



ZESZYTY ENERGETYCZNE, TOM VII

*Wyzwania naukowe w dobie światowej
transformacji energetycznej*

2020, s. 129–146

Złożony system pomiarowy urządzenia termoakustycznego: wybrane zagadnienia projektowe i eksploatacyjne

Krzysztof Grzywnowicz, Leszek Remiorz

Politechnika Śląska,
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych
e-mail: krzysztof.grzywnowicz@polsl.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono opis najważniejszych zagadnień dotyczących projektowania i eksploatacji układu pomiarowego rzeczywistego urządzenia termoakustycznego, funkcjonującego jako chłodziarka/pompa ciepła. Omówiono selekcję punktów pomiarowych oraz wielkości mierzonych ze względu na cel prowadzonego eksperymentu, a także podstawową metodologię oszacowania wartości błędu pomiarowego zastosowanych czujników. Nakreślono także wpływ pracy kluczowych podzespołów złożonego urządzenia – takich jak korektor położenia głośnika czy przetwornice elektryczne – na błędy pomiarowe. Zaprezentowano również narzędzia matematycznego przetwarzania i analizy sygnałów, takie jak dyskretna transformata Fouriera czy funkcja autokorelacji, szczególnie przydatne na etapie weryfikacji stanu pracy urządzenia.

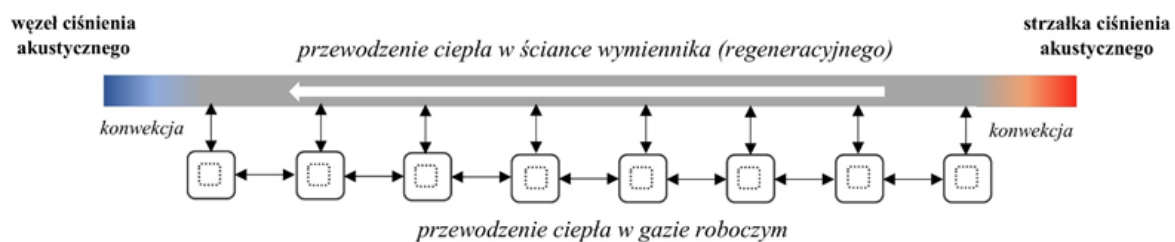
Słowa kluczowe: termoakustyka, tor pomiarowy, analiza sygnałów

1. Wprowadzenie

Zjawiskiem termoakustycznym w klasycznym ujęciu nazywa się fenomen spontanicznej emisji dźwięku przez słup gazu, ograniczony np. cylindrycz-

nym lub prostopadłościennym kanałem, wskutek doprowadzenia do niego ciepła lub chłodu o określonych parametrach [1]. W ten sposób opisane zjawisko stanowi przedmiot badań od ponad stu pięćdziesięciu lat [2], [3], a urządzenia, wykorzystujące drgające słupy gazu jako źródło mocy akustycznej – zwane silnikami termoakustycznymi – do dzisiaj stanowią obszar intensywnego rozwoju [4], [5].

Zarówno rozważania teoretyczne, jak i wyniki analiz matematycznych i badań eksperymentalnych, doprowadziły pod koniec ubiegłego stulecia do wniosku, że prawobieżny obieg termodynamiczny, zachodzący w silniku termoakustycznym i zbliżony do obiegu Stirlinga lub Braytona – w zależności od parametrów układu – można odwrócić, tj. można wymusić przepływ ciepła od źródła o temperaturze niższej do źródła o temperaturze wyższej, wskutek oddziaływania propagującej fali akustycznej [1], co przedstawiono schematycznie na rys. 1. W tym przypadku, w zależności od spodziewanego efektu energetycznego wymuszonych drgań słupa płynu, układ może pełnić rolę chłodziarki lub pompy ciepła [1], [6].



Rys. 1. Schemat ideowy zjawiska termoakustycznego, zachodzącego w obiegu lewobieżnym

Intensywne badania prowadzone w ciągu ostatnich trzydziestu lat m.in. w Los Alamos National Laboratory [7] czy ECN [8], doprowadziły do opracowania zróżnicowanych układów termoakustycznych. W literaturze [7] znajduje się opis kriogenicznej chłodziarki o mocy do 2 kW, umożliwiającej chłodzenie czynnika do temperatury -140°C , dedykowanej wytwarzaniu LNG. Prototyp kompaktowej termoakustycznej chłodziarki, przeznaczonej do zastosowania w przemyśle spożywczym i transporcie, opisano szczegółowo w literaturze przedmiotu [9]. Ponadto opracowano konstrukcję kompaktowego układu prądotwórczego, wykorzystującego kanał termoakustyczny i alternator liniowy, o mocy wynoszącej nieco poniżej 12 W [10].

Znane są również wyniki badań, dotyczących możliwości zastosowania termoakustycznych pomp ciepła w indywidualnych układach grzewczych [8], [11]. Przeprowadzone badania porównawcze [8] wskazują na istotnie wyższe średnie sprawności energetyczne tych urządzeń, w porównaniu do silników i chłodziarek termoakustycznych.

Ze względu na wykorzystanie fali akustycznej urządzenia termoakustyczne wykazują szereg korzystnych ekologicznie i eksploatacyjnie cech, w tym potencjalnie wysoką niezawodność – spowodowaną ograniczeniem ilości elementów ruchomych – oraz brak zagrożenia dla ludzi i środowi-

ska w przypadku rozszczelnienia, ze względu na wykorzystywanie gazów obojętnych jako czynników roboczych [7], [8]. Niemniej, mimo przeprowadzenia szerokich badań o charakterze podstawowym i wdrożeniowym, konstruowane obecnie urządzenia termoakustyczne – niezależnie od zachodzącego obiegu termodynamicznego – charakteryzują się relatywnie niską sprawnością, nie pozwalającą na skuteczne konkutowanie z komercyjnie dostępnymi urządzeniami o niekorzystnej ekologicznie charakterystyce [8], [11]. Z tej przyczyny istotnym obszarem dalszych badań jest poszukiwanie nowych oraz optymalizacja istniejących urządzeń termoakustycznych, w celu istotnego podwyższenia ich sprawności energetycznej.

Mimo znaczącego rozwoju metod numerycznych i istotnego udziału badań obliczeniowych w obecnie prowadzonych analizach z zakresu termoakustyki [5], [12], [13], w literaturze przedmiotu znajduje się opis szeregu badań eksperymentalnych, dotyczących podstaw omawianego zjawiska [14], [15]. Wyniki testów, opisane w źródle [14], wykazują zasadniczą zależność parametrów termoakustycznej pompy ciepła od lokalizacji wewnętrznych wymienników ciepła oraz parametrów wymuszającej fali akustycznej. Inne badania wykazują występowanie silnego gradientu temperatury – wraz z lokalnymi ekstremami – w obszarze wymiennika regeneracyjnego, którego zwrot i magnituda są zależne również od lokalizacji wymiennika w kanale akustycznym [15].

Ponadto prowadzone są obecnie badania weryfikacyjne nowych koncepcji urządzeń termoakustycznych [16–18]. W literaturze znajduje się opis złożonego eksperymentu, dedykowanego identyfikacji parametrów operacyjnych hybrydowego układu chłodziarki termoakustycznej, osiągającej moc chłodniczą nieco ponad 500 W, przy sprawności egzergetycznej na poziomie 58% [16]. W źródle [17] omówiono testy układu sprzężonych ze sobą urządzeń termoakustycznych typu silnik-chłodziarka o regulowanych parametrach geometrycznych, które wykazały możliwość istotnej regulacji chwilowych parametrów cieplnych układu, wskutek modyfikacji geometrii układu. Znany jest również opis eksperymentu dedykowanego weryfikacji parametrów pracy prototypowej termoakustycznej pompy ciepła, osiągającej wartości współczynnika *COP* na poziomie 3, przy temperaturze dolnego źródła ciepła wynoszącej 0°C [18].

Podsumowując, testy eksperymentalne i badania poligonowe do dzisiaj stanowią kluczowy etap badań układów energetycznych, wykorzystujących zjawisko termoakustyczne. Należy więc domniemywać, że w najbliższej przyszłości pomiary parametrów prototypowych lub zmodyfikowanych urządzeń, pozostaną uwzględniane jako zasadniczy etap weryfikacji założeń projektowych (w tym sprawności), a także zostaną wykorzystane do opracowania algorytmów sterowania nastawami urządzenia w czasie jego pracy.

Zakres prowadzonych w czasie eksperymentu pomiarów nie ogranicza się do podstawowych parametrów pracy urządzenia, takich jak oddawany lub pobierany strumień ciepła czy ciśnienie gazu, lecz uwzględnia również

wartości parametrów geometrycznych (jak grubość płyty, z której wykonane są kanały wymienników ciepła [19]) czy częstotliwość fali akustycznej [20]. Zachowanie wysokiej dokładności pomiarów geometrii wymiennika ciepła jest istotne zarówno ze względu na porównanie wyznaczonych i założonych strumieni ciepła, ale również oszacowanie jego wpływu na degenerację fali akustycznej [21], [22], której minimalizacja stanowi zasadniczy krok w projektowaniu wysokosprawnych urządzeń. Szybkozmiennie parametry akustyczne urządzenia, w tym charakterystyka częstotliwościowa oraz amplitudowa ciśnienia dynamicznego, stanowią jedno z podstawowych źródeł informacji o funkcjonowaniu układu i parametrach zachodzącego wewnątrz zjawiska termoakustycznego [15], [23], [24]. Ich pomiar i analiza umożliwia m.in. wykrycie filtrowania częstotliwości przez struktury wymienników ciepła [22] czy występowania interakcji akustycznych przy wielu źródłach drgań [23]. Nie mniej istotne są pomiary relatywnie wolnozmiennych parametrów cieplnych, zwłaszcza temperatur płynów roboczych i ścianek wymienników ciepła w charakterystycznych punktach – mogą one zostać wykorzystane do doboru parametrów pracy urządzenia oraz optymalizacji geometrii samych wymienników [20], oceny parametrów przewodzenia i promieniowania cieplnego w ich obszarze [25], a także oszacowania jego charakterystyki sprawności [19].

Mimo swojej istotności właściwa realizacja pomiarów może stanowić trudne zagadnienie badawcze [26]. Jako najważniejsze przyczyny wspomnianych trudności należy wymienić:

- konieczność zapewnienia możliwie wysokiej dokładności pomiarów temperatury i ciśnienia dynamicznego [19], co związane jest ze stosowaniem przyrządów pomiarowych o wysokiej czułości [24],
- wysoką częstotliwość próbkowania układu pomiaru fali akustycznej, przekładającą się na znaczącą ilość zebranych danych w krótkim odstępie czasu [24],
- możliwość zniekształcenia parametrów akustycznych układu, w tym modyfikacji częstotliwości fali, znaczącego obniżenia amplitudy, czy indukcji echa, poprzez oddziaływanie elementów urządzenia, mających kontakt z gazem roboczym [22], [27],
- konieczność identyfikacji bezwładności zastosowanych przyrządów [24] i synchronizacji pomiarów, w przypadku stosowania zestawów czujników pomiarowych.

Ponadto istotny wpływ na jakość otrzymanych danych, zwłaszcza w zakresie parametrów akustycznych, może mieć nieświadome uśrednianie rzeczywistych wartości, spowodowane niedopasowaną częstotliwością próbkowania, znaczącym opóźnieniem w transmisji danych z różnych kanałów pomiarowych czy brakiem kalibracji przyrządów [21], [24], [28].

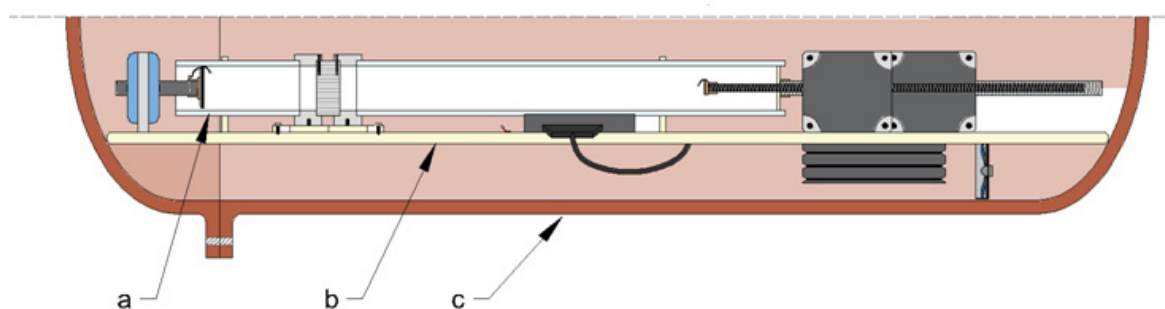
W pracy przedstawiono opis najważniejszych zagadnień dotyczących doboru i konfiguracji elementów torów pomiarowych, współpracujących ze stanowiskiem eksperymentalnym urządzenia termoakustycznego, funk-

cjonującego jako pompa ciepła. Nakreślono także zasady niwelacji wpływu elementów towarzyszących na występowanie błędów grubych. Przedstawiono również podstawowe techniki analizy danych pomiarowych, w celu redukcji ilości danych oraz oszacowania błędów pomiarowych na kolejnych torach.

2. Opis stanowiska badawczego

2.1. Skrócony opis stanowiska

Wspomniane w rozdziale 1. stanowisko badawcze (rys. 2) składa się z: kompaktowego urządzenia termoakustycznego (rys. 2 a), układu mocowania i regulacji nastaw (rys. 2 b) oraz zbiornika ciśnieniowego z armaturą (rys. 2 c).



Rys. 2. Schemat poglądowy stanowiska badawczego: a – urządzenie termoakustyczne, b – układ mocowania i regulacji, c – zbiornik ciśnieniowy

Kompaktowe urządzenie termoakustyczne składa się z cylindrycznego kanału akustycznego, wykonanego z poliwęglanu o grubości ścianki równej 4 mm, obustronnie zamkniętego, przy czym jedna z powierzchni krańcowych kanału zabudowana jest płaskim głośnikiem membranowym o średnicy zewnętrznej odpowiadającej średnicy wewnętrznej kanału, a druga z powierzchni krańcowych zabudowana jest ścianką wykonaną z polichlorku winylu (PVC) o grubości 3 mm. Kanał jest podzielony asymetrycznie na dwie części (o długościach równych odpowiednio 75% i 25% długości kanału), przy czym każda z nich podparta jest kołnierzem mocującym wykonanym z żywicy polimerowej. Przestrzeń współtworzona przez kołnierze, zlokalizowana wewnątrz kanału akustycznego, przeznaczona jest na zaciskowe mocowanie wymiennika regeneracyjnego. Wymiennik regeneracyjny może występować w zróżnicowanych wariantach – dopuszcza się stosowanie różnych długości, materiałów i struktur [29].

Układ mocowania i regulacji składa się z: płyty bazowej, wykonanej z PVC o grubości 10 mm, stanowiącej podstawę mocującą kompaktowe urządzenie termoakustyczne wraz z pośrednimi elementami mocującymi i częścią

armatury; układu napędu i pozycjonowania głośnika i ścianki domykającej kanał akustyczny, zawierającego zestaw silników krokowych, pręty jezdne oraz niezbędne oprzyrządowanie elektryczne; układu regulacji temperatury, złożonego z grzałki elektrycznej, wentylatora, manualnego sterownika i oprzyrządowania elektrycznego [29].

Zbiornik ciśnieniowy stanowi zbiornik stalowy o pojemności nominalnej 77 dm³, wyposażony w demontowalną dennicę oraz wizjer. Zbiornik przystosowany jest do pracy pod ciśnieniem manometrycznym do 10 bar, przy wykorzystaniu gazów niepalnych i niewybuchowych [29].

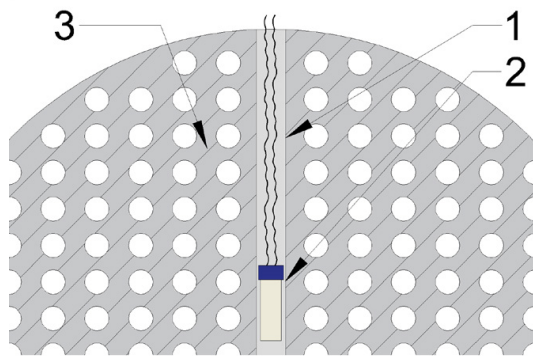
2.2. Tor pomiaru temperatury

Zasadniczym pomiarem w przypadku urządzeń termoakustycznych funkcjonujących w obiegu lewobieżnym, jest pomiar temperatury. Błąd pomiaru tej wielkości ma wpływ na oszacowanie podstawowych parametrów operacyjnych rozpatrywanego systemu, takich jak sprawność czy współczynnik *COP*, a jego wartość zależna jest nie tylko od konstrukcji toru pomiarowego, ale również od lokalizacji czujników.

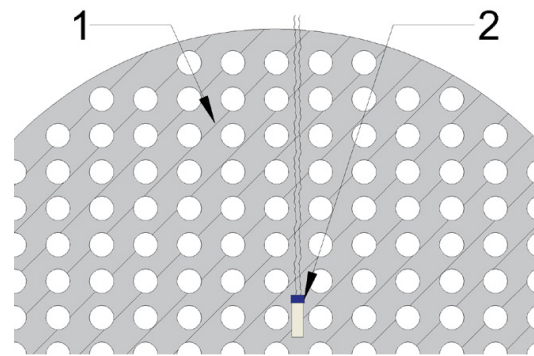
Lokalizacja punktów pomiarowych jest zróżnicowana i zależy zarówno od aplikacji danego układu, jak również od zaawansowania zastosowanego układu regulacji i innych czynników. Niemniej, niejednokrotnie uwzględnia jeden lub więcej pomiarów w układzie wymienników zlokalizowanych w kanale akustycznym [15], [20]. W tym przypadku pomiar jest relatywnie trudny, gdyż na jego wartość może mieć wpływ nie tylko rzeczywista temperatura ścianki wymiennika, lecz także okresowo zmienna temperatura lokalnie zgromadzonego gazu (sprężanego i rozprężanego w kolejnych cyklach propagacji fali akustycznej), zakłócająca pomiar. Przeciwdziałanie temu negatywnemu wpływowi może stanowić:

- zabudowa czujnika temperatury w rynnie wykonanej z materiału wymiennika i trwale z nim połączonej (rys. 3) – to rozwiązanie należy uwzględnić w trakcie projektowania wymiennika; w przypadku wąskich kanałów akustycznych obecność rynny może istotnie wpłynąć na warunki propagacji fali,
- zastosowanie czujnika miniaturowego, tj. o wymiarach mniejszych niż najmniejsza odległość między kolejnymi porami wymiennika (rys. 4) – rozwiązanie o potencjalnym zastosowaniu w wymiennikach z regularnie ułożonymi porami; efekt wdrożenia zależy od geometrii wymiennika,
- wybór czujnika o wysokiej pojemności cieplnej i relatywnie wysokiej stałej czasowej – zastosowanie czujnika o podanych cechach, np. termometru oporowego, niweluje ryzyko znaczącego wpływu niewielkich wahań temperatury – kompensowanych częściowo w kolejnych chwilach pomiaru – na wartość zmierzoną, niemniej, w tym przypadku istnieje ryzyko zakłócenia pomiaru przez niewłaściwie kontrolo-

wany prąd samoogrzewania (tym samym metoda ta raczej nie znajduje zastosowania w instalacjach o dużych mocach).

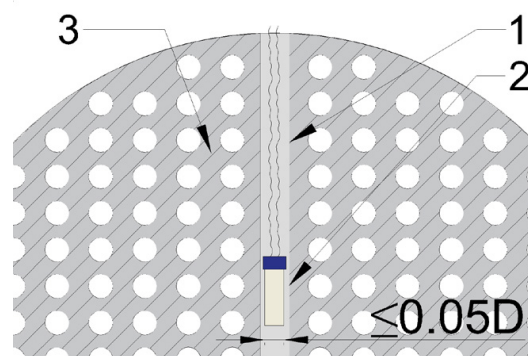


Rys. 3. Schemat zabudowy czujnika temperatury w litej rynnie, wydrążonej w materiale porowatego wymiennika (regeneracyjnego): 1 – rynnna, 2 – czujnik, 3 – materiał wymiennika



Rys. 4. Schemat zabudowy miniaturowego czujnika temperatury bezpośrednio w materiale porowatego wymiennika (regeneracyjnego): 1 – materiał wymiennika, 2 – czujnik

W rozpatrywanym stanowisku zastosowanie znalazła metoda hybrydowa, łącząca wymienione aspekty (rys. 5). Wymiennik regeneracyjny wykonany z tworzywa sztucznego na etapie produkcji wyposażono w dwie wąskie rynny (przy czym założono średnicę rynny na poziomie 5% średnicy wymiennika), izolujące bezpośrednio czujnik od gazu roboczego. Średnicę rynny zminimalizowano, w celu ograniczenia wpływu jej obecności na rozkład ciśnienia akustycznego w kanale akustycznym, co wymusiło zastosowanie miniaturowego czujnika temperatury. W układzie zastosowano czujnik rezystancyjny typu Pt100, izolowany warstwą ceramiki.



Rys. 5. Schemat zabudowy miniaturowego czujnika temperatury w litej rynnie, wydrążonej w materiale porowatego wymiennika (regeneracyjnego): 1 – rynnna, 2 – czujnik, 3 – materiał wymiennika

Pomiary systemowe, wykonywane przy użyciu standardowych czujników Pt100, mogą być obarczone wysokim błędem pomiarowym [30], istotnie ograniczającym ich zastosowanie w laboratoryjnych instalacjach termoakustycznych. Jako rozwiązanie problemu zaproponowano wykorzystanie czujników najwyższych klas dokładności, tj. klasy AA lub klasy A. Ze względu na

istotne trudności w dostępie do miniaturowych sensorów klasy AA, układ wyposażono w czujnik klasy A, scharakteryzowany niepewnością pomiarową wyznaczoną zależnością (1) [31]:

$$u(T)_{max} = \frac{0,15^{\circ}\text{C} + 0,002 \cdot |T|}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

gdzie:

$u(T)_{max}$ – niepewność pomiarowa standardowa temperatury, °C,
 T – wartość pomiaru, °C.

Zastosowanie czujnika Pt100, ze względu na powszechność stosowania tego typu sensorów, ułatwia opracowanie toru pomiarowego. Niemniej, szczególnie istotnym zagadnieniem w tym zakresie jest charakterystyka przetwornika analogowo-cyfrowego (A/C). Jego niewystarczająca rozdzielczość przekłada się bezpośrednio na szeroki zakres wartości oporu przypadających na pojedynczy bit danych przesyłanych do układu pomiarowego. Przykładowo, zastosowanie przetwornika 8-bitowego sprzężonego z czujnikiem o zakresie pomiarowym 950 K (od -150 do 800°C), przekłada się na zakres przetwarzania około 120 K/bit, co może w istotny sposób wpływać na wzrost niepewności pomiarów. Z tej przyczyny, w większości zastosowań laboratoryjnych i poligonowych, konieczne jest wykorzystanie przetworników 16- lub 32-bitowych, pozwalających na ograniczenie błędu kwantyzacji, będącego składową błędą przetwarzania analogowo-cyfrowego, do wartości ułamkowych błędą osiągniętego dla przetwornika 8-bitowego [32].

Istotne zagadnienie stanowi również format i protokół przesyłanych informacji na drodze przetwornik-odbiornik. Większość przetworników A/C dostępnych na rynku, udostępnia dane jako liczby zmiennoprzecinkowe 16- lub 32-bitowe (co umożliwia przechowanie do odpowiednio 5 oraz 45 miejsc po przecinku), co jest całkowicie wystarczające dla potrzeb układów termoakustycznych. Równie istotne znaczenie ma sposób transmisji danych. W większości stosowanych w przemyśle protokołów (np. Modbus) liczby zmiennoprzecinkowe zapisuje się w parzystej liczbie bajtów, przy czym domyślnie najbardziej znaczący bajt (ang. *Most Significant Bite*, MSB) przesyła się w pierwszej kolejności, a najmniej znaczący bajt (ang. *Least Significant Bite*, LSB) – przesyła się w kolejności ostatniej. Niezależnie od wybranego protokołu, w celu zachowania dokładności wartości mantysy liczby zmiennoprzecinkowej, korzystne może być wymuszenie transmisji bajtów w odwróconej kolejności, co zmniejsza ryzyko utraty kluczowych informacji w przypadku przerw w transmisji danych.

2.3. Tor pomiaru ciśnienia

Równie istotnym pomiarem jest pomiar ciśnienia statycznego oraz akustycznego. Pomiar amplitudy ciśnienia dynamicznego, wymuszonego kolej-

no przez propagującą falę akustyczną oraz powstający rezonans, pozwala na identyfikację warunków akustycznych mających miejsce w analizowanym układzie. Pomiar ciśnienia statycznego umożliwia oszacowanie gęstości energii związanej z ruchem oscylacyjnym porcji gazu.

W przypadku pomiaru amplitudy ciśnienia dynamicznego (ciśnienia akustycznego) podstawowe zagadnienie stanowi lokalizacja czujnika pomiarowego. W warunkach idealnego rezonansu akustycznego wzdłuż kanału akustycznego obecne są obszary wzmocnienia i wyciszenia sygnału dźwiękowego, odpowiadające kolejnym strzałkom i węzłom ciśnienia. W rzeczywistym przypadku analizy urządzenia termoakustycznego uzyskanie idealnego rezonansu jest trudne – ze względu na obecność porowatego wymiennika w kanale akustycznym wymuszająca fala dźwiękowa może zostać częściowo odbita i rozproszona, powodując odczyt dodatkowego sygnału nawet w węzłach ciśnienia akustycznego. Ponadto wpływ na rozkład ciśnienia akustycznego może mieć odchylenie kątowe kanału akustycznego od osi źródła fali dźwiękowej [33]. W przypadku znaczących amplitud fali, odchylenie kątowe kanału nieprzekraczające 10° nie powoduje istotnej destabilizacji pola akustycznego [1], [33], jednak w przypadku przekroczenia tej wartości, odbicie fali akustycznej od ścian może skutkować pojawieniem się wysokoenergetycznych składowych, w skrajnym przypadku znoszących rezonans akustyczny.

Z tego powodu korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie czujnika ciśnienia akustycznego w postaci mikrofonu omnidyrekcyjnego, umożliwiającego odczyt sygnału pochodzącego z różnych źródeł, w tym niskoenergetycznych. Wadą tego rozwiązania jest konieczność przeprowadzenia podstawowej analizy sygnału, w celu wyodrębnienia składowych odpowiadających kolejno: fali wymuszającej, szumowi białemu oraz falom o niskich amplitudach, pochodzących z odbicia i rozproszenia fali wymuszającej. Rozwiązanie alternatywne, to jest zastosowanie czujnika jedno- lub bidirekcyjnego, w sposób istotny upraszcza proces matematycznej analizy zebranych danych, obarczone jest jednak ryzykiem konieczności wielokrotnego powtórzenia pomiarów w przypadku pojawienia się istotnych zakłóceń.

Z tej przyczyny na stanowisku badawczym jako czujnik ciśnienia akustycznego zastosowano elektretowy mikrofon pojemnościowy, o częstotliwości detekcji sygnału w przedziale 102–104 Hz i maksymalnym poziomie ciśnienia akustycznego 58 dB [34].

W torze pomiarowym ciśnienia akustycznego niejednokrotnie konieczne jest zastosowanie układu wzmacniacza sygnału. Kluczowe zagadnienie stanowi właściwy dobór współczynnika wzmocnienia. W przypadku złożonych układów pomiarowych zbyt niska jego wartość może spowodować wzrost udziału szumu białego i przesłuchów z pozostałych torów pomiarowych, w sygnale zbieranym przez karty pomiarowe. Nadmierne wzmocnienie może stanowić zarówno potencjalne źródło przesłuchów do innych torów, jak i utrudnić rozdział składowych sygnału w trakcie jego matematycznej

analizy. Ponadto właściwe odwzorowanie kształtu sygnału wymaga zastosowania układu wzmacniacza o wystarczająco wysokiej wartości prędkości narastania (ang. *slewrate*), nie mniejszej niż iloczyn maksymalnej spodziewanej częstotliwości kątowej zbieranego sygnału i maksymalnej jego wartości, wyrażonej w napięciu na stykach obwodu mikrofonu, zgodnie z zależnością (2) [35]:

$$SR = 2\pi \cdot V_{\text{amp}} \cdot f_{\text{max}} \quad (2)$$

gdzie:

SR – prędkość narastania,

V_{amp} – napięcie na stykach mikrofonu przy maksymalnym ciśnieniu akustycznym,

f_{max} – najwyższa częstotliwość składowa rejestrowanego sygnału.

Na podstawie szacunkowych analiz modelowych oraz parametrów technicznych toru pomiarowego, założono maksymalne wartości napięcia i częstotliwości na poziomie odpowiednio 2,5 V oraz 12 kHz.

W opisywanym stanowisku zastosowano niskonapięciowy wzmacniacz elektroniczny o nominalnym wzmacnieniu poziomu ciśnienia akustycznego, wynoszącym 12 dB i prędkości narastania $1,5 \cdot 10^6$ V/s [36].

Pomiar ciśnienia statycznego zrealizowano z wykorzystaniem znormalizowanego czujnika ciśnienia, operującego w zakresie od 0 do 10 bar. Sygnał wyjściowy z zastosowanego czujnika stanowił znormalizowany sygnał prądowy w zakresie od 4 do 20 mA. W torze pomiarowym ciśnienia statycznego umieszczono 14-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, wyposażony w dwa wejścia prądowe o rozdzielczości $3,75 \mu\text{A}$, o czasie przetwarzania 16 ms [37].

3. Pomiar testowy i omówienie wyników

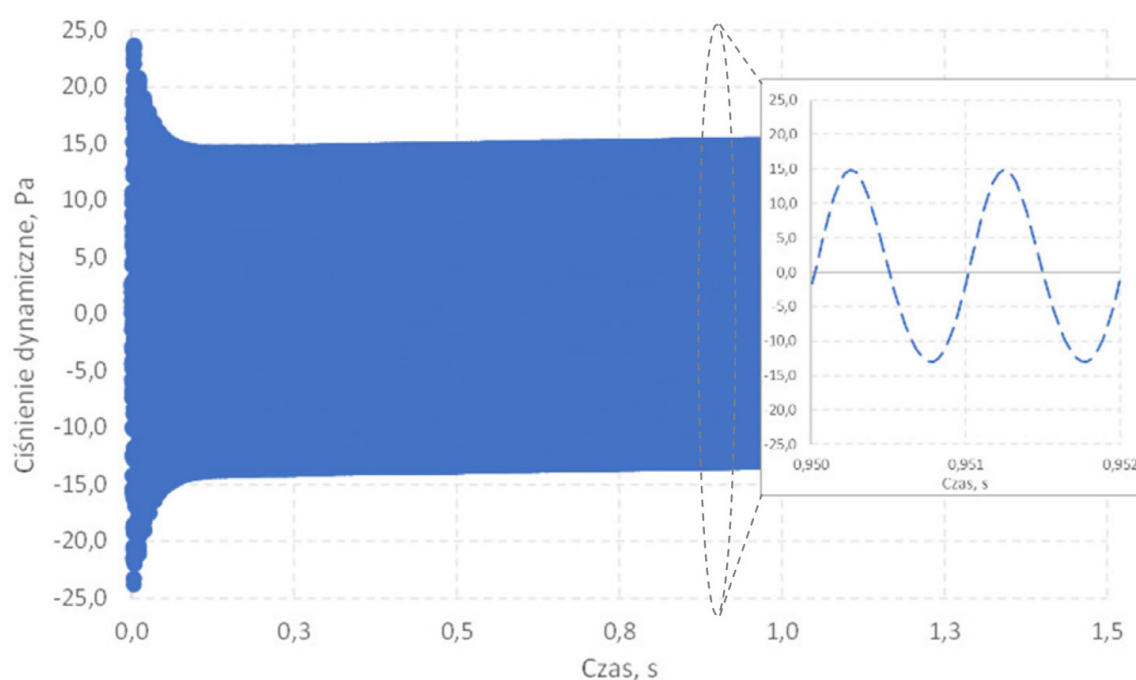
3.1. Założenia

W celu weryfikacji funkcjonowania stanowiska wyposażonego w tory pomiarowe według opisu zamieszczonego w podrozdziałach 2.1 oraz 2.2 zrealizowano pomiar testowy. Pomiar ten uwzględniał wyznaczenie temperatur w obszarze obu zewnętrznych powierzchni wymiennika regeneracyjnego przy sztywnej ścianie, zamykającej kanał akustyczny. Ponadto zebrano próbkę sygnału ciśnienia dynamicznego o długości 1,5 sekundy, zmierzoną w odległości dwóch trzecich długości kanału akustycznego od źródła fali akustycznej (głośnika). Pomiar ciśnienia zrealizowano bezpośrednio po rozpoczęciu emisji fali akustycznej, a pomiar temperatur zrealizowano po 13 minutach od rozpoczęcia emisji. W celu wzbudzenia i podtrzymania zjawiska

termoakustycznego w kanale akustycznym założono emisję fali o stałej częstotliwości, wynoszącej 859,3 Hz oraz o amplitudzie wynoszącej 33% maksymalnej amplitudy fali wytwarzanej przez zadane źródło fali (głośnik). Na podstawie charakterystyki zastosowanego głośnika [38] oraz pomiaru parametrów magnetycznych wykorzystanej w nim cewki, amplitudę drgań membrany w podanych warunkach pracy oszacowano na $1,33 \cdot 10^{-3}$ mm, co odpowiada około 83 Pa amplitudy ciśnienia dynamicznego w warunkach rezonansu (przy ciśnieniu otoczenia). W pomiarze testowym jako wymiennika regeneracyjnego użyto elementu o porowatości równej 45,8%, wykonanego z żywicy poliestrowej o długości wynoszącej 25 mm. Pomiar testowy przeprowadzono w zbiorniku wypełnionym dwutlenkiem węgla pod ciśnieniem 2,9 bar, pełniącym jednocześnie funkcję czynnika roboczego dla urządzenia termoakustycznego. Doboru gazu dokonano na podstawie jego właściwości fizycznych (niskich wartości pojemności cieplnej właściwej i współczynnika przewodzenia ciepła) niekorzystnych dla obserwacji zjawiska termoakustycznego [1], a jego ciśnienie założono na podstawie dopuszczalnych parametrów pracy szczelnego zbiornika ciśnieniowego, w którym umieszczono stanowisko.

3.2. Zestawienie wyników

Zebrane wyniki, dotyczące wartości temperatur, w kolejnych punktach przedstawiono w tab. 1. Wykres sygnału ciśnienia dynamicznego zaprezentowano na rys. 6.



Rys. 6. Zależność sygnału ciśnienia dynamicznego w funkcji czasu pomiaru

Tabela 1. Wyniki pomiarów temperatury

Parametr	Wartość	Jednostka
Temperatura w obszarze krawędzi wymiennika regeneracyjnego położonej bliżej głośnika	24,3	°C
Temperatura w obszarze krawędzi wymiennika regeneracyjnego położonej bliżej sztywnej ścianki	24,1	°C
Temperatura w pobliżu sztywnej ścianki	25,2	°C

Jak można stwierdzić na podstawie danych zawartych w tab. 1, wartości temperatur w obszarze wymiennika regeneracyjnego nie różnią się w sposób istotny. Jednakże wartość temperatury wyznaczona w pobliżu sztywnej ścianki znacząco różni się od temperatur zmierzonych w obszarze wymiennika regeneracyjnego (o odpowiednio 0,9 oraz 1,1°C względem każdej z jego przeciwległych krawędzi).

3.3. Matematyczna analiza sygnału

Jak nadmieniono w podrozdziale 2.3, zastosowanie czujnika ciśnienia akustycznego w postaci mikrofonu omnidyrekcyjnego wprowadza konieczność analizy zebranego sygnału, w celu identyfikacji źródeł ewentualnych szumów i warunków występowania rezonansu akustycznego, a tym samym przeprowadzenia podstawowej analizy stanu pracy układu.

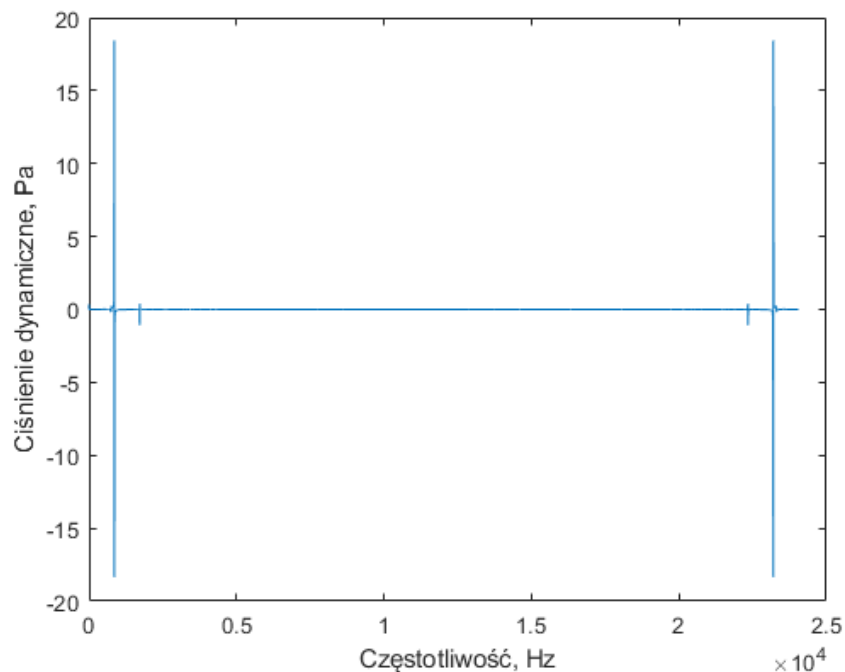
Zebrany z mikrofonu sygnał przeanalizowano przy wykorzystaniu podstawowych narzędzi matematycznej analizy i przetwarzania sygnału, uwzględniających kolejno wyznaczenie:

- a) dyskretnej transformaty Fouriera (DFT),
- b) DFT dla sygnału wymnożonego przez okna parametryczne,
- c) funkcji autokorelacji,
- d) cepstrum.

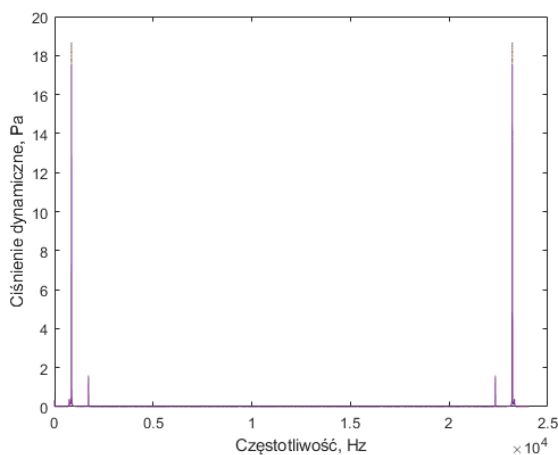
Podstawowym narzędziem wykorzystanym do przeprowadzenia analizy jest transformata Fouriera, umożliwiająca reprezentację zebranego sygnału w dziedzinie częstotliwości. Ponieważ sygnał zebrany z mikrofonu i przekształcony z wykorzystaniem przetwornika A/C (np. w postaci karty dźwiękowej) stanowi sygnał dyskretny, zastosowano dyskretną transformatę Fouriera (DFT). Wykres dyskretnej transformaty Fouriera, wyznaczonej dla przykładowego sygnału zebranego na stanowisku (rys. 6), przedstawiono na rys. 7.

Rezultaty przeprowadzenia DFT pozwalają na uwypuklenie częstotliwości wszystkich fal składowych zebranego sygnału. W przypadku wystąpienia odbicia fali wymuszającej, np. na krawędzi wymiennika wykonanego z częściowo elastycznego materiału i charakteryzującego się niewystarczającą porowatością, w zebranych sygnałach może pojawić się składowa o wysokiej amplitudzie i częstotliwości zbliżonej do częstotliwości fali pierwotnej. Po-

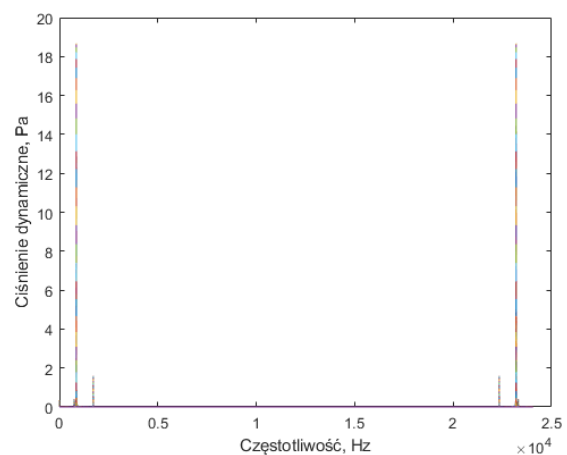
dobnie, w przypadku, gdy na parametry układu może wystąpić wpływ zewnętrznych fal akustycznych o znaczących amplitudach, identyfikacja składowych może wymagać zwiększenia rozdzielczości amplitudowej DFT. Cel ten można osiągnąć poprzez przemnożenie sygnału poprzez okna parametryczne. Działanie to jest szczególnie istotne na etapie identyfikacji występowania stabilnego rezonansu akustycznego i wykluczenia pojawiania się dudnień. W przeprowadzonej analizie założono wymnożenie sygnału niezależnie poprzez okno Hannę i okno Kaisera, stanowiące okna powszechnie używane w analizie danych dźwiękowych [39], [40]. Wykresy dyskretnej transformaty Fouriera wyznaczonej dla przykładu sygnału wymnożonego przez odpowiednio okno Kaisera i Hannę, przedstawiono na rys. 8 i 9.



Rys. 7. Wykres transformaty Fouriera dla zebranej próbki sygnału ciśnienia dynamicznego



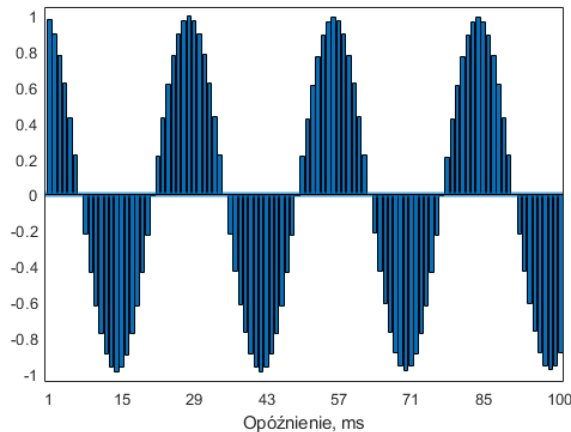
Rys. 8. Wykres transformaty Fouriera dla zebranej próbki sygnału wymnożonej przez okno Kaisera



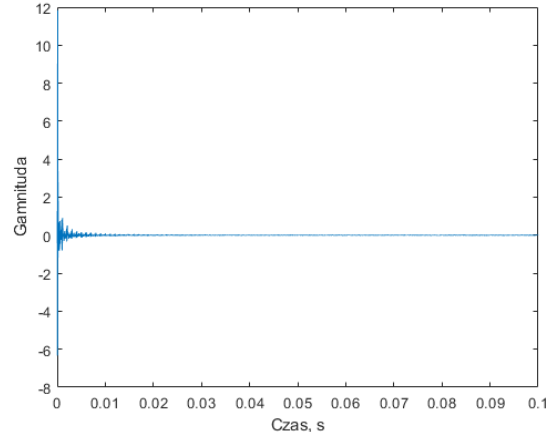
Rys. 9. Wykres transformaty Fouriera dla zebranej próbki sygnału wymnożonej przez okno Hannę

W przypadku wątpliwości w zakresie wyników transformaty sygnału przemnożonego przez okna parametryczne można zastosować autokorelację sygnału dyskretnego, pozwalającą na identyfikację okresowości zebranego sygnału. W odniesieniu do identyfikacji stanu pracy urządzenia termoakustycznego wykres funkcji autokorelacji sygnału pozwala na uwydatnienie interferencji składowych odbitych o wysokich amplitudach. Zakres opóźnień, stanowiący parametr wejściowy wyznaczanej funkcji autokorelacji, dobierany jest arbitralnie. W rozpatrywanej analizie założono zakres opóźnień od 1 do 100 milisekund. Wykres funkcji autokorelacji dla przykładowego sygnału przedstawiono na rys. 10.

Podstawowa analiza sygnału uzupełniona może być o wyznaczenie cepstrum, które pozwala zidentyfikować wpływ wystąpienia echa na pole akustyczne. Identyfikacja ta może być szczególnie istotna dla jasnego określenia wpływu pojawienia się interferencji fali wymuszającej i fal pochodzących ze źródeł zewnętrznych na pole akustyczne w kanale akustycznym analizowanego urządzenia. Obecność licznych pików w krótkim czasie (typowo poniżej 1 milisekundy) potwierdza występowanie licznych interferujących ze sobą fal – w tym echa fali wymuszającej – i istotnego zaburzenia pola akustycznego. Wykres cepstrum dla przykładowego sygnału akustycznego zebranego w czasie pracy stanowiska, przedstawiono na rys. 11.



Rys. 10. Wykres transformaty Fouriera dla zebranej próbki sygnału wymnożonej przez okno Kaisera



Rys. 11. Wykres transformaty Fouriera dla zebranej próbki sygnału wymnożonej przez okno Hanna

3.4. Dyskusja wyników

W założonym czasie emisji dźwięku o zadanej częstotliwości (odpowiadającej częstotliwości rezonansowej kanału akustycznego wchodzącego w skład urządzenia termoakustycznego) nie zaobserwowano istotnej różnicy temperatur między punktami pomiarowymi, zlokalizowanymi w pobliżu przeciwległych skrajnych powierzchni wymiennika regeneracyjnego. Według danych przedstawionych w tab. 1, różnica ta wyniosła $0,2^{\circ}\text{C}$. Biorąc pod

uwagę standardową niepewność pomiaru temperatury typu B, opisaną zależnością (2.1), należy stwierdzić, że wartość ta znajduje się w zakresie błędu pomiarowego i nie może zostać uznana za wiarygodną. Niemniej, warto podkreślić znaczną różnicę między rezultatami pomiarów temperatury w obszarze wymiennika regeneracyjnego a otoczeniem sztywnej ścianki domykającej kanał akustyczny. Zestawiając ze sobą otrzymane wartości można zauważyć, że średnia temperatura wymiennika regeneracyjnego była niższa od temperatury w pobliżu ścianki o 1°C , co w sposób istotny wykracza poza standardową niepewność pomiaru. Należy więc domniemywać, że w badanym urządzeniu termoakustycznym zachodzi zjawisko termoakustyczne, skutkujące istotnym obniżeniem temperatury w obszarze „zimnego końca” wymiennika regeneracyjnego, a zaobserwowana nieistotna różnica temperatur między przeciwległymi powierzchniami skrajnymi wymiennika, wynika z transportu znacznego strumienia ciepła w wymienniku na drodze przewodzenia.

Potwierdzają to wyniki analizy sygnału ciśnienia dynamicznego zebranego przy użyciu mikrofonu elektretowego, umieszczonego wewnątrz kanału akustycznego urządzenia termoakustycznego (jak opisano w podrozdziale 2.3). Sygnał pierwotny przedstawiony na rys. 6 sugeruje występowanie dudnienia i zniesienie zjawiska rezonansu – początkowa amplituda ciśnienia na poziomie 24 Pa ulega degradacji w czasie poniżej 0,3 sekundy i stabilizacji na poziomie około 15 Pa. Niemniej wyniki dyskretnej transformaty Fouriera przedstawionej na rys. 7 wykazują występowanie wyłącznie dwóch składowych sygnału. Składową podstawową o amplitudzie około 15 Pa stanowi sygnał o częstotliwości 859 Hz, odpowiadający częstotliwości rezonansowej oraz częstotliwości fali akustycznej wymuszającej. Drugą składową, o amplitudzie kilkunastokrotnie niższej od amplitudy składowej podstawowej, stanowi fala o częstotliwości 1719 Hz, odpowiadająca drugiej harmonicznej generowanej fali akustycznej. Jak można zauważyć na wykresach DFT przeprowadzonej dla próbki sygnału wymnożonej przez okna Kaisera i Hanna, przedstawionych odpowiednio na rys. 8 i 9, amplituda zaobserwowanej drugiej harmonicznej stanowi około jedną dwunastą amplitudy składowej podstawowej – nie stanowi więc fali zaburzającej w istotny sposób pola akustycznego w badanym urządzeniu. Ponadto jak wykazuje wykres funkcji autokorelacji (rys. 10), zebrany sygnał stanowi niemalże idealny sygnał sinusoidalny, bez istotnych odkształceń. Fakt ten sugeruje brak występowania niepożądanych odbić lub echa zniekształcającego występującą w kanale akustycznym falę. Podobnie wyniki analizy cepstrum, pokazane na rys. 11, nie sugerują wystąpienia echa w sygnale – najwyższa wartość obserwowana jest dla czasu 0 sekund i odpowiada fali podstawowej, a niewielkie amplitudowo zniekształcenia występujące w czasie poniżej 10 milisekund pochodzą prawdopodobnie z błędów przetwarzania i błędów pomiaru, nie odpowiadając rzeczywistemu echu.

4. Podsumowanie

W artykule przedyskutowano podstawowe zagadnienia projektowe i eksploatacyjne torów pomiarowych temperatury i ciśnienia – stanowiących najistotniejsze wielkości mierzone – w układzie urządzenia termoakustycznego. Zastosowanie zaproponowanej konstrukcji torów pomiarowych umożliwiło obserwację efektów cieplnych występowania zjawiska termoakustycznego, w postaci ochładzania obszaru wymiennika regeneracyjnego. Wykorzystanie zaproponowanych metod analizy i przetwarzania sygnału pozwoliło na weryfikację postawionej hipotezy i wykluczenie znaczącego wpływu błędu pomiarowego temperatury na interpretację otrzymanych wyników.

Literatura

- [1] Tijani M.E.H., *Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration*, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven 2001.
- [2] Strutt J.W., *The theory of sound*. Vol. II, New York, Dover 1945.
- [3] Sarpotdar S.M., Ananthkrishnan N., Sharma S.D., *The Rijke Tube – A thermo-acoustic device*, Resonance 2003, 1, 59–71.
- [4] Saechan P., Jaworski J.A., *Numerical studies of co-axial travelling-wave thermo-acoustic cooler powered by standing-wave thermoacoustic engine*, Renewable Energy 2019, 139, 600–610. DOI: 10.1016/j.renene.2019.02.059.
- [5] Rogoziński K., Nowak I., Nowak G., *Modeling the operation of a thermoacoustic engine*, Energy 2017, 138, 249–256. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.058.
- [6] Rossing T.D. (Ed.), *Springer handbook of acoustics*, Springer Science+Business Media LLC New York, New York 2007.
- [7] Swift G., Wollan J., *Thermoacoustics for liquefaction of natural gas*, GasTIPS 2002, 8, 21–26.
- [8] Spoelstra S., *Thermo Acoustic technology for energy applications. Final report*, Energy Research Centre of the Netherlands, Petten 2012.
- [9] Poesse M.E., Smith R.W.M., Garrett S.L., van Gerwen R., Gosselin P., *Thermoacoustic refrigeration for ice cream sales*, The Penn State University Applied Research Laboratory, Penn State University, 2004.
- [10] Yu Z., Jaworski A.J., Backhaus S., *Travelling-wave thermoacoustic electricity generator using an ultra-compliant alternator for utilization of low-grade thermal energy*, Applied Energy 2012, 99, 135–146. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.04.046.
- [11] Kikuchi R., Tsuda K., Bassem M.M., Ueda Y., *Measurement of performance of thermoacoustic heat pump in a -3 to 160°C temperature range*, Japanese Journal of Applied Physics 2015, 54(11), 117101, 1–4. DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.117101>.
- [12] Rahpeima R., Ebrahimi R., *Numerical investigation of the effect of stack geometrical parameters and thermo-physical properties on performance of a standing*

- wave thermoacoustic refrigerator*, Applied Thermal Engineering, 2019, 149, 1203–1214. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.093.
- [13] Zhang D., Jiang E., Shen C., Zhou J., Yang W., He Y., *Numerical analysis on thermoacoustic prime mover*, Journal of Sound and Vibration 2019, 463(4), 114946. DOI: 10.1016/j.jsv.2019.114946.
- [14] Kajurek J., Rusowicz A., Grzebielec A., *The influence of stack position and acoustic frequency on the performance of thermoacoustic refrigerator with the standing wave*, Archives of Thermodynamics 2017, 38(4), 89–107. DOI: 10.1515/aoter-2017-0026.
- [15] Alamir M.A., *Experimental study of the temperature variations in a standing wave loudspeaker driven thermoacoustic refrigerator*, Thermal Science and Engineering Progress, 100361. DOI: 10.1016/j.tsep.2019.100361 (w druku).
- [16] Mingyu H., Wu Z., Hu J., Zhang L., Luo E., *Experimental study on a thermoacoustic combined cooling and power technology for natural gas liquefaction*, Energy Procedia 2019, 158, 2284–2289. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.251.
- [17] Alcock A.C., Tartibu L.K., Jen T.C., *Experimental investigation of an adjustable thermoacoustically-driven thermoacoustic refrigerator*, International Journal of Refrigeration 2018, 94, 71–86. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.07.015.
- [18] Yang Z., Yanyan C., Guoyao Y., Luo E., Yuan Z., *Experimental investigation on a linear-compressor driven travelling-wave thermoacoustic heat pump*, Energy Procedia 2015, 75, 1844–1849. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.160.
- [19] Shivakumara N.V., Bheemsha A., *Experimental performance evaluation of thermoacoustic refrigerator made up of poly-vinyl-chloride for different parallel plate stacks using air as a working medium*, Materials Today: Proceedings 2020, 22, 2160–2171. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.285.
- [20] Xu J., Hu J., Sun Y., Wang H., Wu Z., Hu J., Hochgreb S., Luo E., *A cascade-looped thermoacoustic driven cryocooler with different-diameter resonance tubes. Part II: Experimental study and comparison*, Energy 2020, 207, 118232. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118232.
- [21] Erriu M., Genta G., Ripa D.M., Buogo S., Pili F.M.G., Piras V., Barbato G., Levi R., *Ultrasonic transparency of sonication tubes exposed to various frequencies: A metrological evaluation of modifications and uncertainty of acoustic pressures*, Measurement 2016, 80, 148–153. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.11.009.
- [22] Liu Z., Zhan J., Fard M., Davy J.L., *Acoustic measurement of a 3D printed micro-perforated panel combined with a porous material*, Measurement 2017, 107, 233–236. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.03.032.
- [23] Wang K., Sun D., Xu Y., Shen Q., Zou J., Zhan X., Qiu L., *Experimental study on a 500 W traveling-wave thermoacoustic electric generator*, Energy Procedia 2014, 61, 2271–2274. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.445.
- [24] Sun Y., Rao Z., Zhao D., Wang B., Sun D., Sun X., *Characterizing nonlinear dynamic features of self-sustained thermoacoustic oscillations in a premixed swirling combustor*, Applied Energy 2020, 264, 114698. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114698.

-
- [25] Černý R., Vejmelková E., *Apparent thermal conductivity approach at high-temperature measurements of porous materials*, Measurement 2011, 44(7), 1220–1228. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.04.002.
- [26] Iniesta C., Olazagoitia J.L., Vinolas J., Gros J., *New method to analyse and optimise thermoacoustic power generators for the recovery of residual energy*, Alexandria Engineering Journal. DOI: 10.1016/j.aej.2020.06.046 (w druku).
- [27] Jena D.P., Panigrahi S.N., *Numerically estimating acoustic transmission loss of a reactive muffler with and without mean flow*, Measurement 2017, 109, 168–186. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.05.065.
- [28] Palitó T.T.C., Assagra Y.A.O., Altafim R.A.P., Carmo J.P., Altafim R.A.C., *Low-cost electro-acoustic system based on ferroelectret transducer for characterizing liquids*, Measurement 2019, 131, 42–49. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.08.031.
- [29] Grzywnowicz K., Remiorz L., *Simple refrigerating device for multi-parametric analysis of the thermoacoustic cooling – Design, assembly and testing of the setup*, International Journal of Thermodynamics 2019, 22(4), 193–201. DOI: 10.5541/ijot.639634.
- [30] *Basics of precision temperature measuring with Pt100-Probes*, GHM GROUP, Greisinger 2020.
- [31] Norma PN-EN 60751:1997+A2.
- [32] Kulka Z., Libura A., Nadachowski M., *Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.
- [33] Hofler T.J., *Thermoacoustic refrigerator design and performance*, University of California, San Diego 1986.
- [34] *CEM-C9745JAD462P2.54R Omni-Directional Foil Electret Condenser Microphone*, Challenge Electronics, Deer Park 2010.
- [35] *Op Amp Slew Rate: details; formula*, https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/operational-amplifier-op-amp/slew-rate.php, (dostęp 9.11.2020).
- [36] *LMV321, LMV358, LMV324 General Purpose, Low Voltage, Rail-to-Rail Output Amplifiers*, Fairchild Semiconductor, Sunnyvale 2012.
- [37] *SDM-8AI Moduł rozszerzający – 8 wejść analogowych*, SFAR, Gdynia 2014.
- [38] *Visaton K40 – 8 Ohm*, Visaton GmbH, Haan 2015.
- [39] Smith J.O., *Spectral audio signal processing*, Stanford University, Stanford 2011.
- [40] Oppenheim A.V., Schaefer R., *Discrete-time signal processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River 2009.