

## Sterowany elektromagnetycznie pulsator akustyczny

**Streszczenie.** W artykule opisano budowę układu do wytwarzania powtarzalnych impulsów fali akustycznej o częstotliwości 170-1840 Hz i czasie trwania 3.5 ms. Układ zawiera cylindryczny rezonator, którego jeden koniec zamykany jest migawką z otworem, sterowaną za pomocą elektromagnesów. Drugi koniec rezonatora został połączony z głośnikiem elektrodynamicznym, który wytwarza w rezonatorze falę stojącą. Natężenie tej fali wzrasta do ustalonej wartości w wyniku odbić od końców rezonatora i konstruktywnej interferencji. Po osiągnięciu tej wartości migawka otwiera rezonator. Wtedy fala stojąca zostaje przekształcona w falę bieżącą o zwiększonym natężeniu i wyemitowana z rezonatora. Podane zostały wyniki badań zależności natężenia emitowanej fali, współczynników wzmocnienia i sprawności układu w zależności od częstotliwości fali. Otrzymane wyniki zostały przedyskutowane i porównane z modelem teoretycznym, sformułowanym do opisu działania tego układu.

**Abstract.** The article describes construction of a system for production of repeatable pulses of an acoustic wave with a frequency of 170-1840 Hz and duration of 3.5 ms. The system includes a cylindrical resonator, one end of which is closed by a shutter with an aperture, controlled with electromagnets. The other end of the resonator was connected to an electrodynamic loudspeaker which produces a standing wave in the resonator. This wave intensity increases to the set value as a result of reflections from the ends of the resonator and some constructive interference. Upon reaching this value, the shutter opens the resonator. This is when the standing wave becomes transformed into a traveling wave of increased intensity, and afterwards emitted from the resonator. There are tests results presented which are related to intensity of the emitted wave, amplification factors and efficiency of the system, depending on the wave frequency. The obtained results were discussed and compared with a theoretical model, developed for description of operation of the system in question. (**The acoustic pulsar controlled by electromagnets**)

**Słowa kluczowe:** elektromagnes, fala akustyczna, impuls, rezonator.  
**Key words:** electromagnet, acoustic wave, pulse, resonator.

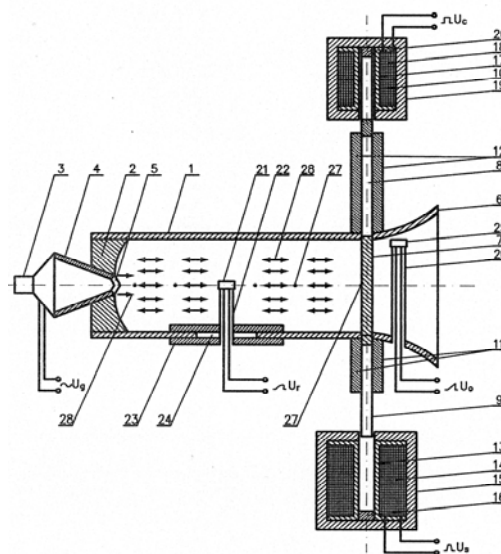
### Wstęp

Promieniowanie emitowane przez lasery charakteryzuje się szczególnymi właściwościami, takimi jak monochromatyczność, spójność mała rozbieżność wiązki i często także duże natężenie. Dzięki tym właściwościom lasery mają liczne zastosowania, m.in. w nowoczesnych technologiach, badaniach naukowych, metrologii i medycynie [1]. Obecnie znane są różne typy laserów, w których ośrodkiem czynnym są ciała stałe, gazy lub ciecze. Lasery te emitują zarówno promieniowanie widzialne jak i niewidzialne. Znacznie mniej znany jest odpowiednik lasera, pracujący na podobnej zasadzie i wysyłający fale dźwiękowe. Urządzenie takie, nazywane SASER (Sound Amplification by Stimulated Emission of Radiation) jest interesujące z punktu widzenia badawczego i również może znaleźć praktyczne zastosowania [2, 3]. Zbudowane dotychczas urządzenia tego typu emitują fale w zakresie ultradźwięków lub hiperdźwięków o częstotliwości rzędu MHz lub GHz. Ośrodkiem czynnym w tych urządzeniach jest ciało stałe o specjalnie przygotowanej strukturze [4, 5] Fale o tak dużej częstotliwości są silnie tłumione w powietrzu, co znacznie ogranicza możliwości ich zastosowań. Celem tego artykułu jest przedstawienie budowy, zasady działania i wyników badań układu, emitującego impulsy o częstotliwości rzędu 1 kHz. Układ taki może uważać za model lasera akustycznego o bardzo niskiej częstotliwości.

### Budowa układu

Budowa układu doświadczalnego została pokazana na rys. 1. W układzie zastosowano rezonator 1 wykonany z zamocowanej poziomo rury aluminiowej o długości  $l = 0,55$  m i średnicy wewnętrznej  $d = 0,04$  m. Jeden koniec rezonatora (wejście) zostało zamknięte stalowym pierścieniem 2, którego powierzchnia skierowana do wnętrza rezonatora jest wklęsła i ma kształt paraboloidy. Przed tym pierścieniem umieszczono głośnik elektrodynamiczny 3, połączony z generatorem akustycznym. Kosz głośnika połączony jest z pierścieniem 2 za pomocą stożkowego koncentratora 4, którego węższy koniec został zamocowany w pierścieniu. W otworze węższego końca koncentratora 4 umieszczony jest

elastyczny zawór 5 w kształcie powierzchni bocznej stożka z przecięciami wzdłuż tworzących. Zawór został wykonany z silikonu i otwiera się w kierunku wnętrza rezonatora 1. Za drugim końcem rezonatora (wyjście) zamocowana jest tuba wyjściowa 6 w kształcie stożka.



Rys. 1. Budowa pulsatora akustycznego pokazana w przekroju; 1 – rura rezonatora, 2 – pierścień, 3 – głośnik elektrodynamiczny, 4 – koncentrator, 5 – zawór elastyczny, 6 – tuba wyjściowa, 7 – płytki migawki, 8 – otwór migawki, 9 – rdzeń elektromagnesu otwierającego, 10 – rdzeń elektromagnesu zamykającego, 11, 12 – prowadnice migawki, 13 – karkas elektromagnesu otwierającego, 14 – uzwojenie elektromagnesu otwierającego, 15 – obudowa elektromagnesu otwierającego, 16 – tłumik elektromagnesu otwierającego, 17 – karkas elektromagnesu zamykającego, 18 – uzwojenie elektromagnesu zamykającego, 19 – obudowa elektromagnesu zamykającego, 20 – tłumik elektromagnesu zamykającego, 21 – mikrofon rezonatora, 22 – wspornik mikrofonu rezonatora, 23 – osłona, 24 – szczelina, 25 – mikrofon wyjściowy, 26 – wspornik mikrofonu wyjściowego, 27 – węzeł fali stojącej, 28 – strzałka fali stojącej,  $U_g$  – napięcie generatora,  $U_s$ ,  $U_c$  – napięcia elektromagnesów odpowiednio: otwierającego i zamykającego,  $U_r$ ,  $U_o$  – napięcia mikrofonów odpowiednio: rezonatora i wyjściowego

Wyjście rezonatora zamykane jest przy użyciu migawki 7 w kształcie płytki z kołowym otworem 8. Migawka została wykonana z blachy stalowej. Średnica otworu 8 jest równa średnicy wewnętrznej rury rezonatora 1. Do przeciwległych boków migawki przymocowane są poziomo stalowe pręty 9, 10, które stanowią rdzenie elektromagnesów otwierającego i zamykającego. Migawka jest przesuwana po prowadnicach 11 i 12, umieszczonych po obu stronach rezonatora 1. Rdzeń 9 może być wciągany w otwór elektromagnesu otwierającego, który składa się z karkasu 13 z nawiniętym na nim uzwojeniem 14, zamkniętym w ferromagnetycznej obudowie 15. Na końcu otworu elektromagnesu umieszczony jest tłumik 16, wykonany z gumy mikroporowatej. Rdzeń 10 może być wciągany w otwór podobnie zbudowanego elektromagnesu zamykającego, który składa się z karkasu 17, uzwojenia 18 i ferromagnetycznej obudowy z tłumikiem 20.

W środkowej części rezonatora 1 znajduje się mikrofon pomiarowy 21, przymocowany do górnego końca wspornika 22, wykonanego z rurki aluminiowej. Wewnątrz tej rurki przechodzą przewody łączące mikrofon 21 z miernikiem natężenia dźwięku. Dolny koniec wspornika 22 przymocowany jest do osłony 23, zamykającej podłużną szczelinę 24, wyciętą w dolnej części rezonatora. Mikrofon pomiarowy 25 znajduje się też w tubie wyjściowej 6 i został on przymocowany do wspornika 26 o stałym położeniu, podobnego do wspornika 22. Oba mikrofony 21, 25 są przyłączone do oscyloskopu z pamięcią, który umożliwia rejestrację i pomiar natężenia dźwięków.

### Zasada działania

Działanie układu polega na tym, że głośnik elektrodynamiczny 3, zasilany z generatora akustycznego napięciem  $U_g$ , wytwarza falę dźwiękową, która rozchodzi się w rezonatorze 1. Fala ta jest częściowo pochłaniana w powietrzu wypełniającym rezonator. Niech początkowo wyjście rezonatora będzie zamknięte migawką 7. Wtedy fala dźwiękowa po przejściu przez rezonator odbija się częściowo od migawki i wraca w kierunku głośnika, a następnie odbija się częściowo od wklęsłej powierzchni pierścienia 2. Na tej drodze fala odbita interferuje z falą emitowaną przez głośnik. Ponieważ materiały migawki i pierścienia mają większą impedancję akustyczną niż powietrze, to przy każdym odbiciu następuje zmiana fazy fali na przeciwną. Zmiana ta zachodzi dwukrotnie i dlatego fala odbita od pierścienia 2 ma taką samą fazę jak fala emitowana z głośnika 3. Z tego powodu interferencja fali odbitej i fali emitowanej z głośnika jest konstruktywna i zachodzi wzrost natężenia fali wypadkowej, która porusza się w kierunku migawki 7. Jeżeli częstotliwość wytwarzanej fali jest równa jednej z częstotliwości drgań własnych słupa powietrza w rezonatorze, to wytwarzana jest fala stojąca [6]. Jeden z węzłów tej fali znajduje się na powierzchni migawki 7, a jedna ze strzałek przy wierzchołku elastycznego zaworu 5. Dalsza emisja fali przez głośnik powoduje wzrost energii drgań słupa powietrza w rezonatorze. Jednocześnie wzrastają straty energii związane z pochłanianiem fali w powietrzu i odbiciem [7]. Dlatego wzrost energii fali odbywa się coraz wolniej wraz z upływem czasu.

Opisany etap zostanie nazwany pompowaniem rezonatora 1. Etap ten trwa aż do osiągnięcia pewnej, maksymalnej wartości energii drgań [8, 9]. Wtedy do uzwojenia elektromagnesu otwierającego 13 jest przykładany impuls napięcia  $U_s$ . Powoduje to wciągnięcie rdzenia 9 do otworu w karkasie 13 i przesunięcie migawki 7 w prowadnicach 11, 12. W ten sposób migawka zostaje otwarta i przez to również otwarty jest rezonator. Fala stojąca w rezonatorze jest superpozycją dwóch fal

biegnących w przeciwnych kierunkach i odbijających się od powierzchni migawki 7 oraz pierścienia 2. Po otwarciu migawki fala nie może się od niej odbić. Zachodzi tylko odbicie od wklęsłej powierzchni pierścienia. Skutkiem tego fala stojąca przekształca się falę biegnącą, która wychodzi z rezonatora. Czas pełnego otwarcia migawki powinien być równy czasowi dwukrotnego przejścia fali przez rezonator lub krótszy. Umożliwia to wyjście tworzącej się fali biegnącej z rezonatora w najkrótszym czasie. Czas wyjścia fali z rezonatora jest znacznie krótszy od jego czasu pompowania. Dlatego zachodzi szybki wypływ energii zgromadzonej w rezonatorze i wzrost natężenia impulsu fali wychodzącej. Wklęsła powierzchnia pierścienia przyczynia się do kolimacji fali odbitej. Elastyczny zawór 5, przepuszcza fale tylko do wnętrza rezonatora i zapobiega wtórnemu oddziaływaniu fali odbitej na membranę głośnika 3. Po wyjściu fali z rezonatora jest przykładany impuls napięcia  $U_c$  do uzwojenia 18 elektromagnesu zamykającego migawkę 7 i rezonator może być znowu pompowany. Tłumiki 16 i 20 pochłaniają energię przesuwających się rdzeni 9, 10 w końcowym etapie otwierania i zamykania migawki 7, kiedy rdzenie zderzają się z obudowami elektromagnesów 15, 19.

### Model teoretyczny

Częstotliwości własne  $f_n$  drgań słupa powietrza w cylindrycznym rezonatorze o długości  $l$  oraz promieniu wewnętrznym  $R$  wyrażają się wzorem

$$(1) \quad f_n = \frac{(2n-1)v}{4(l+2bR)}$$

w którym:  $v$  oznacza prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej w powietrzu,  $b$  oznacza współczynnik liczbowy, zależny od kształtu końca rezonatora. Czas przejścia fali dźwiękowej przez rezonator  $t_p$ , to jest czas upływający od wyjścia z elastycznego zaworu do odbicia od zamkniętej migawki i powrotu do zaworu, wyraża się wzorem

$$(2) \quad t_p = \frac{2l}{v}$$

Czas  $t_p$  będzie nazywany czasem pełnego przejścia fali. Natężenie fali emitowanej przez głośnik o mocy  $P$ , czyli natężenie początkowe  $I_0$  można obliczyć ze wzoru

$$(3) \quad I_0 = \frac{P}{\pi R^2}$$

W czasie  $t_p$  głośnik emituje do rezonatora energię  $Pt_p$ . Jeżeli pominąć straty energii fali w wyniku pochłaniania i podczas odbicia, to średnią gęstość energii fali w rezonatorze  $\rho_0$  po czasie  $t_p$  można obliczyć ze wzoru

$$(4) \quad \rho_0 = \frac{Pt_p}{\pi R^2 l}$$

Współczynnik odbicia fali  $r$  od migawki lub pierścienia wyraża się wzorem

$$(5) \quad r = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

w którym  $Z_1$ ,  $Z_2$  oznaczają impedancje akustyczne odpowiednio materiału migawki lub pierścienia (stali) i powietrza. Fala dźwiękowa o natężeniu początkowym  $I_0$  wysłana z głośnika dochodzi do migawki i odbija się od niej.

Następnie fala odbita wraca w kierunku pierścienia i również odbija się od niego. Po uwzględnieniu strat energii fali przy jej odbiciach i pochłanianiu podczas przechodzenia przez rezonator, otrzymuje się następujący wzór na natężenie fali  $I_i$  po  $i$  pełnych przejściach

$$(6) \quad I_i = I_0(r^2 e^{-2kl})^i = \left[ I_0(r^2 e^{-2kl}) \right] (r^2 e^{-2kl})^{i-1}$$

w którym  $i = 1, 2, 3, \dots$ , natomiast  $k$  oznacza współczynnik absorpcji fali w powietrzu. Wartość współczynnika  $k$  zależy od częstotliwości fali oraz od temperatury, wilgotności i ciśnienia powietrza. Wartości  $I_i$  wyrażone wzorem (6) tworzą ciąg geometryczny o ilorazie

$$(7) \quad q = r^2 e^{-2kl}$$

oraz pierwszym wyrazie

$$(8) \quad I_1 = I_0(r^2 e^{-2kl}) = I_0 q$$

Natężenie fali  $I_n$  po  $n$  pełnych przejściach przez rezonator przy założeniu ciągłej pracy głośnika można obliczyć korzystając ze wzoru na sumę wyrazów ciągu geometrycznego. Otrzymuje się wtedy

$$(9) \quad I_n = \sum_{i=1}^n I_i = I_0 q \frac{1-q^n}{1-q}$$

Ponieważ  $q < 1$ , to wartość  $I_n$  jest skończona. Jest to jeden z czynników wskazujących na poprawność wyprowadzonego wzoru. Po bardzo długim czasie (teoretycznie nieskończenie długim) natężenie fali w rezonatorze wynosi  $I_f$  oraz wyraża się wzorem

$$(10) \quad I_f = \frac{I_0 q}{1-q}$$

Można zdefiniować względny przyrost natężenia fali w rezonatorze  $\Delta p$  po  $n$  pełnych przejściach w sposób następujący

$$(11) \quad \Delta p = \frac{I_n - I_{n-1}}{I_{n-1}}$$

Po podstawieniu do wzoru (11) natężeń  $I_n, I_{n-1}$ , wyrażonych za pomocą wzoru (9) i zamianie oznaczenia  $n$  na  $i_a$ , otrzymuje się następujący wzór na  $\Delta p$

$$(12) \quad \Delta p = \frac{(1-q)}{q^{1-i_a} - 1}$$

We wzorze (12)  $i_a$  oznacza ilość pełnych przejść fali przez rezonator, po których względny przyrost jej natężenia jest równy  $\Delta p$ . Straty energii w rezonatorze rosną wraz ze wzrostem natężenia fali są wprost proporcjonalne do energii już zgromadzonej, natomiast moc emitowana przez głośnik ma stałą wartość. Dlatego względne przyrosty natężenia fali  $\Delta p$  maleją wraz z upływem czasu pompowania. W tej sytuacji można wybrać dwa warianty pompowania rezonatora. W pierwszym wariantcie, nazywanym optymalnym, pompowanie zostaje zakończone po czasie  $t_a$ , w którym względny przyrost natężenia fali  $\Delta p$  zmniejszy się do ustalonej wartości, np. 0,01. W drugim wariantcie, nazywanym długim, pompowanie odbywa się w czasie znacznie dłuższym niż  $t_a$ . Wówczas możliwe jest

osiągnięcie większego natężenia fali zbliżonego do wartości  $I_f$  wynikającej ze wzoru (10). Ten drugi wariant pompowania wymaga jednak dostarczenia do rezonatora znacznie większej energii i charakteryzuje się znacznie mniejszą sprawnością. W dalszym rozważaniach będzie wyznaczona sprawność dla pierwszego wariantu pompowania. Wzór (12) można przekształcić w celu wyznaczenia  $i_a$ . Otrzymuje się wtedy

$$(13) \quad i_a = 1 + \frac{\log\left(\frac{\Delta p}{1 + \Delta p - q}\right)}{\log q}$$

Czas  $t_a$  niezbędny do wykonania  $i_a$  pełnych przejść fali przez rezonator wyraża się wzorem

$$(14) \quad t_a = t_p i_a$$

Czas wyrażony wzorem (14) oznacza czas pompowania, w którym względny przyrost natężenia będzie wynosił  $\Delta p$ . Natężenie fali w rezonatorze wyrażało się wtedy wzorem

$$(15) \quad I_a = I_0 q \frac{1-q^{i_a}}{1-q}$$

W ogólnym przypadku dobroć rezonatora  $Q$  definiowana jest jako stosunek energii zgromadzonej w rezonatorze  $E_a$  do energii traconej podczas jednego okresu drgań  $E_1$

$$(16) \quad Q = \frac{E_a}{E_1}$$

W rozpatrywanym przypadku energia tracona  $E_1$  będzie liczona dla jednego czasu przejścia fali przez rezonator  $t_p$ . Energię zgromadzoną w rezonatorze  $E_a$  w czasie  $t_a$  można obliczyć na podstawie wzoru (9). Jeżeli uwzględnione zostanie jeszcze, że w czasie jednego pełnego przejścia fali z głośnika emitowana jest energia  $P t_p$ , to wówczas otrzymuje się wzór

$$(17) \quad E_a = P t_p q \frac{1-q^{i_a}}{1-q}$$

Energia tracona podczas jednego pełnego przejścia fali przez rezonator  $E_1$  jest proporcjonalna do zgromadzonej w nim energii  $E_a$  i na podstawie wzorów (6) oraz (7) wyraża się wzorem

$$(18) \quad E_1 = E_a (1-q)$$

Po podstawieniu wzoru (18) do (16) otrzymuje się następujący wzór na dobroć rozpatrywanego rezonatora

$$(19) \quad Q = \frac{1}{1-q}$$

Ze wzoru (19) oraz wzorów (7) i (5) wynika, że dobroć tego rezonatora zależy tylko od właściwości materiałów użytych do jego budowy.

Ważnym parametrem charakteryzującym akumulację energii fali w rezonatorze jest sprawność pompowania  $\eta$ . Sprawność ta zostanie zdefiniowana jako stosunek energii zgromadzonej w rezonatorze  $E_a$  do energii, którą należy dostarczyć z głośnika  $E_d$  w celu uzyskania wartości  $E_a$ . Zgodnie z tą definicją można napisać wzór

$$(20) \quad \eta = \frac{E_a}{E_d}$$

Ponieważ energia  $E_d$  jest gromadzona w czasie  $t_a$ , to można ją obliczyć ze wzoru

$$(21) \quad E_d = Pt_a$$

Po kolejnych podstawieniach wzorów (21), (17) i (14) do wzoru (20) otrzymuje się następujący wzór na sprawność pompowania

$$(22) \quad \eta = \frac{q(1-q^{i_a})}{i_a(1-q)^{i_a}}$$

Występującą we wzorze (22) wielkość  $i_a$  należy obliczyć według wzoru (13). Ze wzorów (13) i (22) wynika, że sprawność pompowania zależy od parametrów rezonatora oraz od zakładanego względnego przyrostu energii  $\Delta p$ , przy którym pompowanie ma być zakończone.

Istotną wielkością charakteryzującą akumulację energii w rezonatorze jest też teoretyczny współczynnik wzmocnienia dla wariantu optymalnego pompowania  $m_{at}$ . Współczynnik ten będzie zdefiniowany jako stosunek natężenia  $I_a$ , albo energii fali  $E_a$ , po zakończeniu pompowania, odpowiednio do początkowego natężenia fali  $I_0$ , albo do jej początkowej energii  $E_0$ . Zgodnie z tą definicją i wzorami (15) i (17), współczynnik  $m_{at}$  można wyrazić następującym wzorem

$$(23) \quad m_{at} = \frac{I_a}{I_0} = \frac{E_a}{E_0} = \frac{q(1-q^{i_a})}{1-q}$$

Oprócz tego można wprowadzić również doświadczalny współczynnik wzmocnienia  $m_{am}$ , zdefiniowany w analogiczny sposób. Wartość współczynnika  $m_{am}$  będzie obliczona po podstawieniu do wzoru definicyjnego odpowiednich wartości natężeń  $I_a$  oraz  $I_0$  zmierzonych podczas eksperymentu. Wykorzystując oba współczynniki wzmocnienia można obliczyć ich względną różnicę  $\Delta m_a$  według wzoru

$$(24) \quad \Delta m_a = \frac{m_{at} - m_{am}}{m_{am}} 100\%$$

co pozwoli na porównanie zgodności modelu teoretycznego z wynikami eksperymentu. W analogiczny sposób można wprowadzić teoretyczny współczynnik wzmocnienia dla wariantu długiego pompowania  $m_{ft}$ . Na podstawie tej analogii oraz wzoru (10) dla współczynnika  $m_{ft}$  zostanie zapisany wzór

$$(25) \quad m_{ft} = \frac{I_f}{I_0} = \frac{E_f}{E_0} = \frac{q}{1-q}$$

Dla dalszych porównań rozpatrywanego modelu z wynikami eksperymentu wprowadza się również doświadczalny współczynnik wzmocnienia  $m_{fm}$  dla wariantu długiego pompowania. Wówczas różnicę między współczynnikami  $m_{ft}$  oraz  $m_{fm}$  można wyrazić wzorem

$$(26) \quad \Delta m_f = \frac{m_{ft} - m_{fm}}{m_{fm}} 100\%$$

Wyprowadzone wzory będą wykorzystane do dyskusji wyników eksperymentów opisanych w następnej części artykułu.

## Wyniki eksperymentów

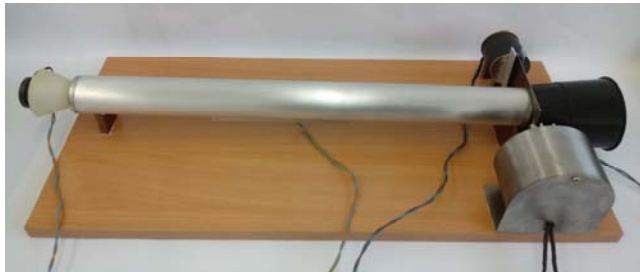
Układ zbudowany według opisu zawartego we wcześniejszej części artykułu został pokazany na fot. 1 i wykorzystany do przeprowadzenia badań podstawowych parametrów rezonatora, natężenia fali biegnącej, współczynników wzmocnienia oraz sprawności w zależności od częstotliwości fali wytwarzanej przez głośnik. Badania przeprowadzono w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 70%. W tych warunkach prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu  $v = 343,6$  m/s. Współczynnik odbicia dźwięku  $r$  od migawki i pierścienia obliczono ze wzoru (5) przyjmując, że impedancje akustyczne dla stali i powietrza wynoszą odpowiednio:  $Z_1 = 3,9 \cdot 10^7$  kg/(m<sup>2</sup>s) i  $Z_2 = 427$  kg/(m<sup>2</sup>s). Dla tych wartości otrzymano  $r = 0,99995621$ . W pierwszej części badań zmierzono sześć najniższych częstotliwości własnych rezonatora i obliczono jego podstawowe parametry. Wyniki tych pomiarów i obliczeń zostały podane w tab. 1. Częstotliwości własne zmierzono przy użyciu miernika znajdującego się w generatorze zasilającym głośnik. Osiągnięcie rezonansu było wykrywane jako maksimum napięcia przy użyciu mikrofonu elektretowego o wymiarach 5×3×2 mm, umieszczonego wewnątrz rezonatora i połączonego ze wzmacniaczem oraz woltomierzem. Dla porównania częstotliwości te obliczono również ze wzoru (1). Do obliczeń przyjęto wartość współczynnika  $b = 0,72$ , właściwą dla rezonatora z końcem o przekroju kołowym i promień rezonatora  $R = 0,02$  m. Różnice między częstotliwościami zmierzonymi i obliczonymi nie przekroczyły 2%. Wartości współczynników pochłaniania dźwięku w powietrzu  $k$  dla wyznaczonych częstotliwości zostały przyjęte na podstawie danych dostępnych w literaturze [10]. Korzystając z tych danych oraz wcześniej wyprowadzonych wzorów (7), (13), (14) i (19) obliczono kolejno: ilorz ciągu  $q$ , ilość pełnych przejść fali dla wariantu optymalnego pompowania  $i_a$ , czas tego pompowania  $t_a$  i dobroć rezonatora  $Q$ . Wszystkie wymienione parametry obliczono dla sześciu najniższych częstotliwości własnych rezonatora, które wyznaczono wcześniej. Również wszystkie dalsze pomiary przeprowadzono dla tych częstotliwości.

Tabela 1. Podstawowe parametry rezonatora;  $f_{rt}$  – częstotliwość rezonansowa teoretyczna,  $f_{rm}$  – częstotliwość rezonansowa zmierzona,  $k$  – współczynnik absorpcji dźwięku w powietrzu,  $q$  – współczynnik akumulacji,  $i_a$  – optymalna liczba przejść,  $t_a$  – czas optymalnego pompowania,  $Q$  – dobroć rezonatora

No	$f_{rt}$ [Hz]	$f_{rm}$ [Hz]	$k \times 10^{-3}$ [dB/m]	$q$	$i_a$	$t_a$ [s]	$Q$
1	167	170	0,72	0,9984	603	1,980	640
2	500	500	2,78	0,9942	34	0,108	173
3	833	835	4,25	0,9912	27	0,080	114
4	1167	1170	5,42	0,9988	25	0,080	89
5	1450	1450	6,78	0,9860	20	0,065	72
6	1833	1840	7,79	0,9840	19	0,060	63

W kolejnych etapach badań wykonano pomiary natężenia fali w rezonatorze  $I_{fm}$  oraz  $I_{am}$  po zakończeniu pompowania zarówno dla wariantu długiego jak też optymalnego pompowania. Wyniki tych pomiarów zostały przedstawione odpowiednio w tab. 2 i 3. Korzystając ze wzorów (10) i (15) przeprowadzono obliczenia wartości tych natężeń  $I_{ft}$ ,  $I_{fm}$ , wynikające z przyjętego modelu. Następnie

obliczono współczynniki wzmocnienia dla obu wariantów pompowania wynikające z pomiarów, czyli  $m_{fm}$ ,  $m_{am}$  oraz z przewidywań modelu, czyli  $m_{ft}$ ,  $m_{at}$ . W tym celu wykorzystano wzory (23) i (25). Celem porównania wartości uzyskanych na podstawie pomiarów z przewidywaniami modelu wykorzystano wzory (24) i (26) do obliczenia względnych różnic tych współczynników  $\Delta m_a$  oraz  $\Delta m_f$ . Dla wariantu optymalnego pompowania obliczono również sprawność  $\eta$ .



Fot. 1. Wygląd zewnętrzny zbudowanego pulsatora akustycznego

Tabela 2. Wyniki uzyskane dla wariantu długiego pompowania;  $f_{rm}$  – częstotliwość rezonansowa zmierzona,  $I_{ft}$  – natężenie teoretyczne,  $I_{fm}$  – natężenie zmierzone,  $m_{ft}$  – współczynnik wzmocnienia teoretyczny,  $m_{fm}$  – współczynnik wzmocnienia obliczony,  $\Delta m_f$  – różnica współczynników wzmocnienia

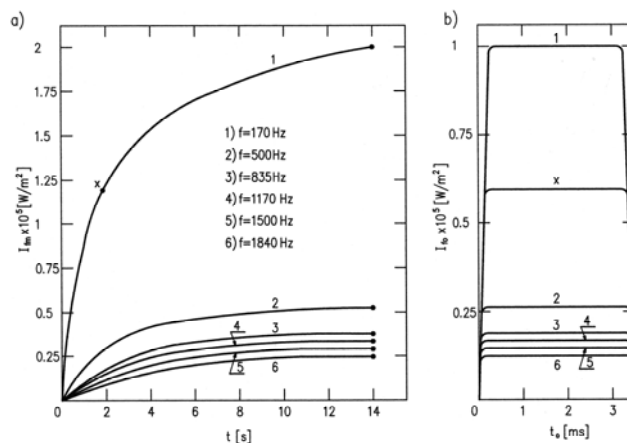
No.	$f_{rm}$ [Hz]	$I_{fm} \times 10^5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$I_{ft} \times 10^5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$m_{fm}$	$m_{ft}$	$\Delta m_f$ [%]
1	170	1,98	2,0388	622	641	-3,0
2	500	0,51	0,5500	160	172	-7,0
3	835	0,30	0,3252	94	102	-7,8
4	1170	0,26	0,2848	81	90	-10,0
5	1450	0,21	0,2283	66	71	-7,0
6	1840	0,18	0,1919	57	60	-5,0

Tabela 3. Wyniki uzyskane dla wariantu optymalnego pompowania;  $f_{rm}$  – częstotliwość rezonansowa zmierzona,  $I_{at}$  – natężenie teoretyczne,  $I_{am}$  – natężenie zmierzone,  $m_{am}$  – współczynnik wzmocnienia obliczony,  $m_{at}$  – współczynnik wzmocnienia teoretyczny,  $\Delta m_a$  – różnica współczynników wzmocnienia,  $\eta$  – sprawność

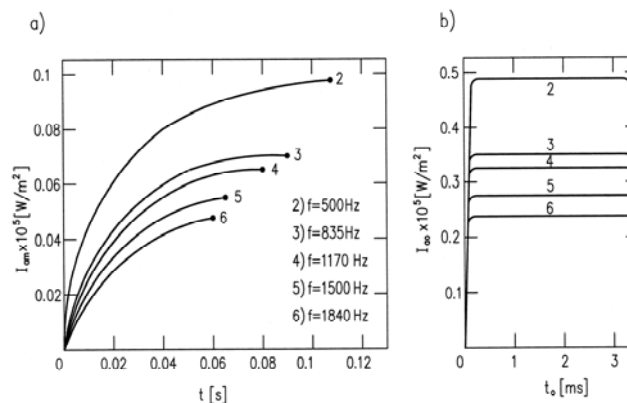
No.	$f_{rm}$ [Hz]	$I_{am} \times 10^5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$I_{at} \times 10^5$ [W/m <sup>2</sup> ]	$m_{am}$	$m_{at}$	$\Delta m_a$ [%]	$\eta$ [%]
1	170	1,210	1,244	381	391	-2,6	95
2	500	0,095	0,098	30	31	-2,9	92
3	835	0,065	0,069	20	22	-7,4	89
4	1170	0,061	0,064	19	20	-5,0	88
5	1450	0,055	0,057	17	18	-4,0	87
6	1840	0,049	0,052	15	16	-6,8	87

## Wnioski

Wykonane pomiary i obliczenia wykazały, że względne różnice między odpowiednimi wartościami nie przekraczają 10%, przy czym wszystkie wartości współczynników wzmocnienia otrzymane z pomiarów były niższe, niż odpowiednie wartości przewidywane przez model. Różnice te można wyjaśnić tym, że straty energii fali podczas pompowania, były większe, niż przewiduje model. Zwiększone straty mogły nastąpić z powodu rozbieżności fali w rezonatorze po odbiciu od migawki. Następstwem tego były odbicia od cylindrycznej ścinki rezonatora, podczas których część energii fali była pochłaniana. Wykorzystując oscyloskop z pamięcią przeprowadzono również pomiary natężenia fali  $I_{fm}$ ,  $I_{am}$  wewnątrz rezonatora w zależności od czasu pompowania  $t$  oraz natężenia  $I_{fo}$ ,  $I_{ao}$  impulsu fali biegnącej od czasu otwarcia migawki  $t_o$ . Pomiary te wykonano dla wariantu długiego pompowania i optymalnego pompowania. Wyniki tych pomiarów zostały wykorzystane do narysowania wykresów przedstawionych na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Zależności; (a) – natężenia fali w rezonatorze  $I_{fm}$  od czasu pompowania  $t$ , (b) – natężenia impulsu wyjściowego  $I_{fo}$  od czasu otwarcia migawki  $t_o$ . Zależności uzyskane dla wariantu długiego pompowania dla sześciu zmierzonych najniższych częstotliwości własnych rezonatora  $f_{rm}$ . Symbol x oznacza czas optymalnego pompowania dla częstotliwości  $f_{rm} = 170$  Hz



Rys. 3. Zależności; (a) – natężenia fali wewnątrz rezonatora  $I_{am}$  od czasu pompowania  $t$ , (b) – natężenia impulsu wyjściowego  $I_{ao}$  od czasu otwarcia migawki  $t_o$ . Zależności uzyskane dla wariantu optymalnego pompowania dla sześciu zmierzonych najniższych częstotliwości własnych rezonatora  $f_{rm}$

Z przeprowadzonych badań wynika, że też zbudowany układ umożliwia wytwarzanie na wyjściu impulsów fali dźwiękowej o czasie trwania ok. 3,5 ms. Natężenie tych impulsów jest od kilkudziesięciu do kilkuset razy większe, niż natężenie fali początkowej, która była używana do pompowania rezonatora. Wytwarzanie impulsów wyjściowych może być realizowane w dwóch wariantach pompowania – długiego, albo optymalnego. W wariantcie długiego pompowania możliwe jest otrzymanie większego natężenia impulsów wyjściowych, niż w wariantcie optymalnego pompowania. Wariant długiego pompowania wymaga jednak dostarczenia znacznie większej energii i charakteryzuje się mniejszą sprawnością. Jest to spowodowane tym, że wraz ze wzrostem czasu pompowania wzrastają straty energii w rezonatorze i przystoż natężenia fali przypadający na jej jedno przejście przez rezonator maleje. Parametry układu takie jak: dobroć rezonatora, natężenie impulsu wyjściowego, współczynnik wzmocnienia i sprawność silnie zależą do częstotliwości fali [11]. Wartości tych parametrów szybko maleją wraz ze wzrostem częstotliwości. Przyczyną tego jest wzrost współczynnika pochłaniania fali w powietrzu wraz ze wzrostem jej częstotliwości. Z tego powodu układ pracuje najbardziej efektywnie przy najniższej częstotliwości własnej, rezonatora, wynoszącej ok. 170 Hz.

Podsumowując można stwierdzić, że przeprowadzone badania potwierdziły słuszność przyjętej koncepcji wzmacniania i generowania impulsów fali akustycznej o dużym natężeniu. Koncepcja ta polega na gromadzeniu energii drgań w postaci fali stojącej w zamkniętym rezonatorze, a następnie jej przekształceniu w impuls fali bieżącej, tzw. paczkę falową, w wyniku szybkiego otwarcia tego rezonatora. Opracowany model teoretyczny wykazuje dobrą zgodność z wynikami doświadczalnymi. Zgodność tę można jeszcze poprawić, uwzględniając w tym modelu m.in. rozbieżność fali rozchodzącej się wewnątrz rezonatora. Czas trwania impulsu jest zdeterminowany przez szybkości otwierania rezonatora i rozchodzenia się fali w ośrodku, wypełniającym rezonator. Z kolei energia przenoszona przez impuls zależy od wielu czynników, m.in. od czasu pompowania, natężenia początkowego i może osiągać duże wartości, niemożliwe do uzyskania bezpośrednio przy użyciu przetwornika elektroakustycznego. Daje to możliwość zastosowań tego typu układów w różnych technologiach w tym również w innowacyjnych technologiach obronnych do likwidacji niektórych celów, np. bezzałogowych statków powietrznych. Choć układ został zbudowany i przetestowany w przypadku fal akustycznych, to możliwe jest również zbudowanie jego odmiany, generującej impulsy fal elektromagnetycznych, np. w niektórych pasmach mikrofal.

**Autor:** dr hab. inż. Stanisław Bednarek, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź, E-mail: [stanislaw.bednarek@fis.uni.lodz.pl](mailto:stanislaw.bednarek@fis.uni.lodz.pl)

## LITERATURA

- [1] Ziętek B., Lasery, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń (2009), s. 705
- [2] Lozovik E. Yu., Merkulova S.P., Ovchinnikov I.V., Sasers: resonant transitions in narrow-gap semiconductors and excitation system in coupled quantum wells, *Physical Letter A*, **282** (2001) 407-414
- [3] Wallentowitz S., Vogel W., Siemers I., Toschek P.E., Vibrational amplification by stimulated emission of radiation, *Physical Review A*, **54** (1996) no. 1, 943-946
- [4] Berdsley R.P., Akimov A.V., Henini M., Kent A.J. Coherent terahertz sound amplification and spectral line narrowing in a Stark ladder superlattice, *Physical Review Letters*, **104** (2010) 85501
- [5] Prieur J.Y., Höhler R., Joffrin J., Devaud M., Sound and amplification by stimulated emission of radiation in an amorphous compound, *Europhysics Letters* **24**, (1993) no 5, 409-414
- [6] Everest F.A., Pholman K.C., Master Handbook of Acoustics, McGraw-Hill Company Inc. (2009), p. 331
- [7] Raichel D., The Science and Applications of Acoustics, Springer, Berlin (2006), p.145
- [8] Watson A., Pump up the volume, *New Scientist* (1999) no. 3, 36-41
- [9] Kuttruff H., Acoustics: An Introduction, Taylor and Francis, New York (2007), p. 170
- [10] Mizerski W. (red.), Tablice fizyczno-astronomiczne, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa (2013), s. 271
- [11] Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V., Fundamentals of Acoustics, Wiley, New York (1982), p. 131