

## D101. Właściwości fal dźwiękowych. Prędkość dźwięku i dudnienia.

**Cel:** stworzenie aplikacji pomiarowej do badanie wybranych właściwości fal dźwiękowych:

- pomiar prędkości dźwięku z czasu propagacji impulsu akustycznego,
- badanie zjawiska interferencji fal (dudnienia),

### Zagadnienia:

1. Równanie falowe, związki pomiędzy częstotliwością  $f$ , częstością kołową  $\omega$ , długością fali  $\lambda$ , prędkością fali  $v$ , okresem  $T$ , liczbą falową  $k$ , energia fali akustycznej, analiza Fouriera.
2. Wzór na sumę sinusów:  $\sin\alpha + \sin\beta$ .

### Wprowadzenie

Równanie opisujące falę płaską o częstotliwości  $f$  i długości fali  $\lambda$ , rozchodzącą się w kierunku  $x$  ma postać:

$$y = A \sin(\omega t - kx), \quad (1)$$

gdzie  $y$  to wychylenie z położenia równowagi,  $A$  to amplituda wychylenia,  $\omega = 2\pi f$  to częstość kołowa,  $k$  to liczba falowa ( $k = 2\pi/\lambda$ ). W odniesieniu do fali dźwiękowej  $y$  ma sens zmiany ciśnienia akustycznego. W tym ćwiczeniu źródłem dźwięku będą kolumny głośnikowe podłączone do karty dźwiękowej komputera. Rejestracja sygnału akustycznego odbywać się będzie przy pomocy zwykłego mikrofonu podłączonego do tej samej karty dźwiękowej. Ponieważ fala dźwiękowa jest falą podłużną, nie podlega zjawisku polaryzacji.

Ustawiając mikrofon w konkretnym miejscu ( $x = \text{const}$ ), dostajemy sygnał akustyczny postaci sinusoidalnej

$$y = A \sin(\omega t - \varphi), \quad (2)$$

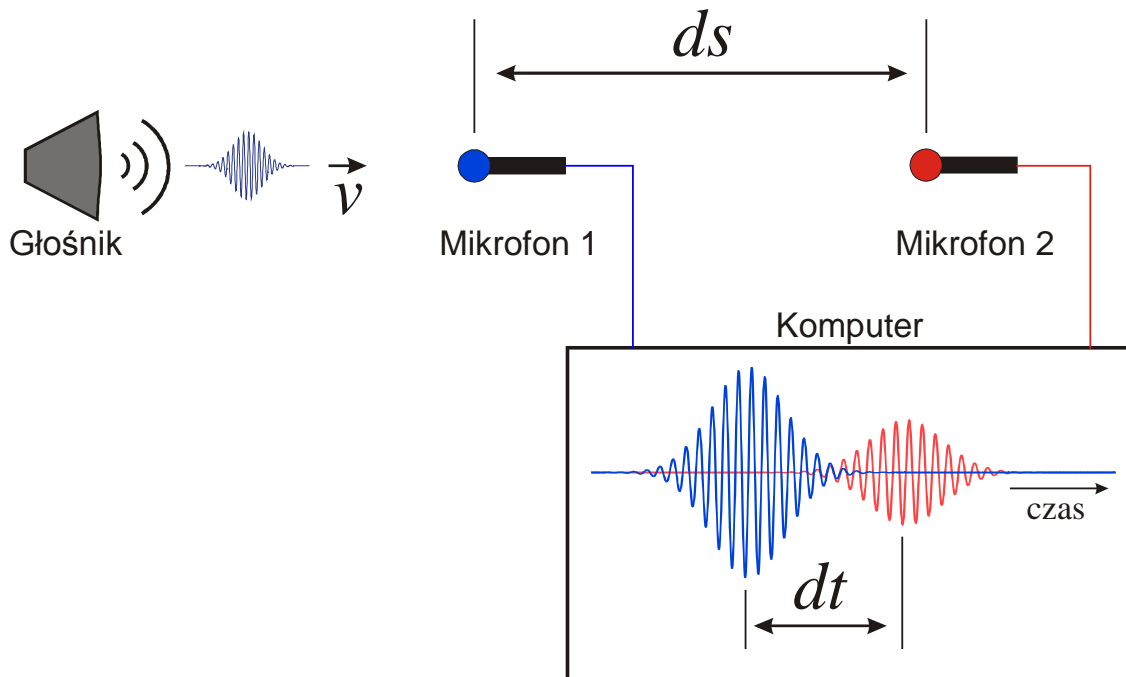
gdzie  $\varphi = kx$ .

### Zadania do wykonania:

1. Napisanie programu do generowania tonów opartego na karcie dźwiękowej i zestawie głośnikowym. Częstotliwości i amplitudy powinny być regulowane niezależnie dla kanału lewego i prawego.
2. Napisanie programu do rejestrowania dźwięku przy pomocy mikrofonu i karty dźwiękowej.
3. Rejestracja przykładowych przebiegów fali akustycznej pochodzącej z jednego źródła. Optymalizacja wzajemnego położenia głośnika i mikrofonu oraz nastaw „Właściwości nagrywania” w systemie operacyjnym.
4. Szczegóły odnośnie funkcji generujących i rejestrujących dźwięk znajdują się w części „Uwagi techniczne”. Rozpocznij od generacji tonu. Jeśli efekt Cię zadowala, to dodaj funkcję rejestracji. Obie pętle odpowiedzialne za generuję i rejestruje dźwięku mogą znajdować się na tym samym diagramie blokowym.

### 1. Pomiar prędkości dźwięku z badania czasu propagacji impulsu akustycznego.

Prędkość dźwięku zmierzyć można również metodą bardziej bezpośrednią. Zakładając, że dźwięk rozchodzi się w powietrzu ze stałą prędkością, wykorzystać można definicję prędkości w ruchu jednostajnym:  $v = ds/dt$ . Wyznaczenie prędkości  $v$  wykonać można poprzez generację krótkiego impulsu (paczki falowej) a następnie znalezienia czasu,  $dt$ , jaki potrzebuje ten impuls na przebycie odległości  $ds$ .



Paczkę falową można wygenerować poprzez pomnożenie fali sinusoidalnej przez funkcję dzwonową, np. typu Gaussa,  $e^{-[(t-t_0)/\Delta t]^2}$ , gdzie  $t_0$  jest położeniem środka, a  $\Delta t$  jego szerokością.

Zadania do wykonania:

1. Wykorzystaj jeden głośnik i dwa mikrofony. Odległość między mikrofonami wynosi,  $ds$ .
2. Zmodyfikuj swój generator tak aby tym razem generował ton o zadanej częstotliwości, którego amplituda zmodulowana jest funkcją Gaussa. W ten sposób powstanie impuls. Czas trwania impulsu określa wartość parametru  $\Delta t$  (szerokość połówkowa).
3. Zarejestruj sygnał akustyczny z mikrofonów oddalonych o dystans  $ds$ . Uzyskany obraz powinien składać się z dwóch impulsów, których maksima przesunięte są w czasie o  $dt$ . Użyj funkcji Trigger and Gate.vi aby uzyskać stabilny obraz impulsów na wykresie. Używając kursorów na wykresie Waveform Graph określ czas propagacji impulsu,  $dt$ .
4. Zmierz czasy propagacji impulsu dla kilku odległości między mikrofonami. Znajdź wartość prędkości dźwięku wykonując analizę regresji liniowej zależności  $ds(dt)$ .

### 3. Badanie zjawiska interferencji fal (dudnienia)

Fale pochodzące z różnych źródeł docierające jednocześnie do danego miejsca w przestrzeni interferują ze sobą, tzn. dodają się do siebie ich chwilowe wychylenia. Dla dwóch fal rozchodzących się w jednym kierunku, niespolaryzowanych lub spolaryzowanych w tej samej płaszczyźnie możemy napisać

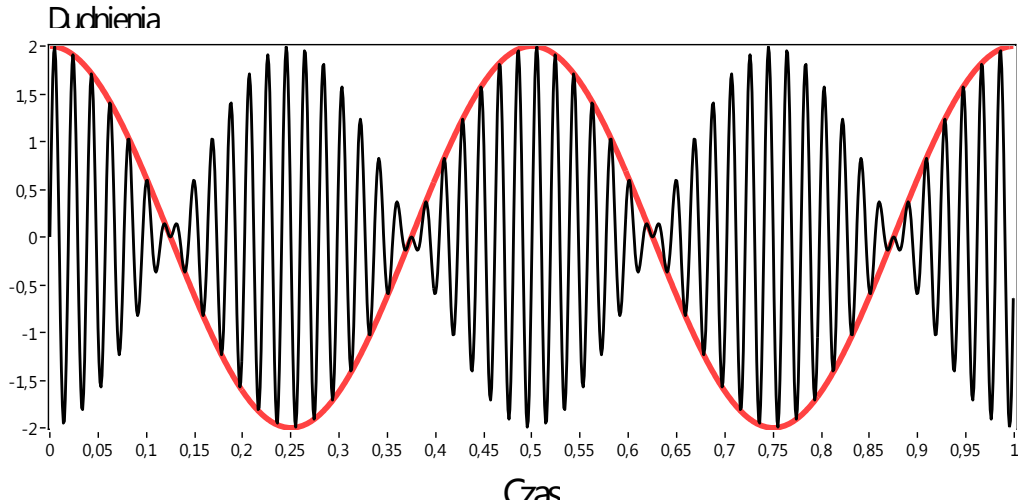
$$y = A_1 \sin(\omega_1 t - k_1 x) + A_2 \sin(\omega_2 t - k_2 x) \quad (6)$$

Jeśli częstotliwości dwóch interferujących fal niewiele się od siebie różnią, obserwujemy zjawisko dudnienia. Polega ono na pojawieniu się wrażenia modulacji amplitudy dźwięku z częstotliwością równą różnicy częstotliwości interferujących fal.

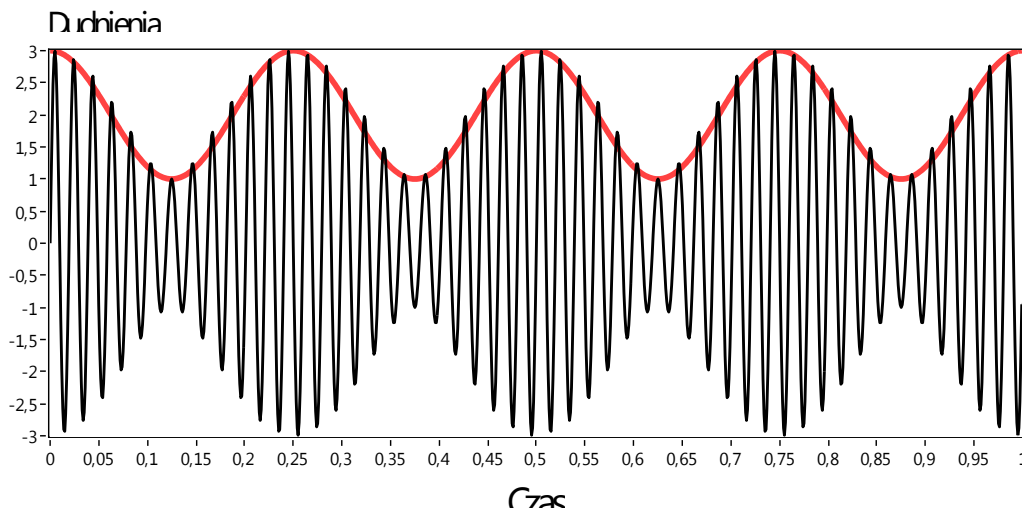
Pomijając czynnik przestrzenny  $kx$ , mamy:

$$\begin{aligned} y &= A[\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)] \\ &= 2A \cos[\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t] \sin[\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t], \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie wolno oscylujący czynnik  $\cos[\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t]$  traktować można jako modulację amplitudy szybszych oscylacji o częstości kołowej  $\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$ .



Głębokość modulacji zmniejsza się, gdy interferujące fale różnią się amplitudą.



Choć analitycznie trudno w prosty sposób opisać obwiednię takich dudnień, można tę kwestię zilustrować następująco:

$$\begin{aligned}
 y &= A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) \\
 &= A_1 \sin(\omega_1 t) + A_1 \sin(\omega_2 t) + (A_2 - A_1) \sin(\omega_2 t) \\
 &= 2A_1 \cos[\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t] \sin[\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t] + (A_2 - A_1) \sin(\omega_2 t).
 \end{aligned} \tag{8}$$

Widać stąd, że złożenie oscylacji o zbliżonych częstościach można przedstawić jako głęboko modulowane oscylacje o częstości pośredniej oraz stałe oscylacje o częstości silniejszej składowej. Amplituda modulowanej części to podwójna amplituda słabszej składowej, a amplituda części stałej to różnica pomiędzy amplitudami składowych  $|A_2 - A_1|$ . Niestety, opis ten nie pasuje do rzeczywistych obserwacji, ponieważ różnica częstości tych drgań powoduje, że ostre przejścia wygładzają się, prowadząc do powstania obwiedni przypominających funkcję sinusoidalną o częstości różnicowej  $(\omega_1 - \omega_2)$ , a nie jej połowie.

Przygotowując to ćwiczenie zauważyliśmy, że obwiednię dudnień dość dobrze opisuje złożenie dwóch oscylujących funkcji:

$$y = a \cos \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t \right] \left( b \cos [(\omega_1 - \omega_2)t] + c \right). \quad (9)$$

Pozostawiamy dociekliwym studentom próbę uzasadnienia takiego rozwiązania. W ramach tego ćwiczenia można wyznaczyć zależności parametrów  $a$ ,  $b$ ,  $c$  od stosunku amplitud sygnałów  $A_1/A_2$ . Wartości tych parametrów uzyskamy z ręcznego dopasowania, posługując się np. suwakami w celu płynnej i szybkiej regulacji.

Zwróć uwagę, że dudnienie obserwujemy tylko wtedy, gdy fale mają szansę interferować na detektorze. Z pewnością dzieje się tak, gdy używamy głośników jako źródeł dźwięku, a detektorem jest niewielki mikrofon. Dla porównania spróbuj posłuchać tego samego dźwięku przez słuchawki (różne częstotliwości w kanałach lewym i prawym) albo przysuwając głośniki bezpośrednio do uszu (po jednym do każdego).

*Zadania do wykonania:*

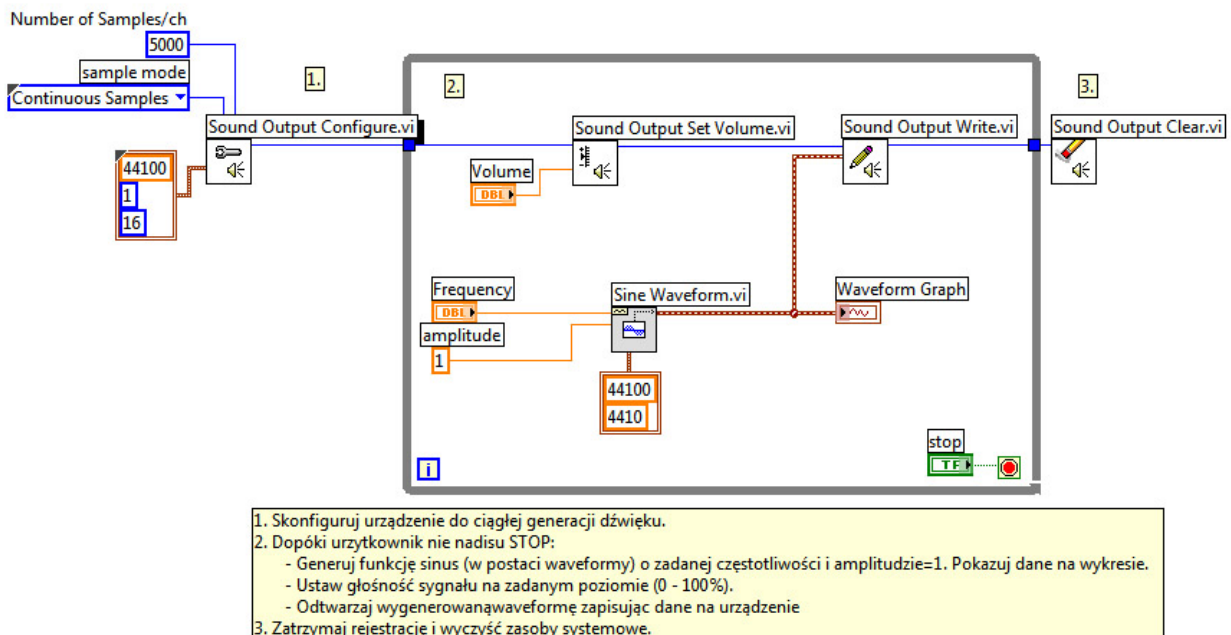
*1. Ustawić dwie kolumny głośnikowe obok siebie, a mikrofon przed nimi w odległości 20-40 cm. Generować dźwięk o nieco różniących się częstotliwościach w obu głośnikach. Mierzyć sygnał z mikrofonu dla różnych kombinacji częstotliwości i amplitud. Uzyskaną w ten sposób obwiednię opisać równaniem (7) lub (9). W przypadku opisu równaniem (9) spróbować zinterpretować parametry  $a$ ,  $b$ ,  $c$  poprzez wartości amplitud fal składowych. Parametry fal składowych można wyznaczyć niezależnie wyłączając poszczególne kolumny.*

## Literatura

1. Henryk Szydłowski “Pracownia Fizyczna”, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1994
1. David Halliday, Robert Resnick i Jearl Walker “Podstawy fizyki” Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2003

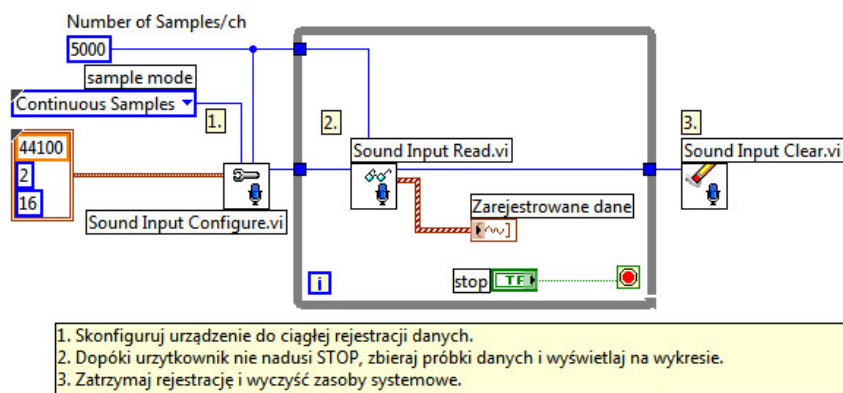
**Uwagi techniczne:**

1. Ze względu na konieczność stosowania w niektórych zadaniach pomiaru dwukanałowego (stereo), mikrofony można podłączyć poprzez wzmacniacz do wejścia liniowego karty dźwiękowej („line in”) tak, że jeden z nich wchodzi na kanał lewy, a drugi na kanał prawy. W zadaniach, w których wystarcza jeden mikrofon, można podłączać go normalnie do wejścia mikrofonowego, pamiętając o ustawieniach „Właściwości nagrywania” (patrz następny punkt).
2. Sprawdź ustawienia „Właściwości nagrywania” w systemie. Dwukrotnie kliknij ikonkę głośnika w pasku narzędziowym Windows. W menu Opcje wybierz Właściwości i zaznacz Ustawienie głośności dla nagrywania. Następnie zadбай o to, by była zaznaczona kratka przy urządzeniu „Wejście liniowe” lub „Mikrofon”, w zależności od potrzeb. Ustaw suwakiem głośność nagrywania co najmniej w połowie zakresu suwaka.
3. Kilka uwag odnośnie generowania dźwięku przy pomocy karty dźwiękowej:
  - Funkcje umożliwiające generację dźwięku znajdują się w palecie funkcji: Functions/Graphics and Sound/Sound/Sound Output
  - W celu wygenerowania tonu najlepiej posłużyć się funkcją *Sine Waveform.vi*. Oprócz częstotliwości i amplitudy sinusa funkcja wymaga również podania częstotliwości próbkowania urządzenia oraz liczby próbek z jakich składać się ma generowany sygnał. Wielkości te potrzebne są w celu wygenerowania tzw. *Waveform*'y. Jest to specjalny typ danych, w którym oprócz tablicy wartości podlegającej generacji, znajduje się również informacja o parametrach użytego przetwornika cyfrowo/analogowego. W przypadku karty muzycznej częstość próbkowania wynosi 44100 próbek na sekundę (Samples/second; [S/s]).
  - Poniższy program generuje monofoniczny ton o zadanej amplitudzie i częstotliwości. Dla potrzeb niektórych doświadczeń (np. badanie dudnień) konieczne jest generowanie sygnału stereo. W tym celu należy dokonać stosowanej zmiany w klastrze *Sound Format* funkcji *Sound Output Configure*. Należy użyć dwóch funkcji *Sine Waveform.vi*. Następnie należy stworzyć tablicę z obydwu waveform (funkcja *Build Array*) i przesłać ją do funkcji generującej *Sound Output Write.vi*.



4. Kilka uwag odnośnie rejestrowania dźwięku przy pomocy karty dźwiękowej:

- Funkcje umożliwiające generację dźwięku znajdują się w palecie funkcji: Functions/Graphics and Sound/Sound/Sound Input
- Poniższy program generuje sygnał stereo i prezentuje dane na wykresie. Wartość wpisana w pole *Number of Samples/ch* funkcji *Sound Input Configure.vi* określa z ilu próbek składać się będzie sygnał, a zatem jak długi odcinek czasu zostanie zarejestrowany przez funkcję *Sound Input Read.vi*. Zwiększenie tej wartości pozwoli na rejestrację dłuższych odcinków czasowych.



## 5. Modulacja amplitudy tonu; Tworzenie paczki falowej.

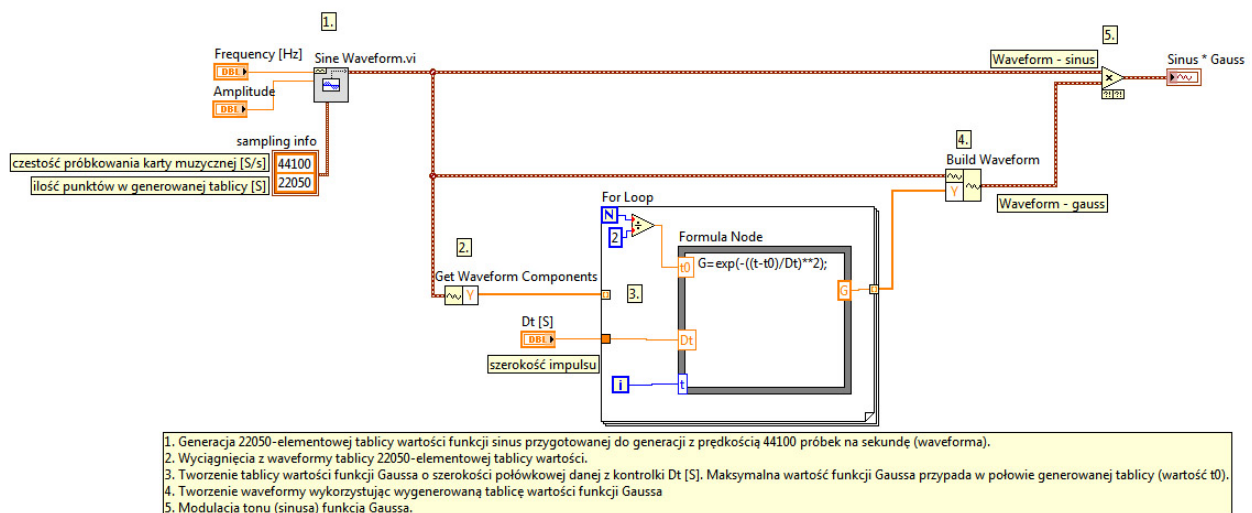
Jesteśmy zainteresowani wygenerowaniem funkcji  $y(t) = A(t)T(t)$  gdzie  $A(t)$  oznacza zmienną w czasie amplitudę (funkcją Gaussa) a  $T(t)$  to część sinusoidalna, czyli ton:

$$A(t) = e^{-[(t-t_0)/\Delta t]^2}$$

$$T(t) = \sin(2\pi ft).$$

Aby zmodulowana funkcja była poprawnie generowana, musi być wyrażona w postaci *Waveform*'y. Jej tworzenie najlepiej rozpocząć od wykorzystania funkcji *Sine Waveform.vi*. Następnie, za pomocą funkcji *Get Waveform Components*, pobrać z waveformy jedynie tablicę wartości funkcji. Dalej, stworzyć tablicę wartości funkcji Gauss o tym samym rozmiarze, co tablica sinusów (pętla *FOR* + struktura *Formula Node*). Stworzoną w ten sposób tablicę wykorzystać do zbudowania waveformy używając funkcji *Build Waveform*. Dwie waveformy (dla funkcji Gaussa i funkcji sinus) można teraz pomnożyć. Powstała waveforma może być wysłana do funkcji generującej dźwięk *Sound Output Write.vi*.

Panel frontowy przykładowego VI'a realizującego modulację amplitudy sinusa funkcją Gaussa pokazano poniżej.

6. Przy dopasowywaniu obwiedni do zapisu dudnień skorzystaj z możliwości zmian parametrów  $a$ ,  $b$ ,  $c$  przy pomocy suwaków lub innych podobnego typu kontroltek. Pozwoli to na szybkie i precyzyjne znalezienie właściwych wartości tych parametrów. Spróbuj też wygenerować pełną funkcję z członem szybko oscylującym, biorąc częstotliwości z pomiarów dla pojedynczych kanałów, a zmieniając tylko amplitudy lub też biorąc ich wartości z pomiarów uzyskanych dla pojedynczych kanałów.