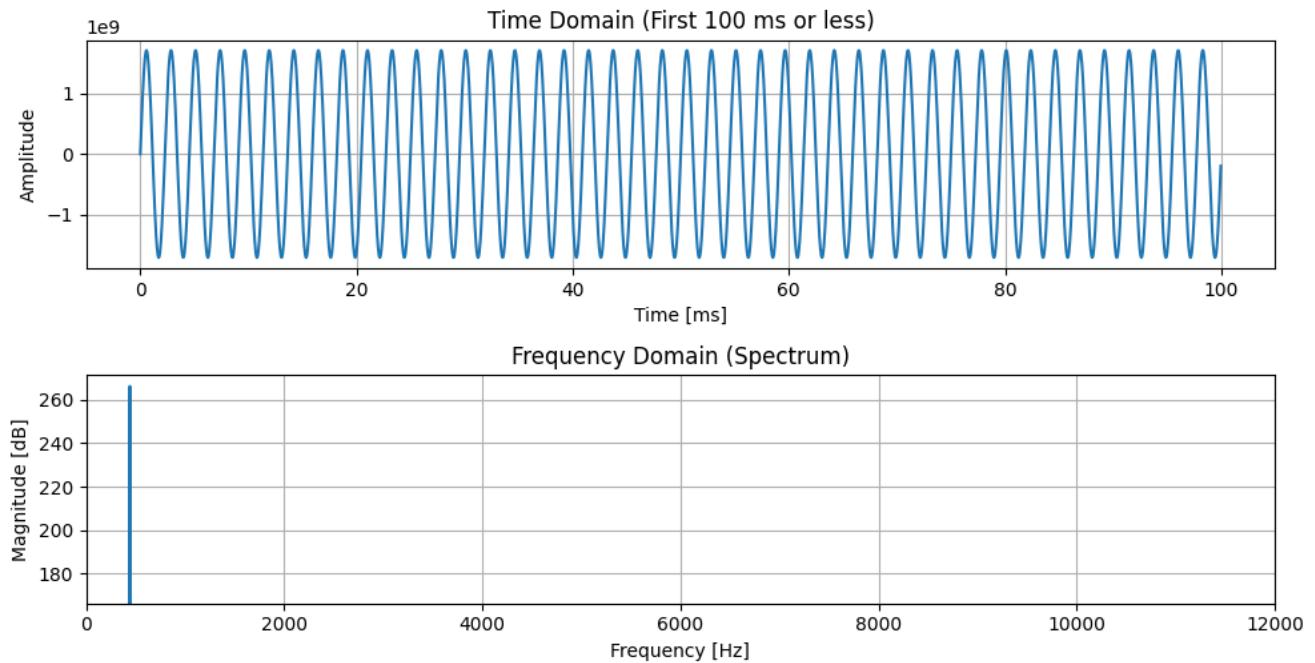


Kwantyzacja *sin\_440* do 24 bitów

## Decymacja

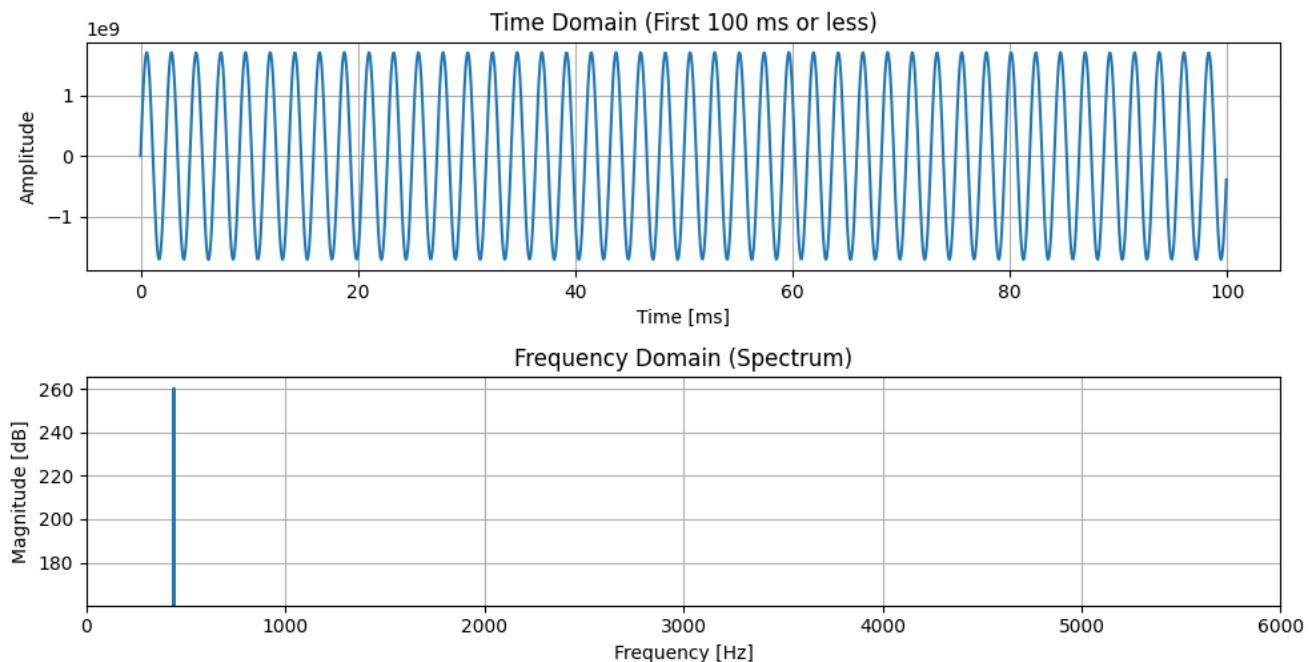
Analiza wpływu decymacji. Decymacja zmniejsza częstotliwość próbkowania *Fs*. Jeśli nowa częstotliwość Nyquista (*Fs/n* / 2) jest niższa niż najwyższa częstotliwość w sygnale, wystąpi aliasing, widoczny jako pojawienie się "fałszywych" częstotliwości w widmie.

*sin\_440Hz - decim\_n2*



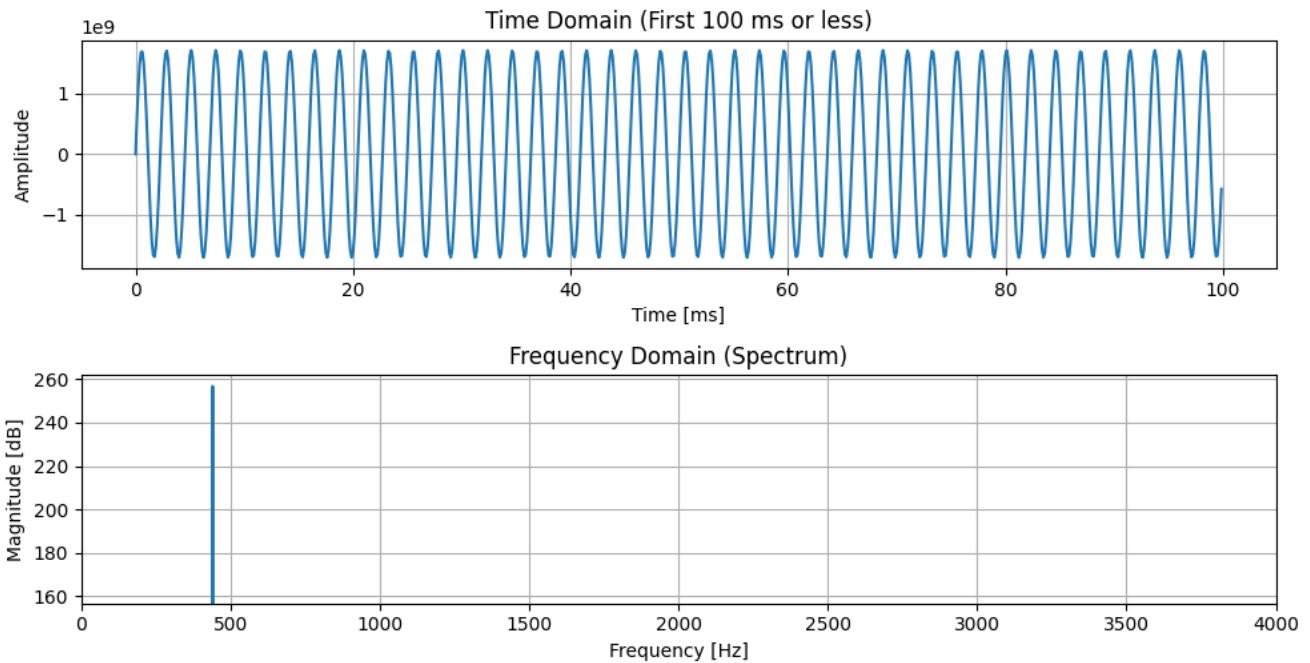
*Decymacja sin\_440 z krokiem n=2*

*sin\_440Hz - decim\_n4*



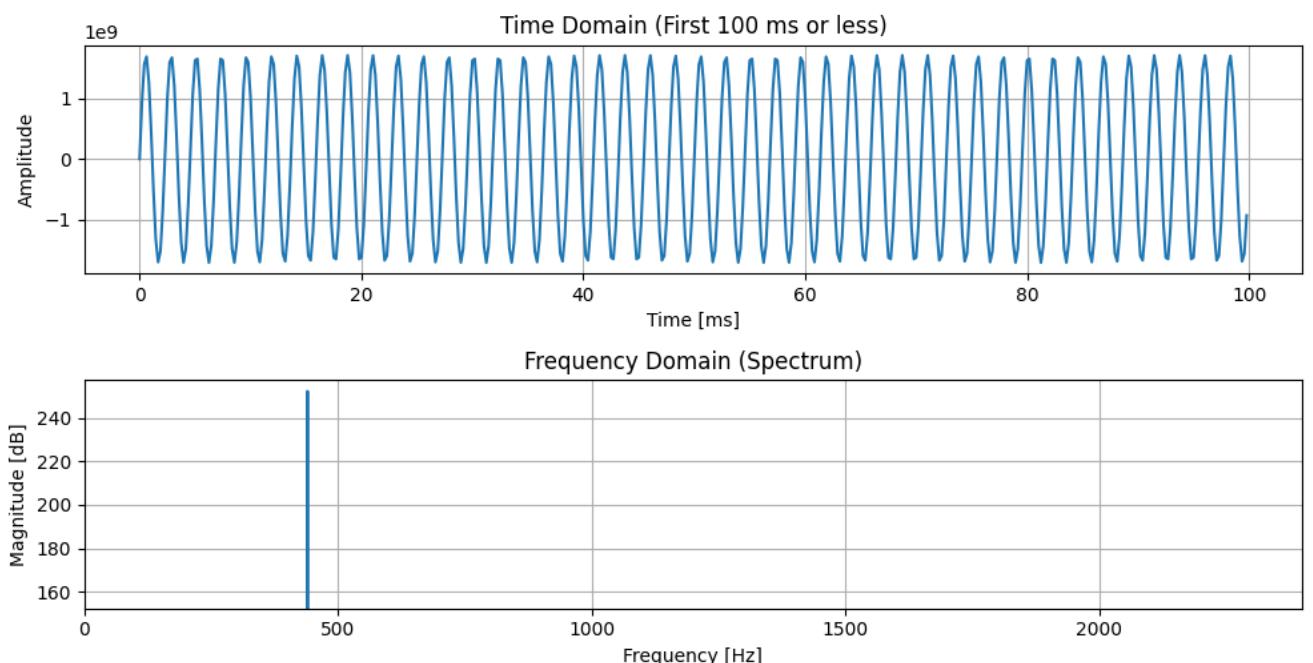
*Decymacja sin\_440 z krokiem n=4*

*sin\_440Hz - decim\_n6*

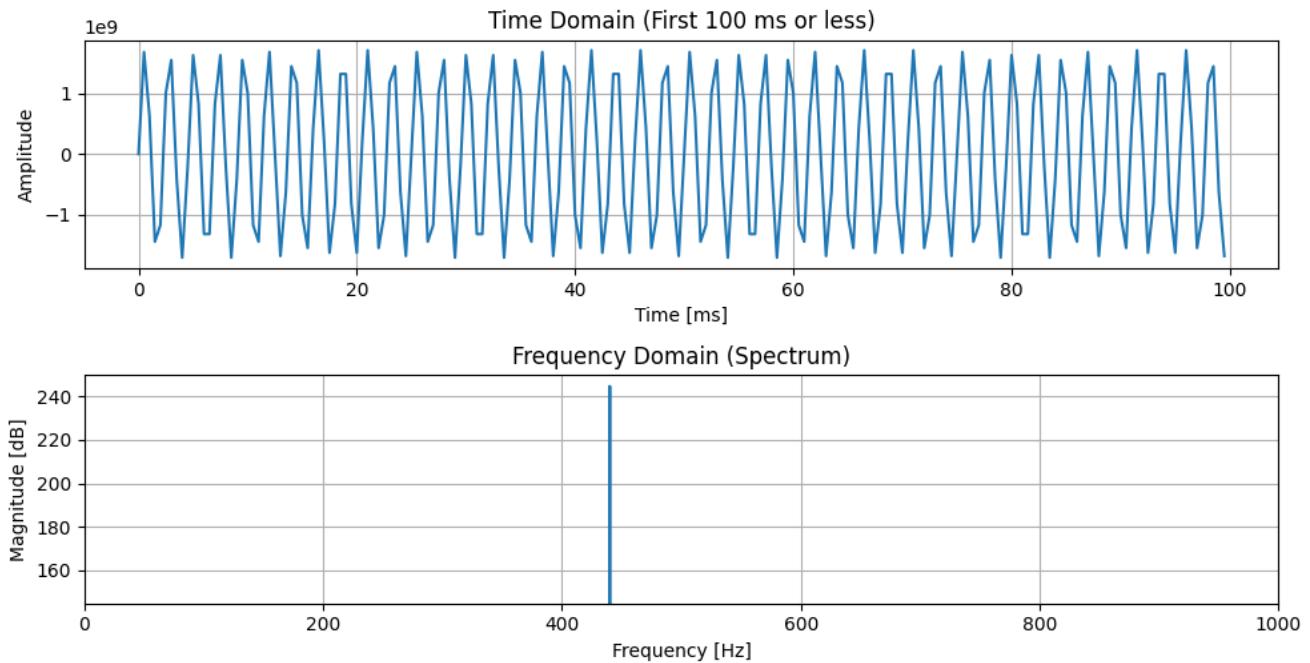


*Decymacja sin\_440 z krokiem n=6*

*sin\_440Hz - decim\_n10*



*Decymacja sin\_440 z krokiem n=10*

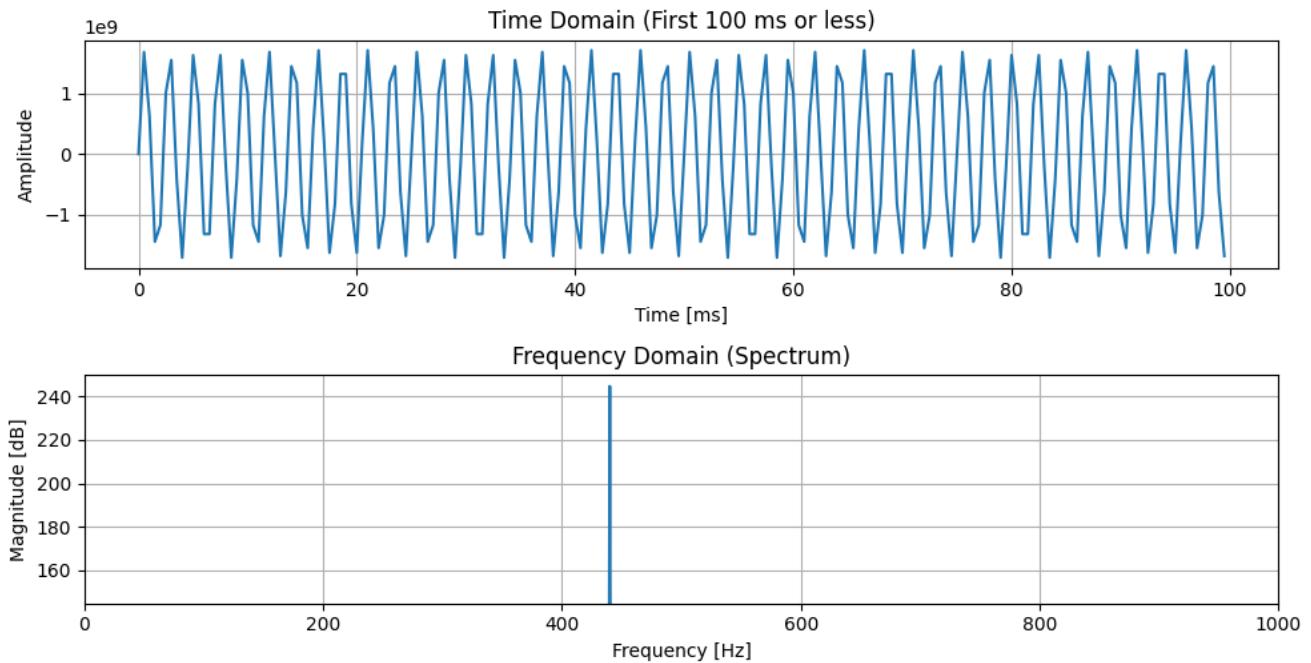


*Decymacja sin\_440 z krokiem n=24*

## Interpolacja

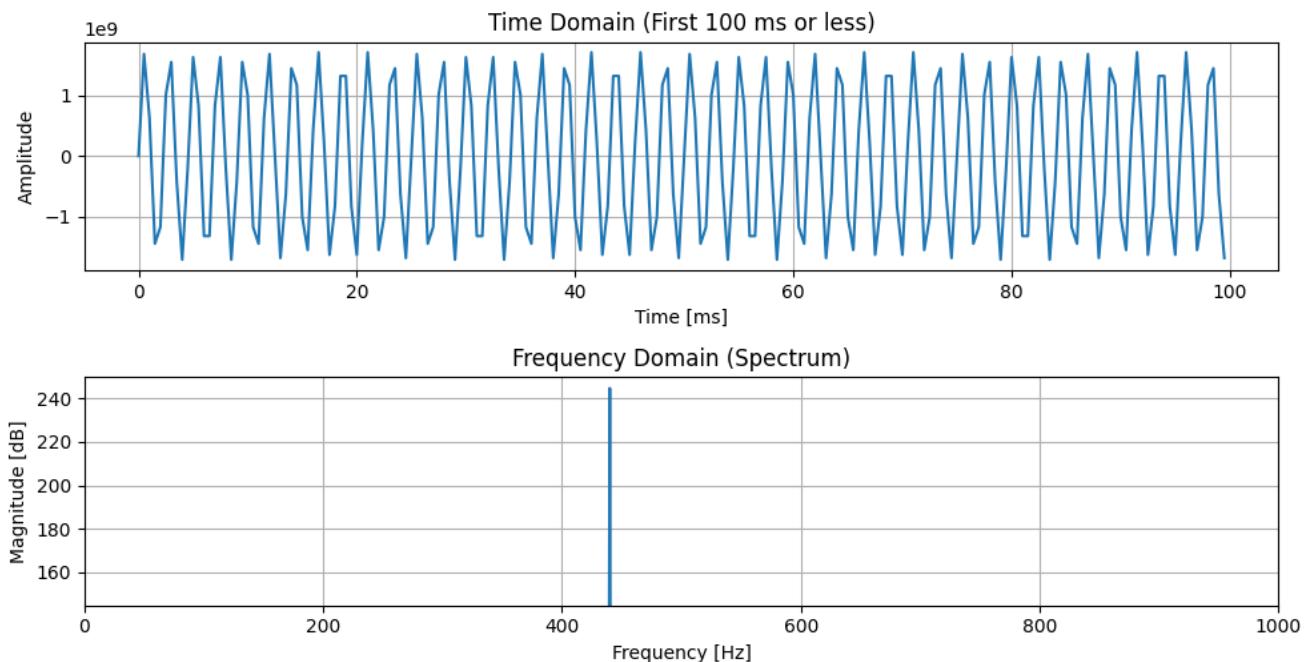
Analiza wpływu interpolacji (liniowej i sześciennnej **cubic**) na zmianę częstotliwości próbkowania. Downsampling (zmniejszenie  $F_s$ ) przez interpolację może prowadzić do utraty wysokich częstotliwości, jeśli nowa  $F_s$  jest zbyt niska (efekt podobny do filtrowania dolnoprzepustowego). Upsampling (zwiększenie  $F_s$ ) nie dodaje nowej informacji, ale może wygładzić sygnał. Interpolacja **cubic** jest zazwyczaj dokładniejsza od liniowej, ale bardziej kosztowna obliczeniowo.

*sin\_440Hz - interp\_linear\_2000Hz*



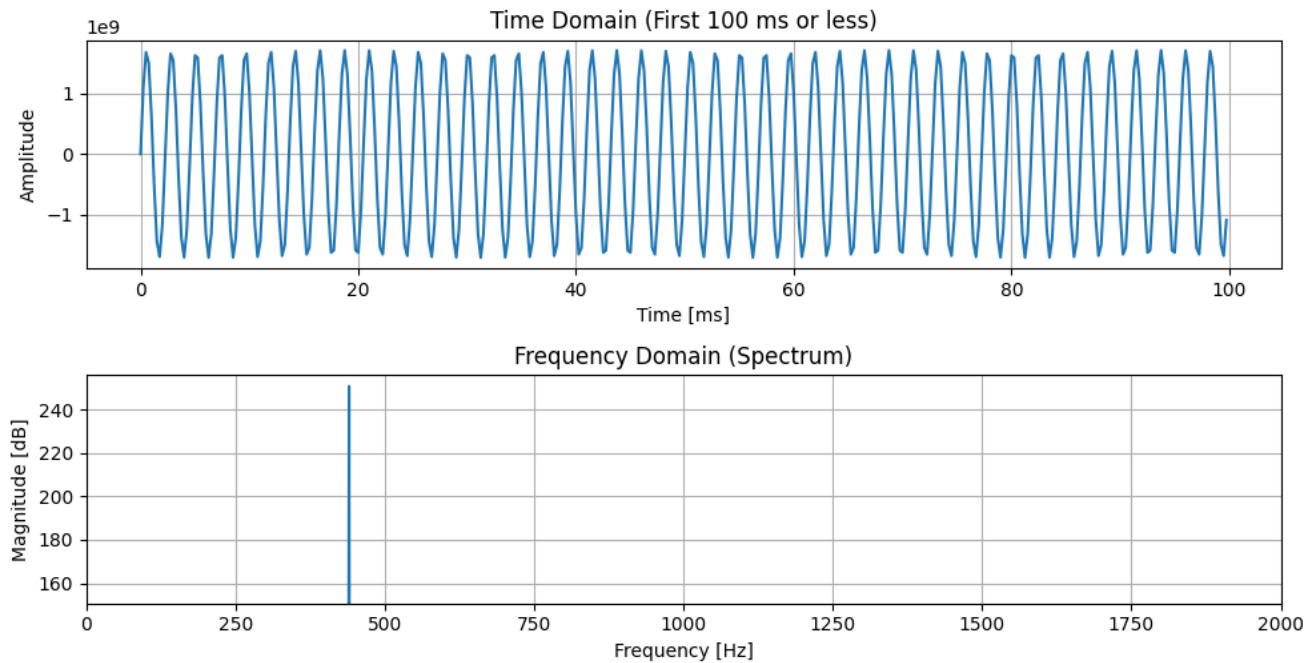
*Interpolacja sin\_440 do 2000 Hz (liniowa)*

*sin\_440Hz - interp\_cubic\_2000Hz*



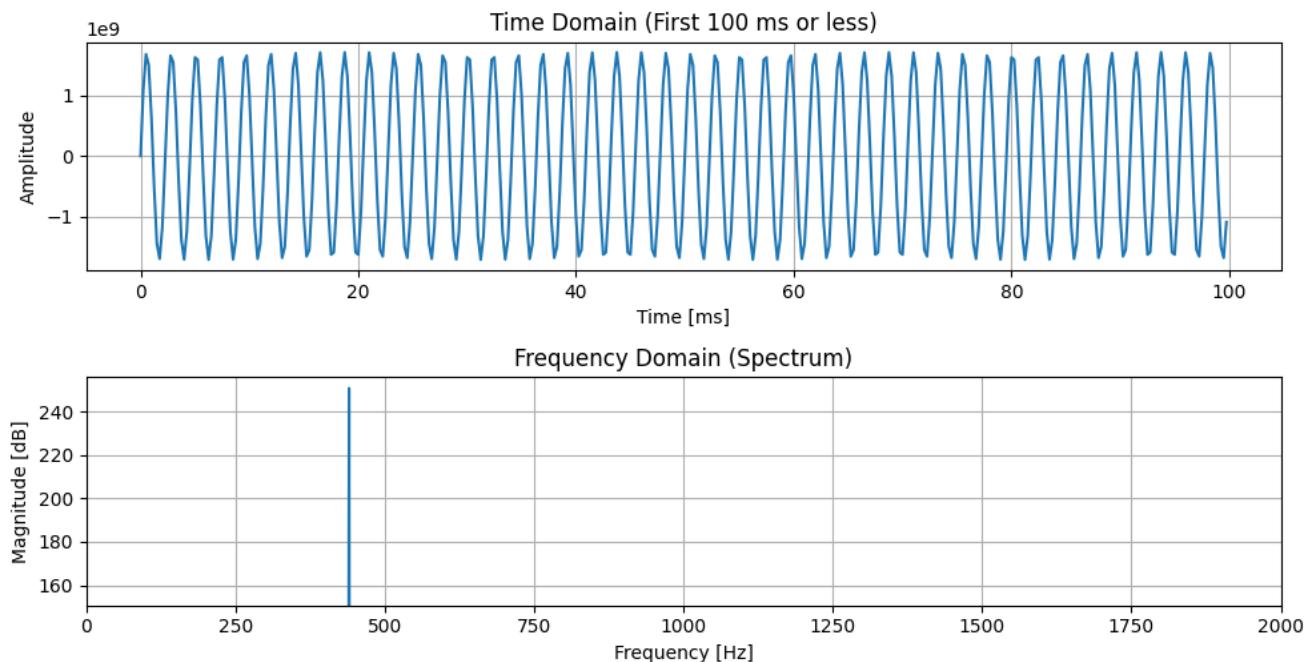
*Interpolacja sin\_440 do 2000 Hz (cubic)*

*sin\_440Hz - interp\_linear\_4000Hz*



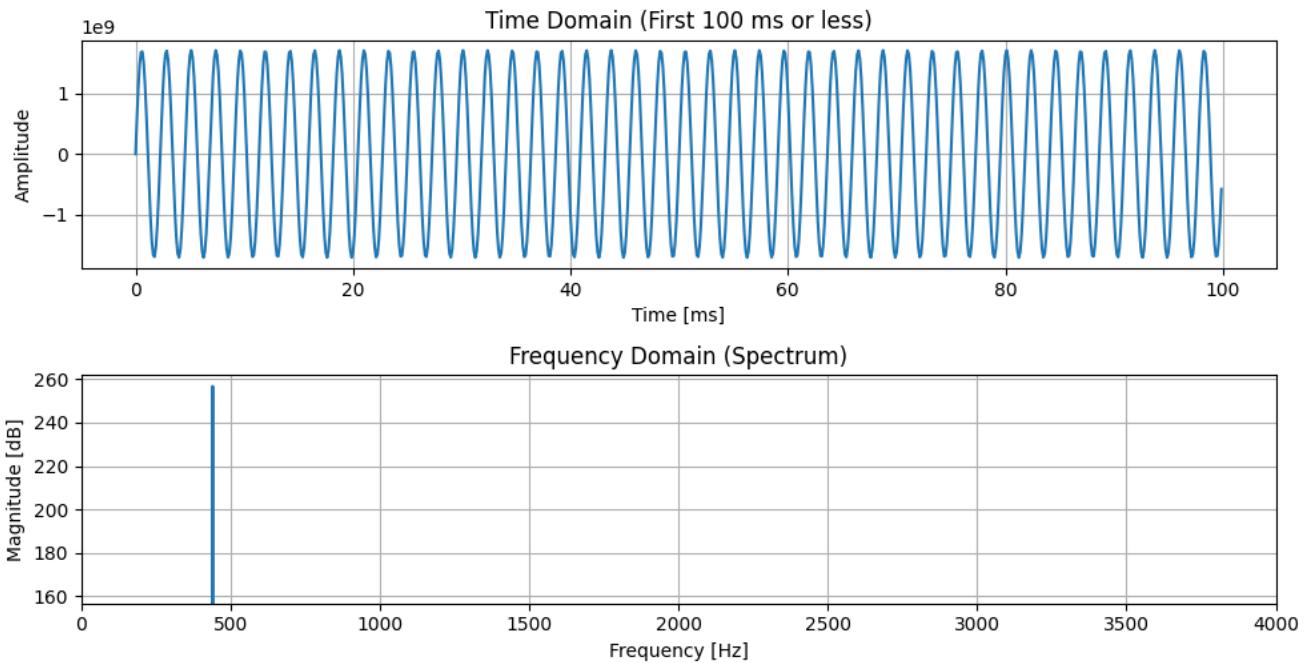
Interpolacja *sin\_440* do 4000 Hz (liniowa)

*sin\_440Hz - interp\_cubic\_4000Hz*



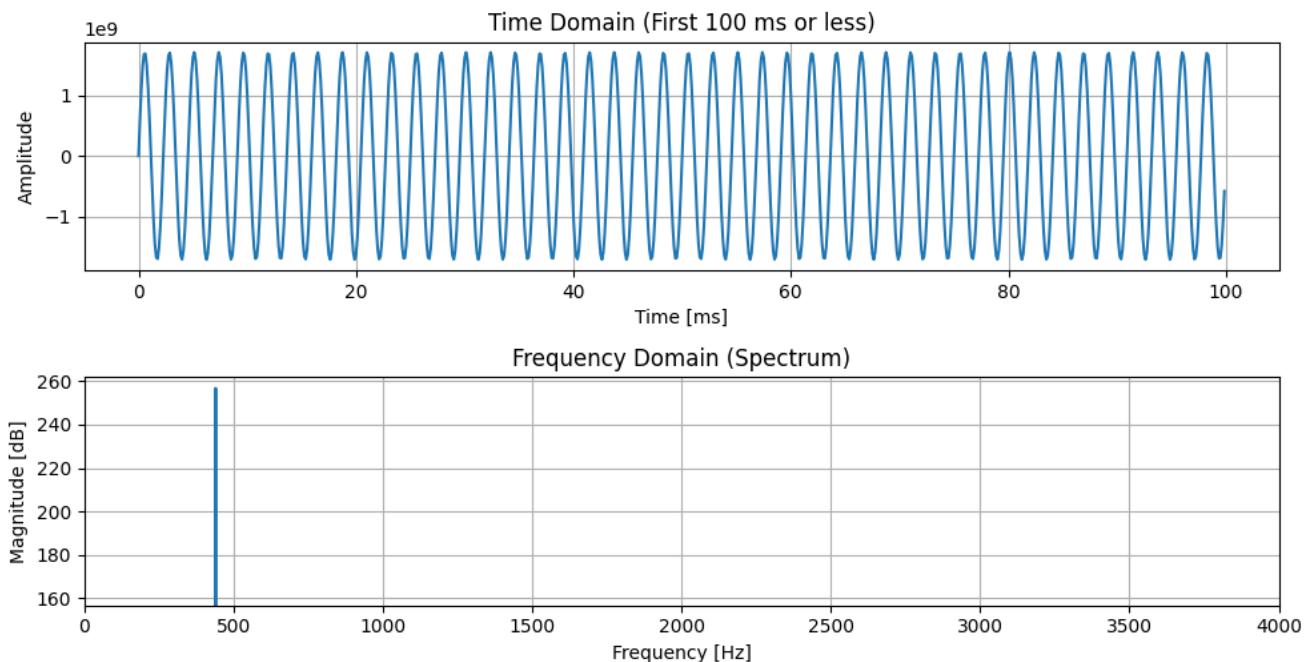
Interpolacja *sin\_440* do 4000 Hz (cubic)

*sin\_440Hz - interp\_linear\_8000Hz*



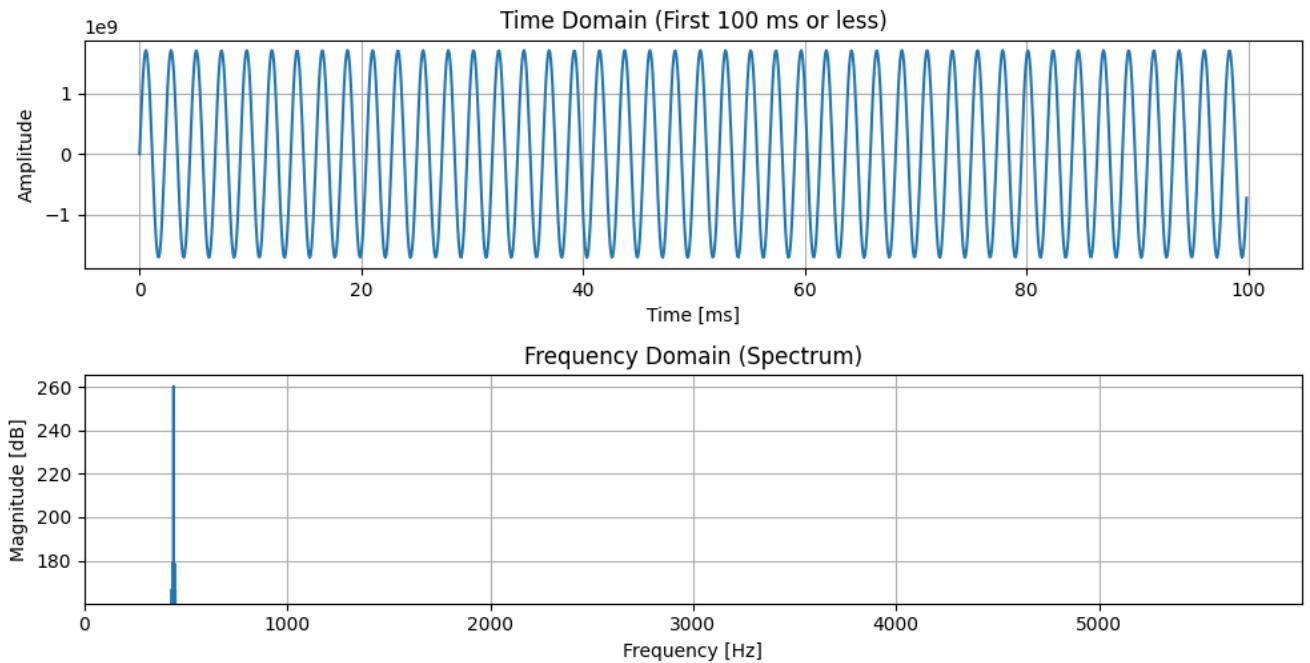
Interpolacja *sin\_440* do 8000 Hz (liniowa)

*sin\_440Hz - interp\_cubic\_8000Hz*



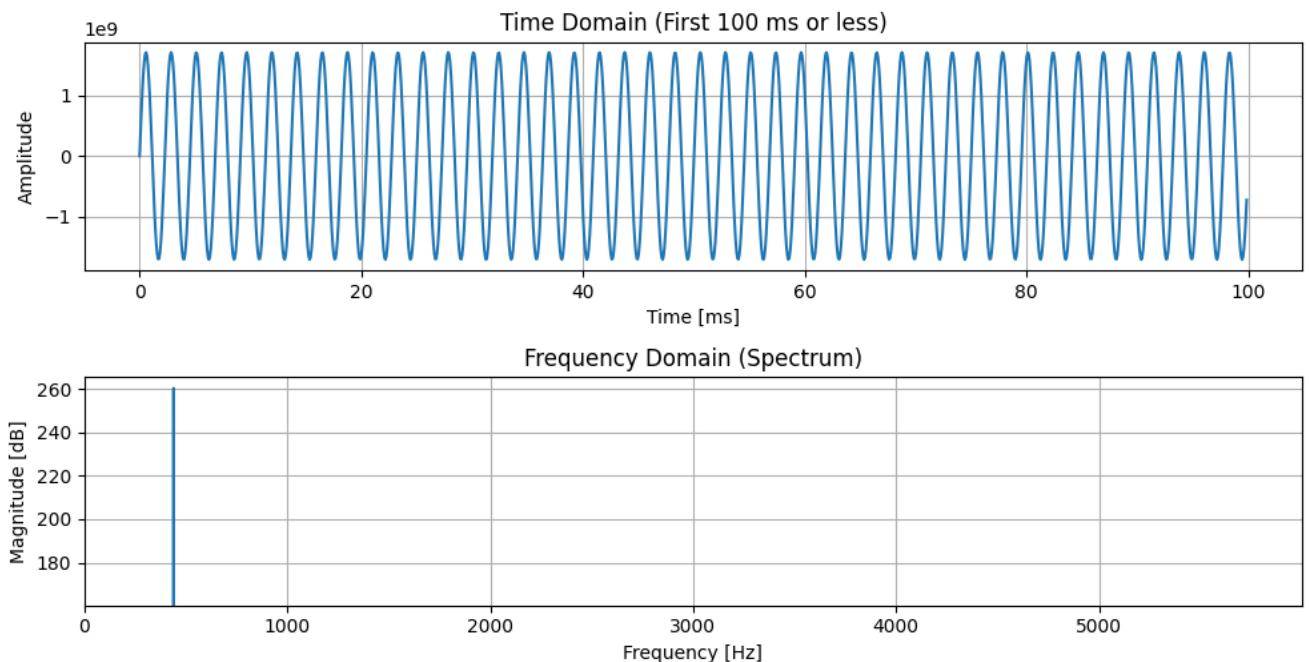
Interpolacja *sin\_440* do 8000 Hz (cubic)

*sin\_440Hz - interp\_linear\_11999Hz*



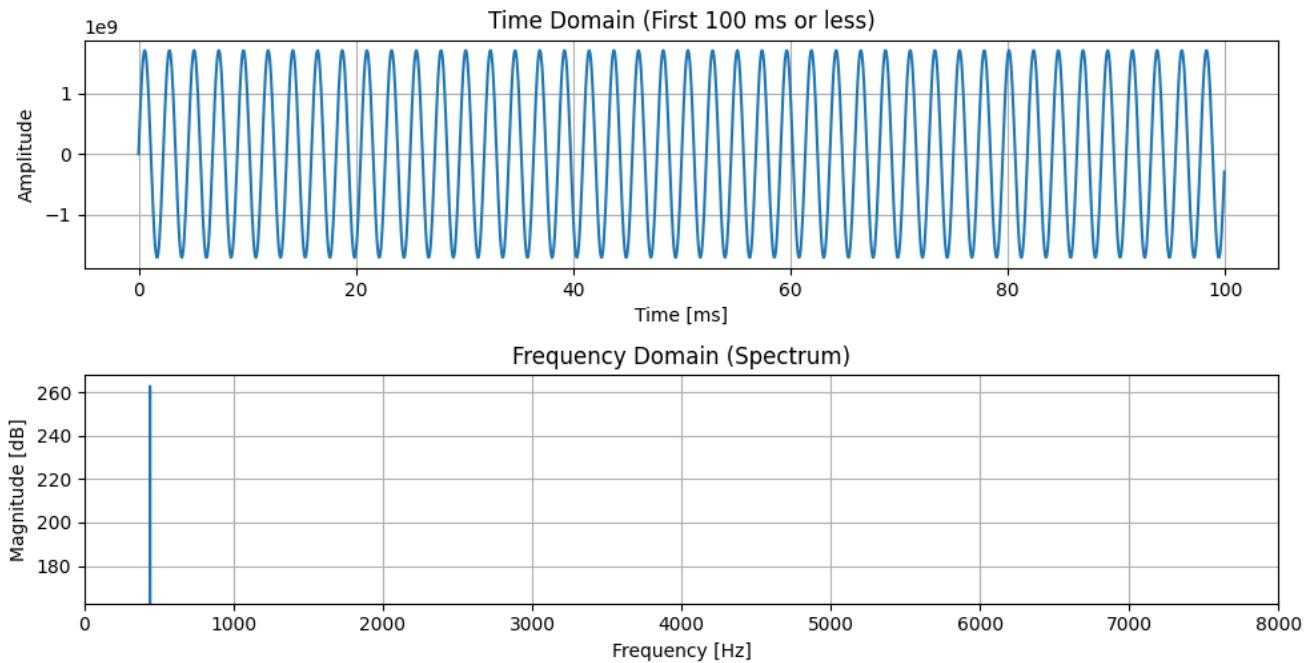
Interpolacja *sin\_440* do 11999 Hz (liniowa)

*sin\_440Hz - interp\_cubic\_11999Hz*



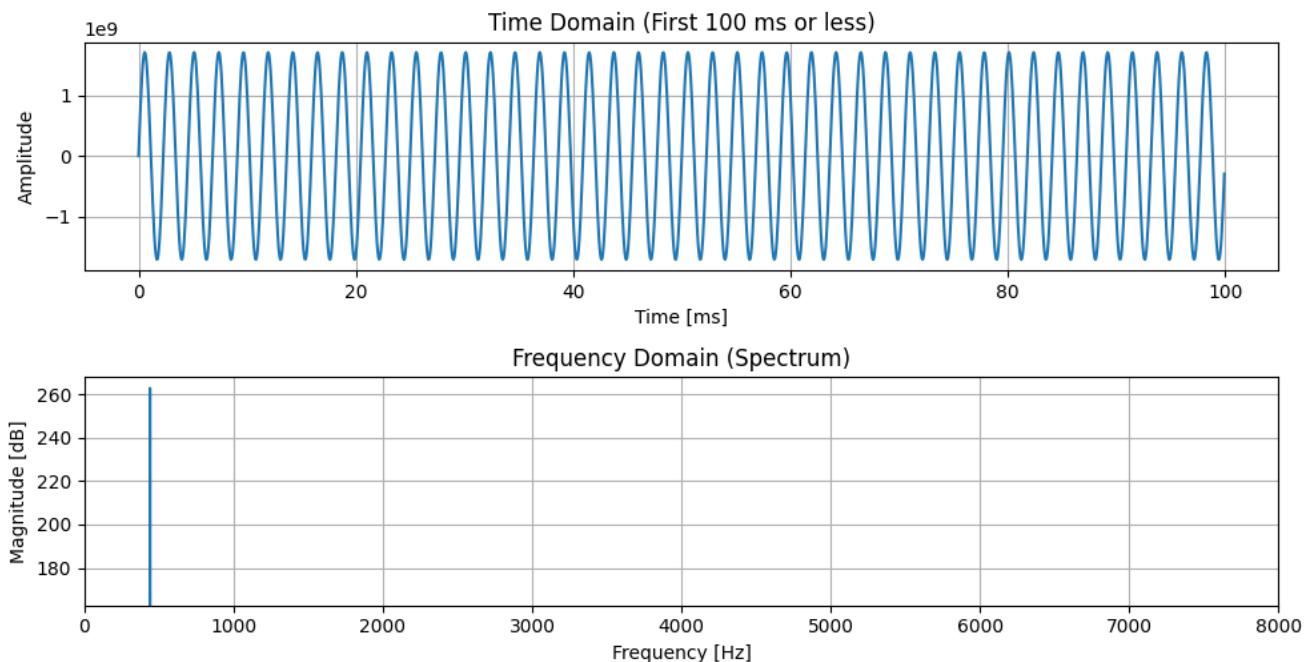
Interpolacja *sin\_440* do 11999 Hz (cubic)

*sin\_440Hz - interp\_linear\_16000Hz*



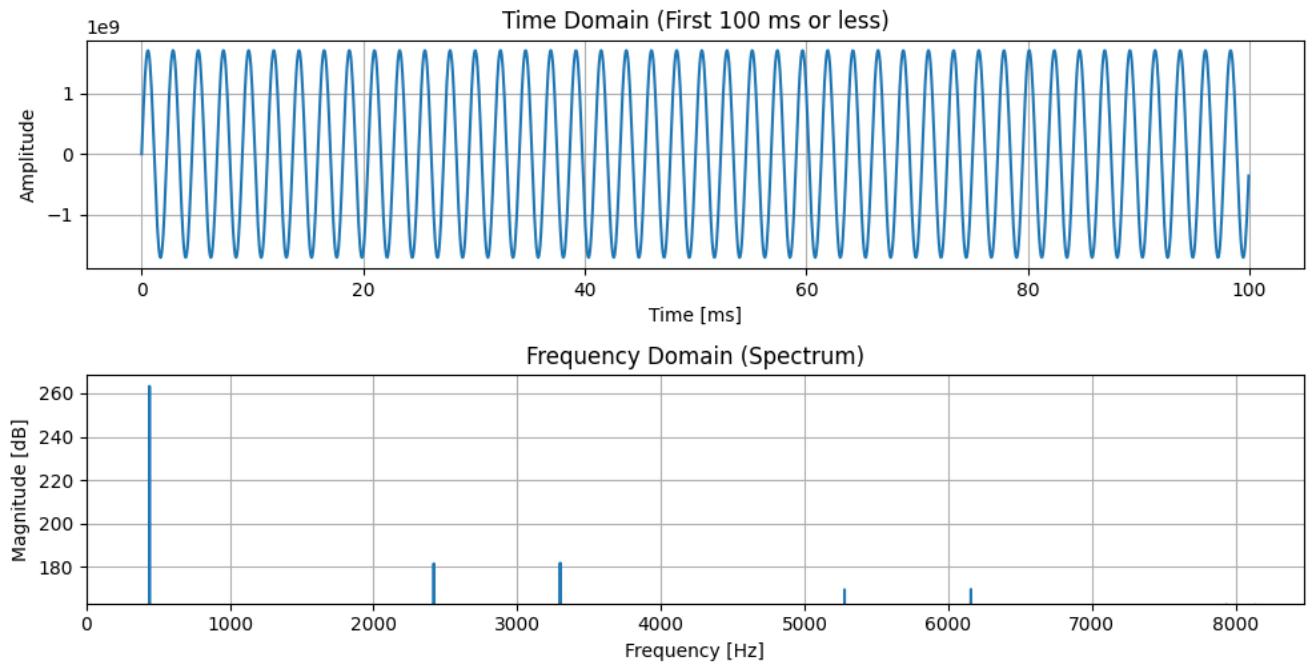
*Interpolacja sin\_440 do 16000 Hz (liniowa)*

*sin\_440Hz - interp\_cubic\_16000Hz*



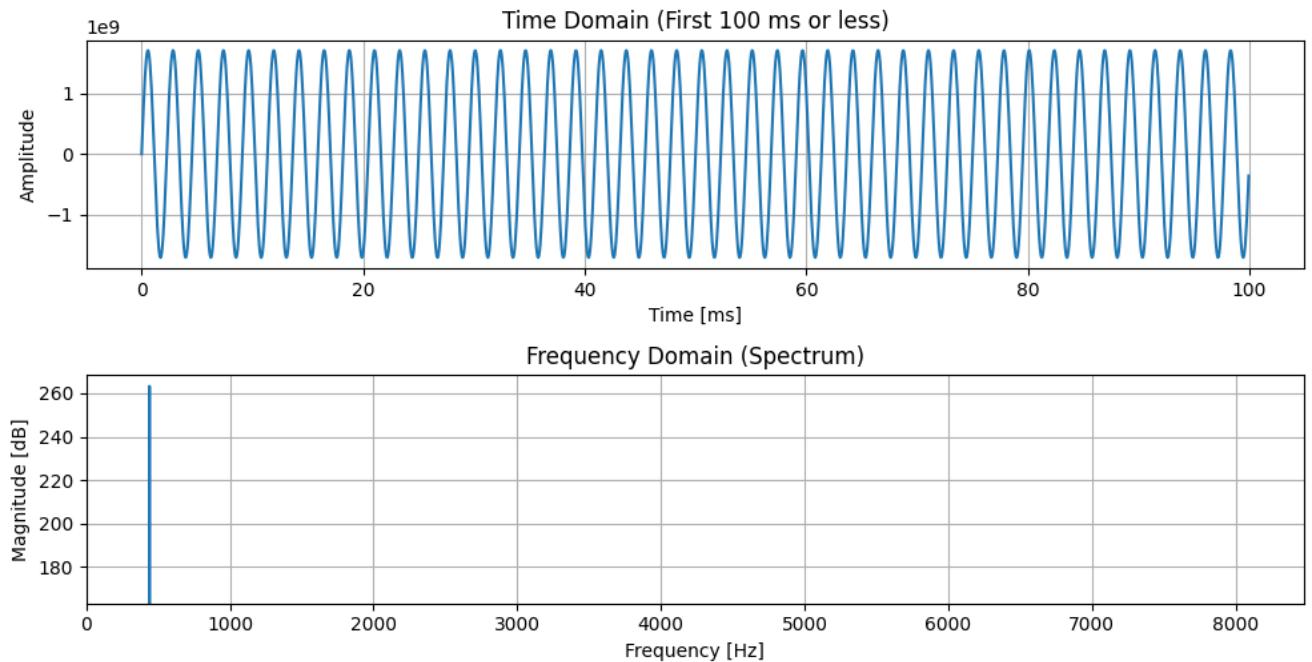
*Interpolacja sin\_440 do 16000 Hz (cubic)*

*sin\_440Hz - interp\_linear\_16953Hz*



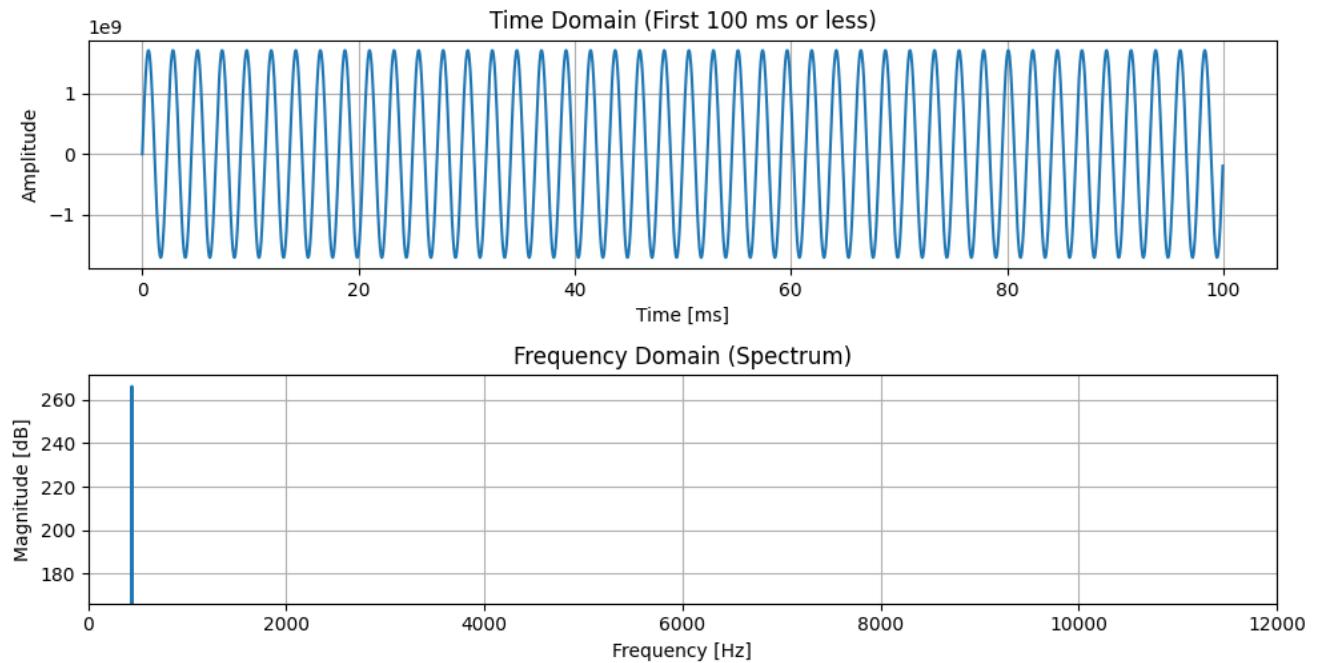
Interpolacja *sin\_440* do 16953 Hz (liniowa)

*sin\_440Hz - interp\_cubic\_16953Hz*



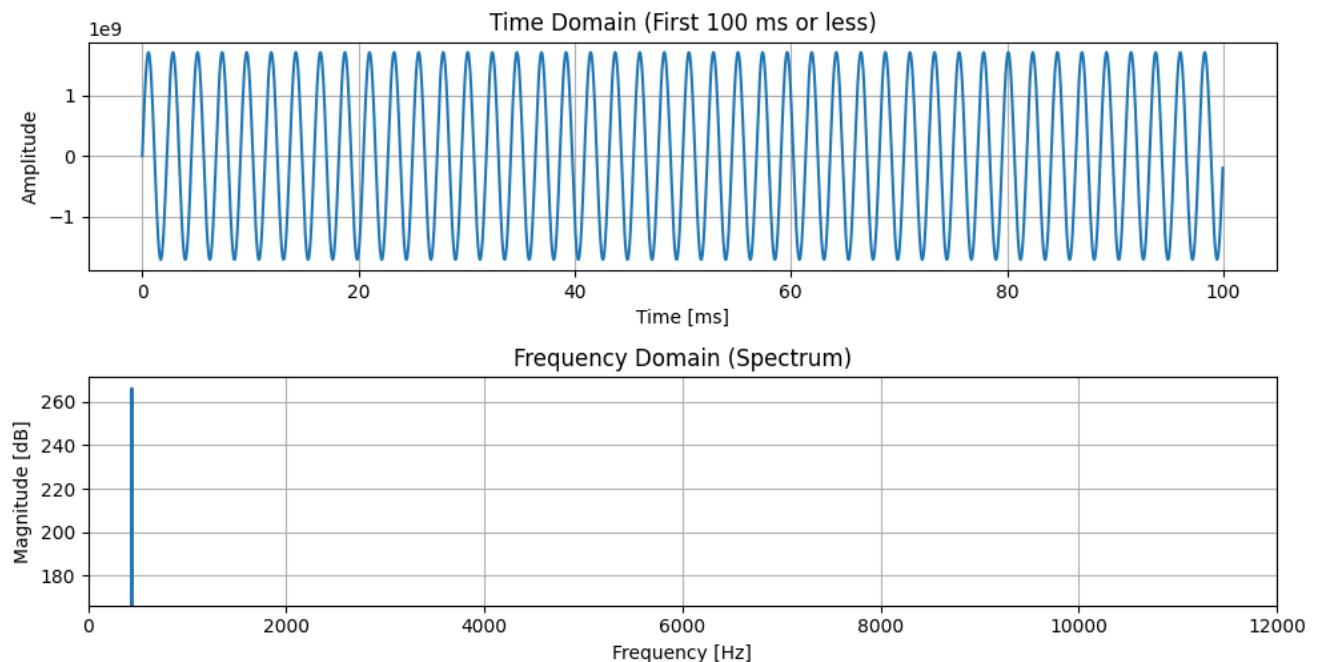
Interpolacja *sin\_440* do 16953 Hz (cubic)

*sin\_440Hz - interp\_linear\_24000Hz*



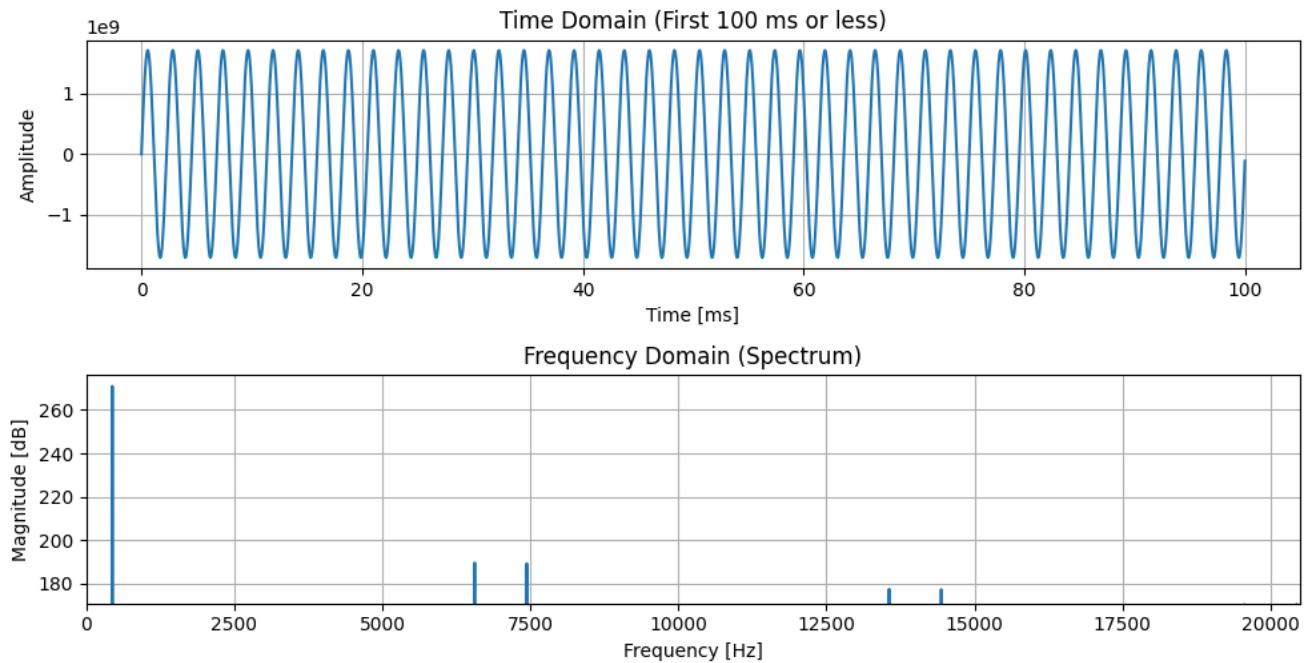
Interpolacja *sin\_440* do 24000 Hz (liniowa)

*sin\_440Hz - interp\_cubic\_24000Hz*



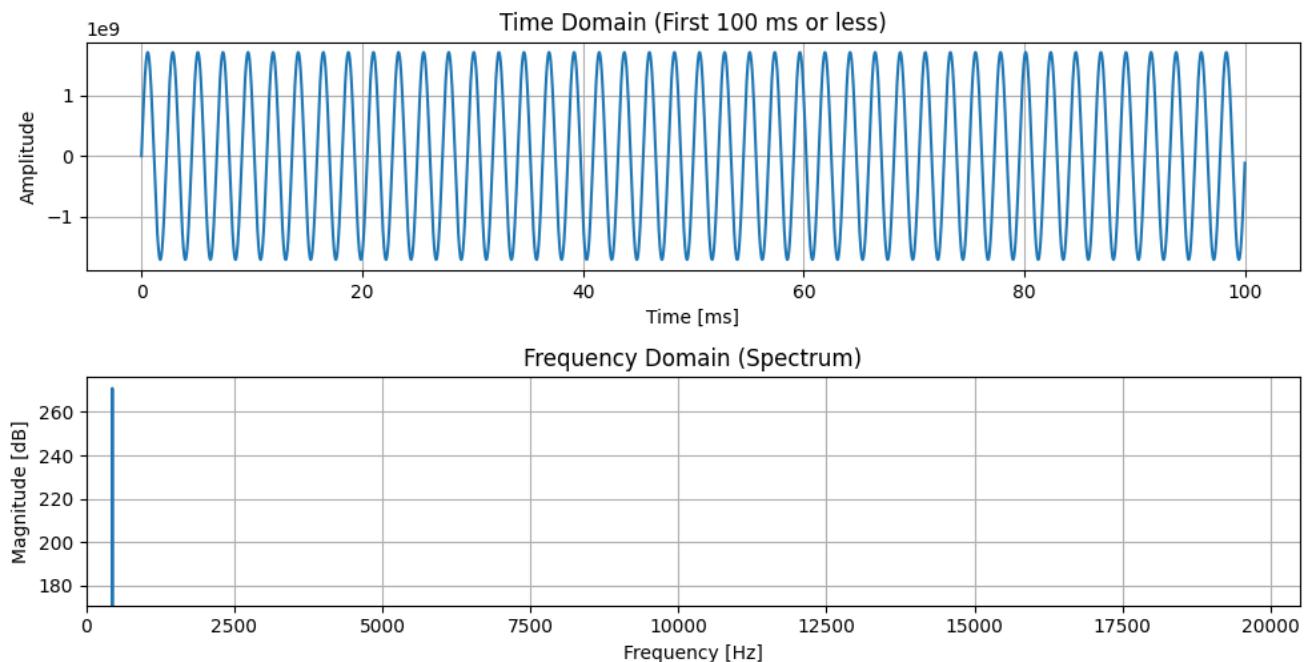
Interpolacja *sin\_440* do 24000 Hz (cubic)

*sin\_440Hz - interp\_linear\_41000Hz*



Interpolacja *sin\_440* do 41000 Hz (liniowa)

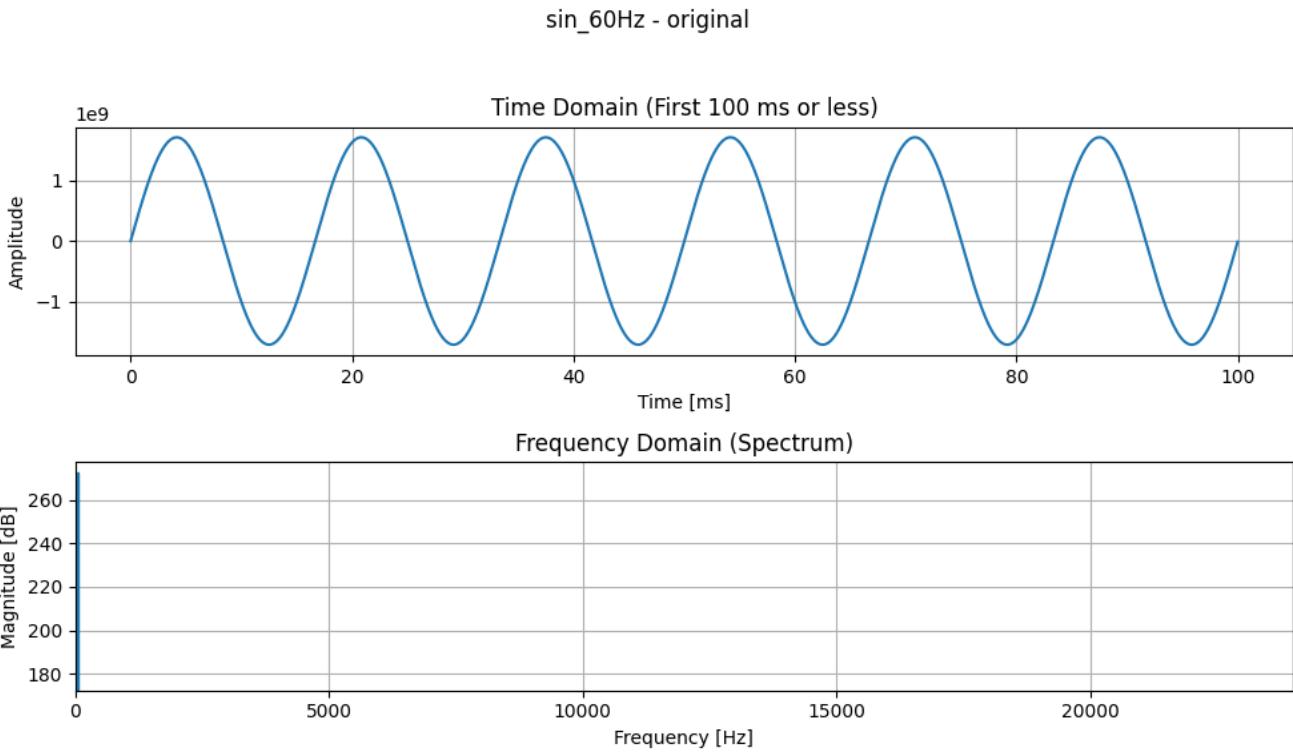
*sin\_440Hz - interp\_cubic\_41000Hz*



Interpolacja *sin\_440* do 41000 Hz (cubic)

Plik: *sin\_60*

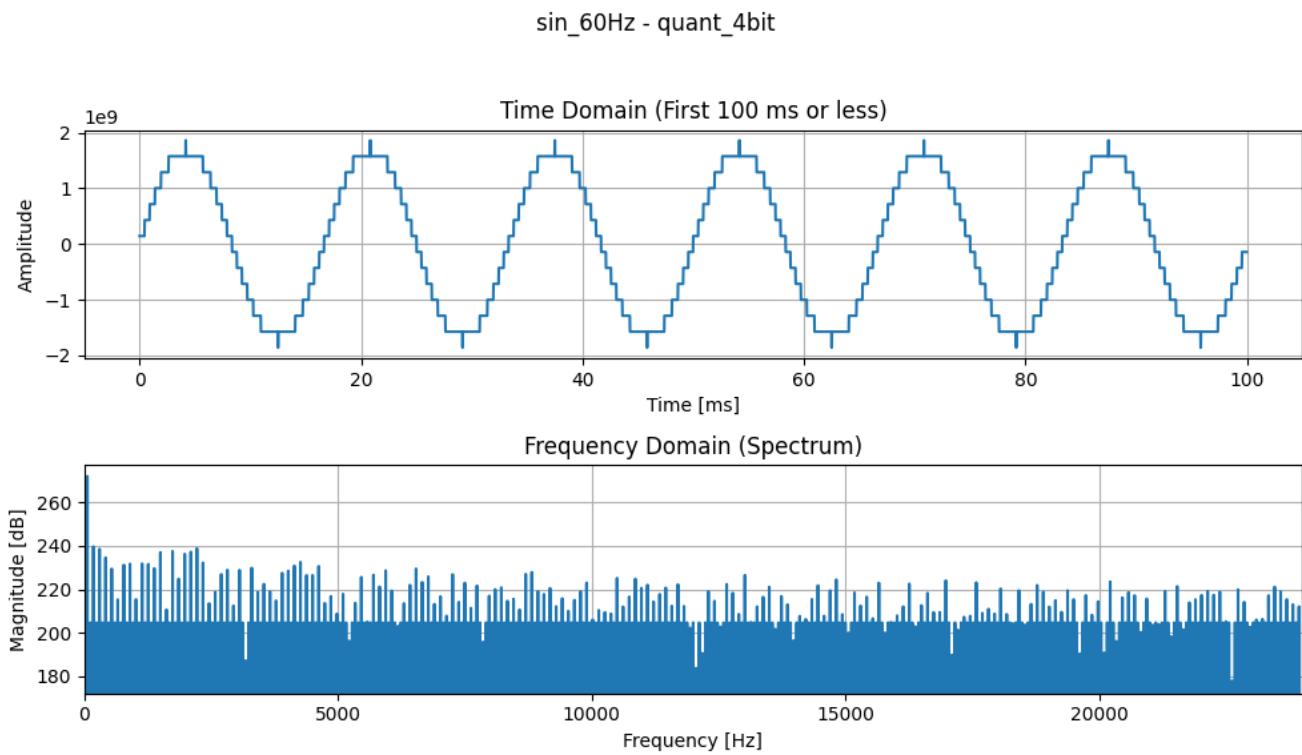
Oryginał



Wykres oryginalnego sygnału **sin\_60**

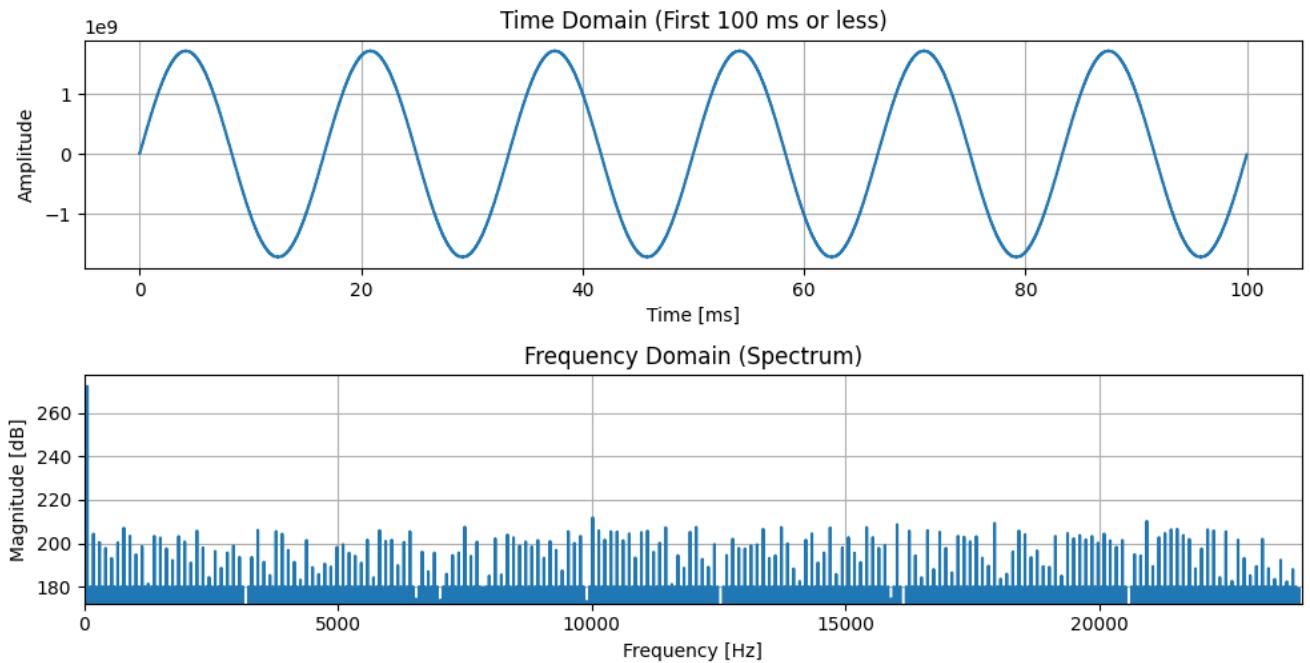
## Kwantyzacja

Analiza wpływu kwantyzacji na sygnał sinusoidalny. Wraz ze zmniejszaniem liczby bitów oczekuje się pojawienia się szumu kwantyzacji, widocznego jako dodatkowe składowe harmoniczne w widmie oraz "schodkowanie" sygnału w dziedzinie czasu.



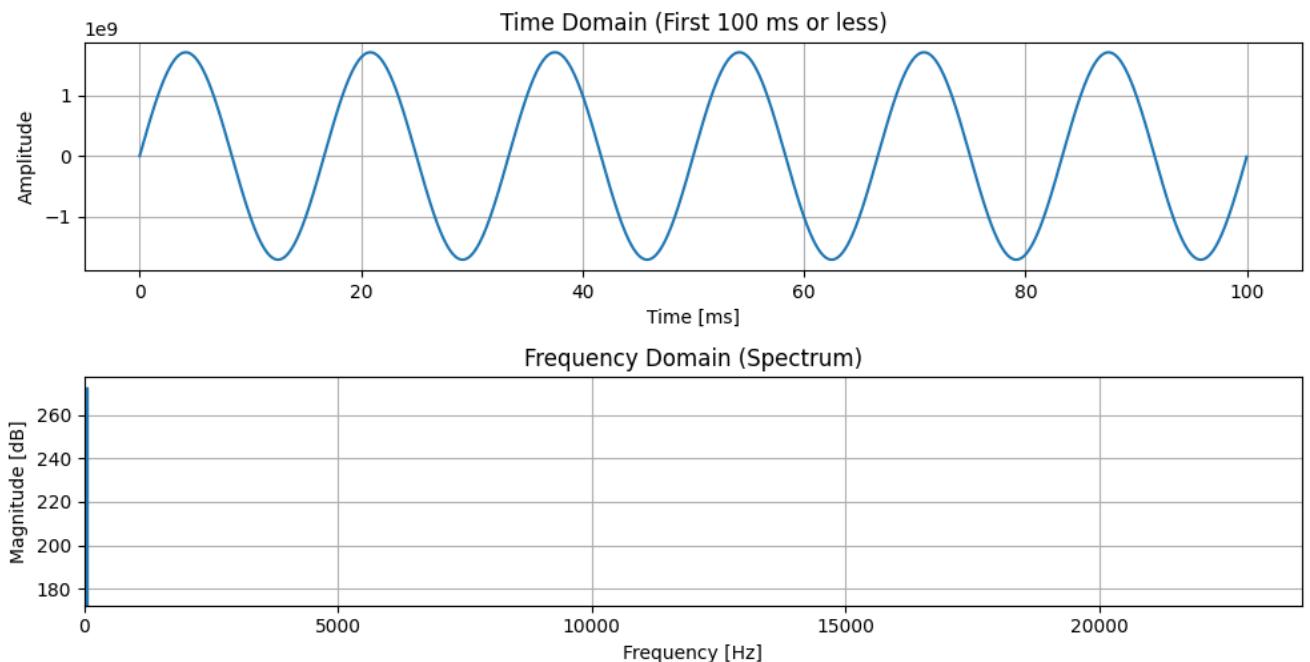
Kwantyzacja **sin\_60** do 4 bitów

*sin\_60Hz - quant\_8bit*



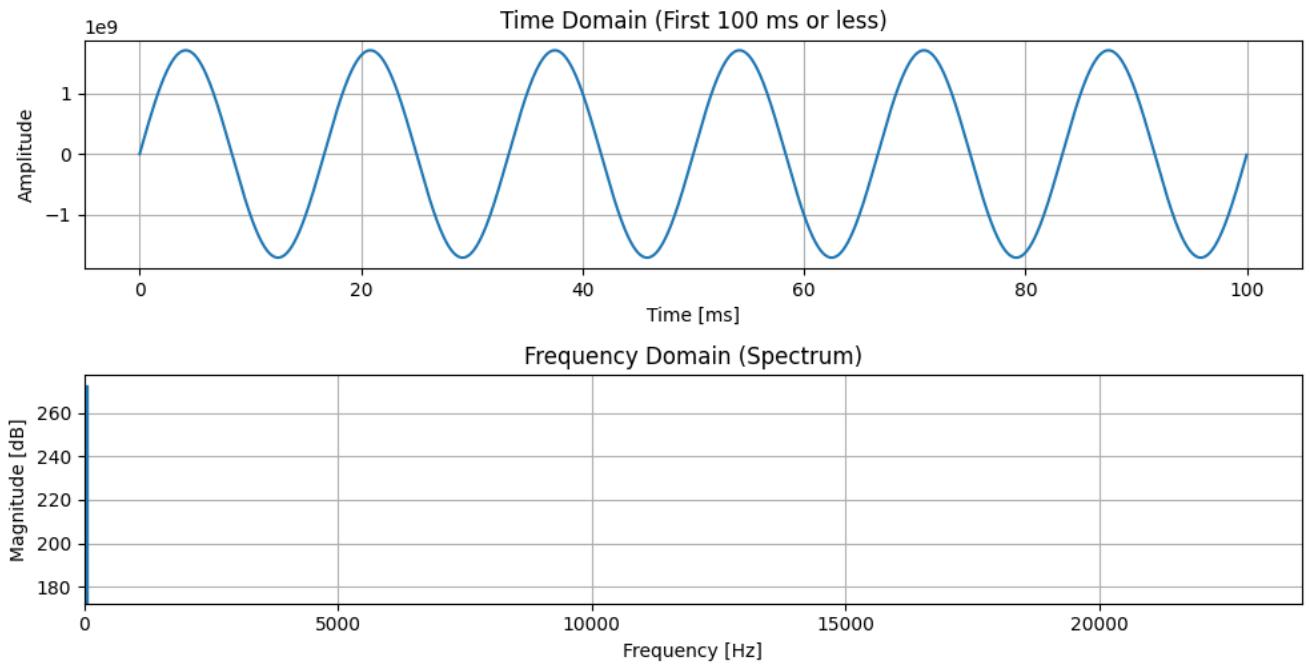
*Kwantyzacja sin\_60 do 8 bitów*

*sin\_60Hz - quant\_16bit*



*Kwantyzacja sin\_60 do 16 bitów*

sin\_60Hz - quant\_24bit

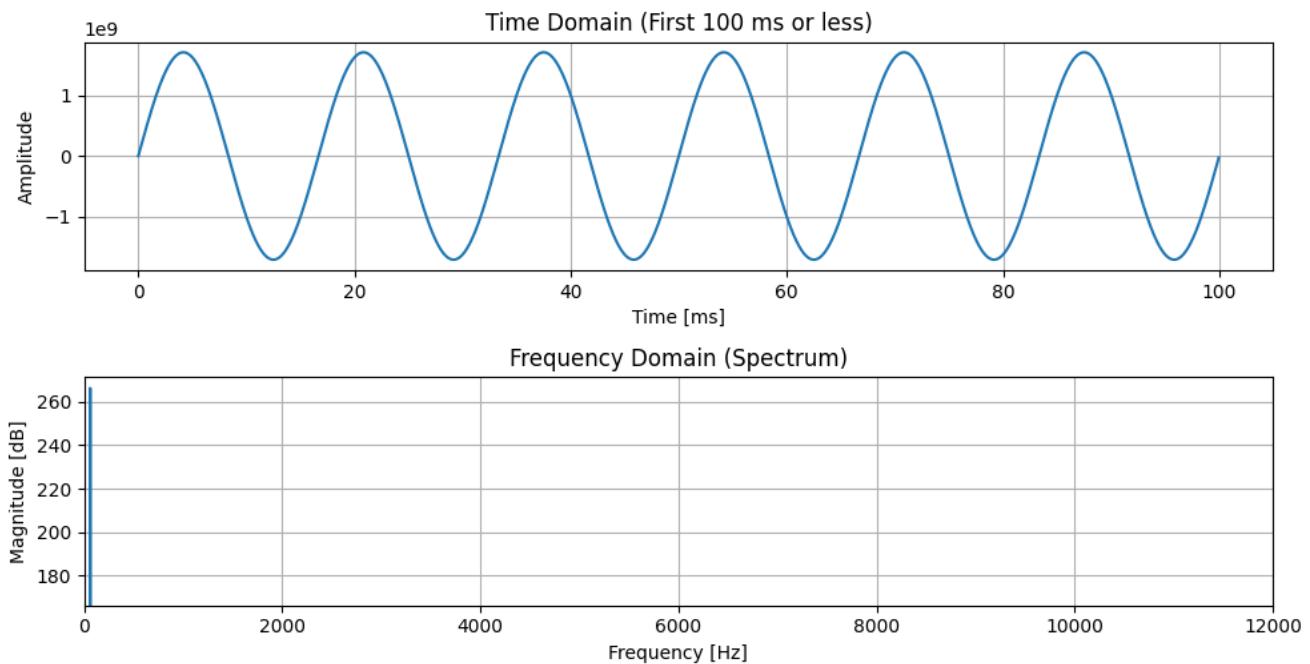


Kwantyzacja sin\_60 do 24 bitów

## Decymacja

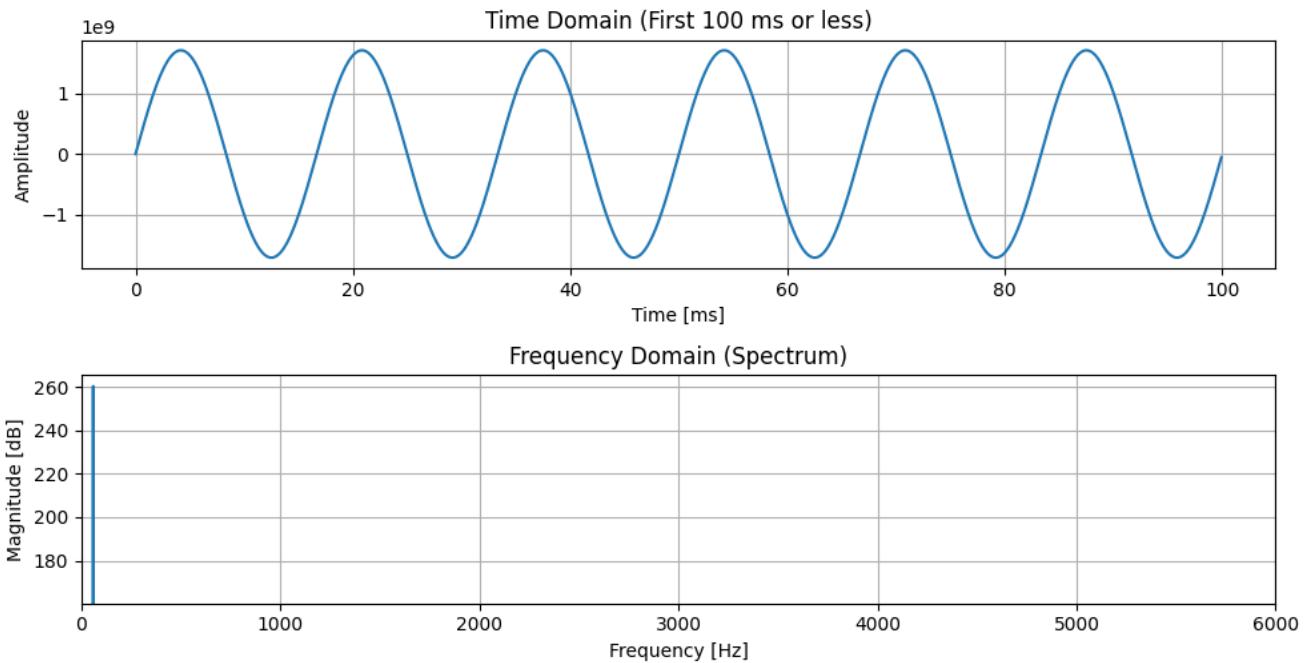
Analiza wpływu decymacji. Decymacja zmniejsza częstotliwość próbkowania  $F_s$ . Jeśli nowa częstotliwość Nyquista ( $F_s/n / 2$ ) jest niższa niż najwyższa częstotliwość w sygnale, wystąpi aliasing, widoczny jako pojawienie się "fałszywych" częstotliwości w widmie.

sin\_60Hz - decim\_n2



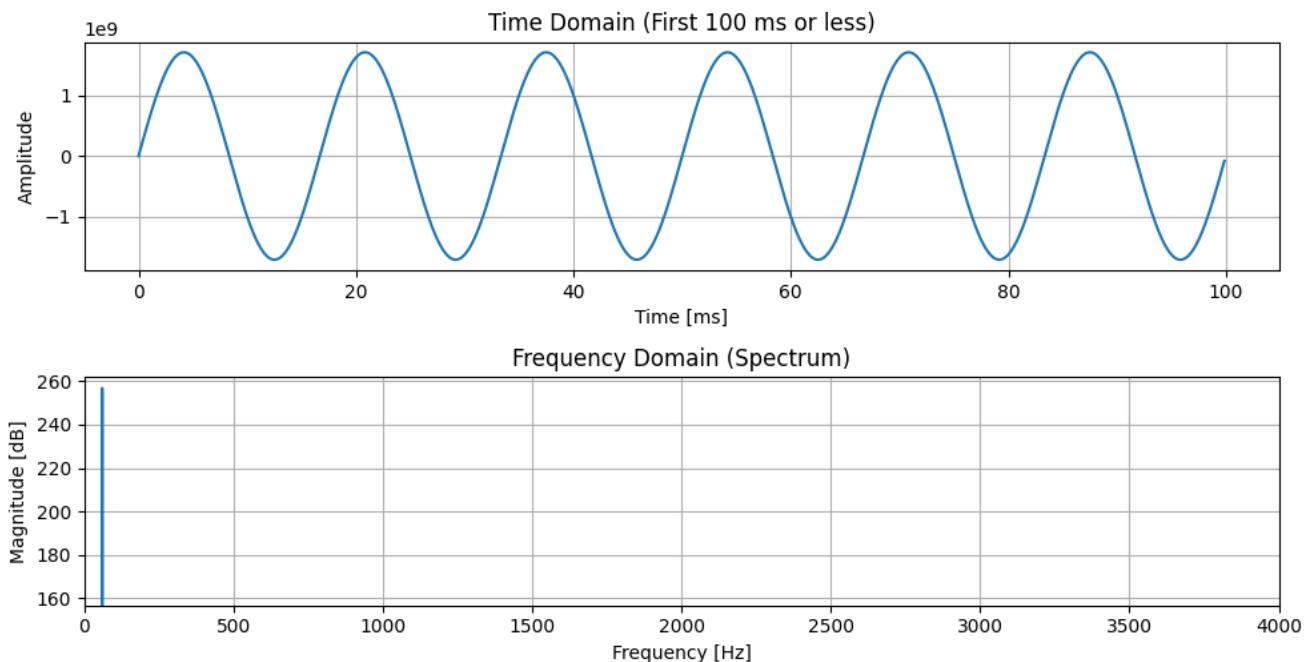
Decymacja sin\_60 z krokiem n=2

*sin\_60Hz - decim\_n4*



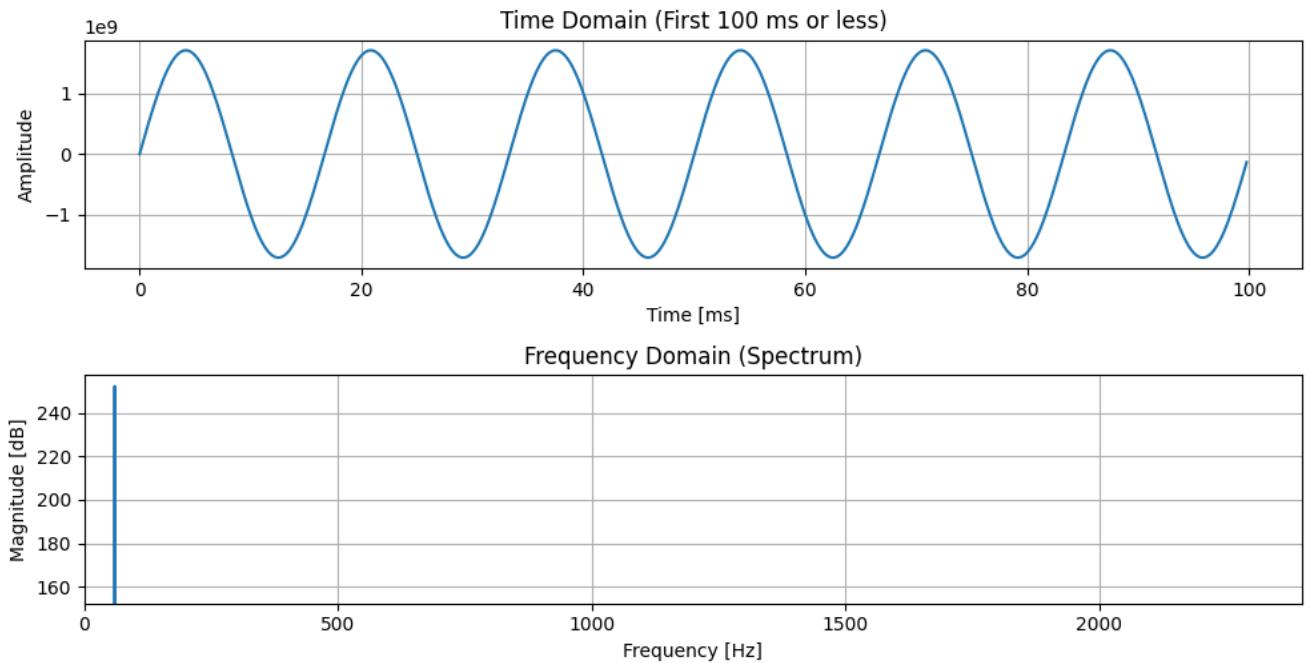
Decymacja *sin\_60* z krokiem  $n=4$

*sin\_60Hz - decim\_n6*



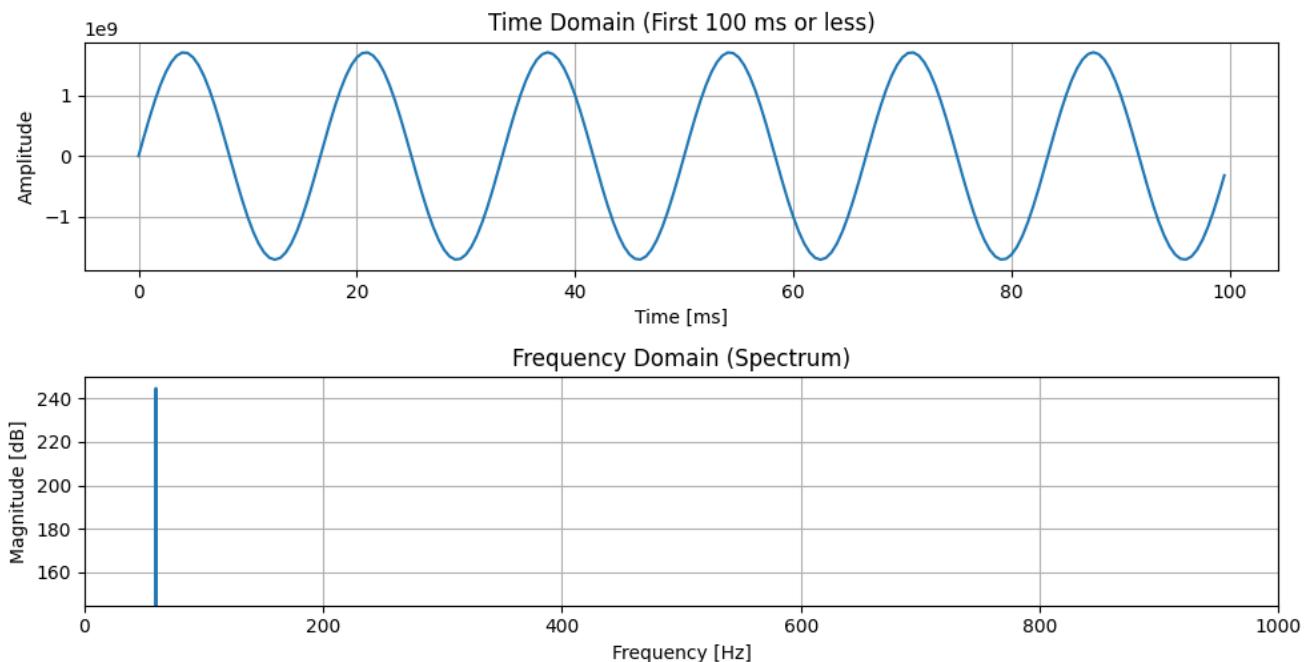
Decymacja *sin\_60* z krokiem  $n=6$

### *sin\_60Hz - decim\_n10*



Decymacja *sin\_60* z krokiem n=10

### *sin\_60Hz - decim\_n24*



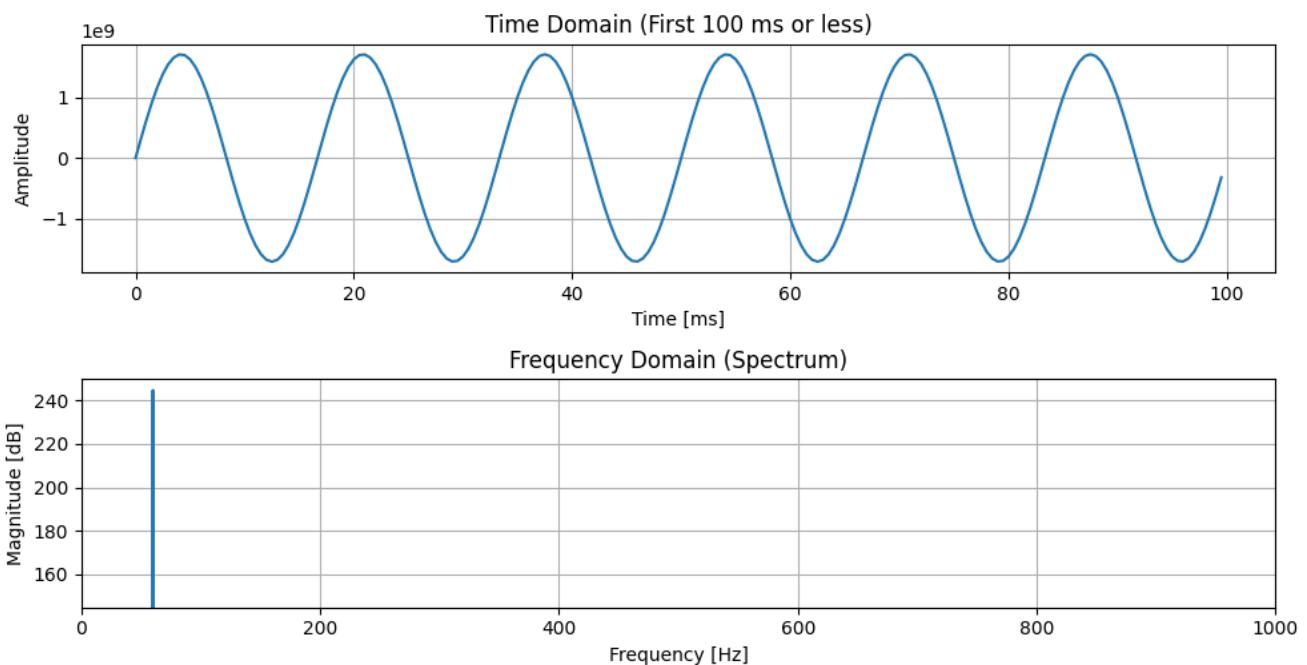
Decymacja *sin\_60* z krokiem n=24

## Interpolacja

Analiza wpływu interpolacji (liniowej i sześciennnej **cubic**) na zmianę częstotliwości próbkowania. Downsampling (zmnieszenie Fs) przez interpolację może prowadzić do utraty wysokich częstotliwości, jeśli nowa Fs jest zbyt niska (efekt podobny do filtrowania dolnoprzepustowego). Upsampling (zwiększenie Fs) nie dodaje nowej informacji, ale może wygładzić sygnał. Interpolacja

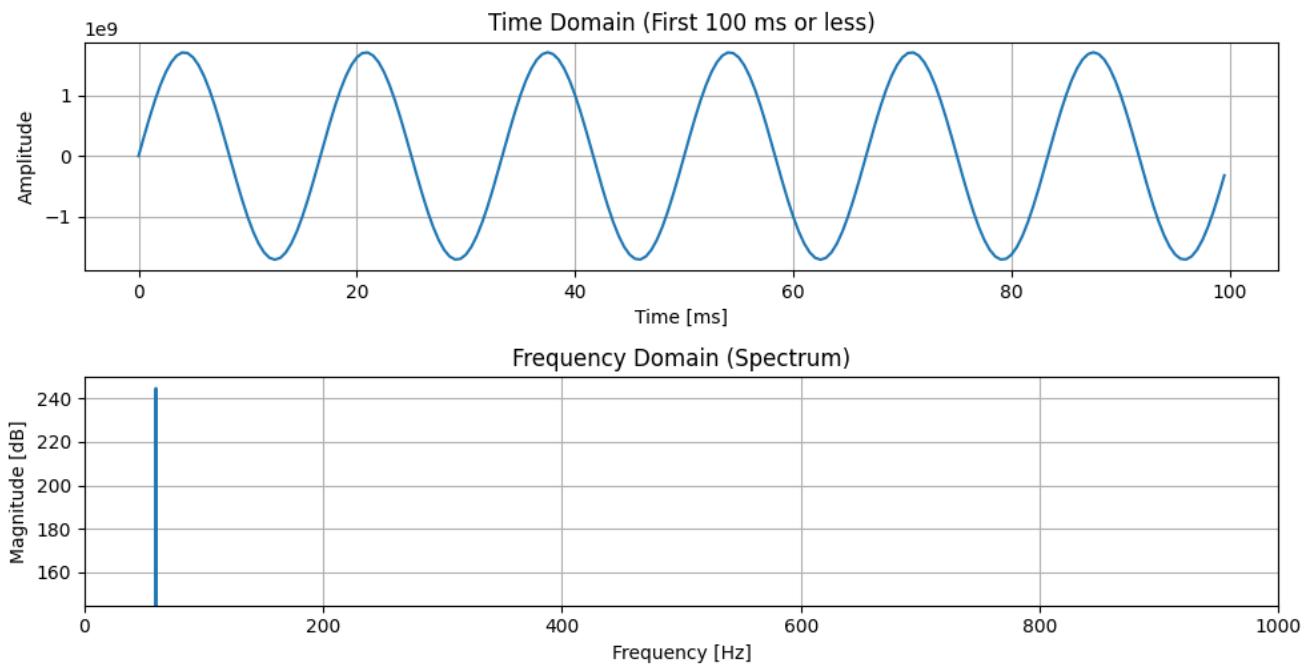
**cubic** jest zazwyczaj dokładniejsza od liniowej, ale bardziej kosztowna obliczeniowo.

sin\_60Hz - interp\_linear\_2000Hz



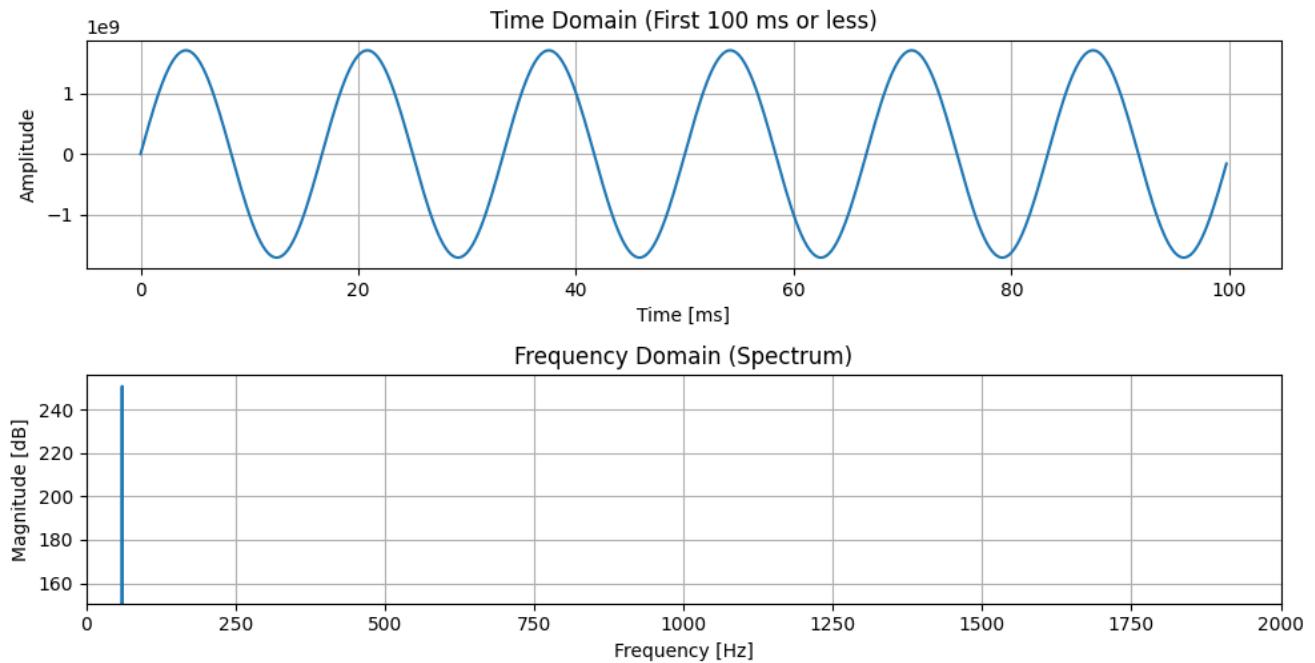
Interpolacja sin\_60 do 2000 Hz (liniowa)

sin\_60Hz - interp\_cubic\_2000Hz



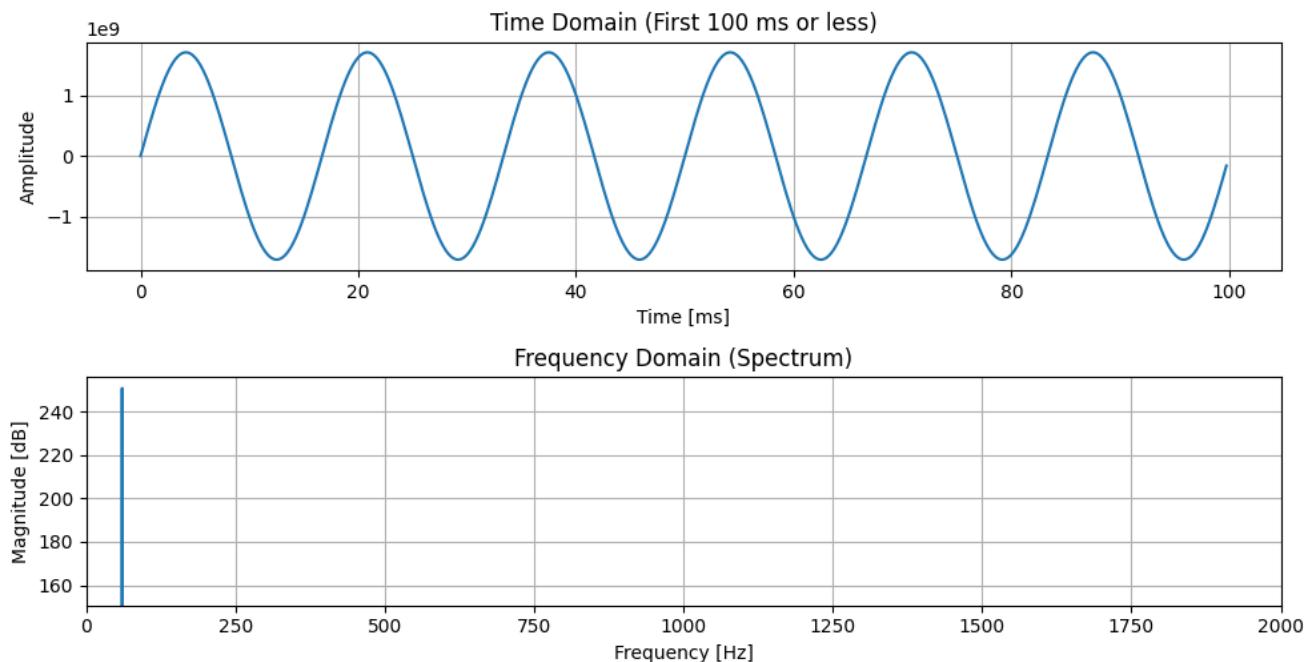
Interpolacja sin\_60 do 2000 Hz (cubic)

### $\sin_{60\text{Hz}}$ - interp\_linear\_4000Hz



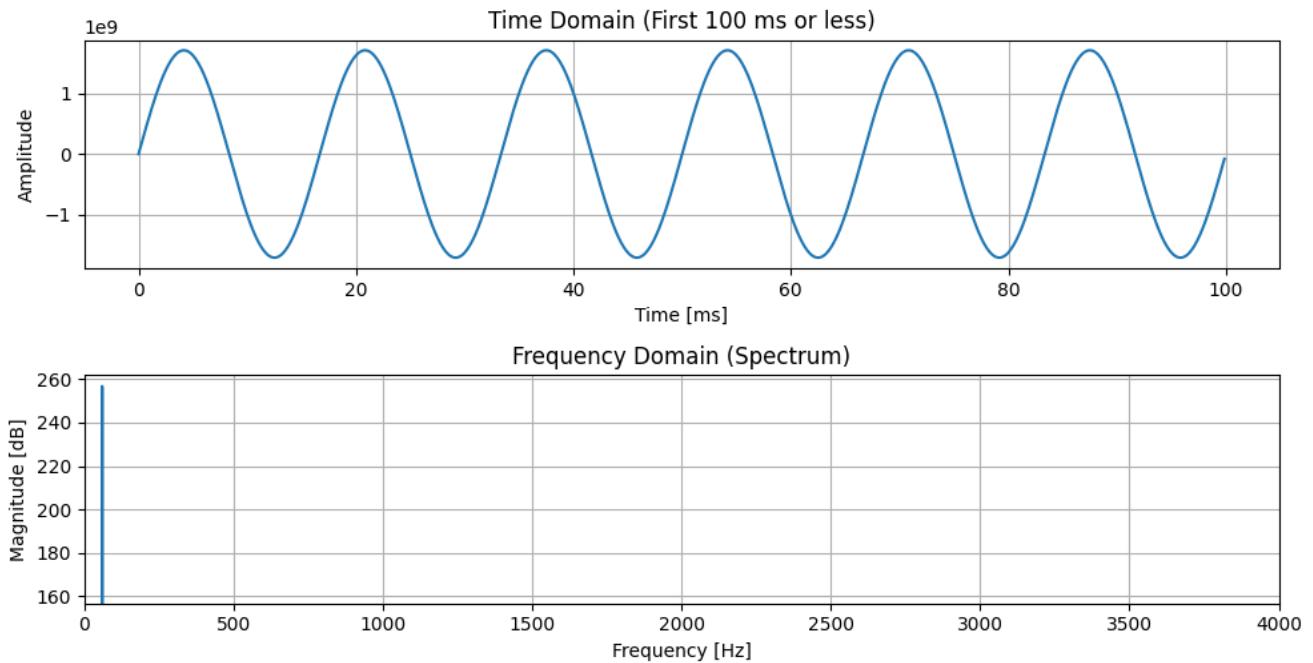
Interpolacja  $\sin_{60}$  do 4000 Hz (liniowa)

### $\sin_{60\text{Hz}}$ - interp\_cubic\_4000Hz



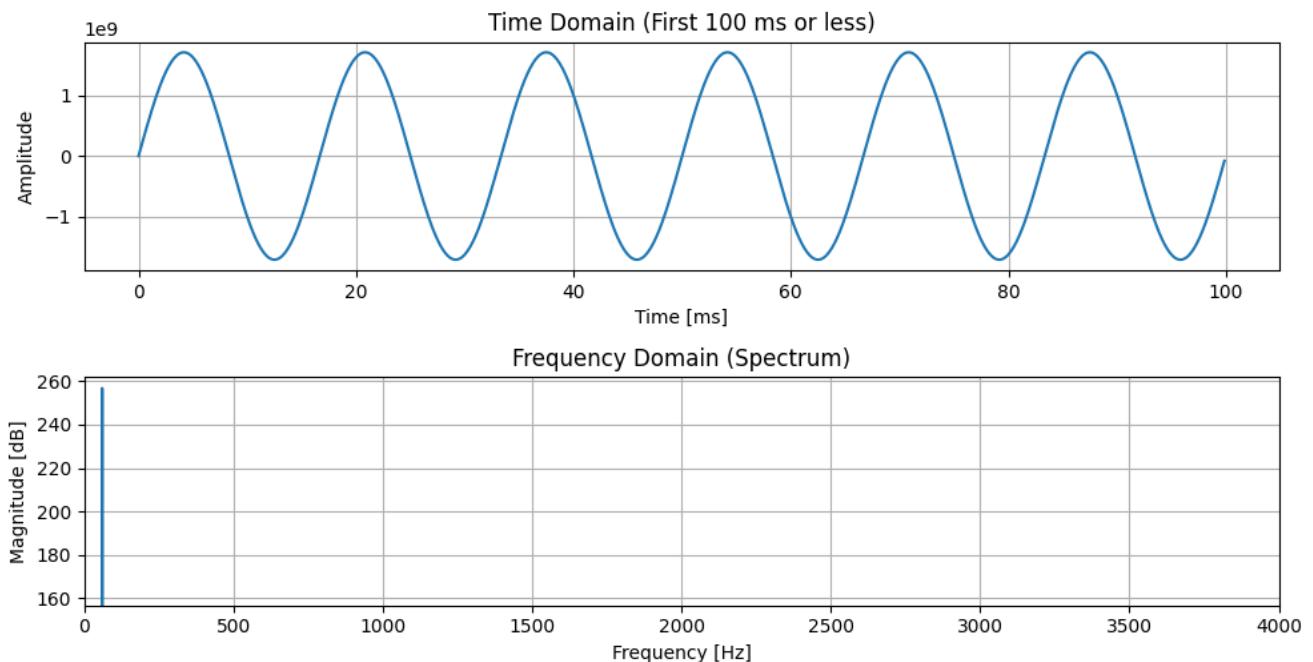
Interpolacja  $\sin_{60}$  do 4000 Hz (cubic)

*sin\_60Hz - interp\_linear\_8000Hz*



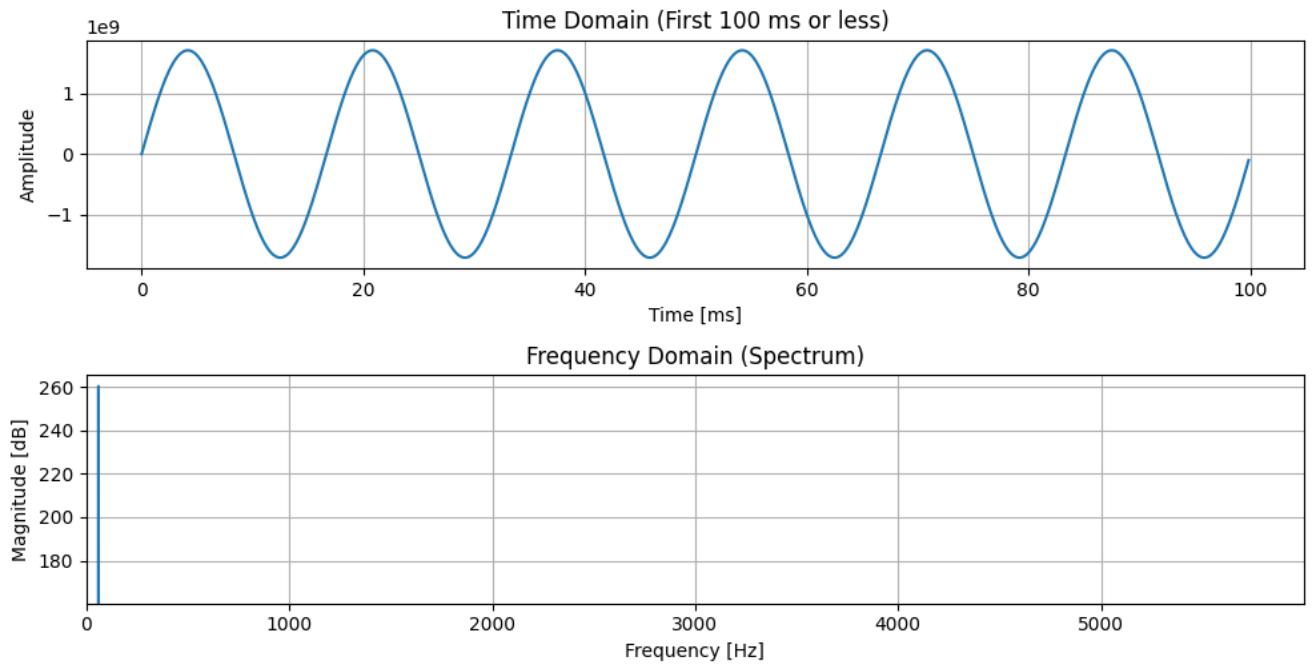
Interpolacja *sin\_60* do 8000 Hz (liniowa)

*sin\_60Hz - interp\_cubic\_8000Hz*



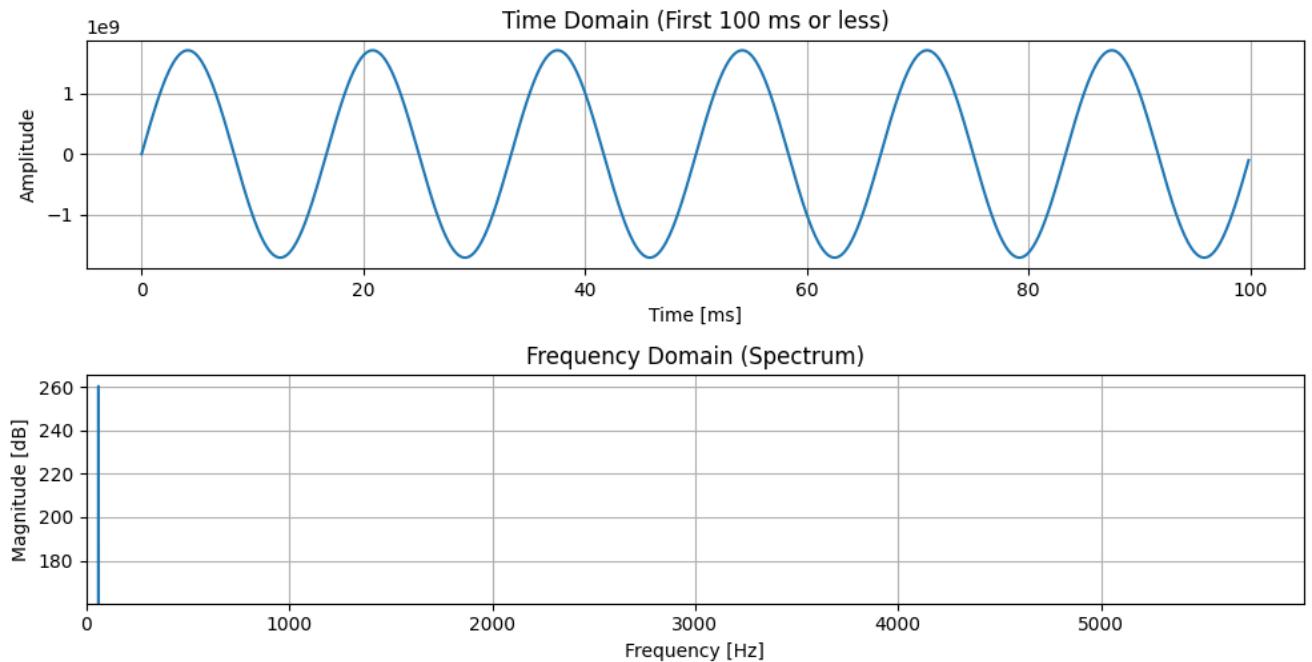
Interpolacja *sin\_60* do 8000 Hz (cubic)

$\sin_{60\text{Hz}}$  - interp\_linear\_11999Hz



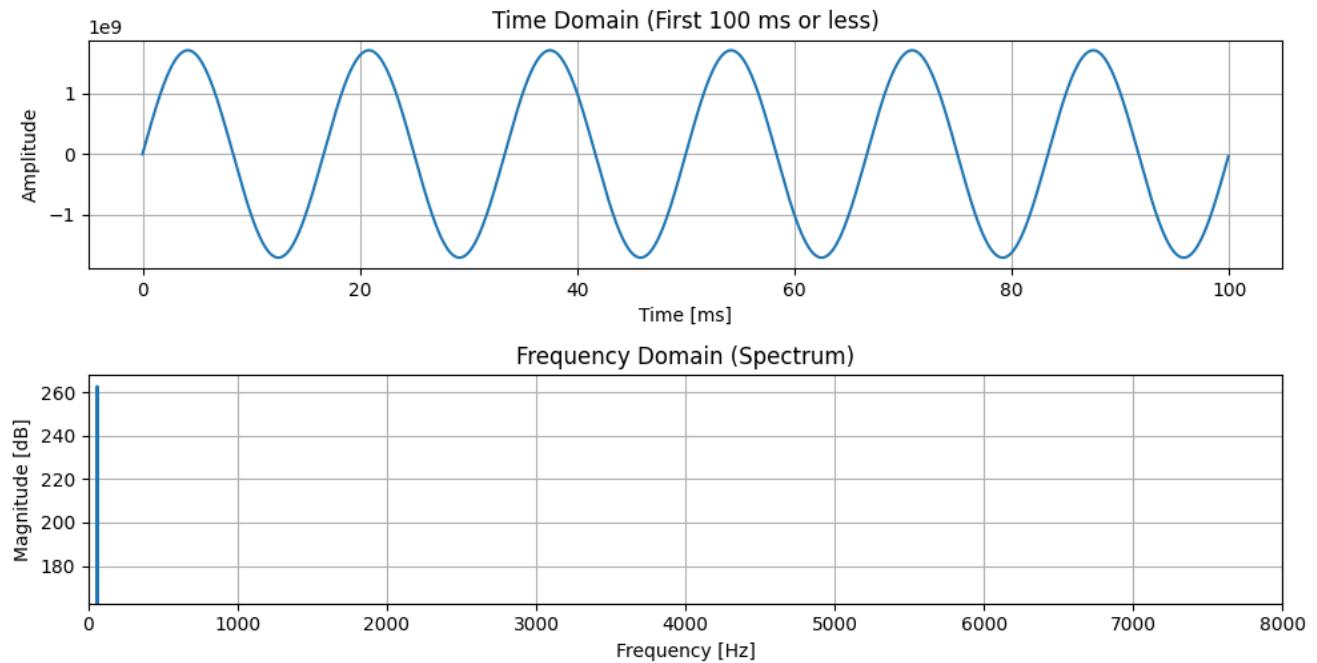
Interpolacja  $\sin_{60}$  do 11999 Hz (liniowa)

$\sin_{60\text{Hz}}$  - interp\_cubic\_11999Hz



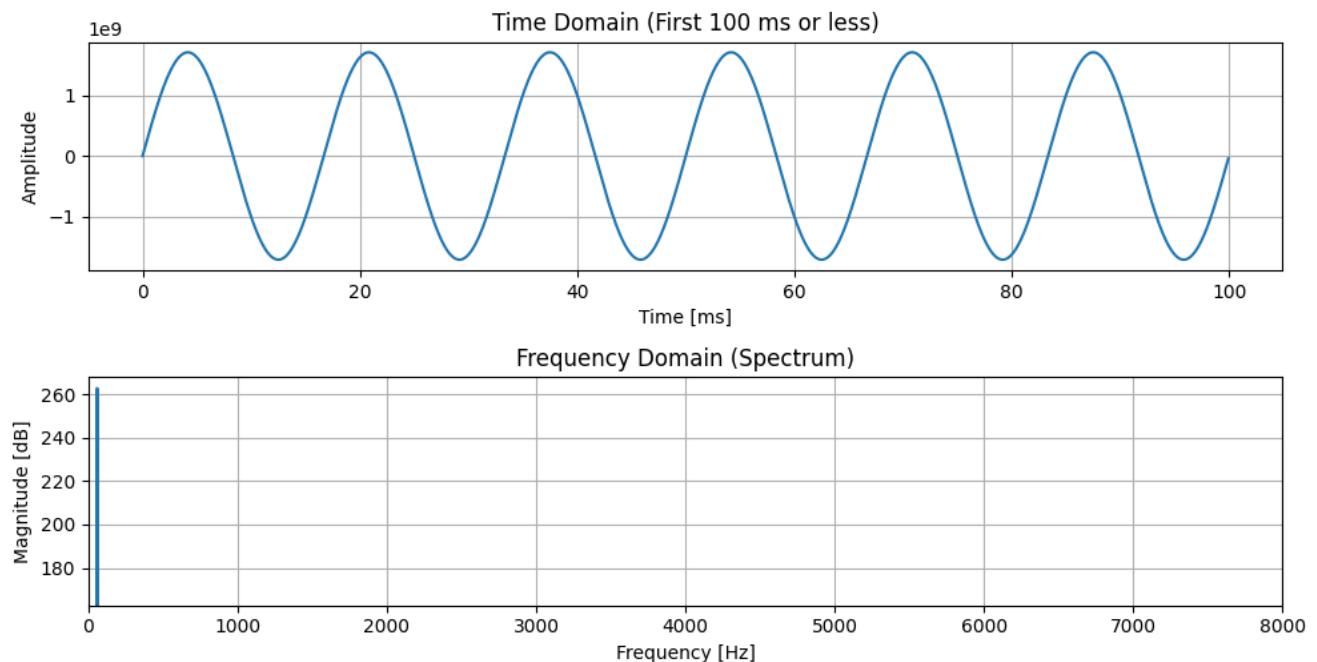
Interpolacja  $\sin_{60}$  do 11999 Hz (cubic)

$\sin_{60\text{Hz}}$  - interp\_linear\_16000Hz



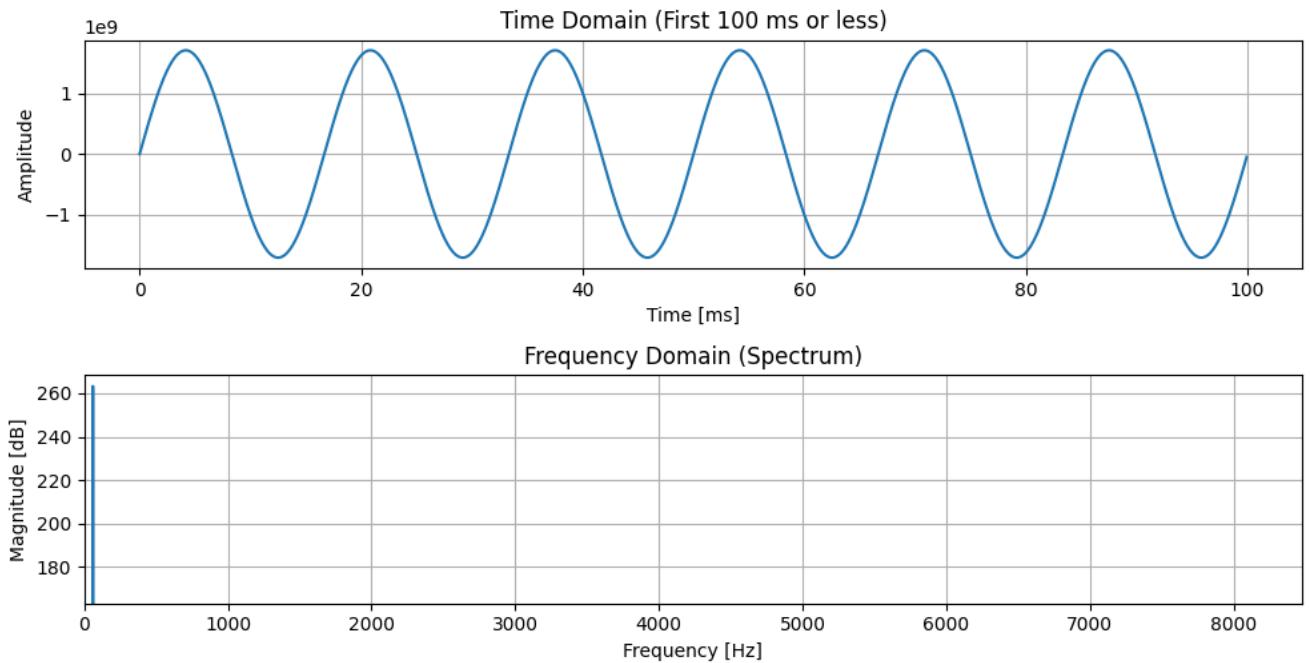
Interpolacja  $\sin_{60}$  do 16000 Hz (liniowa)

$\sin_{60\text{Hz}}$  - interp\_cubic\_16000Hz



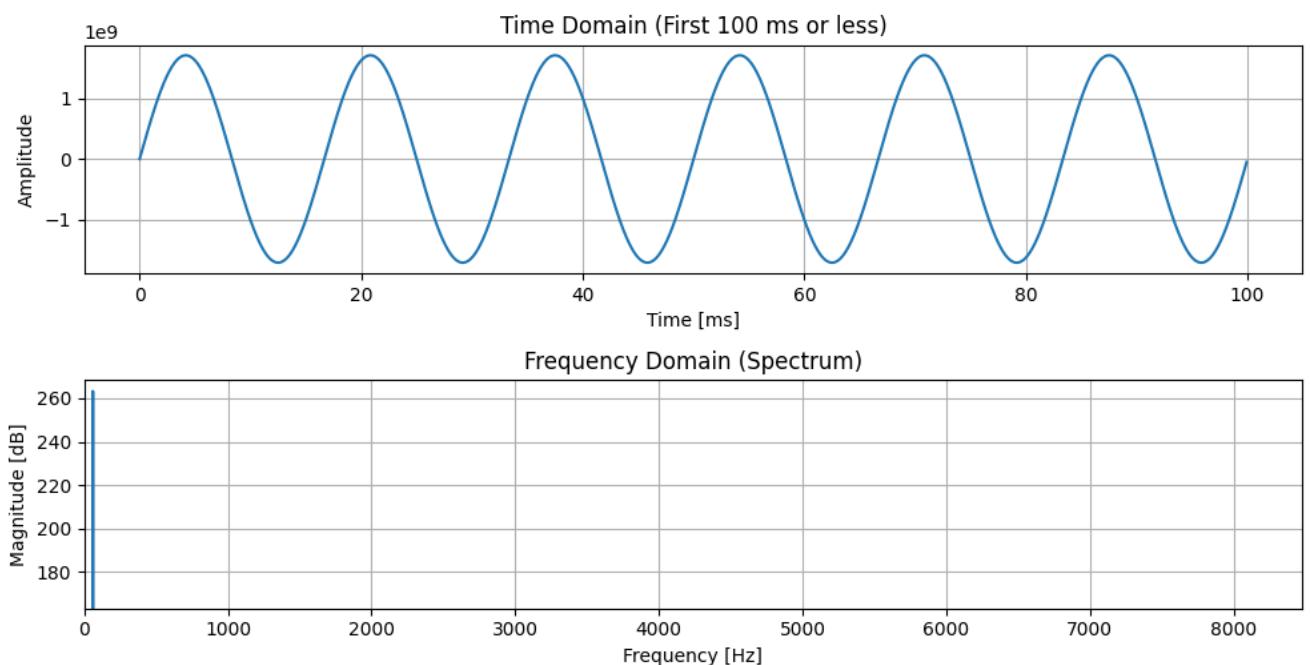
Interpolacja  $\sin_{60}$  do 16000 Hz (cubic)

*sin\_60Hz - interp\_linear\_16953Hz*



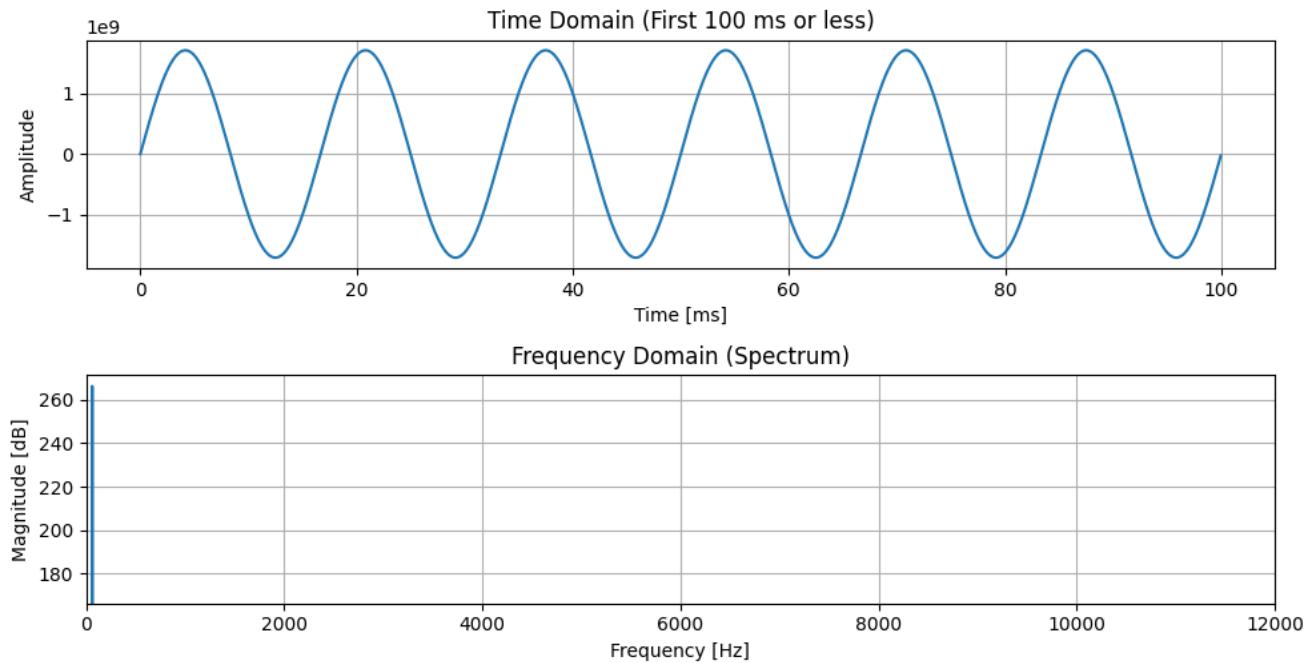
Interpolacja *sin\_60* do 16953 Hz (liniowa)

*sin\_60Hz - interp\_cubic\_16953Hz*



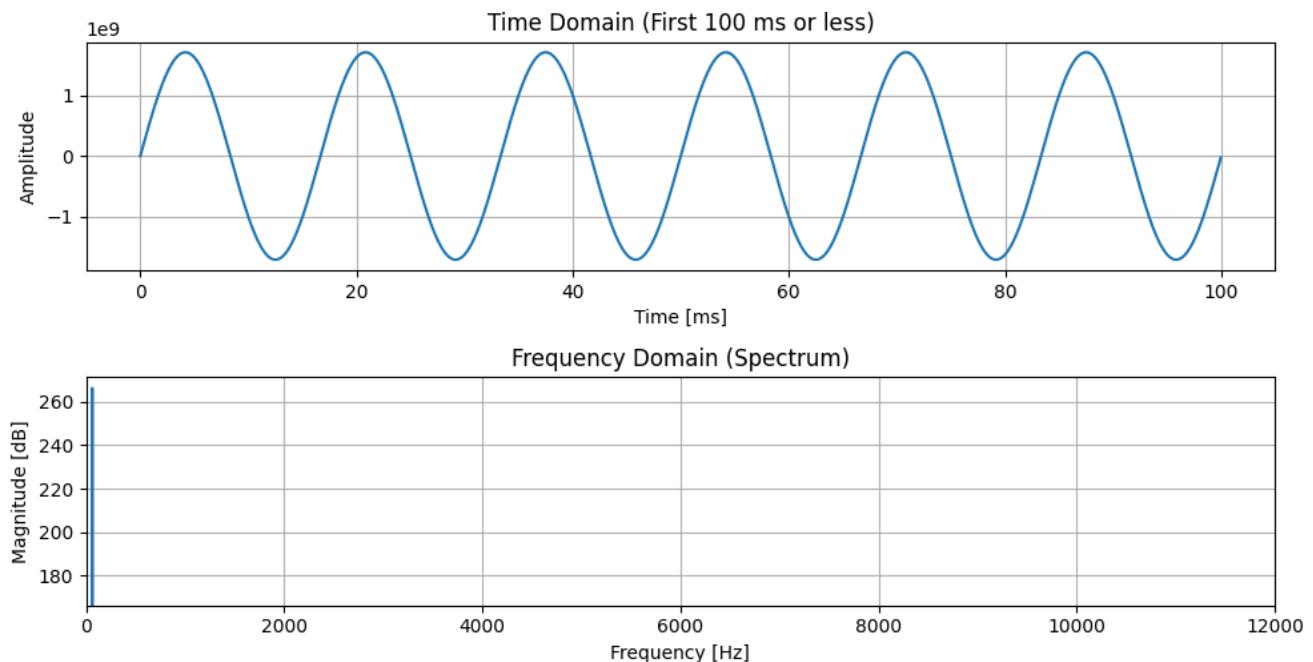
Interpolacja *sin\_60* do 16953 Hz (cubic)

$\sin_{60\text{Hz}}$  - interp\_linear\_24000Hz



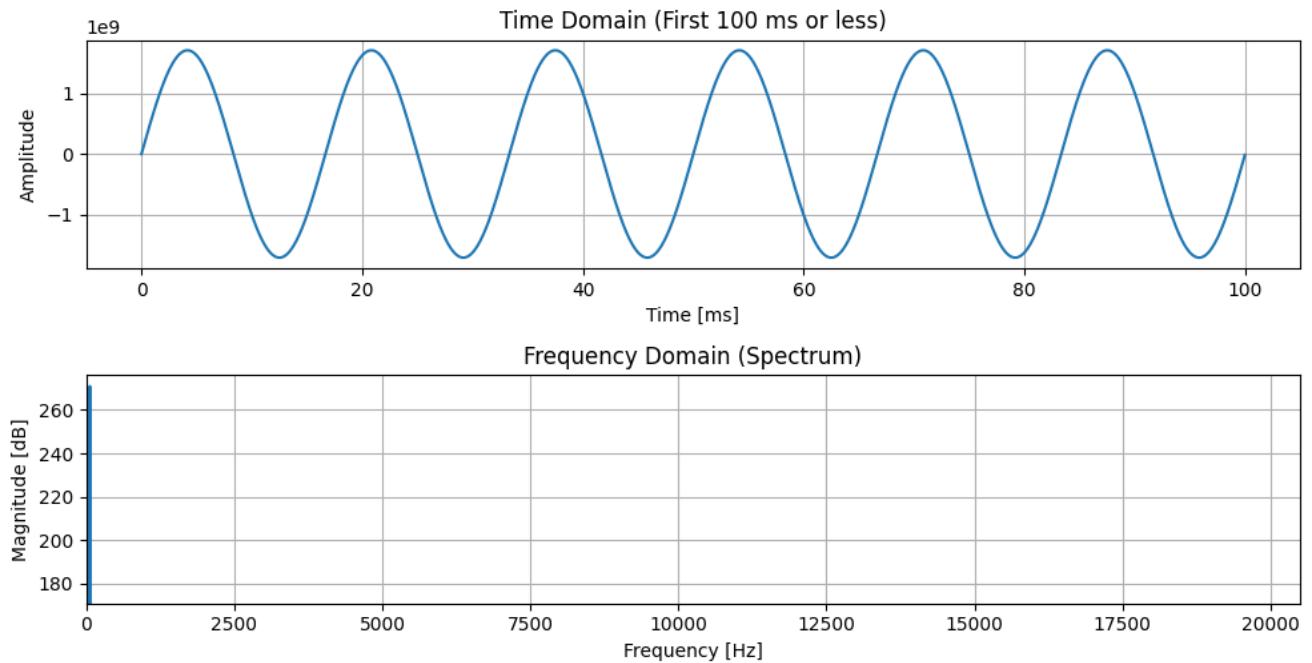
Interpolacja  $\sin_{60}$  do 24000 Hz (liniowa)

$\sin_{60\text{Hz}}$  - interp\_cubic\_24000Hz



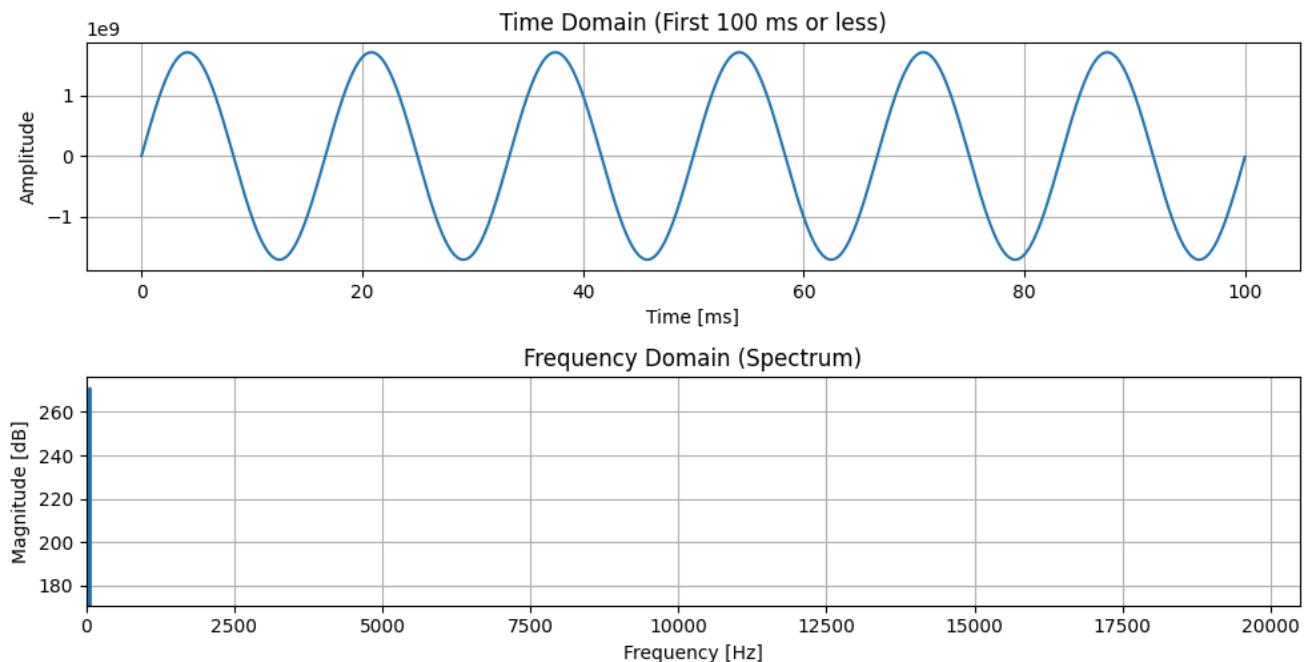
Interpolacja  $\sin_{60}$  do 24000 Hz (cubic)

*sin\_60Hz - interp\_linear\_41000Hz*



Interpolacja *sin\_60* do 41000 Hz (liniowa)

*sin\_60Hz - interp\_cubic\_41000Hz*

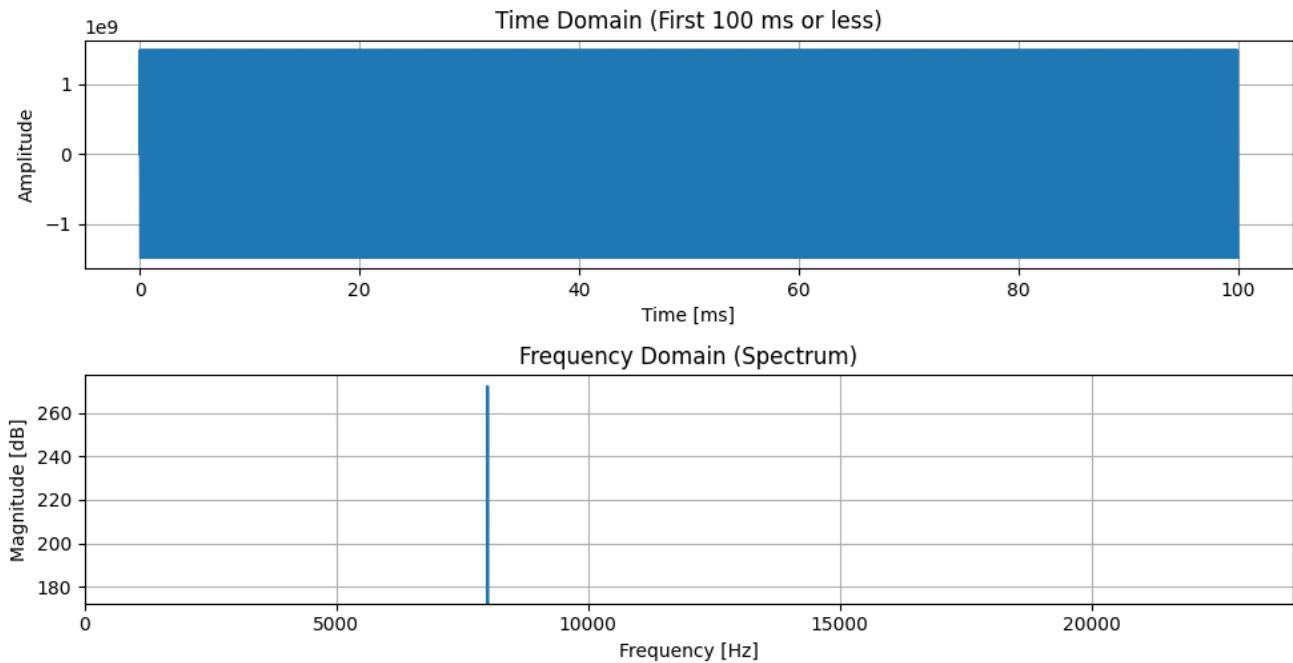


Interpolacja *sin\_60* do 41000 Hz (cubic)

Plik: *sin\_800*

Oryginał

*sin\_8000Hz - original*

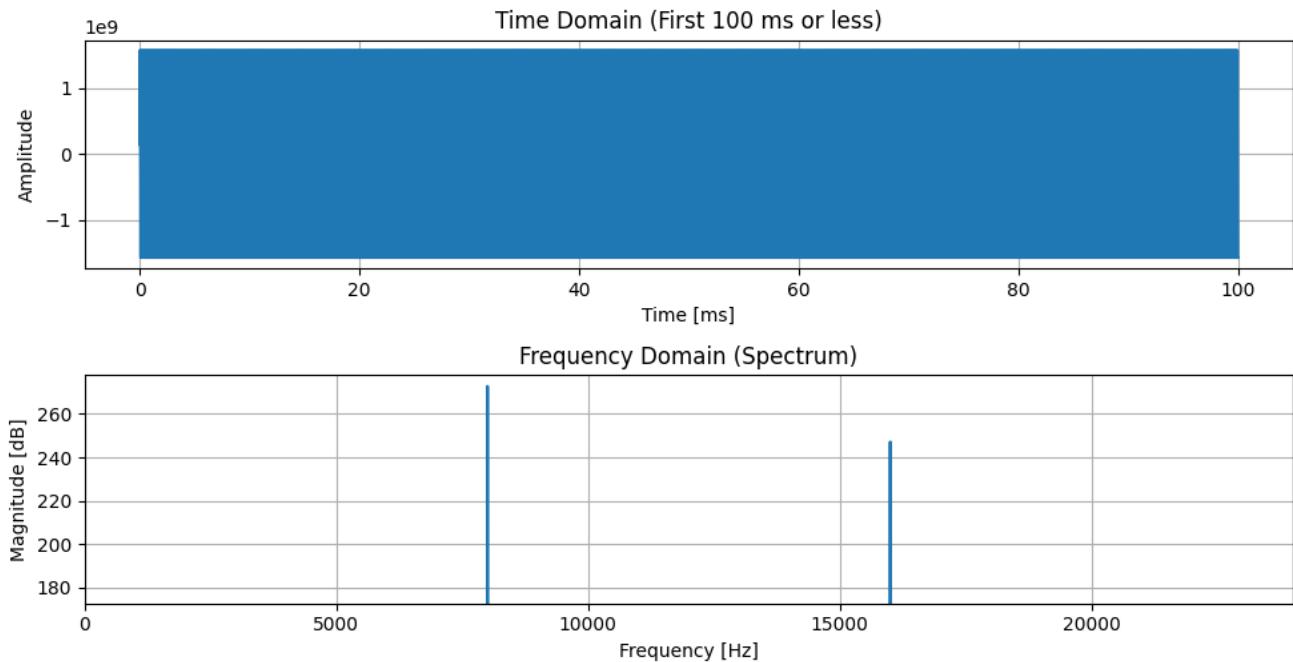


Wykres oryginalnego sygnału *sin\_8000*

## Kwantyzacja

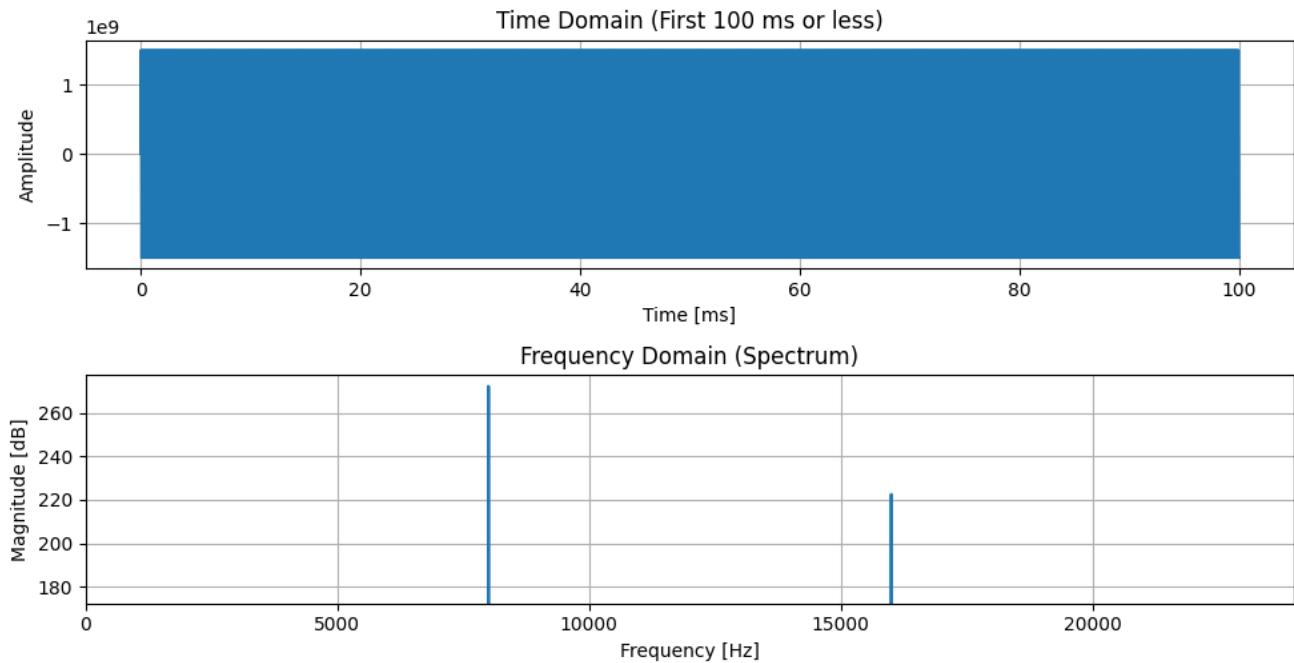
Analiza wpływu kwantyzacji na sygnał sinusoidalny. Wraz ze zmniejszaniem liczb bitów oczekuje się pojawienia się szumu kwantyzacji, widocznego jako dodatkowe składowe harmoniczne w widmie oraz "schodkowanie" sygnału w dziedzinie czasu.

*sin\_8000Hz - quant\_4bit*



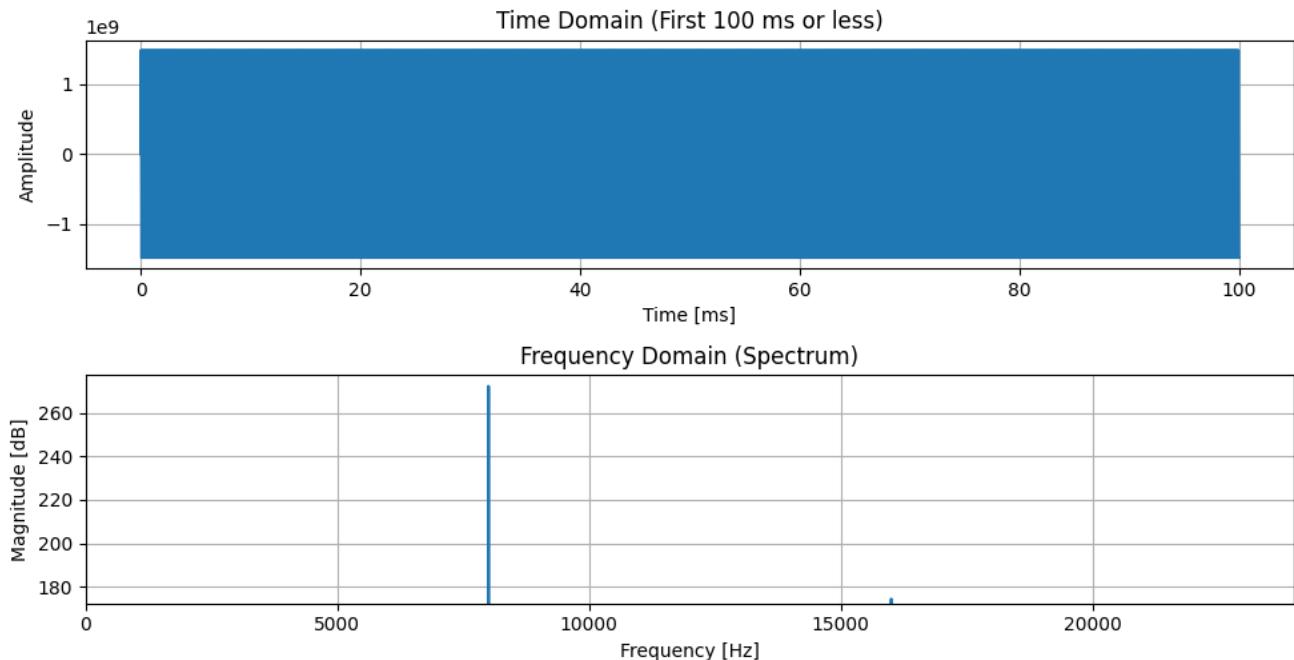
Kwantyzacja *sin\_8000* do 4 bitów

*sin\_8000Hz - quant\_8bit*



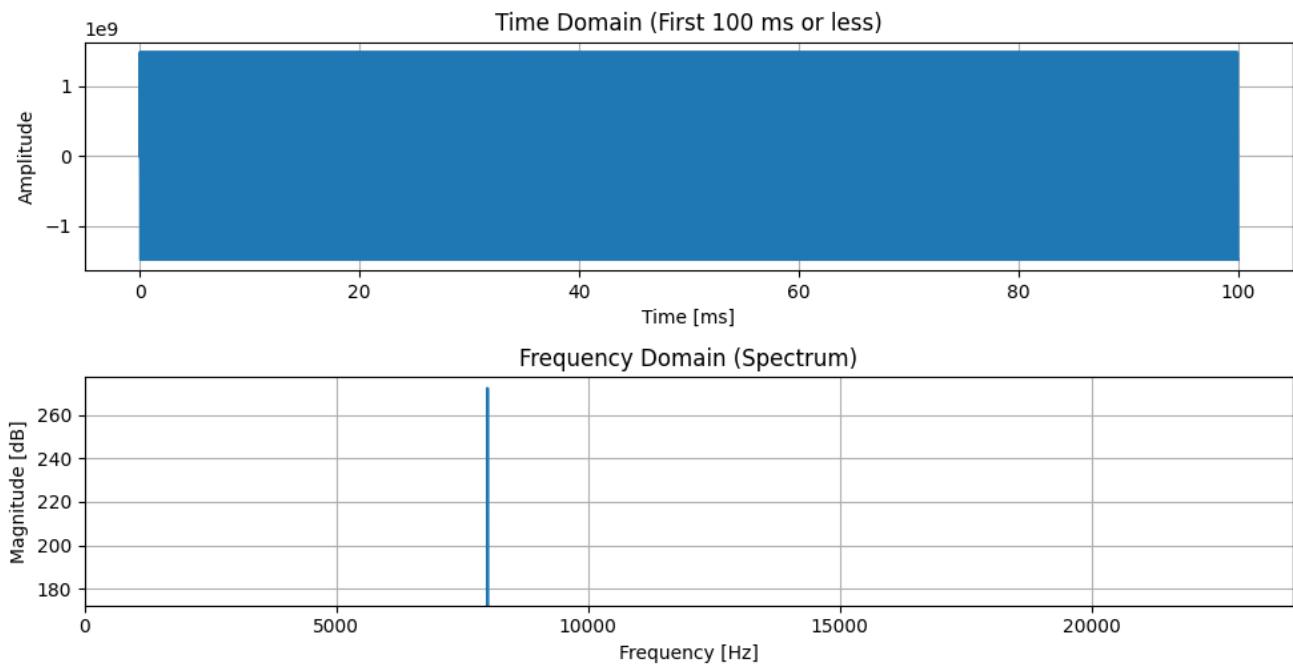
*Kwantyzacja sin\_8000 do 8 bitów*

*sin\_8000Hz - quant\_16bit*



*Kwantyzacja sin\_8000 do 16 bitów*

*sin\_8000Hz - quant\_24bit*

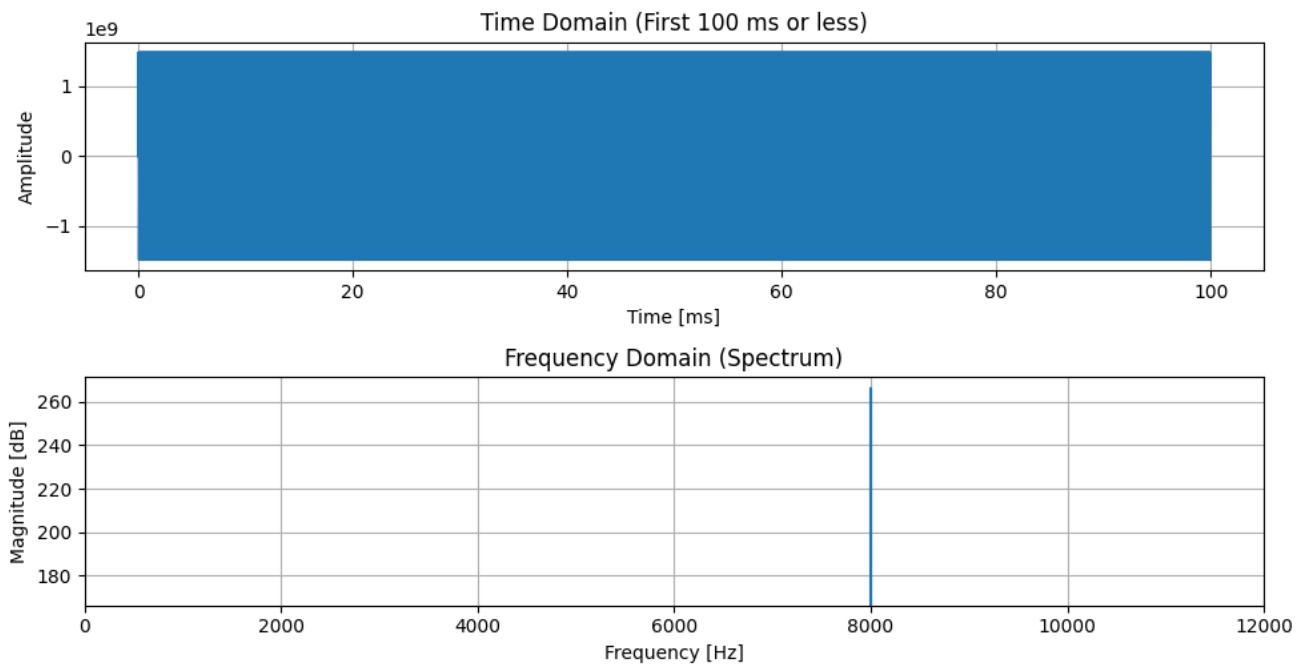


*Kwantyzacja sin\_8000 do 24 bitów*

## Decymacja

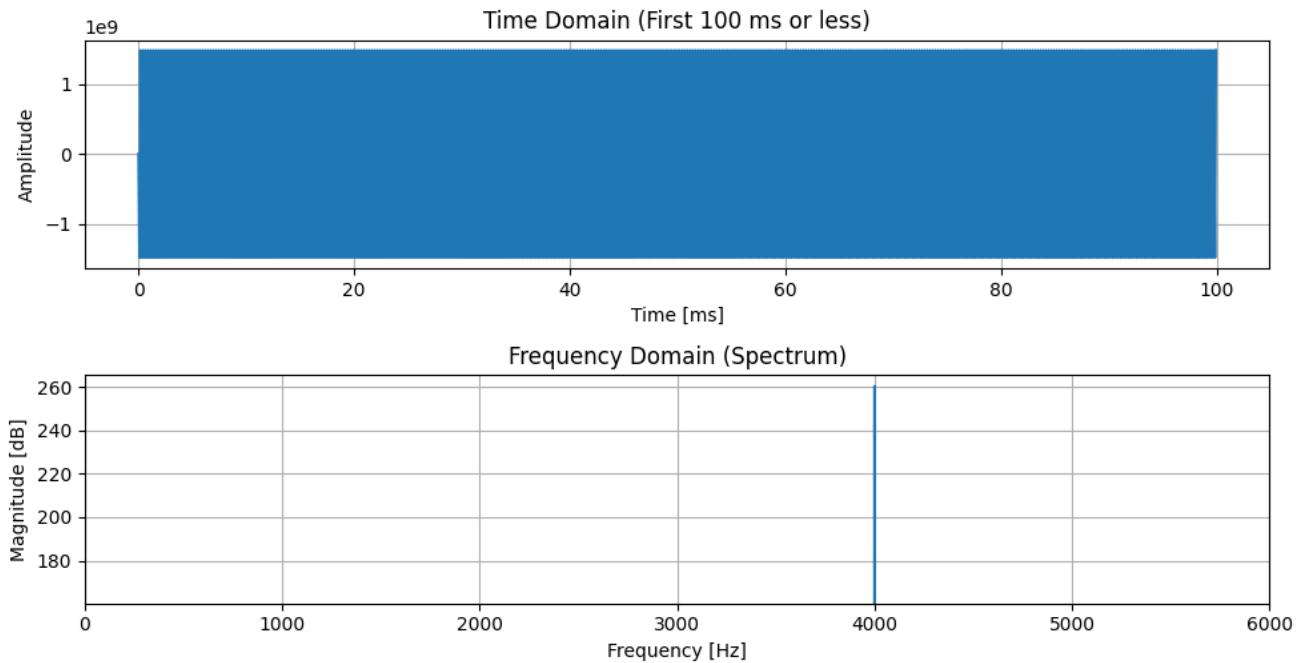
Analiza wpływu decymacji. Decymacja zmniejsza częstotliwość próbkowania  $F_s$ . Jeśli nowa częstotliwość Nyquista ( $F_s/n / 2$ ) jest niższa niż najwyższa częstotliwość w sygnale, wystąpi aliasing, widoczny jako pojawienie się "fałszywych" częstotliwości w widmie.

*sin\_8000Hz - decim\_n2*



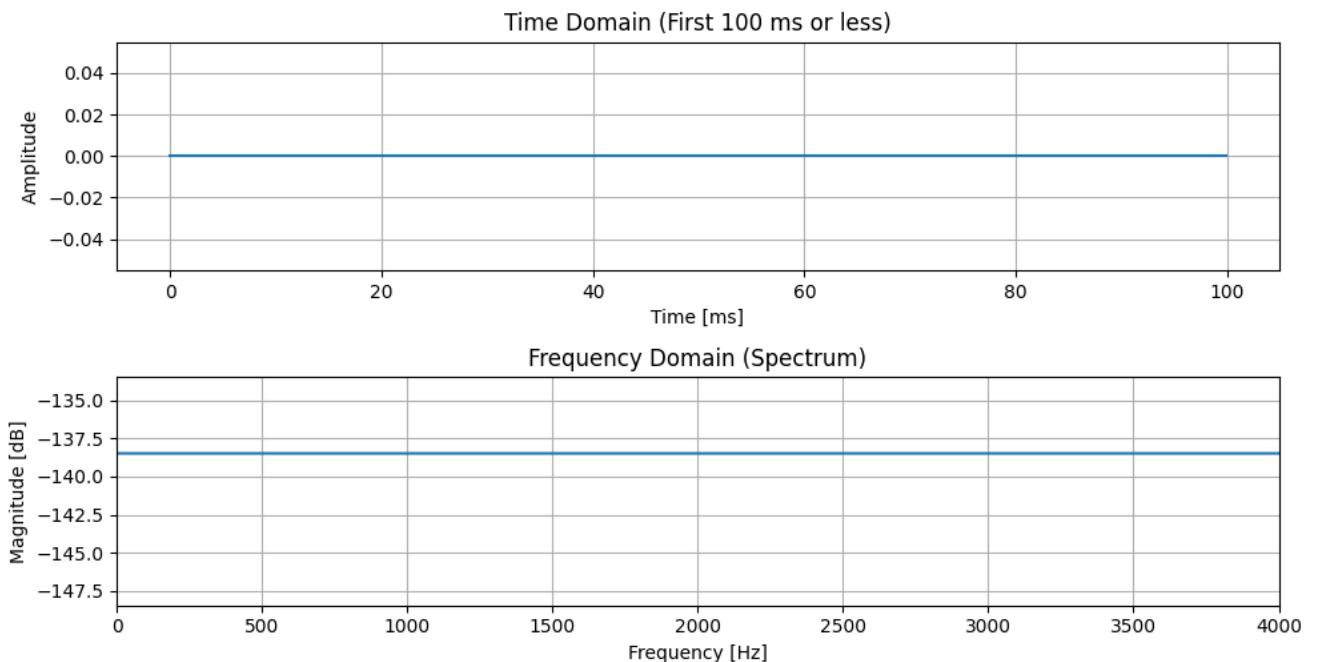
*Decymacja sin\_8000 z krokiem n=2*

sin\_8000Hz - decim\_n4



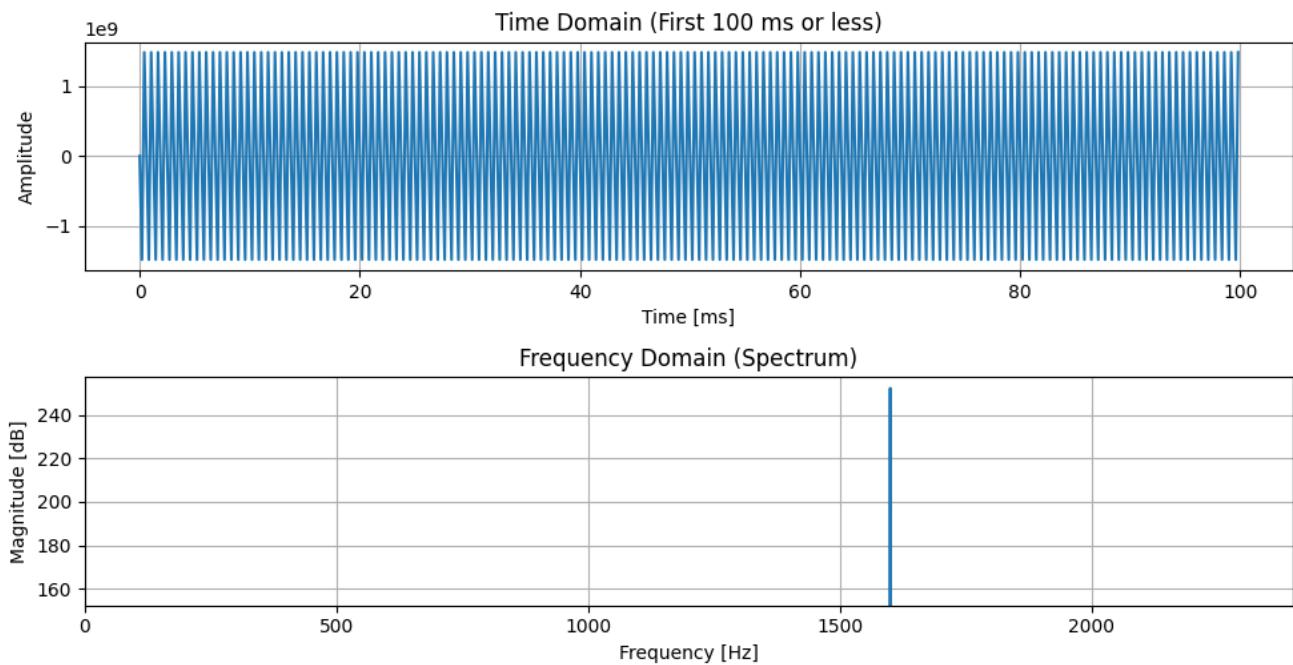
Decymacja sin\_8000 z krokiem n=4

sin\_8000Hz - decim\_n6



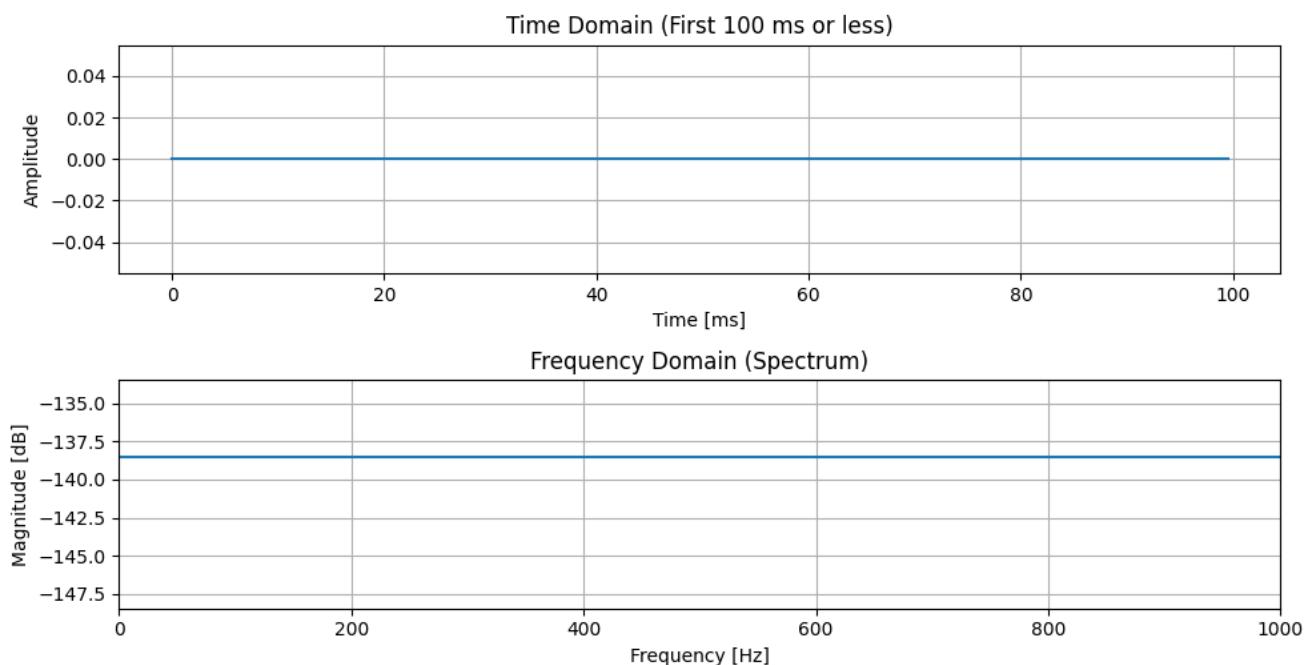
Decymacja sin\_8000 z krokiem n=6

*sin\_8000Hz - decim\_n10*



*Decymacja sin\_8000 z krokiem n=10*

*sin\_8000Hz - decim\_n24*



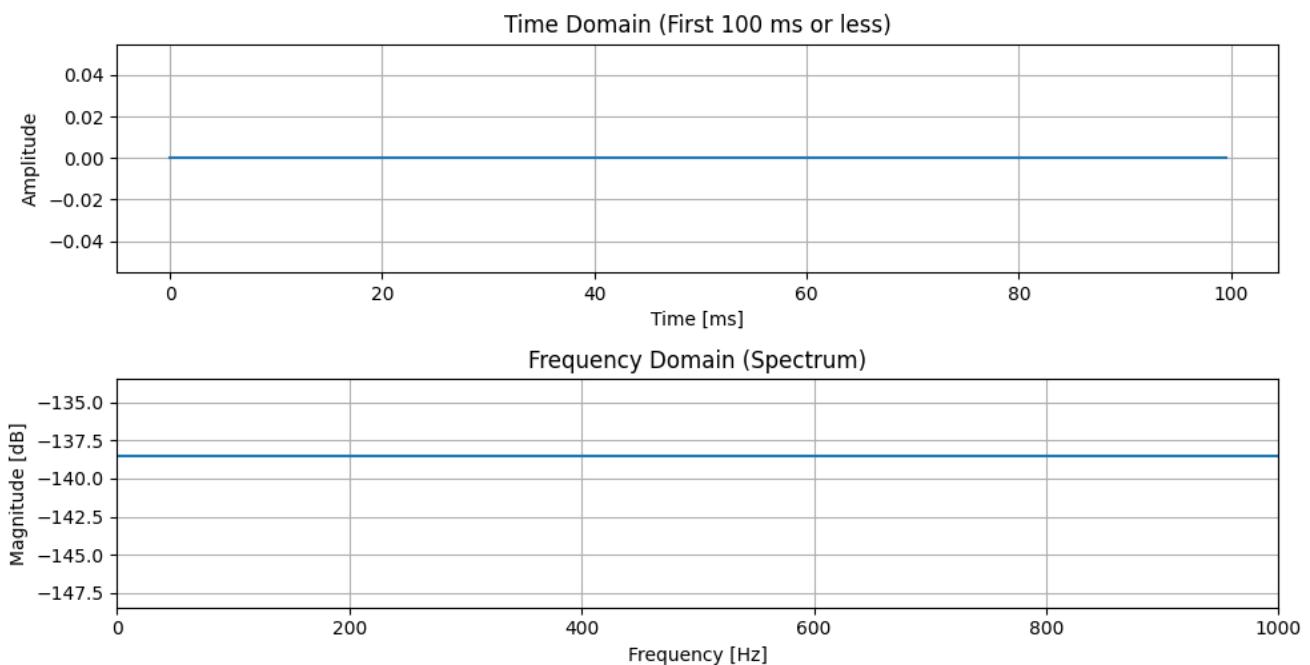
*Decymacja sin\_8000 z krokiem n=24*

## Interpolacja

Analiza wpływu interpolacji (liniowej i sześciennnej **cubic**) na zmianę częstotliwości próbkowania. Downsampling (zmnieszenie  $F_s$ ) przez interpolację może prowadzić do utraty wysokich częstotliwości, jeśli nowa  $F_s$  jest zbyt niska (efekt podobny do filtrowania dolnoprzepustowego). Upsampling (zwiększenie  $F_s$ ) nie dodaje nowej informacji, ale może wygładzić sygnał. Interpolacja

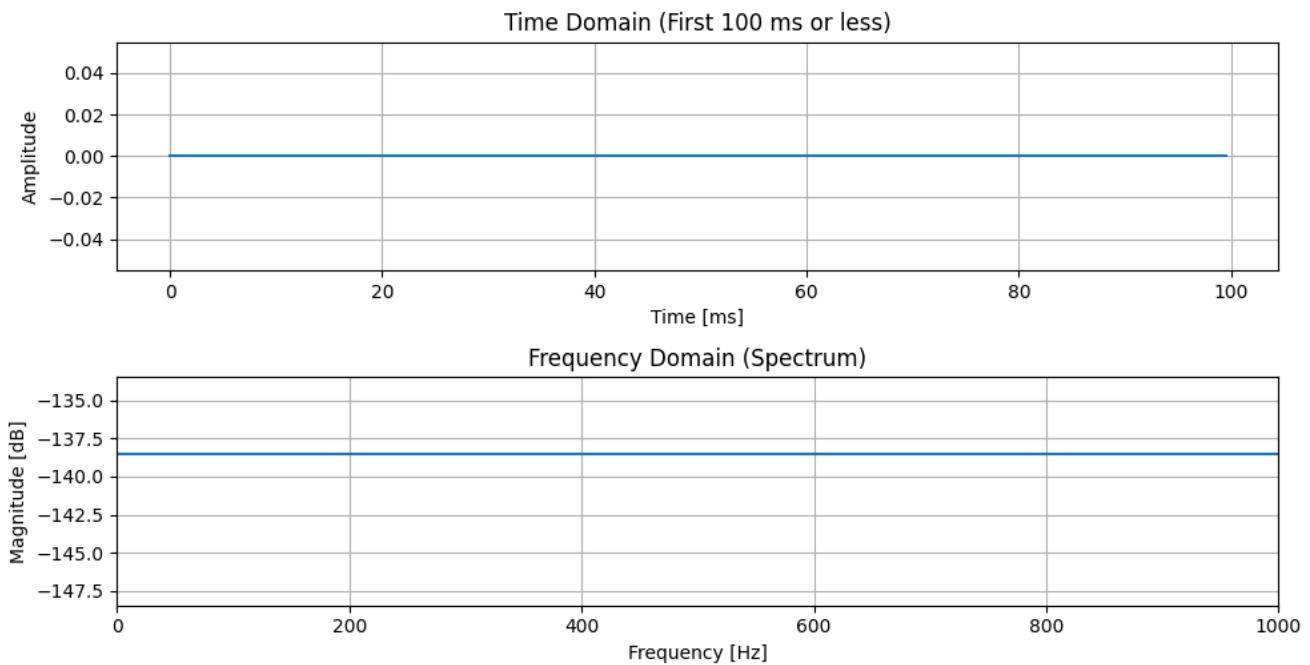
**cubic** jest zazwyczaj dokładniejsza od liniowej, ale bardziej kosztowna obliczeniowo.

$\sin_{8000\text{Hz}} - \text{interp\_linear\_}2000\text{Hz}$



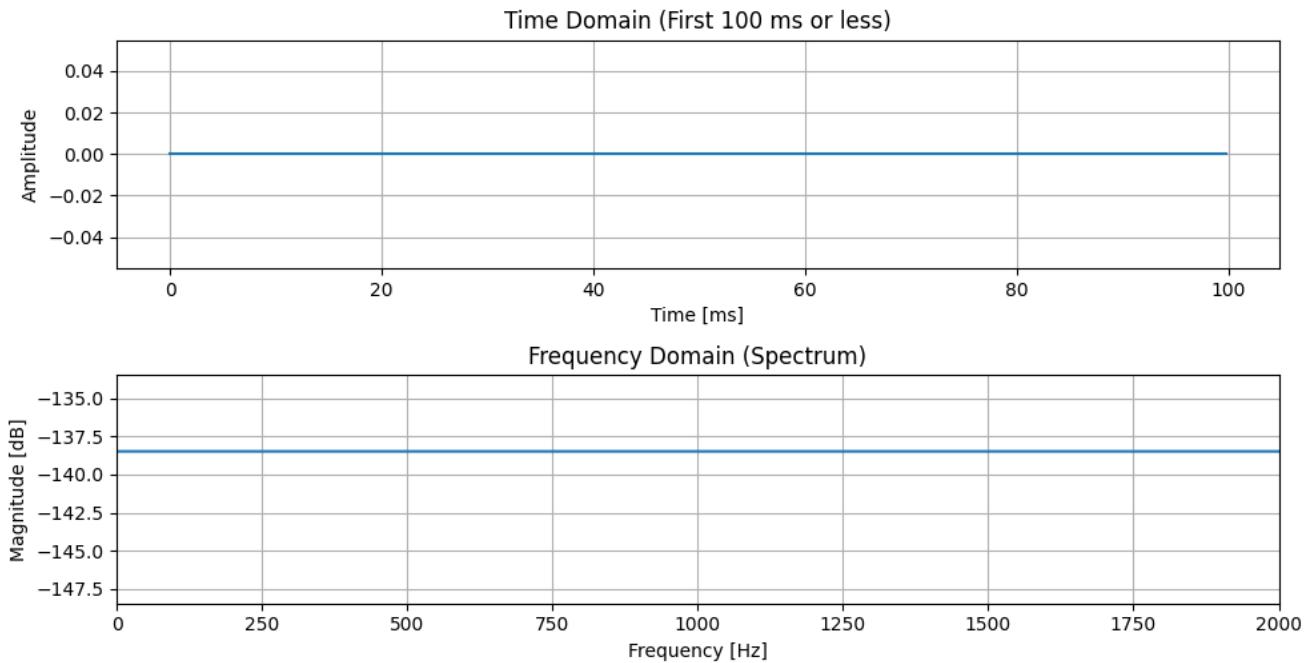
Interpolacja  $\sin_{8000}$  do  $2000\text{ Hz}$  (liniowa)

$\sin_{8000\text{Hz}} - \text{interp\_cubic\_}2000\text{Hz}$



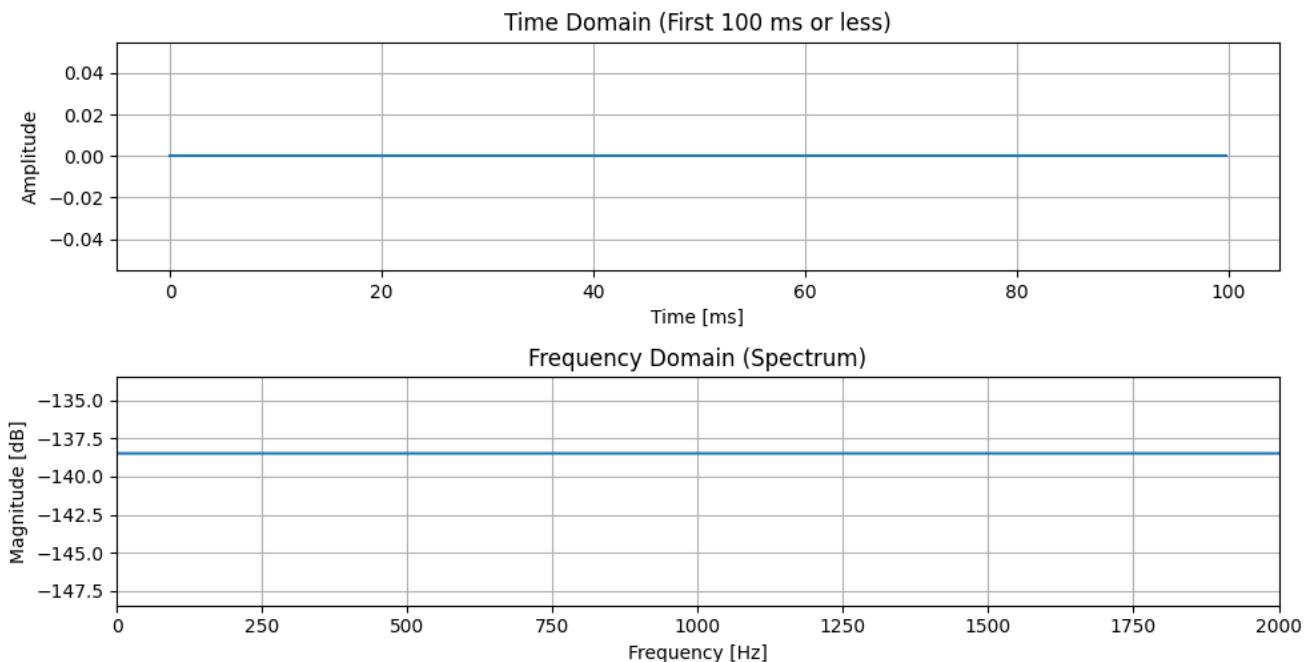
Interpolacja  $\sin_{8000}$  do  $2000\text{ Hz}$  (cubic)

*sin\_8000Hz - interp\_linear\_4000Hz*



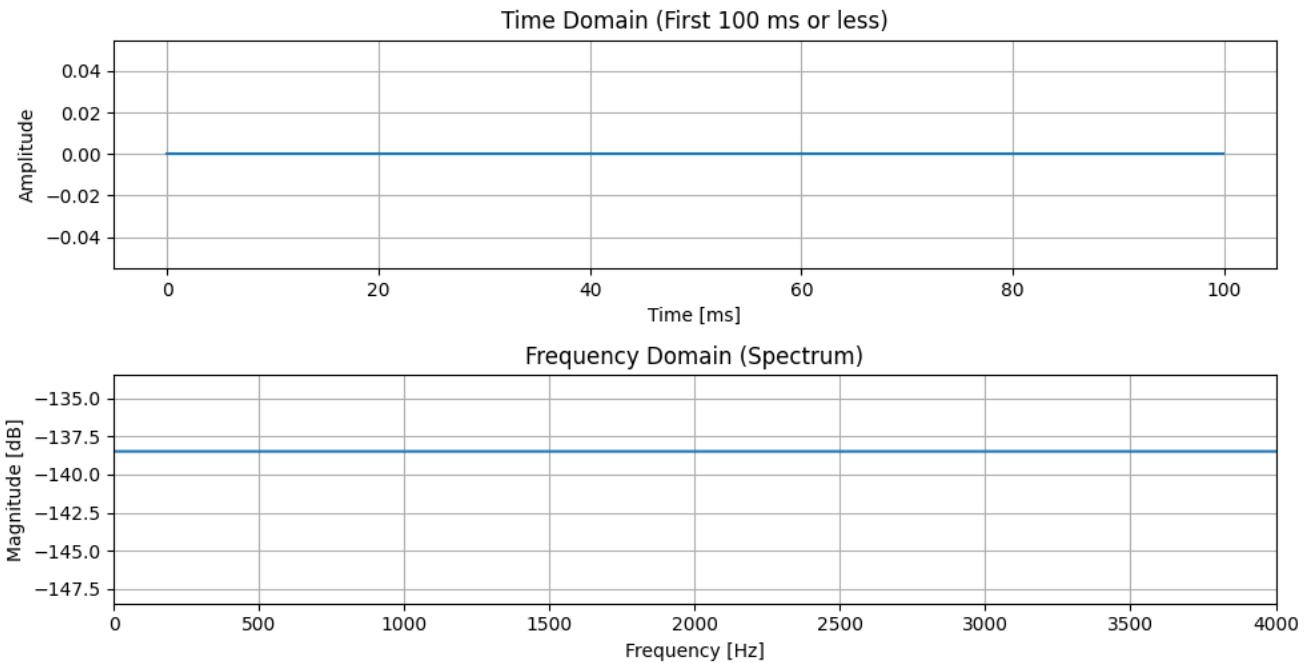
*Interpolacja sin\_8000 do 4000 Hz (liniowa)*

*sin\_8000Hz - interp\_cubic\_4000Hz*



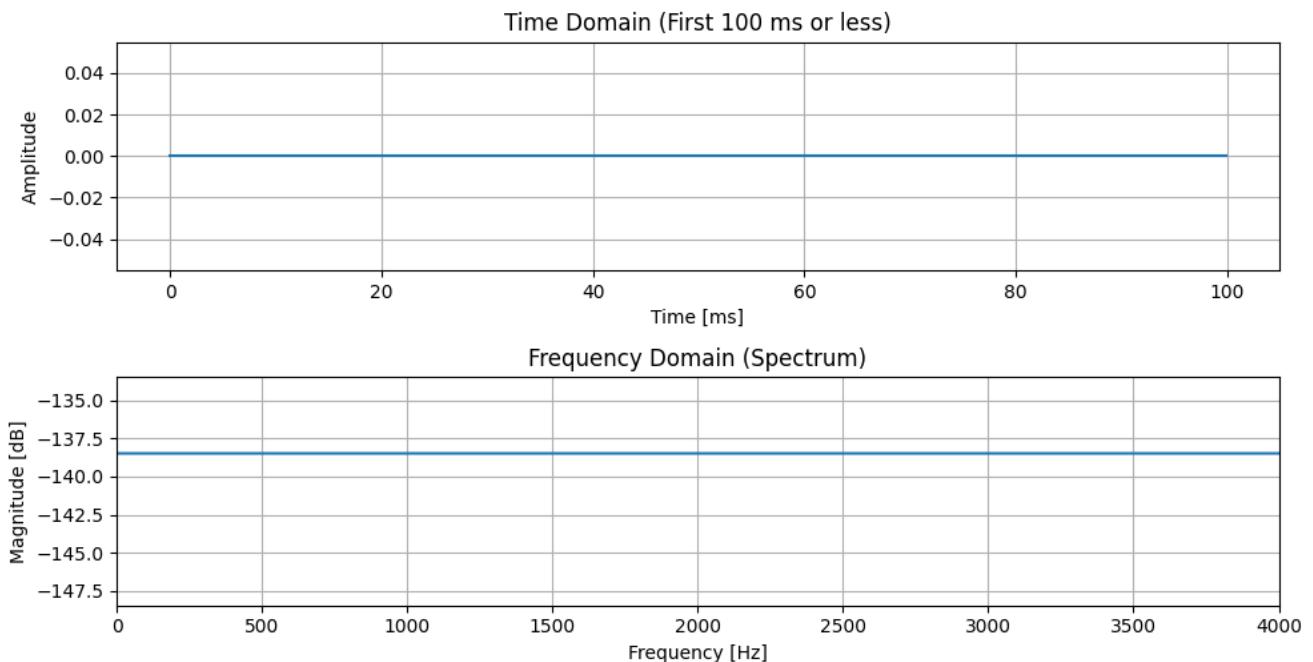
*Interpolacja sin\_8000 do 4000 Hz (cubic)*

*sin\_8000Hz - interp\_linear\_8000Hz*



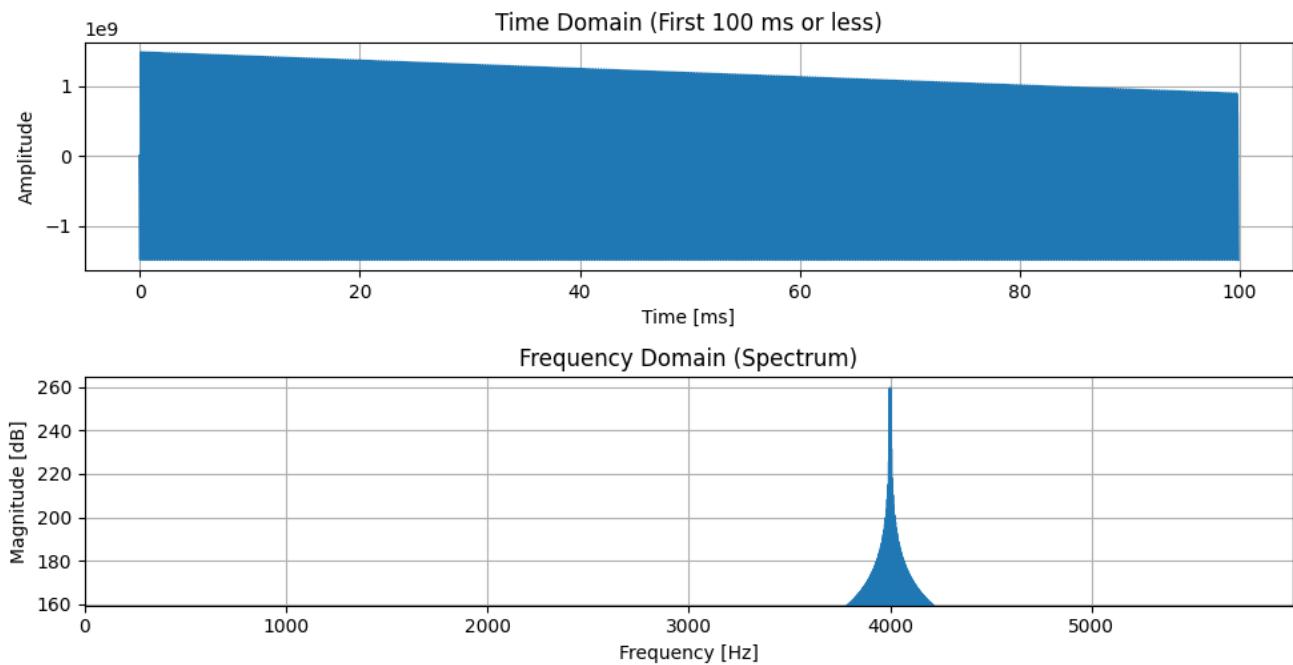
*Interpolacja sin\_8000 do 8000 Hz (liniowa)*

*sin\_8000Hz - interp\_cubic\_8000Hz*



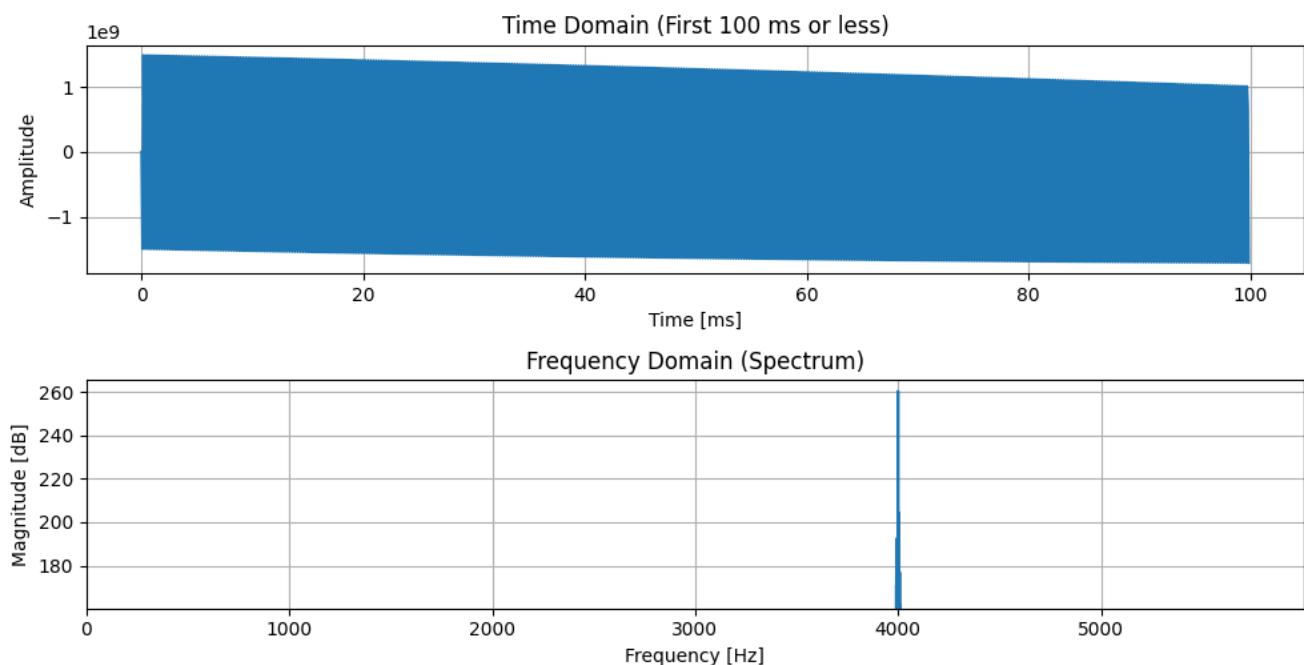
*Interpolacja sin\_8000 do 8000 Hz (cubic)*

*sin\_8000Hz - interp\_linear\_11999Hz*



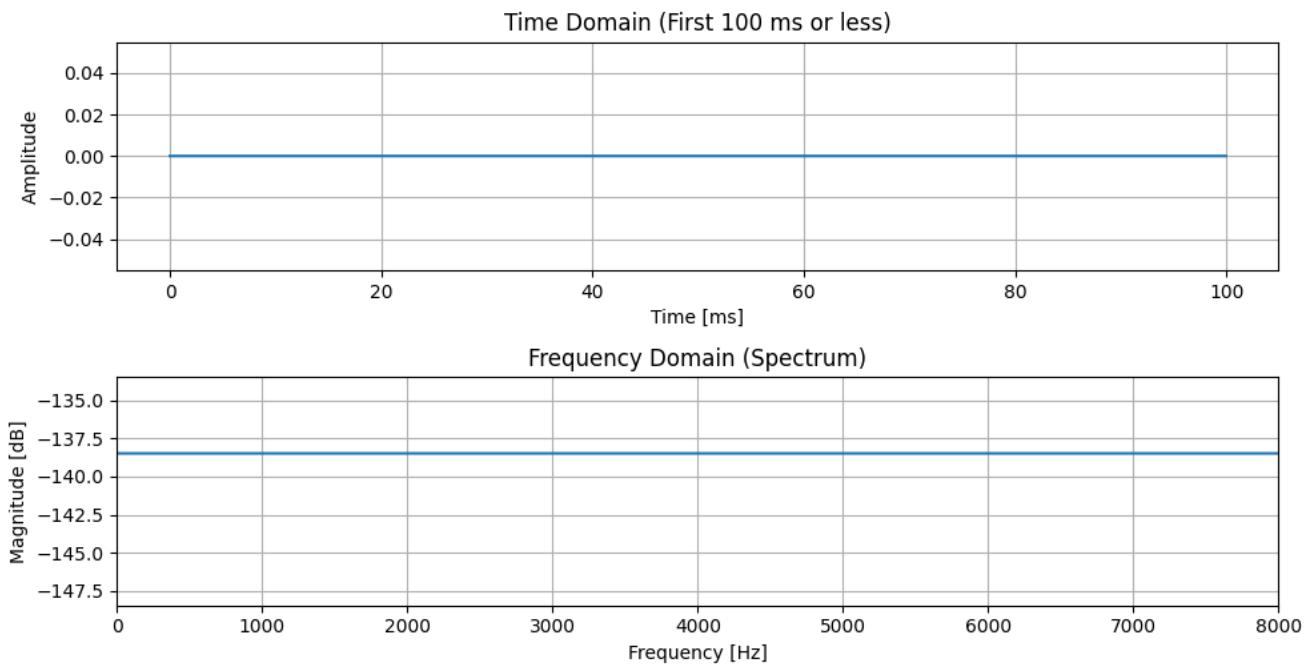
*Interpolacja sin\_8000 do 11999 Hz (liniowa)*

*sin\_8000Hz - interp\_cubic\_11999Hz*



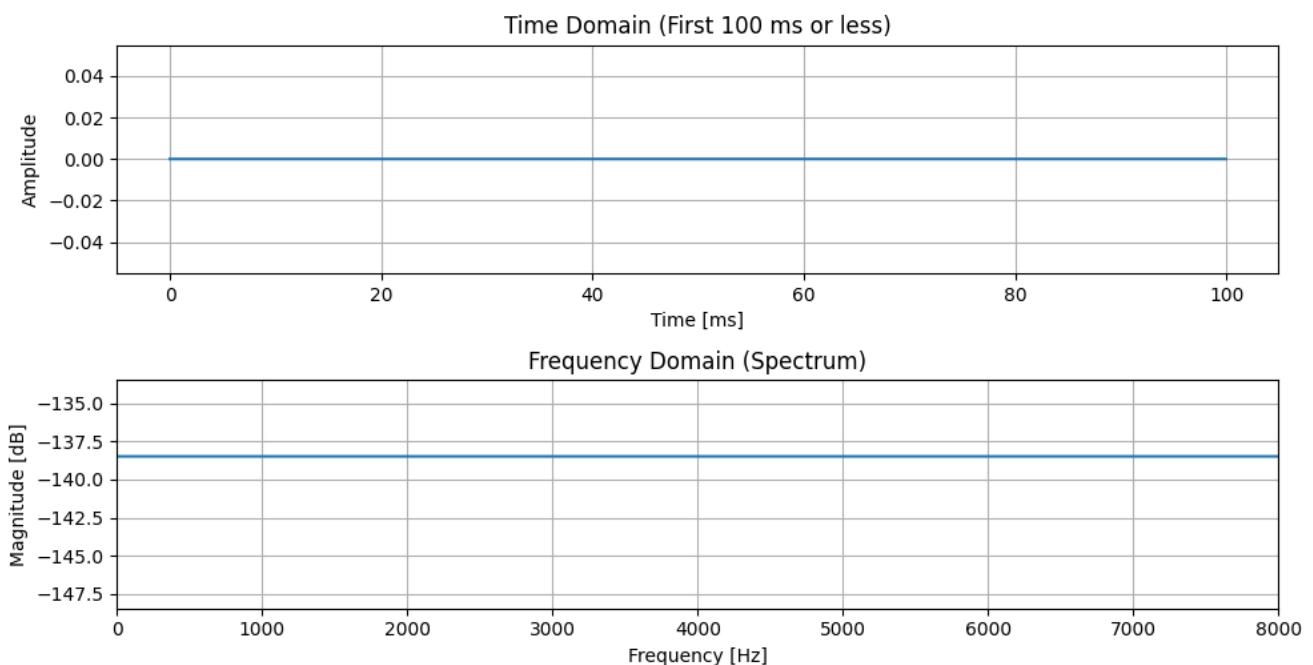
*Interpolacja sin\_8000 do 11999 Hz (cubic)*

*sin\_8000Hz - interp\_linear\_16000Hz*



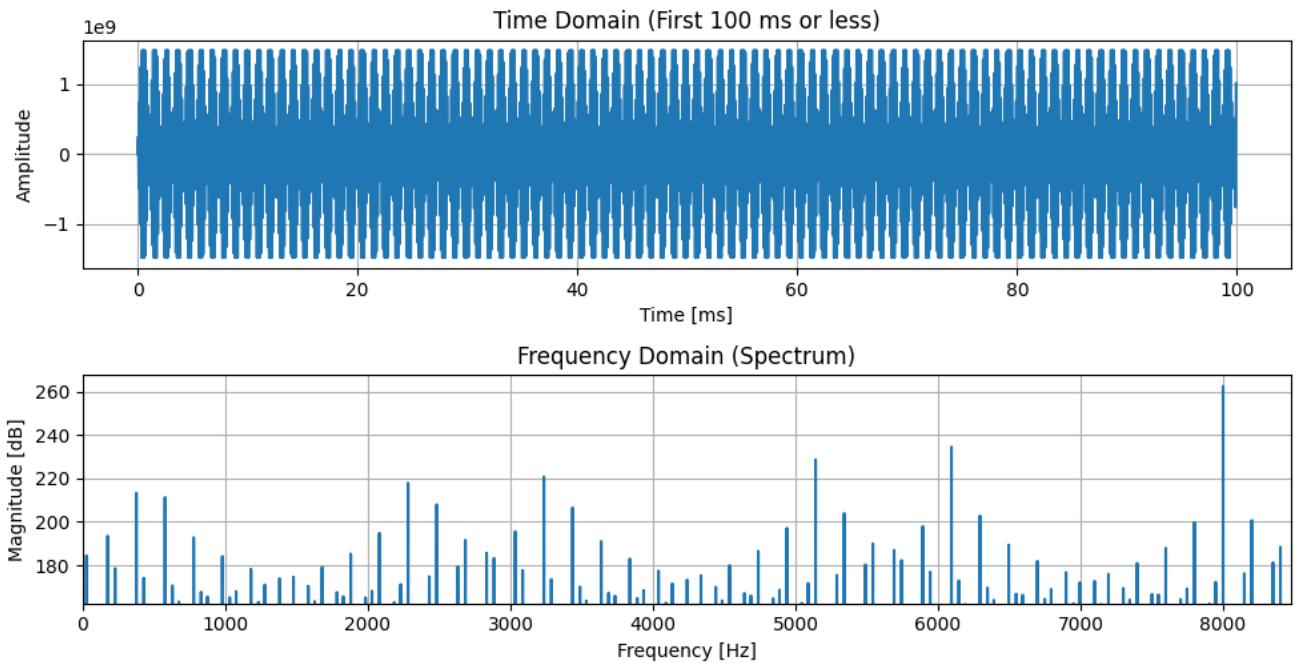
Interpolacja *sin\_8000* do 16000 Hz (*liniowa*)

*sin\_8000Hz - interp\_cubic\_16000Hz*



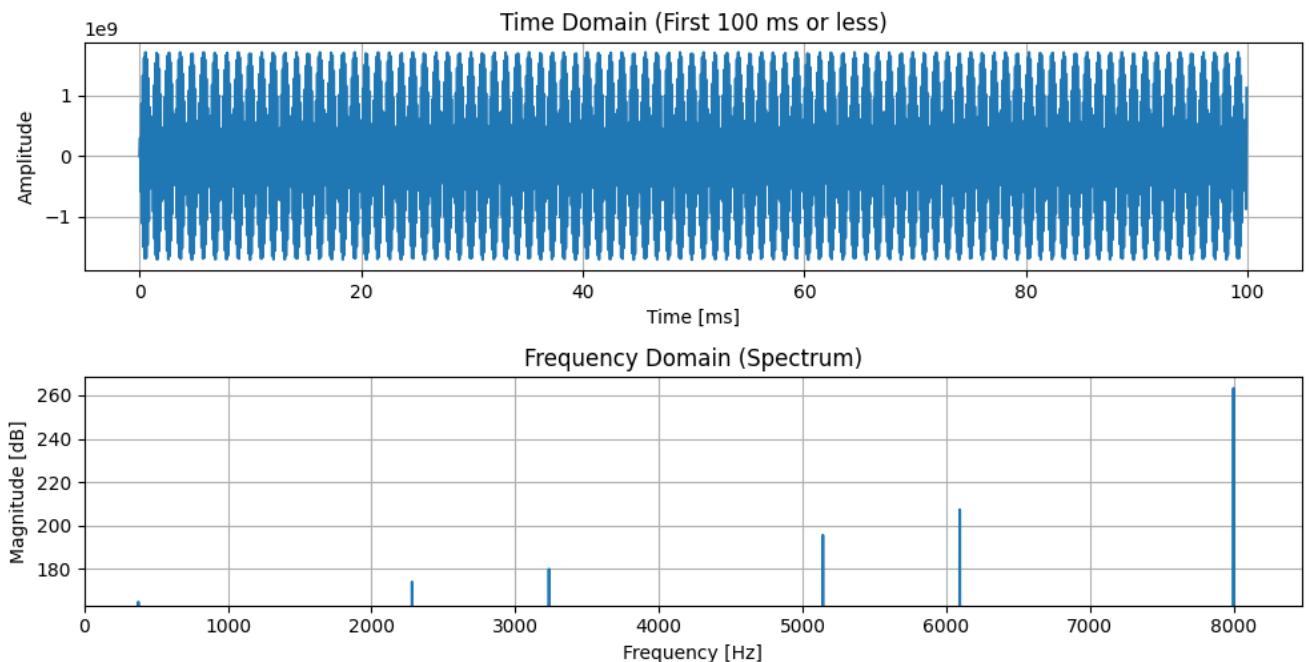
Interpolacja *sin\_8000* do 16000 Hz (*cubic*)

*sin\_8000Hz - interp\_linear\_16953Hz*



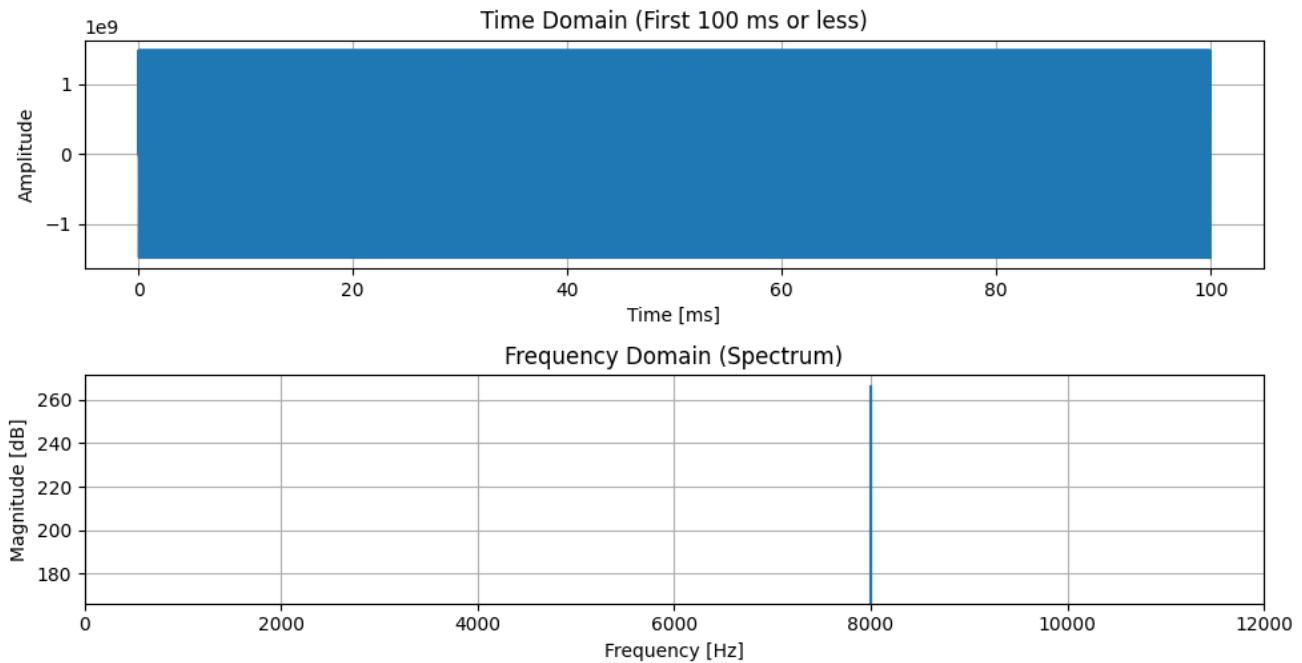
*Interpolacja sin\_8000 do 16953 Hz (liniowa)*

*sin\_8000Hz - interp\_cubic\_16953Hz*



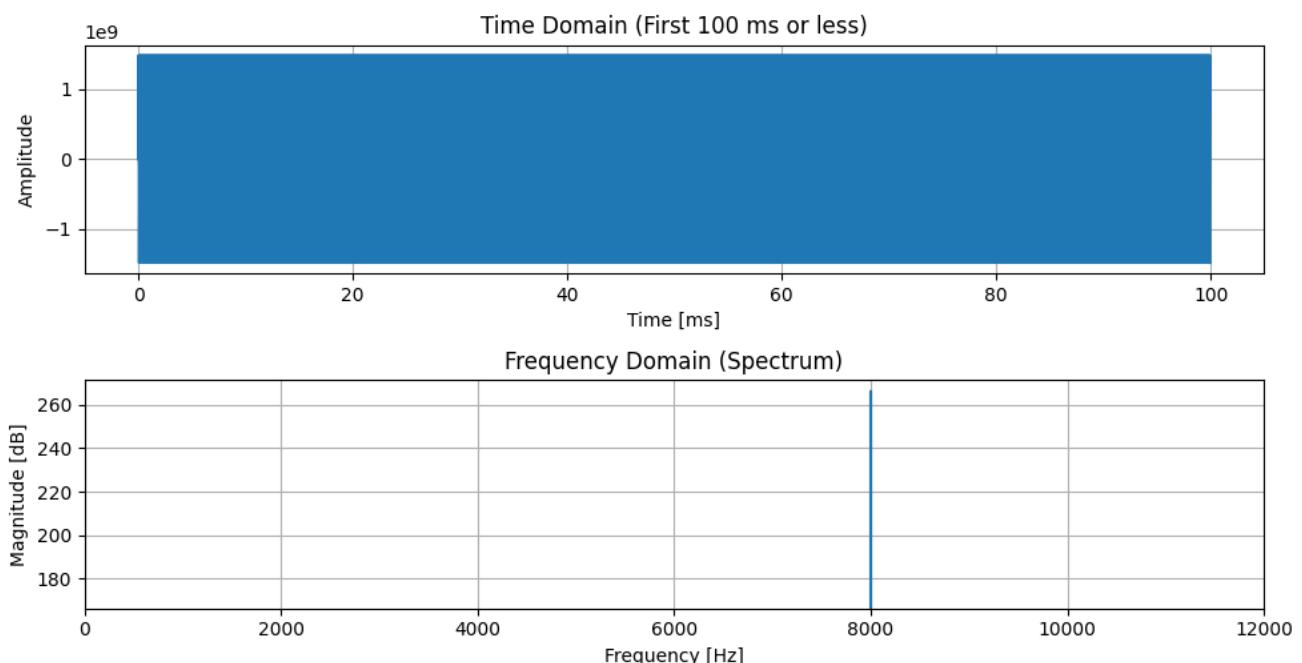
*Interpolacja sin\_8000 do 16953 Hz (cubic)*

*sin\_8000Hz - interp\_linear\_24000Hz*



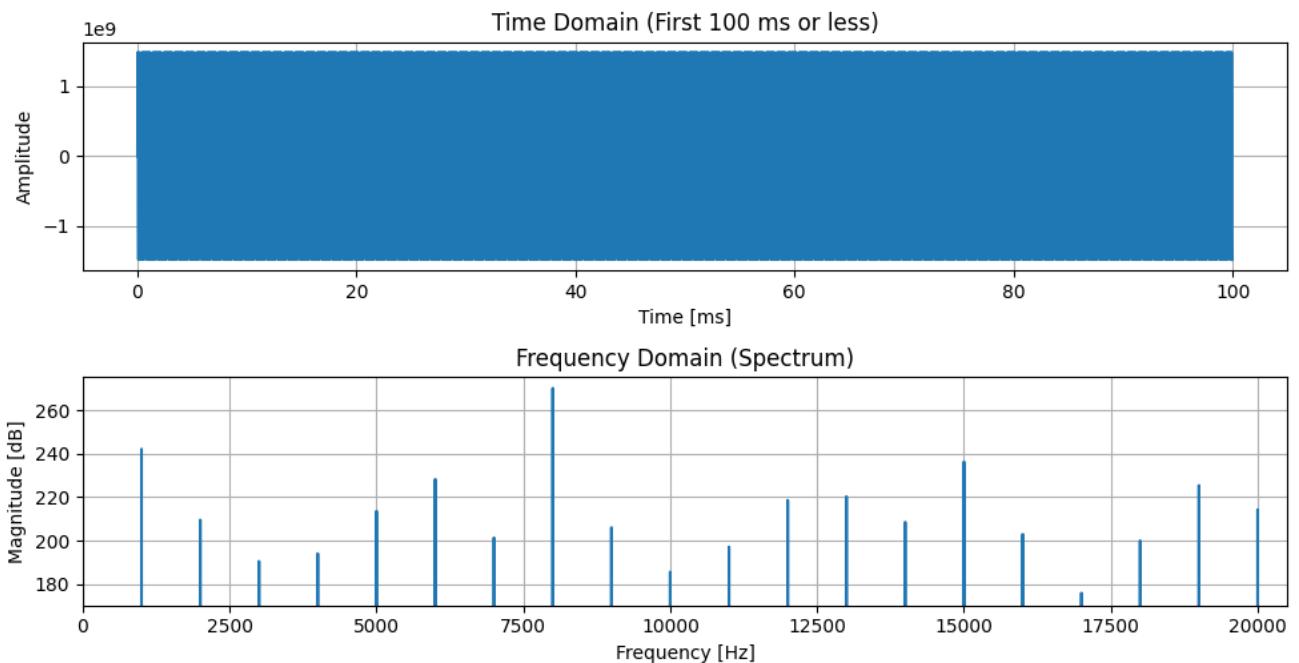
*Interpolacja sin\_8000 do 24000 Hz (liniowa)*

*sin\_8000Hz - interp\_cubic\_24000Hz*



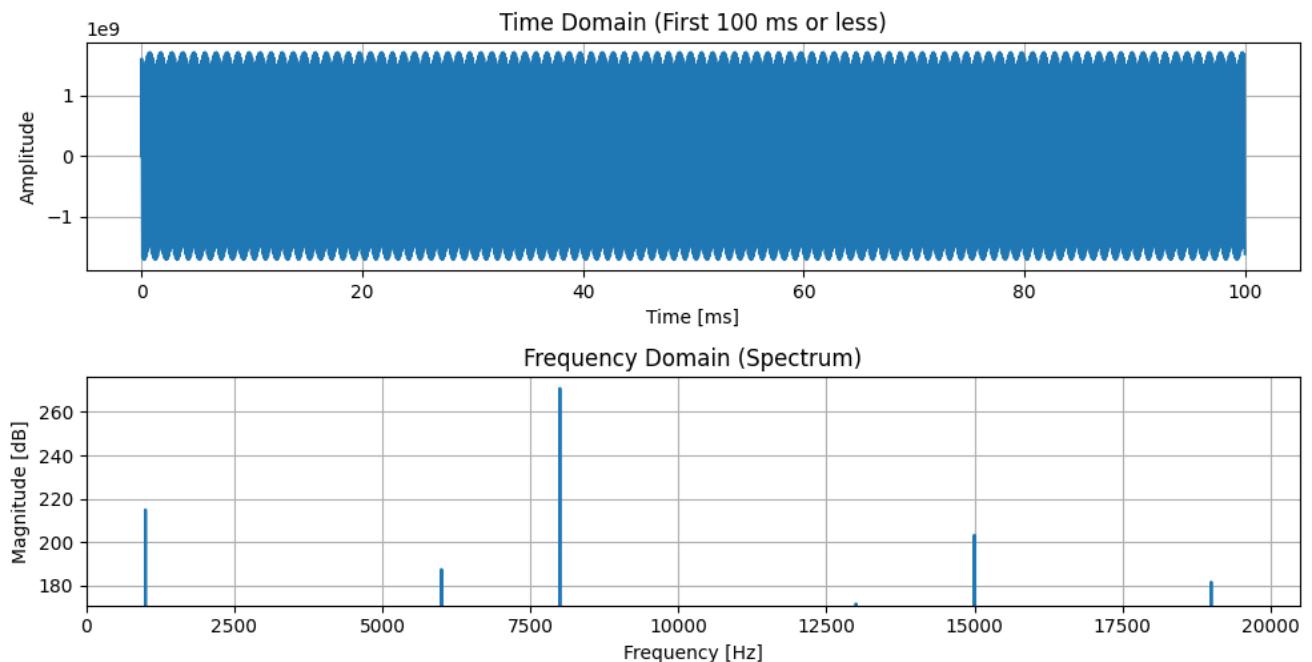
*Interpolacja sin\_8000 do 24000 Hz (cubic)*

*sin\_8000Hz - interp\_linear\_41000Hz*



*Interpolacja sin\_8000 do 41000 Hz (liniowa)*

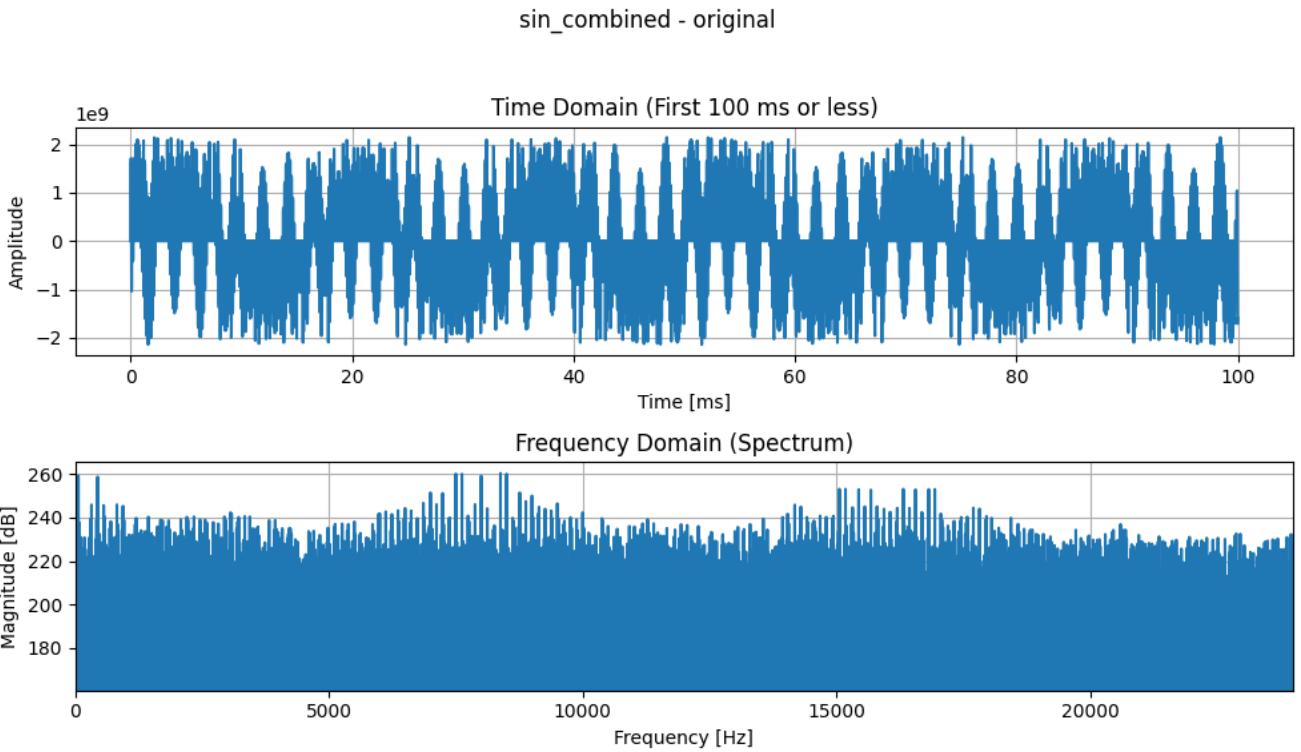
*sin\_8000Hz - interp\_cubic\_41000Hz*



*Interpolacja sin\_8000 do 41000 Hz (cubic)*

**Plik: sin\_combined**

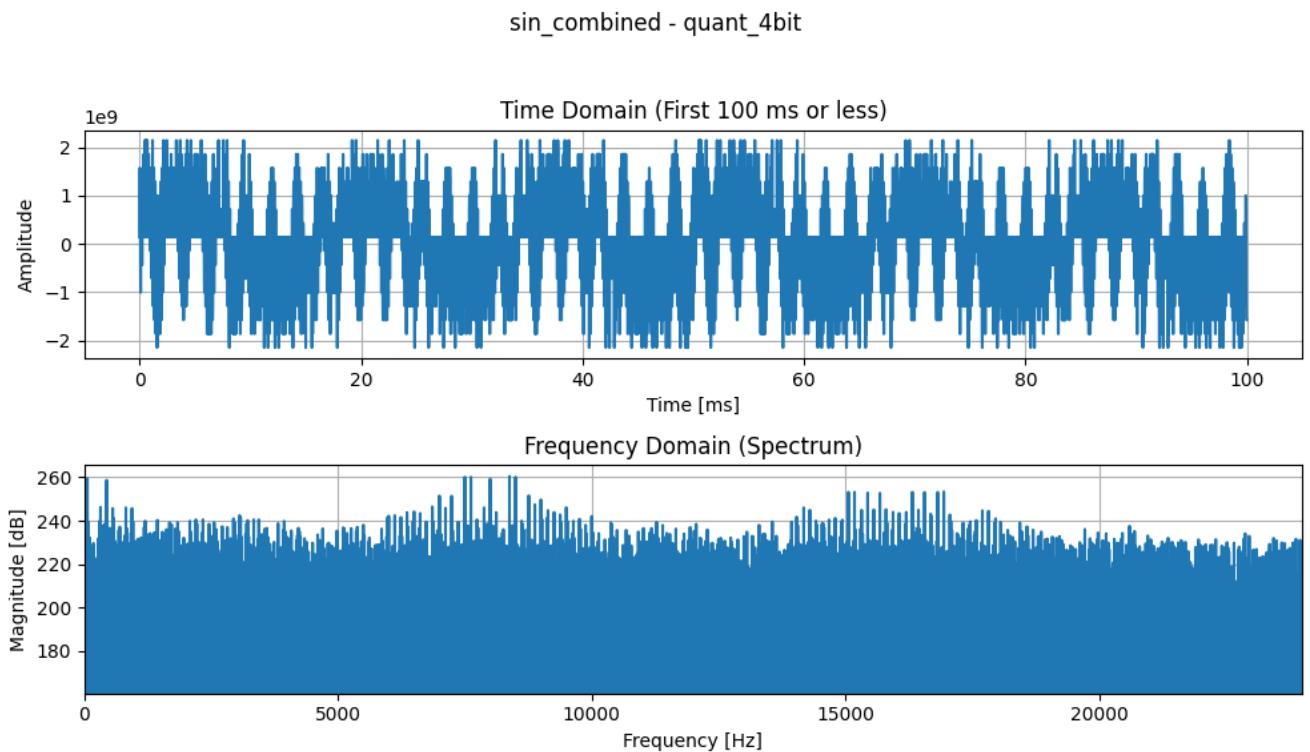
**Oryginał**



Wykres oryginalnego sygnału **sin\_combined**

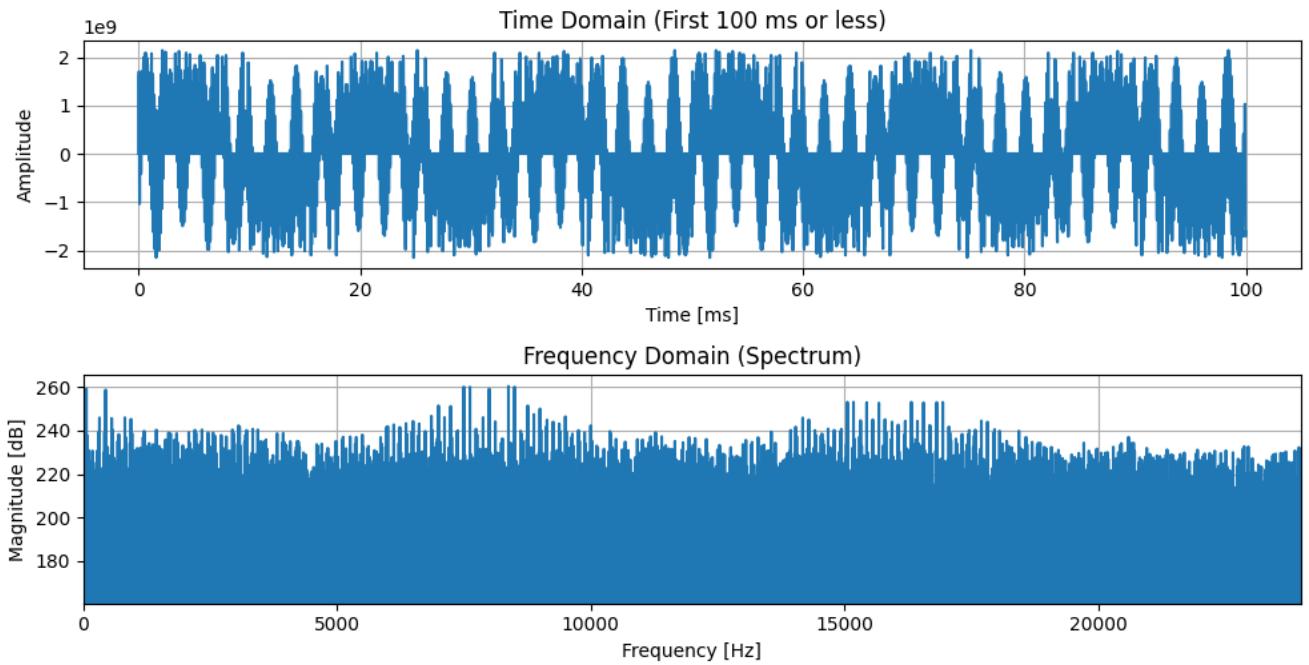
## Kwantyzacja

Analiza wpływu kwantyzacji na sygnał sinusoidalny. Wraz ze zmniejszaniem liczbą bitów oczekuje się pojawienia się szumu kwantyzacji, widocznego jako dodatkowe składowe harmoniczne w widmie oraz "schodkowanie" sygnału w dziedzinie czasu.



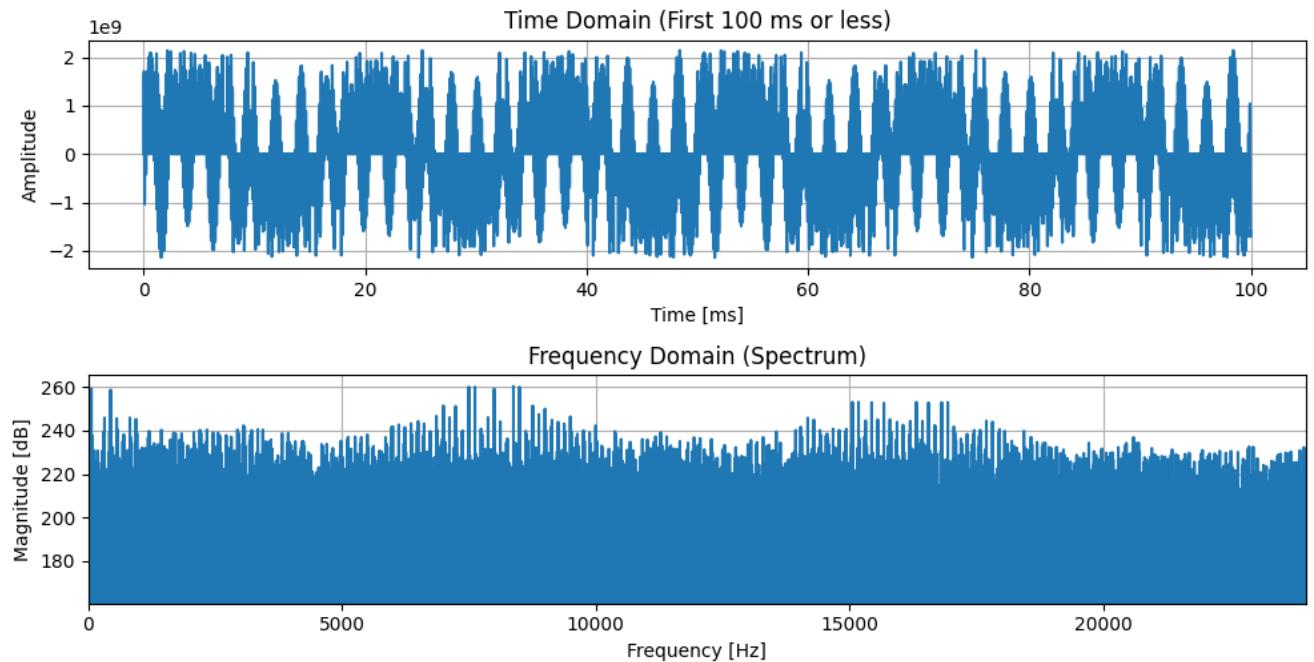
Kwantyzacja **sin\_combined** do 4 bitów

*sin\_combined - quant\_8bit*

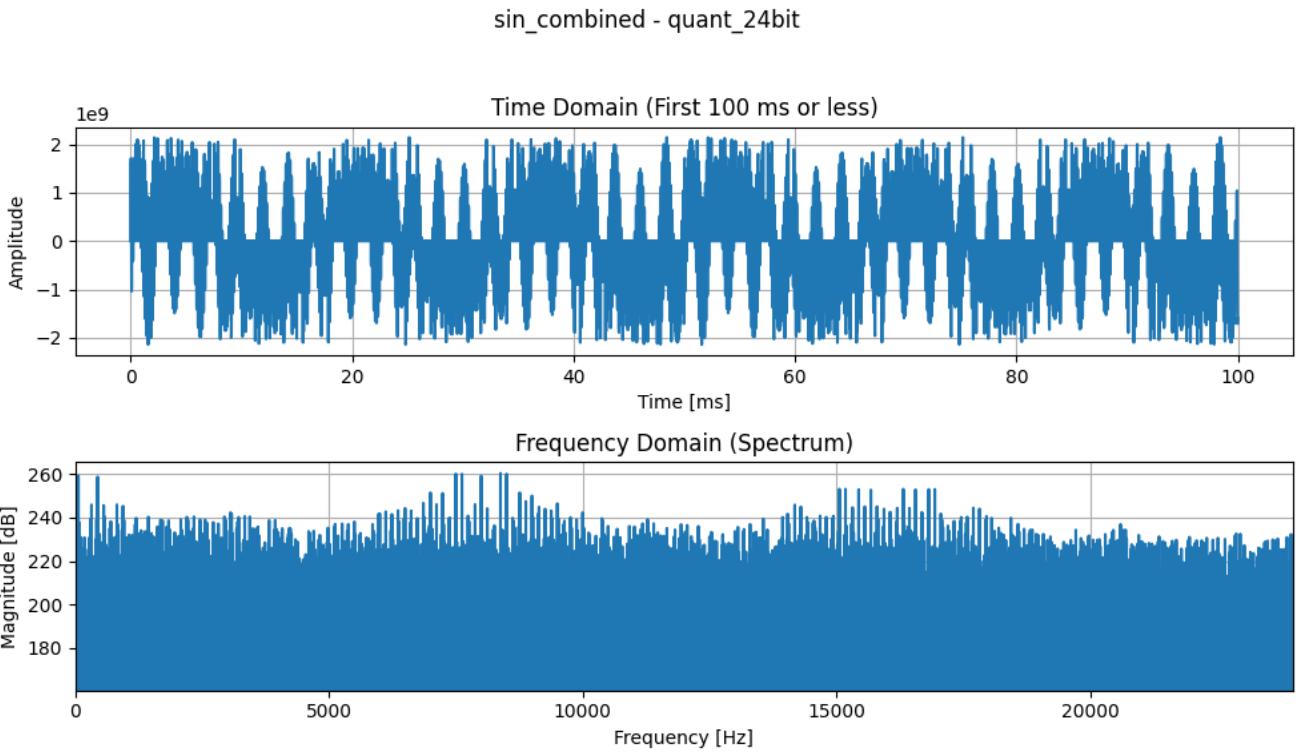


*Kwantyzacja sin\_combined do 8 bitów*

*sin\_combined - quant\_16bit*



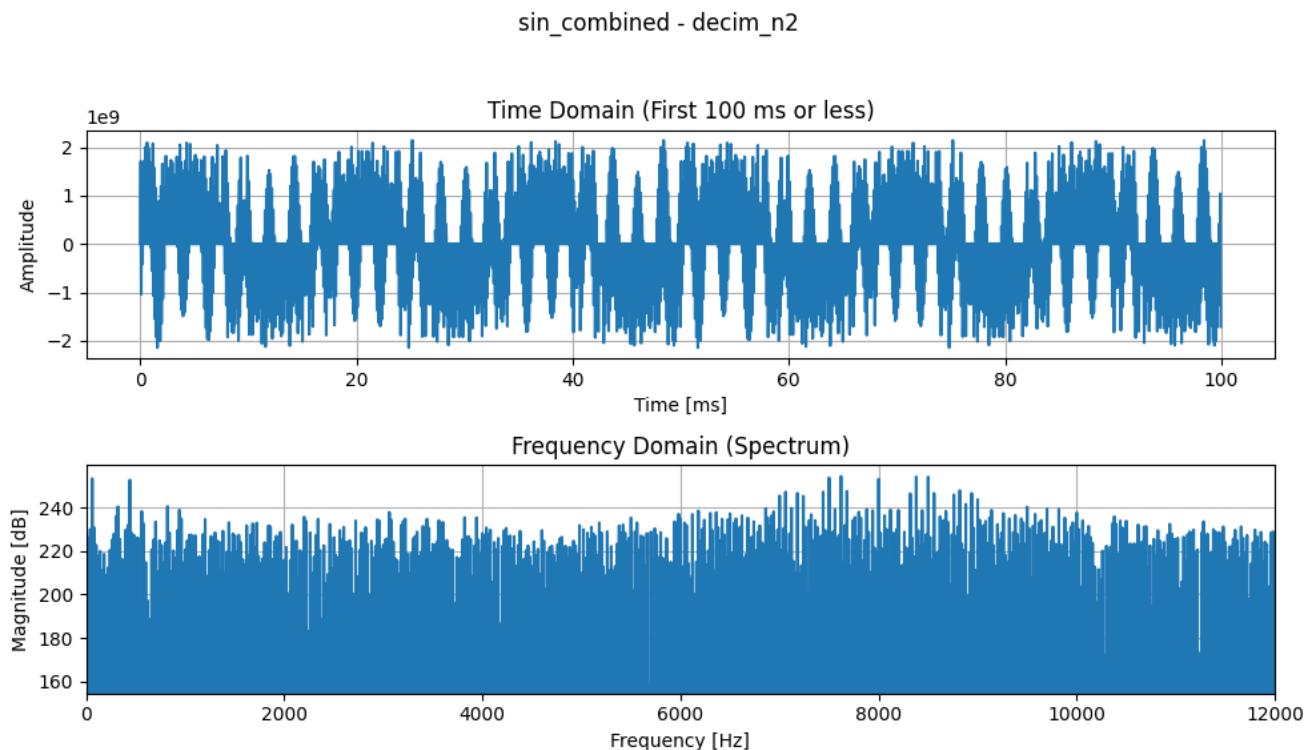
*Kwantyzacja sin\_combined do 16 bitów*



*Kwantyzacja sin\_combined do 24 bitów*

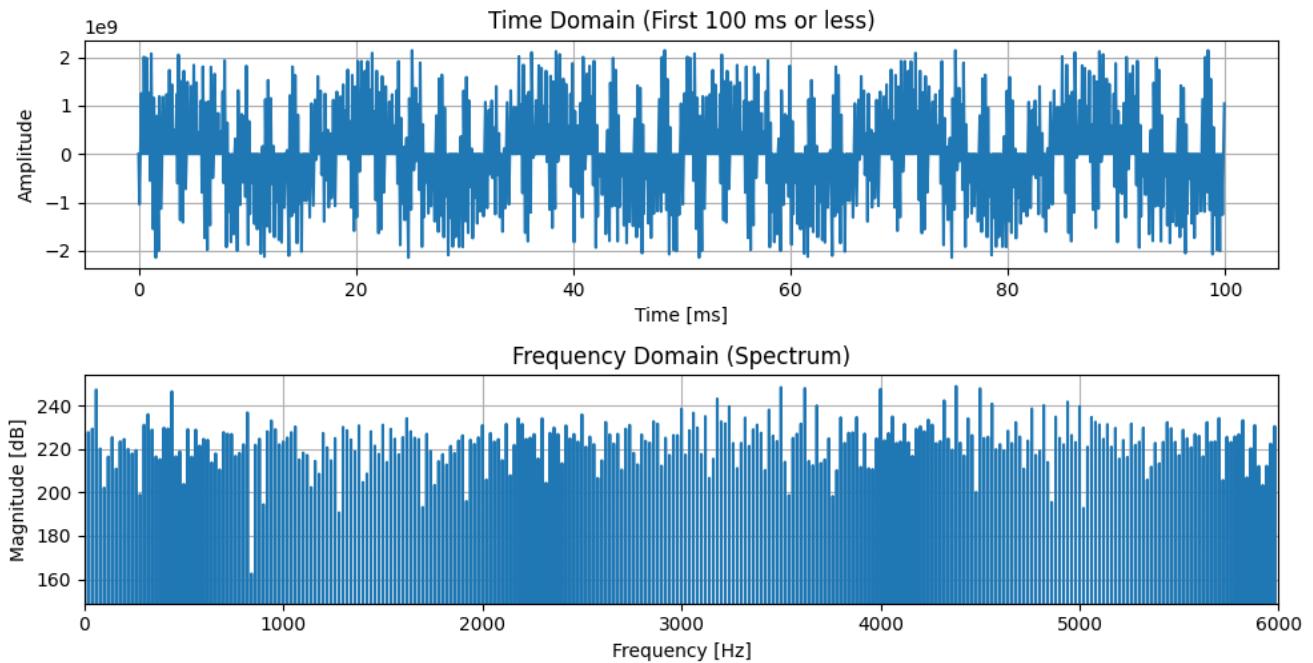
## Decymacja

Analiza wpływu decymacji. Decymacja zmniejsza częstotliwość próbkowania  $F_s$ . Jeśli nowa częstotliwość Nyquista ( $F_s/n / 2$ ) jest niższa niż najwyższa częstotliwość w sygnale, wystąpi aliasing, widoczny jako pojawienie się "fałszywych" częstotliwości w widmie.



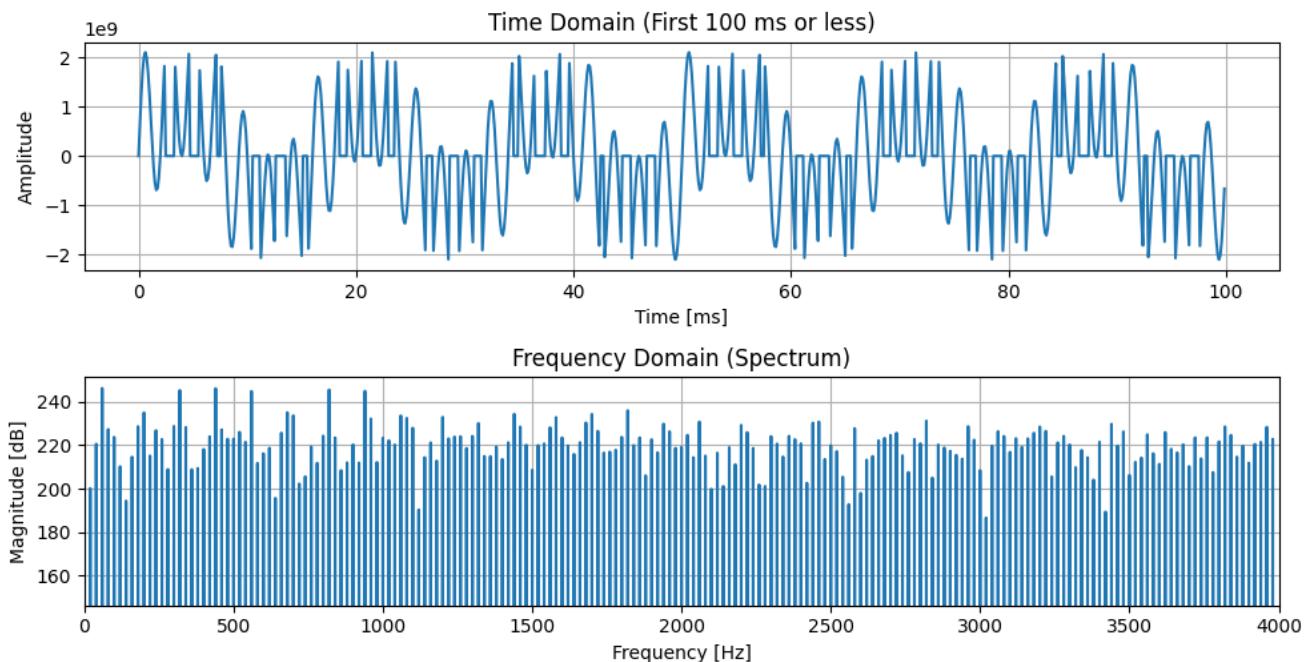
*Decymacja sin\_combined z krokiem n=2*

*sin\_combined - decim\_n4*



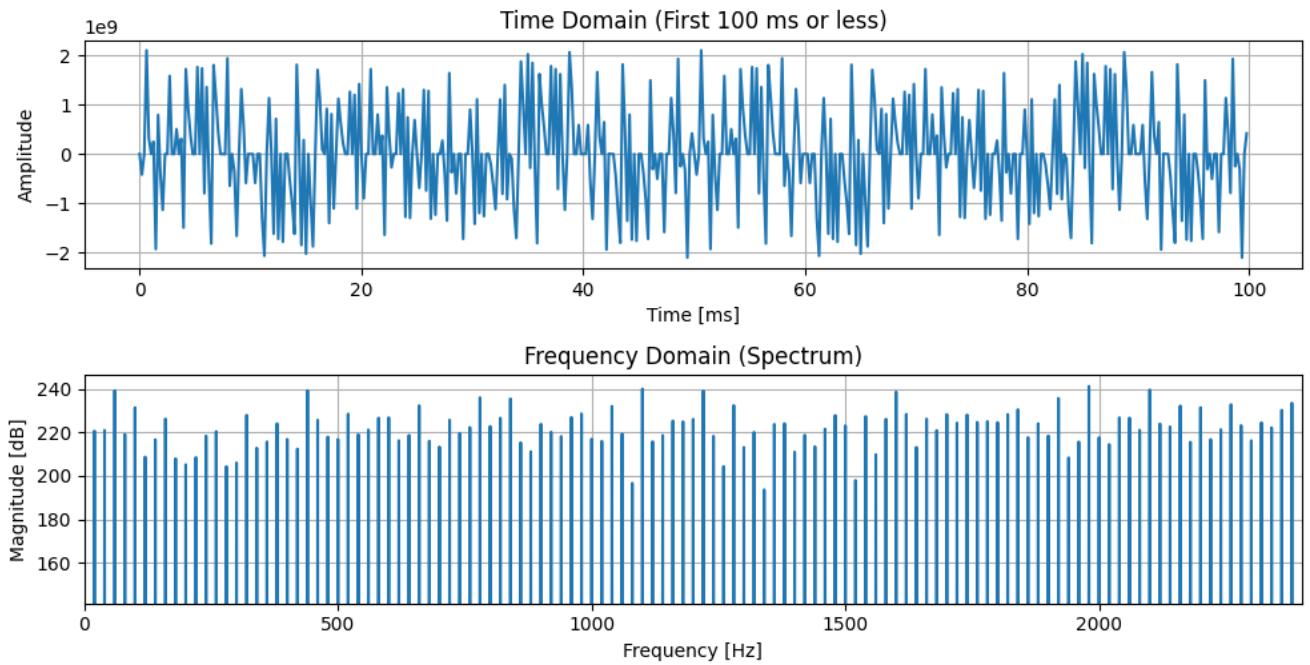
Decymacja *sin\_combined* z krokiem  $n=4$

*sin\_combined - decim\_n6*



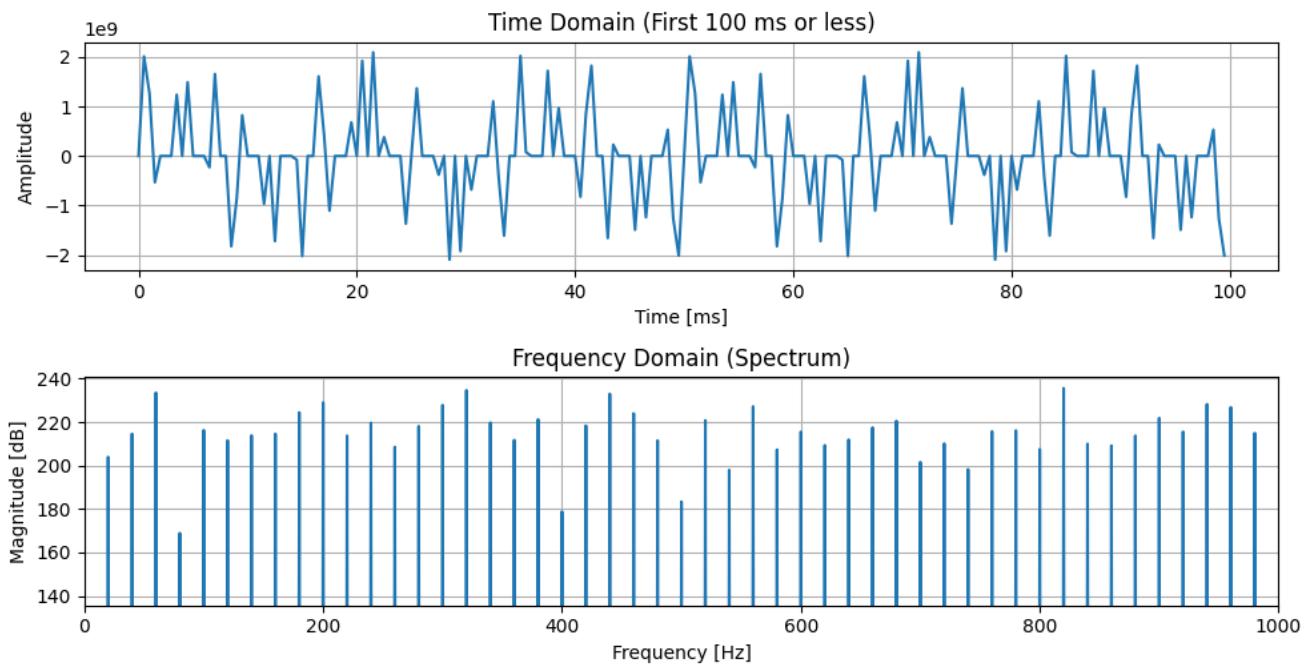
Decymacja *sin\_combined* z krokiem  $n=6$

### sin\_combined - decim\_n10



Decymacja sin\_combined z krokiem n=10

### sin\_combined - decim\_n24



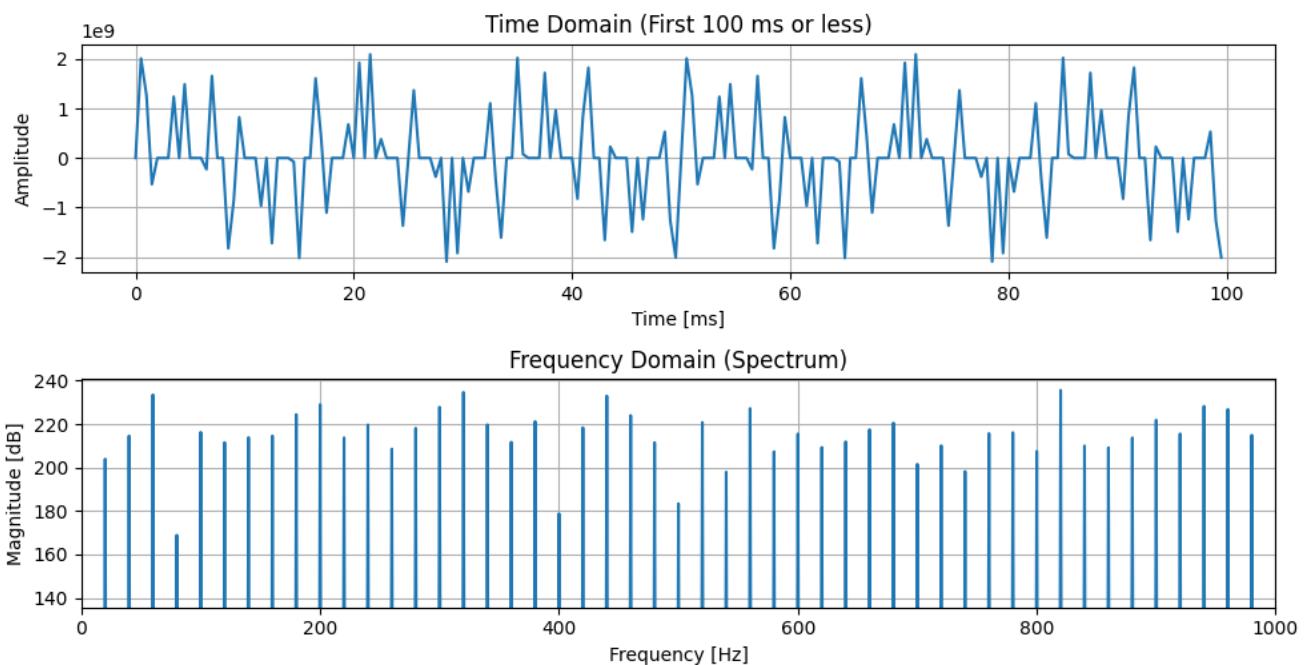
Decymacja sin\_combined z krokiem n=24

## Interpolacja

Analiza wpływu interpolacji (liniowej i sześciennnej **cubic**) na zmianę częstotliwości próbkowania. Downsampling (zmnieszenie Fs) przez interpolację może prowadzić do utraty wysokich częstotliwości, jeśli nowa Fs jest zbyt niska (efekt podobny do filtrowania dolnoprzepustowego). Upsampling (zwiększenie Fs) nie dodaje nowej informacji, ale może wygładzić sygnał. Interpolacja

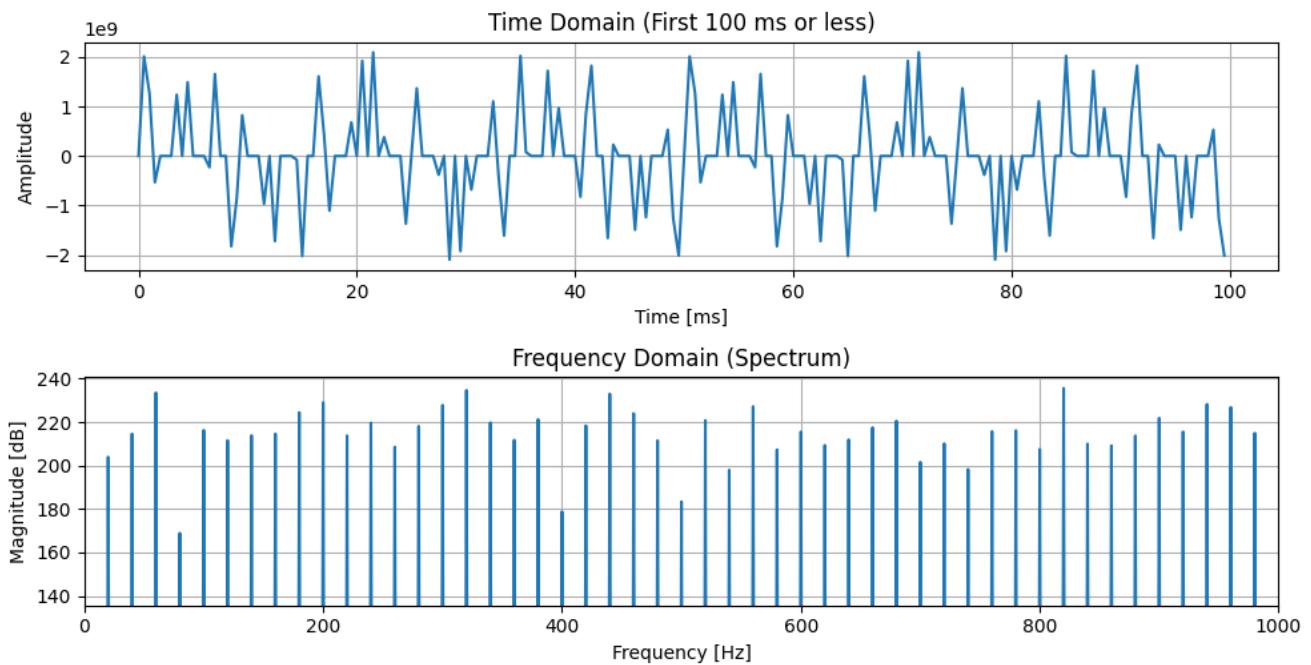
**cubic** jest zazwyczaj dokładniejsza od liniowej, ale bardziej kosztowna obliczeniowo.

sin\_combined - interp\_linear\_2000Hz



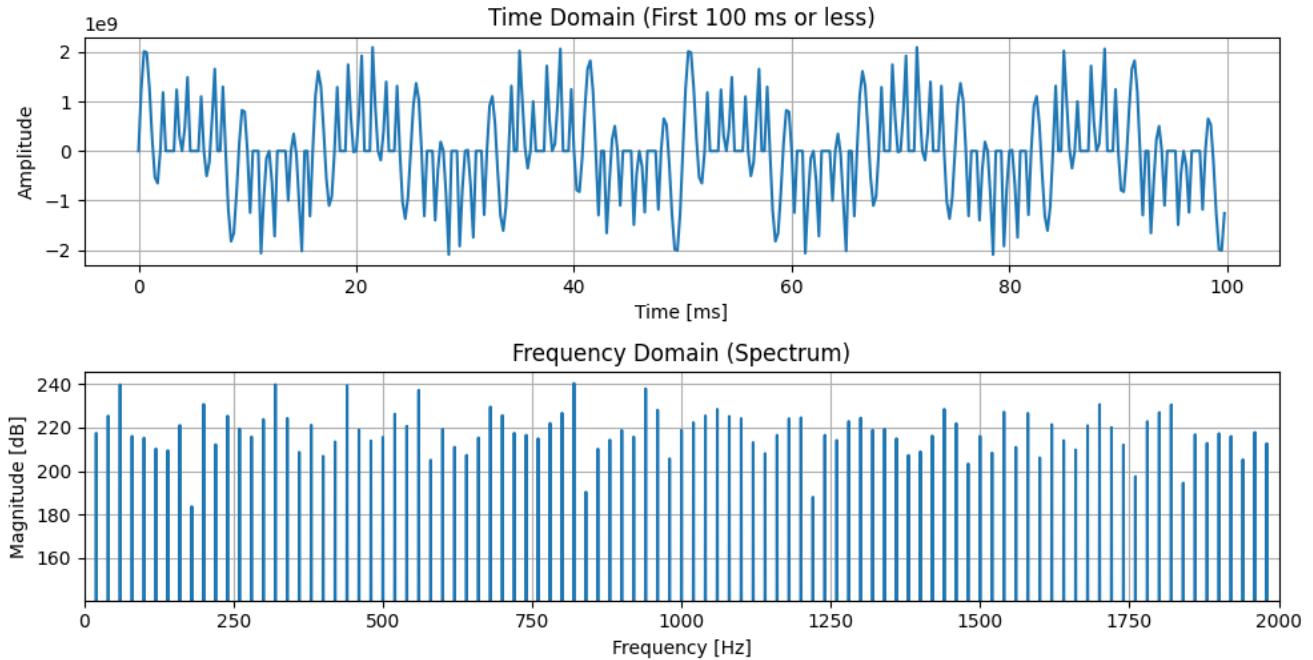
Interpolacja **sin\_combined** do 2000 Hz (liniowa)

sin\_combined - interp\_cubic\_2000Hz



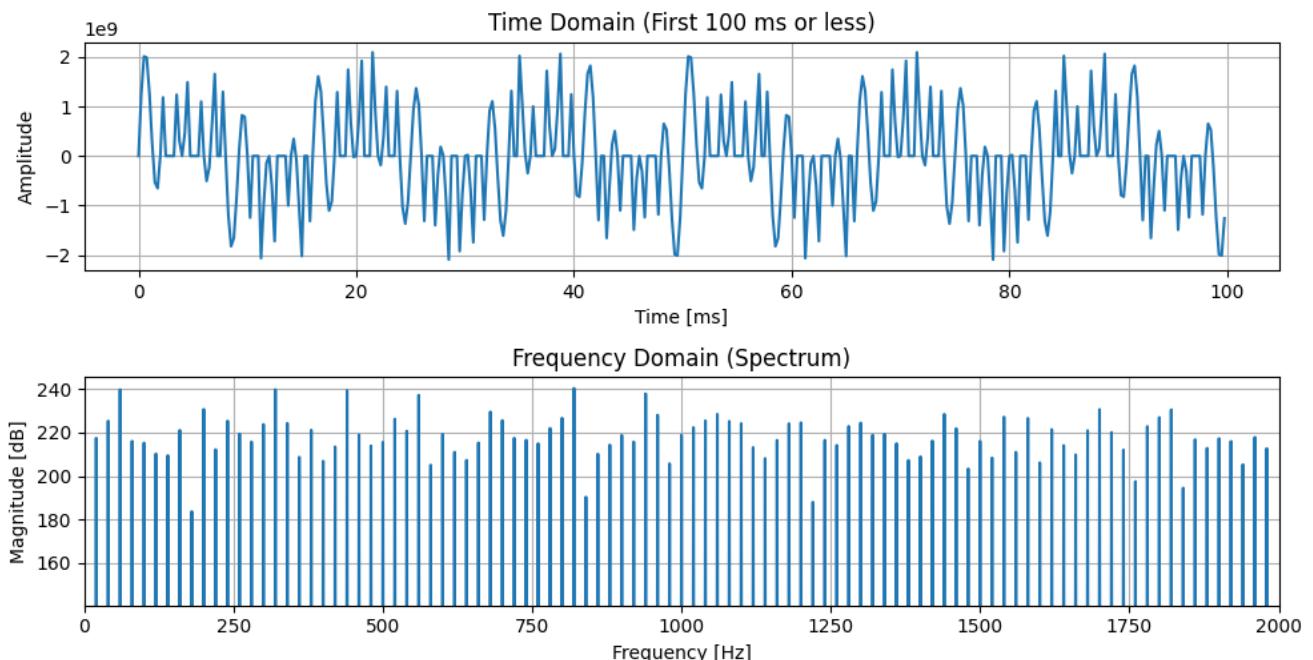
Interpolacja **sin\_combined** do 2000 Hz (cubic)

sin\_combined - interp\_linear\_4000Hz



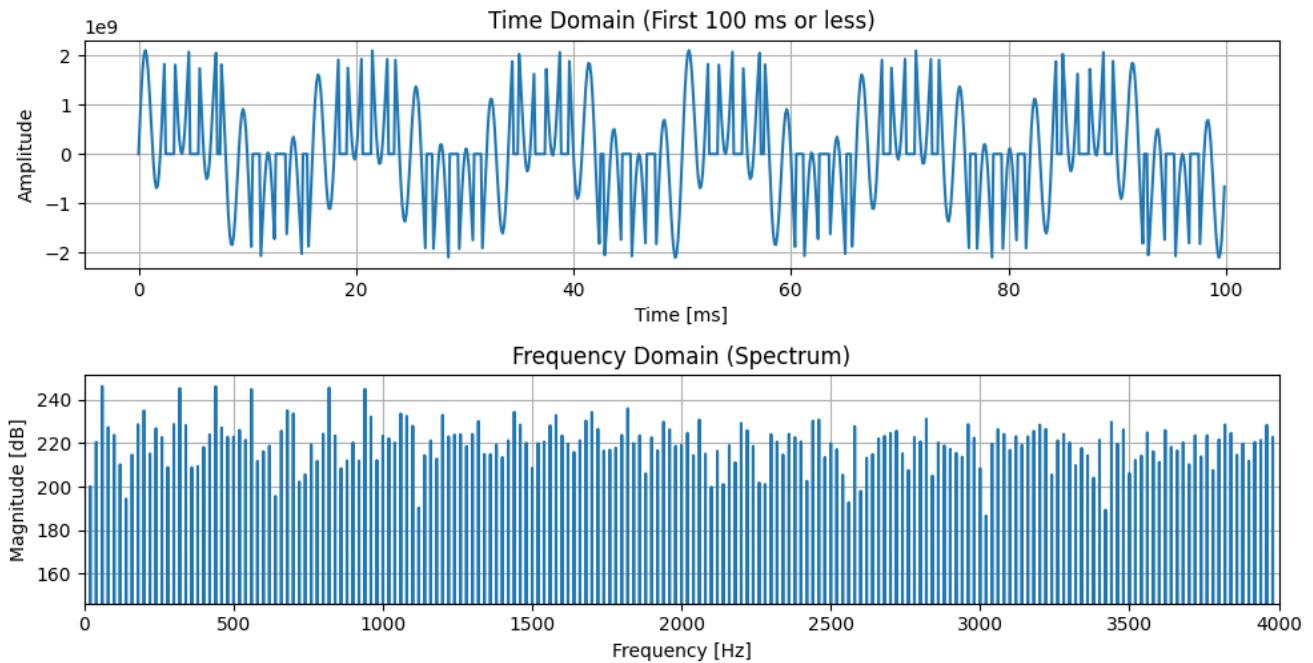
Interpolacja sin\_combined do 4000 Hz (liniowa)

sin\_combined - interp\_cubic\_4000Hz



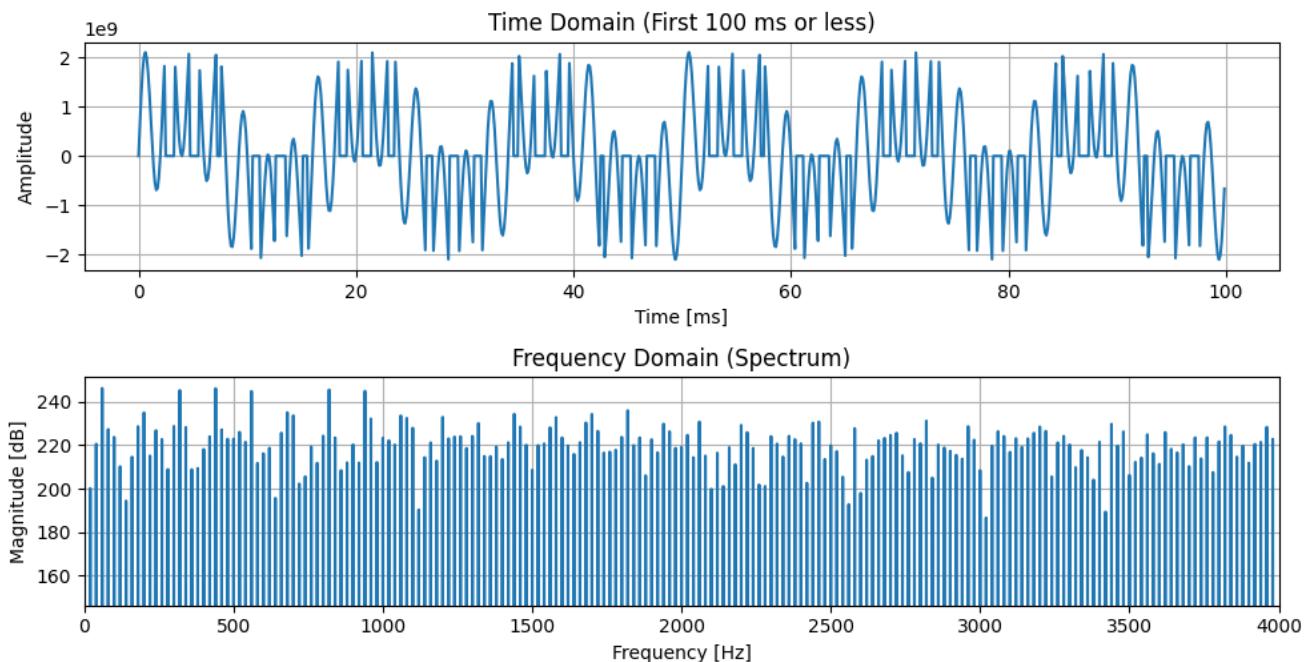
Interpolacja sin\_combined do 4000 Hz (cubic)

sin\_combined - interp\_linear\_8000Hz



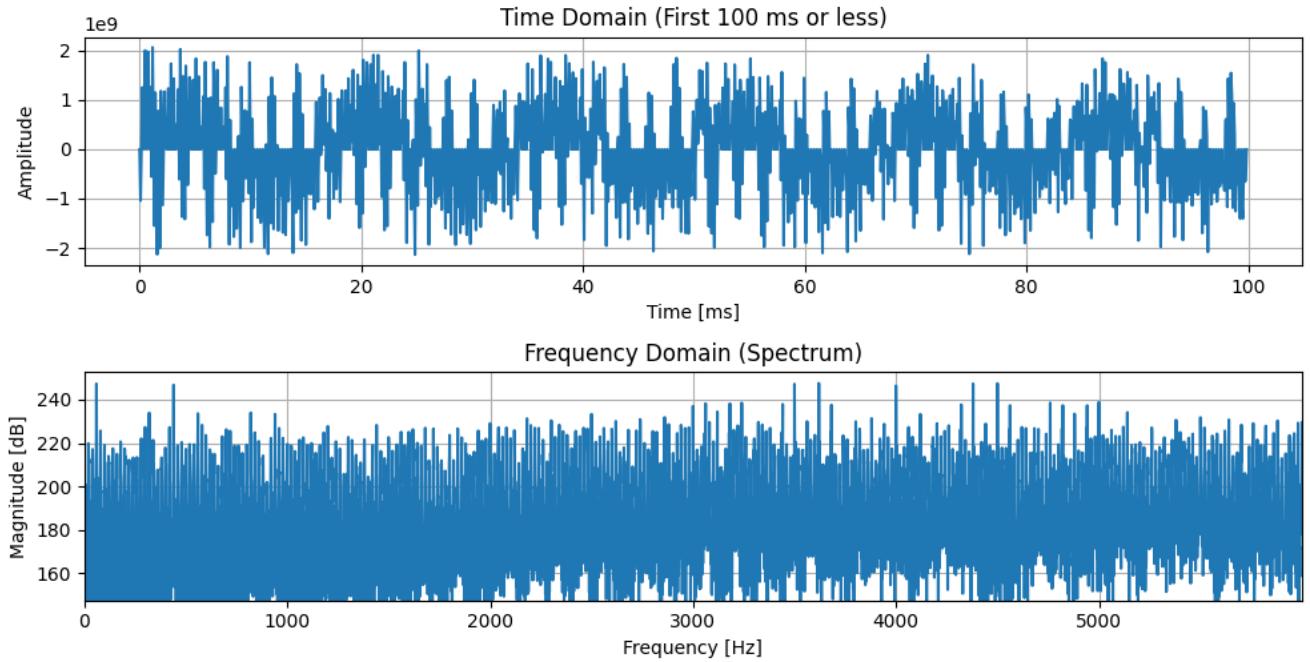
Interpolacja sin\_combined do 8000 Hz (liniowa)

sin\_combined - interp\_cubic\_8000Hz



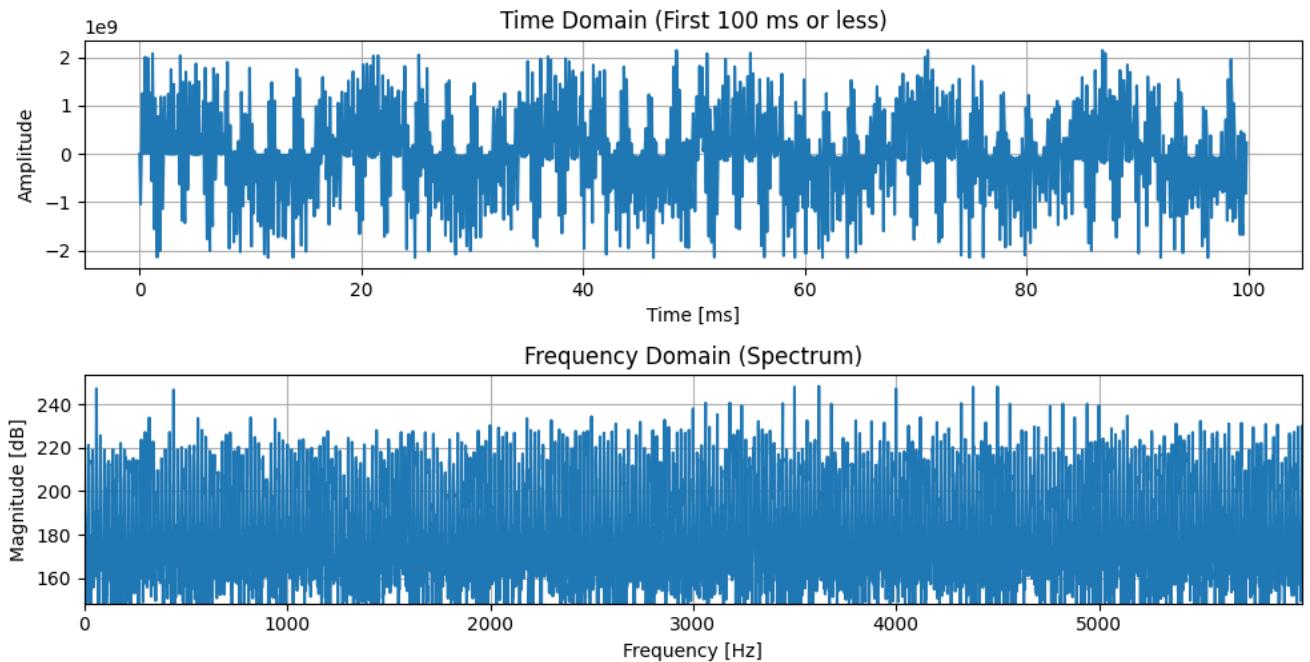
Interpolacja sin\_combined do 8000 Hz (cubic)

sin\_combined - interp\_linear\_11999Hz



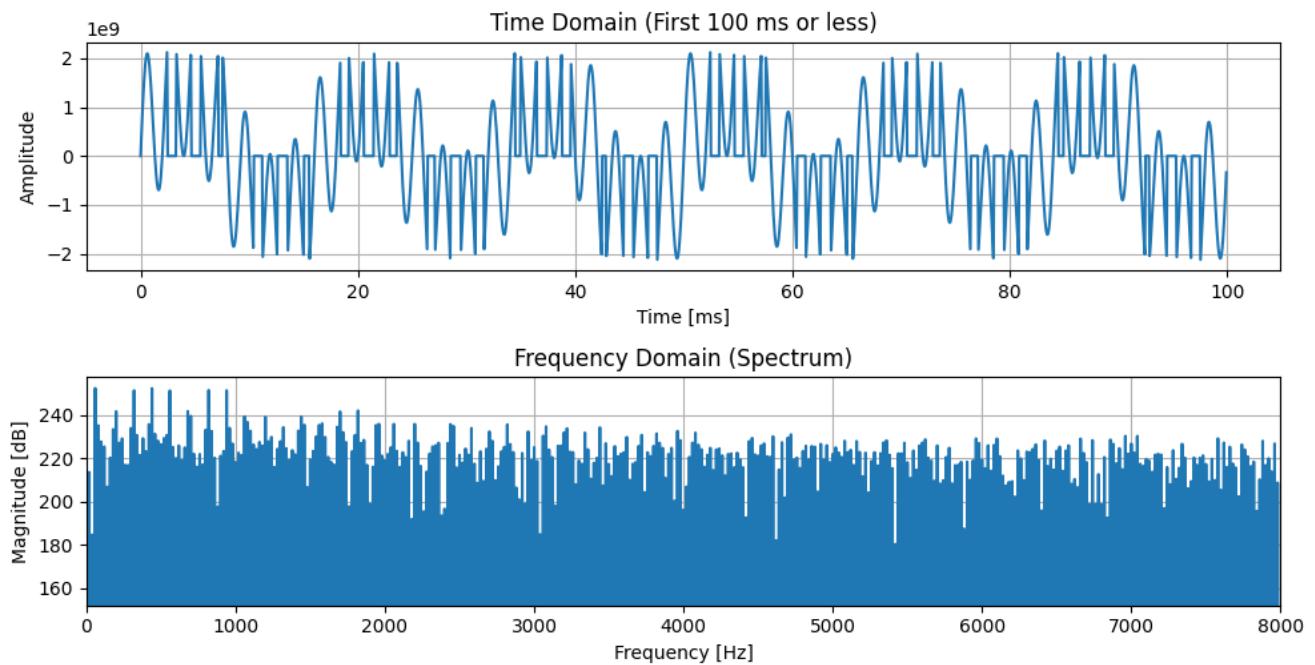
Interpolacja sin\_combined do 11999 Hz (liniowa)

sin\_combined - interp\_cubic\_11999Hz



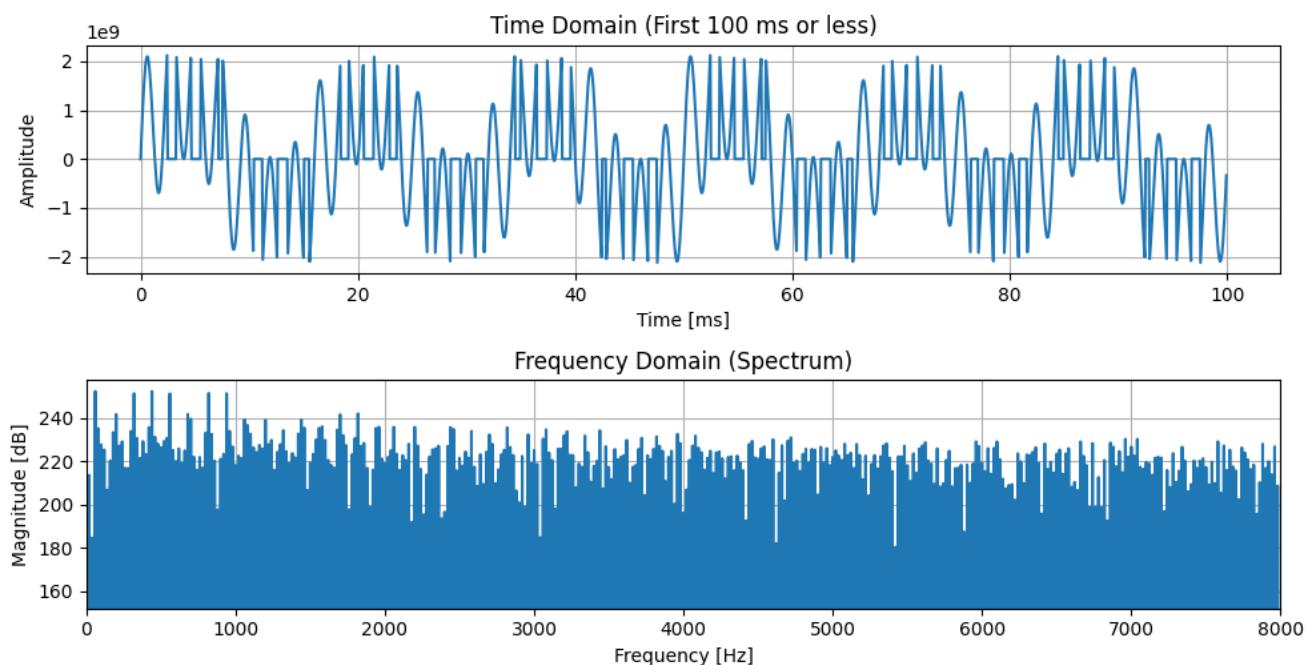
Interpolacja sin\_combined do 11999 Hz (cubic)

sin\_combined - interp\_linear\_16000Hz



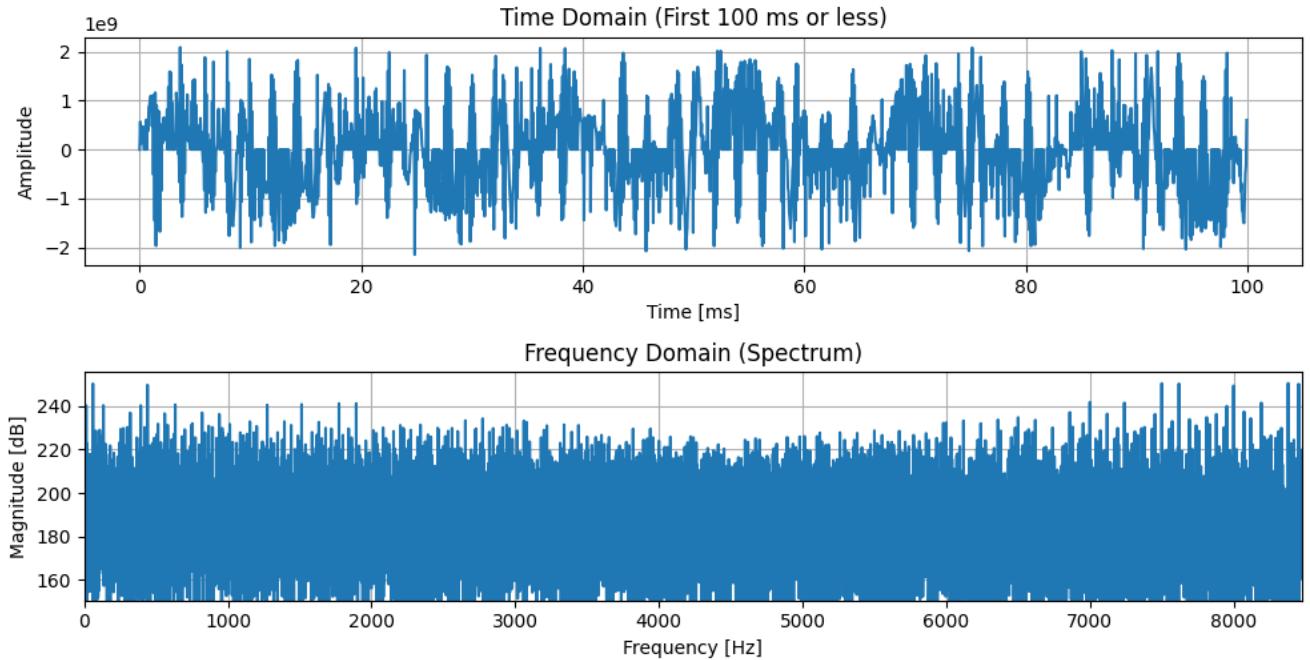
Interpolacja sin\_combined do 16000 Hz (liniowa)

sin\_combined - interp\_cubic\_16000Hz



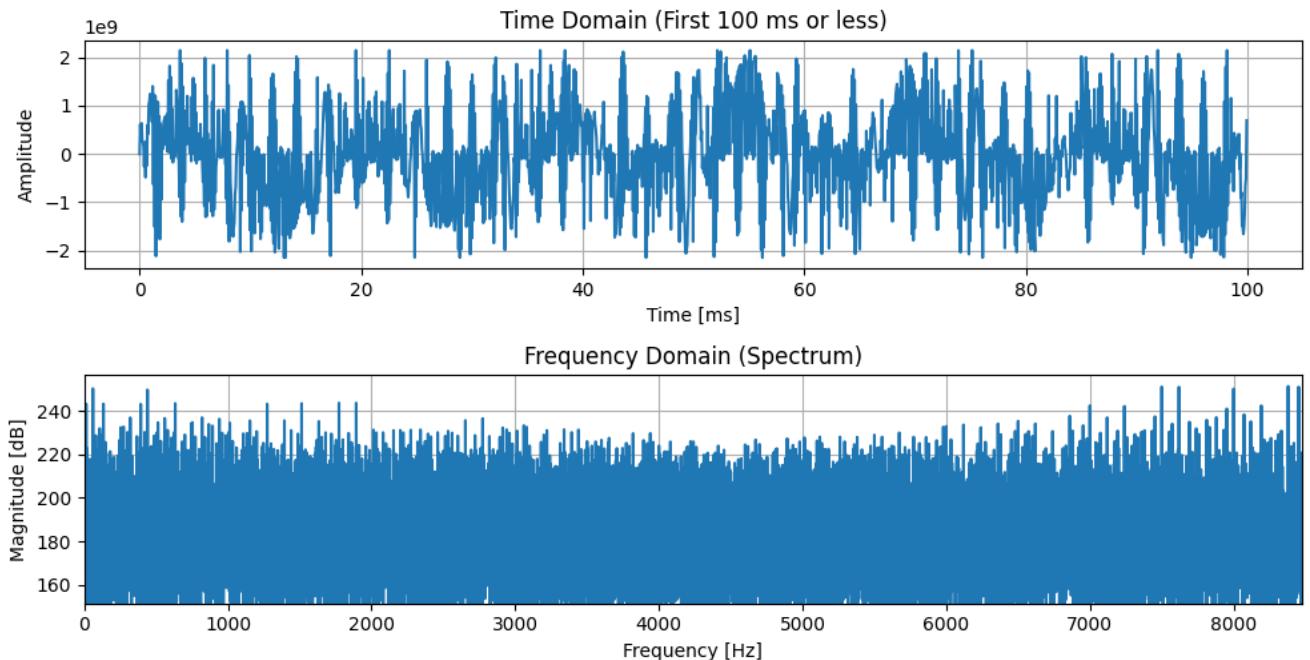
Interpolacja sin\_combined do 16000 Hz (cubic)

sin\_combined - interp\_linear\_16953Hz



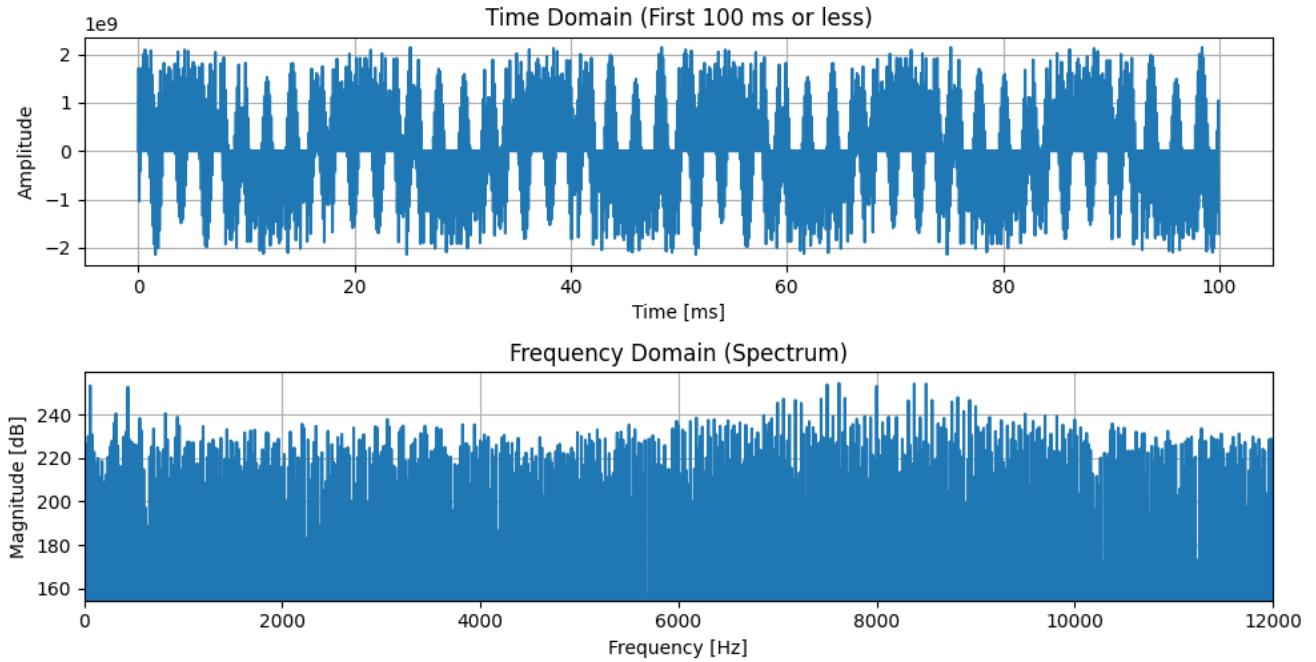
Interpolacja sin\_combined do 16953 Hz (liniowa)

sin\_combined - interp\_cubic\_16953Hz



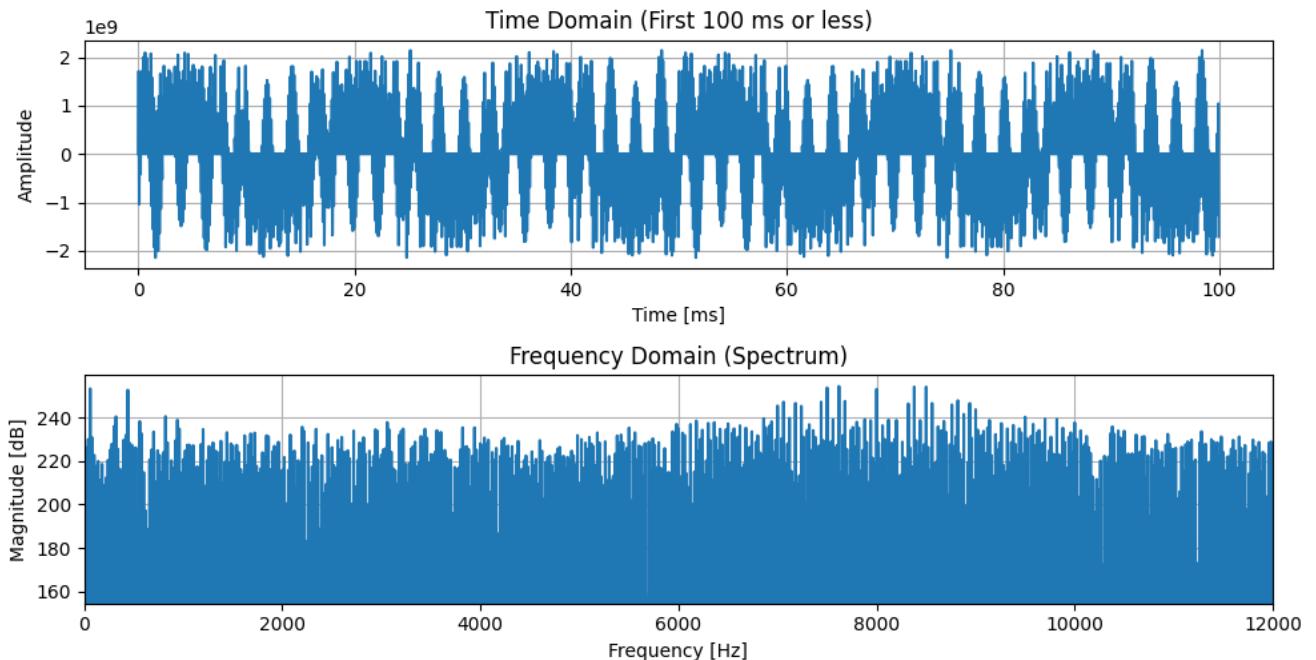
Interpolacja sin\_combined do 16953 Hz (cubic)

sin\_combined - interp\_linear\_24000Hz



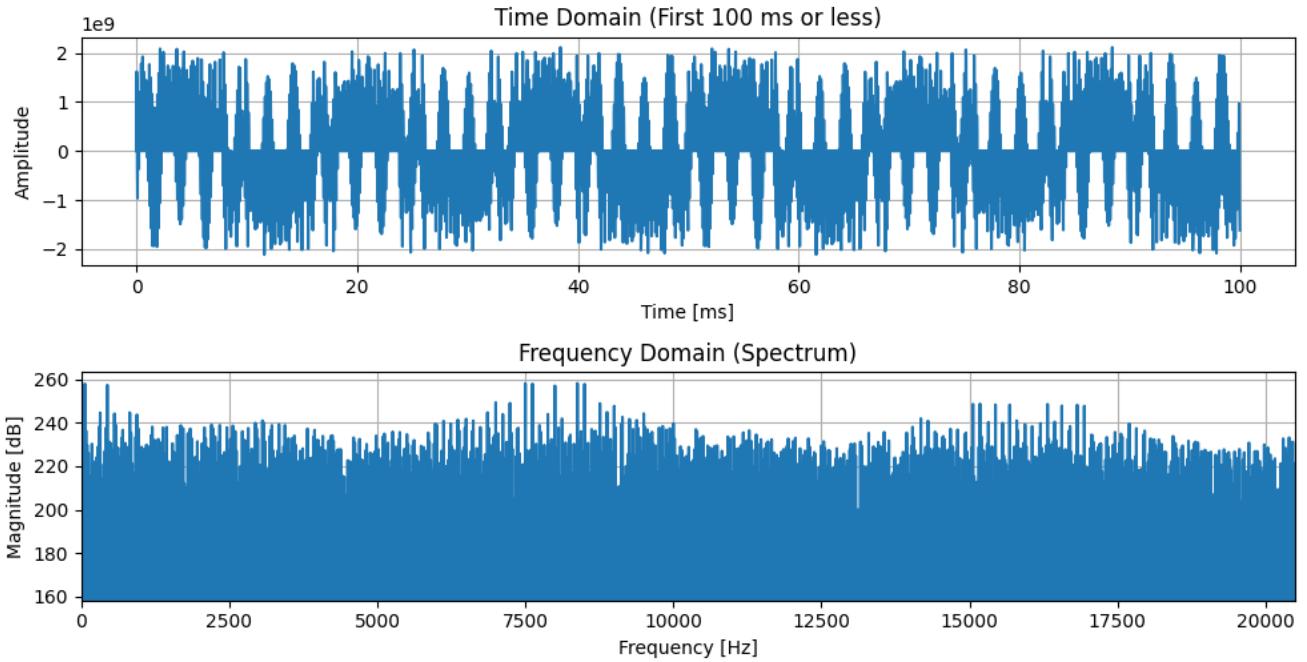
Interpolacja sin\_combined do 24000 Hz (liniowa)

sin\_combined - interp\_cubic\_24000Hz



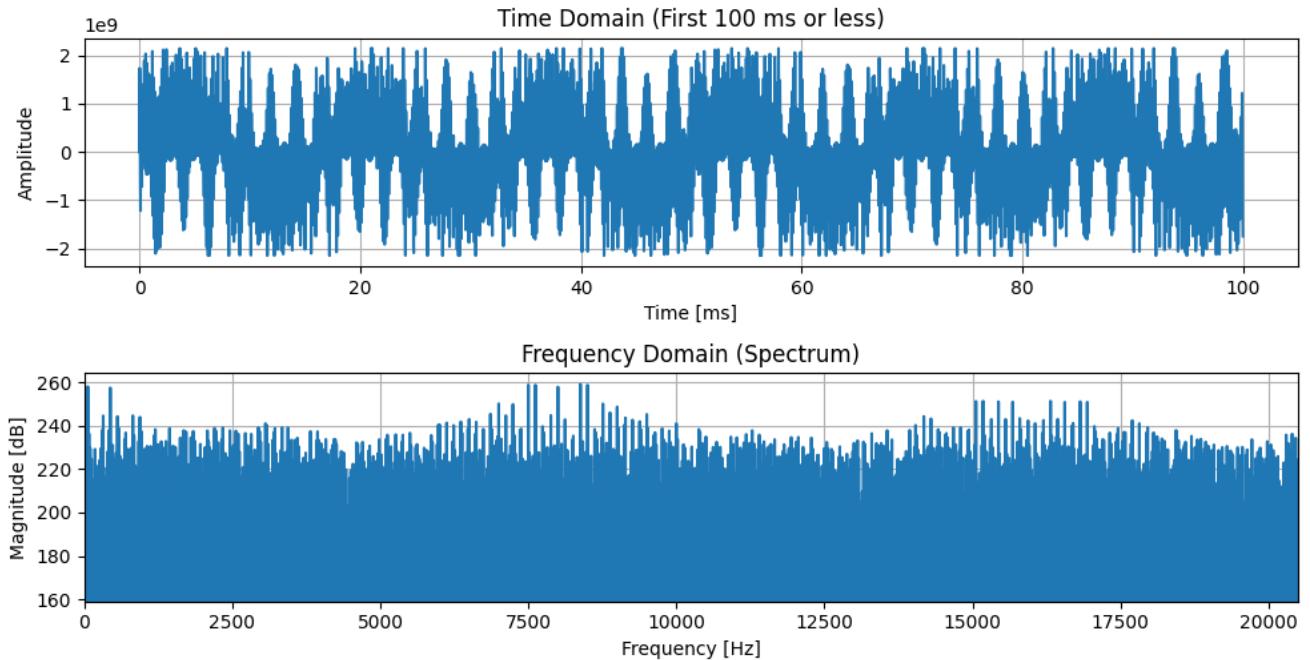
Interpolacja sin\_combined do 24000 Hz (cubic)

sin\_combined - interp\_linear\_41000Hz



Interpolacja *sin\_combined* do 41000 Hz (liniowa)

sin\_combined - interp\_cubic\_41000Hz



Interpolacja *sin\_combined* do 41000 Hz (cubic)

## Obserwacje Odsłuchowe (*sing\_\* .wav*)

Przeprowadzono testy odsłuchowe dla wybranych plików z katalogu [./Pliki\\_Sing/](#), po jednym z każdej kategorii ([low](#), [medium](#), [high](#)). Wyniki subiektywnej oceny wpływu modyfikacji na jakość dźwięku przedstawiono w tabeli poniżej.

Plik Źródłowy (kategoria)	Modyfikacja	Parametr	Obserwacje / Jakość dźwięku
Plik Low (nazwa_pliku_1 o w.wav)	Kwantyzacja	4-bit	Silny szum kwantyzacji, wyraźne zniekształcenia, dźwięk może wydawać się metaliczny lub "brudny". Niska jakość.
Plik Low	Kwantyzacja	8-bit	Słyszalny, ale znacznie słabszy szum tła (szum kwantyzacji). Ogólnie zrozumiałe, ale zauważalna degradacja jakości, utrata subtelności.
Plik Low	Decymacja	n=4	Wyraźna utrata wysokich tonów, dźwięk stłumiony ("jak przez ścianę"). Aliasing może być słyszalny jako dodatkowe, nienaturalne składowe.
Plik Low	Decymacja	n=6	Jeszcze większa utrata wysokich częstotliwości. Dźwięk bardziej stłumiony. Aliasing prawdopodobnie bardziej zauważalny.
Plik Low	Decymacja	n=10	Bardzo mocno stłumiony dźwięk, bardzo niska jakość. Trudności ze zrozumieniem mowy. Dominują niskie i średnie tony.
Plik Low	Decymacja	n=24	Ekstremalnie niska jakość, sygnał może być ledwo rozpoznawalny lub całkowicie niezrozumiałły. Silne zniekształcenia aliasingowe.
Plik Low	Interpolacja	4000 Hz (linear)	Bardzo stłumiony dźwięk, jakby odcięto wszystkie wysokie częstotliwości (efektywnie pasmo do ok. 2kHz). Bardzo niska jakość.
Plik Low	Interpolacja	4000 Hz (cubic)	Podobnie do liniowej, bardzo niska jakość. Różnica między cubic a linear może być niesłyszalna przy tak niskiej Fs.
Plik Low	Interpolacja	8000 Hz (linear)	Jakość przypominająca starą linię telefoniczną (pasmo do ok. 4kHz). Wyraźnie ograniczona jakość, brak "góry".
Plik Low	Interpolacja	8000 Hz (cubic)	Bardzo podobnie do liniowej przy tej częstotliwości.
Plik Low	Interpolacja	11999 Hz (linear)	Jakość wyraźnie lepsza niż 8kHz, ale nadal może brakować najwyższych częstotliwości ("powietrza"). Akceptowalna, ale niepełna.
Plik Low	Interpolacja	11999 Hz (cubic)	Podobnie jak liniowa, być może nieco gładzsze wysokie tony.
Plik Low	Interpolacja	16000 Hz (linear)	Całkiem dobra jakość, zbliżona do jakości FM/MP3 niższej jakości. Większość pasma słyszalnego zachowana.

Plik Źródłowy (kategoria)	Modyfikacja	Parametr	Obserwacje / Jakość dźwięku
Plik Low	Interpolacja	16000 Hz (cubic)	Bardzo podobnie do liniowej przy tej częstotliwości.
Plik Low	Interpolacja	16953 Hz (linear)	Jakość praktycznie nieodróżnialna od 16000 Hz.
Plik Low	Interpolacja	16953 Hz (cubic)	Jakość praktycznie nieodróżnialna od 16000 Hz.
Plik Medium (nazwa_pliku_ me dium.wav)	Kwantyzacja	4-bit	Silny szum kwantyzacji, zniekształcenia, niska jakość.
Plik Medium	Kwantyzacja	8-bit	Słyszalny szum, zauważalna degradacja, ale zrozumiałe.
Plik Medium	Decymacja	n=4	Stłumiony dźwięk, utrata wysokich tonów, możliwy aliasing.
Plik Medium	Decymacja	n=6	Bardziej stłumiony, większa szansa na aliasing.
Plik Medium	Decymacja	n=10	Mocno stłumiony, niska jakość.
Plik Medium	Decymacja	n=24	Bardzo niska jakość, potencjalnie niezrozumiałe.
Plik Medium	Interpolacja	4000 Hz (linear)	Bardzo stłumiony, brak wysokich tonów.
Plik Medium	Interpolacja	4000 Hz (cubic)	Podobnie jak liniowa.
Plik Medium	Interpolacja	8000 Hz (linear)	Jakość "telefoniczna".
Plik Medium	Interpolacja	8000 Hz (cubic)	Podobnie jak liniowa.
Plik Medium	Interpolacja	11999 Hz (linear)	Akceptowalna jakość, może brakować najwyższych tonów.
Plik Medium	Interpolacja	11999 Hz (cubic)	Podobnie jak liniowa.
Plik Medium	Interpolacja	16000 Hz (linear)	Dobra jakość, większość pasma zachowana.
Plik Medium	Interpolacja	16000 Hz (cubic)	Podobnie jak liniowa.
Plik Medium	Interpolacja	16953 Hz (linear)	Podobnie jak 16000 Hz.
Plik Medium	Interpolacja	16953 Hz (cubic)	Podobnie jak 16000 Hz.
Plik High (nazwa_pliku_ hi gh.wav)	Kwantyzacja	4-bit	Silny szum kwantyzacji, zniekształcenia, niska jakość. Sygnały o wysokiej częstotliwości mogą być szczególnie zniekształcone.

Plik Źródłowy (kategoria)	Modyfikacja	Parametr	Obserwacje / Jakość dźwięku
Plik High	Kwantyzacja	8-bit	Słyszalny szum, zauważalna degradacja, ale zrozumiałe. Utrata detali w wysokich tonach może być bardziej widoczna niż w pliku low.
Plik High	Decymacja	n=4	Wyraźna utrata wysokich tonów, stłumienie. Aliasing może być bardziej problematyczny dla składowych o wysokiej częstotliwości.
Plik High	Decymacja	n=6	Jeszcze większe stłumienie, większe ryzyko aliasingu.
Plik High	Decymacja	n=10	Mocno stłumiony, niska jakość.
Plik High	Decymacja	n=24	Bardzo niska jakość, niezrozumiałe.
Plik High	Interpolacja	4000 Hz (linear)	Bardzo stłumiony, całkowity brak wysokich tonów.
Plik High	Interpolacja	4000 Hz (cubic)	Podobnie jak liniowa.
Plik High	Interpolacja	8000 Hz (linear)	Jakość "telefoniczna", brak najwyższych częstotliwości.
Plik High	Interpolacja	8000 Hz (cubic)	Podobnie jak liniowa.
Plik High	Interpolacja	11999 Hz (linear)	Akceptowalna jakość, ale wyraźnie ucięta "góra" pasma.
Plik High	Interpolacja	11999 Hz (cubic)	Podobnie jak liniowa.
Plik High	Interpolacja	16000 Hz (linear)	Dobra jakość, zachowane większość informacji z oryginalnego sygnału (jeśli $F_s_{orig} > 16\text{kHz}$ ).
Plik High	Interpolacja	16000 Hz (cubic)	Podobnie jak liniowa.
Plik High	Interpolacja	16953 Hz (linear)	Podobnie jak 16000 Hz.
Plik High	Interpolacja	16953 Hz (cubic)	Podobnie jak 16000 Hz.

## Podsumowanie / Wnioski

- Kwantyzacja:** Liczba bitów ma bezpośredni wpływ na stosunek sygnału do szumu kwantyzacji. Przy 8 bitach szum jest często słyszalny, ale akceptowalny dla mowy. Przy 4 bitach szum i zniekształcenia są bardzo silne, znaczco degradując jakość. W widmie szum kwantyzacji objawia się jako podniesienie poziomu szumu tła oraz pojawienie się dodatkowych harmonicznych (szczególnie widoczne przy niskich rozdzielczościach). Zmniejszenie liczby bitów powoduje "schodkowanie" sygnału w dziedzinie czasu.
- Decymacja:** Wpływ współczynnika  $n$  jest dwójaki: zmniejsza ilość danych i obniża częstotliwość Nyquista do  $F_s / (2^n)$ . Jeśli w oryginalnym sygnale były składowe powyżej tej nowej

częstotliwości Nyquista, pojawia się aliasing - "zawijanie" się wysokich częstotliwości do pasma poniżej  $F_s / (2 \cdot n)$ , co słyszać jako nienaturalne tony lub zniekształcenia, a widać w widmie jako "fałszywe" prążki. Im większe  $n$ , tym niższa częstotliwość Nyquista i większe ryzyko aliasingu oraz większa utrata wysokich tonów (nawet bez aliasingu, bo pasmo jest węższe). Przy dużych  $n$  (np. 10, 24) aliasing i ograniczenie pasma prowadzą do bardzo niskiej jakości.

- **Interpolacja:** Docelowa częstotliwość próbkowania ( $F_{s\_new}$ ) określa górną granicę pasma przenoszenia (ok.  $F_{s\_new} / 2$ ). Downsampling (obniżenie  $F_s$ ) działa jak filtr dolnoprzepustowy - niskie  $F_{s\_new}$  (np. 4000 Hz, 8000 Hz) powodują znaczną utratę wysokich częstotliwości i stłumienie dźwięku. Różnica między interpolacją liniową a **cubic** jest zazwyczaj subtelna w odsłuchu, szczególnie przy dużym downsamplingu, gdzie dominuje efekt ograniczenia pasma. Teoretycznie **cubic** lepiej rekonstruuje sygnał, co może być widoczne jako mniej artefaktów w widmie przy upsamplingu lub łagodniejsze przejścia w czasie. Interpolacja znaczco pogarsza jakość, gdy  $F_{s\_new}$  jest zbyt niska, by przenieść istotne składowe oryginalnego sygnału (zgodnie z twierdzeniem Nyquista-Shannona).
- **Ogólne:** Najbardziej destrukcyjna dla jakości dźwięku jest zazwyczaj:
  - Kwantyzacja do bardzo małej liczby bitów (np. 4 bity) ze względu na silny szum i zniekształcenia.
  - Decymacja/Interpolacja do bardzo niskiej częstotliwości próbkowania (np. 4000 Hz, 8000 Hz, lub decymacja z dużym  $n$ , np. 10, 24) z powodu silnego ograniczenia pasma i/lub aliasingu. Trudno jednoznacznie wskazać "najgorszą" operację, gdyż zależy to od parametrów i charakteru sygnału.