

Aspekty akustyczne strugi syntetyzowanej – przegląd

Emil Smyk

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska;
e-mail.smyk@utp.edu.pl

Streszczenie: Struga syntetyzowana znajduje coraz więcej zastosowań zarówno w technice, jak i w nauce. Do jej generowania wykorzystuje się najczęściej głośniki lub elementy piezoelektryczne. Głośniki zapewniają większy strumień pędu, jednak generują również większy hałas, co może być problematyczne przy komercyjnych zastosowaniach siłowników strugi syntetyzowanej. W artykule dokonano przeglądu publikacji dotyczących aspektu poziomu dźwięku generowanego przez siłowniki strugi oraz wskazano kierunek przyszłego rozwoju w tej dziedzinie.

Słowa kluczowe: poziom hałasu, akustyka, generator strugi syntetyzowanej

Acoustic aspects of synthetic jet – review

Emil Smyk

UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland;
e-mail.smyk@utp.edu.pl

Summary: Synthetic jet finds more and more applications in technology and science. It is generated most often by loudspeakers or piezoelectric elements. The loudspeakers provide greater velocity momentum, but also generates more noise, which can be problematic in commercial applications of the synthetic jet actuator. The paper reviews articles on the aspect of the sound level generated by the synthetic jet actuators and show the direction of future development in this field.

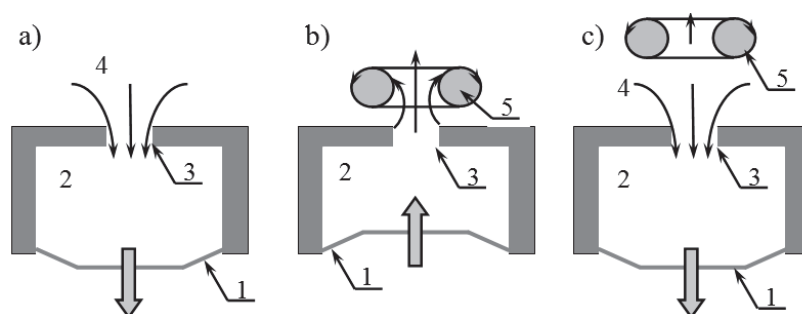
Key words: noise level, acoustic, synthetic jet actuator

1. Wstęp

Strumienie syntetyzowane powstają na skutek naprzemiennego wtłaczania i wytlaczania płynu roboczego do zamkniętej komory poprzez dyszę (rys. 1). Efekt ten uzyskuje się poprzez zastąpienie jednej lub większej liczby ścian ruchomym lub odkształcalnym elementem. W zależności od rodzaju tego elementu generatora strugi syntetyzowanej wyróżnia się generatory akustyczne (membrana głośnika), piezoelektryczne (element piezoelektryczny), mechaniczne (tłok), plazmowe (przepływ uzyskany poprzez zmianę temperatury w komorze) [21].

Struga syntetyzowana znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach techniki, takich jak sterowanie strumieniem [5, 9], mieszanie [17, 24] lub chłodnictwo [18, 25]. W szczególności ostatnie wymienione zastosowanie jest popularne, czego dowodem jest komercyjne zastosowanie strugi syntetyzowanej w urządzeniu o nazwie SynJet® [22], które składa się z radiatora i siłownika generującego strugę syntetyzowaną pełniącą rolę strugi uderzającej. Rozwiązanie to wykorzystywane jest do chłodzenia elementów elektroniki, w szczególności do odprowadzania ciepła z opraw LED.

Jako elementy wykonawcze w siłownikach stosuje się najczęściej membrany głośnika lub elementy piezoelektryczne. Struga generowana przez siłowniki akustyczne ma większy moment pędu, jednak charakteryzuje się większym poziomem generowanego dźwięku. Jest to spowodowane nie tylko przez różnice w amplitudzie, ale również częstotliwości, w jakiej pracują urządzenia (dla przykładu 174 Hz dla siłownika akustycznego [23] i 2050 Hz [6] dla siłownika piezoelektrycznego). Należy przy tym pamiętać, że hałas ma dwa źródła – jest generowany przez element wykonawczy oraz przez strugę.



Rys. 1. Generowanie strumieni syntetyzowanych: a) faza ssania; b) faza wydmuchu; c) faza ssania i oddalanie się strugi syntetyzowanej (1 – membrana; 2 – komora; 3 – dysza; 4 – strumień zasysany z otoczenia; 5 – wiry brzegowe) [opracowanie własne]

Fig. 1. Synthetic jet actuator a) the suction phase; b) the injection phase; c) the suction phase and the moving away of synthetic jet (1 – diaphragm; 2 – cavity; 3 – nozzle; 4 – jet sucked in from the environment; 5 – edge vortices) [own study]

Poziom generowanego dźwięku jest szczególnie ważny w przypadku wykorzystania siłowników w urządzeniach komercyjnych. Zgodnie z normą EN ISO 9241-6:2002 [11] w przypadku wykonywania zadań trudnych i złożonych, przy których wymagana jest koncentracja (prace biurowe), równoważny poziom

dźwięku nie powinien przekraczać 35–55 dB. Generatory strugi syntetycznej mogą więc być stosowane do odprowadzania ciepła takich elementów, jak radiatory w komputerach lub oprawy LED, jednak w tym celu należy jednak zapewnić odpowiednio niski poziom generowanego hałasu.

W pracy przedstawiono badania dotyczące akustycznego aspektu strugi syntetycznej, sformułowano wnioski i wskazano możliwe kierunki dalszego rozwoju badań.

2. Metodyka badań

Badania akustyczne powinny być przeprowadzane zgodnie z normą ISO 3746:2010 [10]. Oznacza to, że w trakcie badania obiekt powinien znajdować się w komorze bezchowej. Norma dopuszcza ponadto badania w innych warunkach, o ile w pomieszczeniu, w którym się one odbywają, nie zaobserwowano żadnych odbić, a poziom ciśnienia akustycznego tła jest mniejszy niż poziom natężenia dźwięku generowanego przez badany obiekt o 10 dB lub więcej. Zaleca się ponadto stosowanie krzywej warzenia SPL-A (dla niskich poziomów ciśnienia akustycznego). W tabeli 1 przedstawiono metody pomiarowe stosowane w badaniach związanych z pomiarem natężenia dźwięku generowanego przez generator strugi syntetyzowanej.

Tabela 1. Stosowane metody badawcze [opracowanie własne]

Table 1. Used research methods [own study]

Artykuł	Rok	Method badawcza
Arik, M. [1]	2007	komora bezchowa
Lasance, C.J.M. i inni [16]	2008	komora pogłosowa (ISO 3741:1999)
Bhapkar, U. i inni [2]	2013	pomiary w pomieszczeniu bez innych źródeł dźwięku
Bhapkar, U. i inni [3]	2014	pomiary w pomieszczeniu (ISO 3746:2010)
Laxmikant, D. i inni [19]	2015	komora bezchowa (ISO 3746:2010)
Jabbala, M., Jeyalingam, J. [12]	2017	komora bezchowa (ISO 3746:2010)
Kanase, M.M. i inni [14]	2018	komora bezchowa (ISO 3746:2010)
Jeyalingam, J., Jabbala, M. [13]	2018	komora pogłosowa

Należy zauważyć, że wybór badań poświęconych pomiarom poziomu hałasu generowanego przez generatory strugi syntetyzowanej jest niewielki. Jednak w większości z nich stosuje się obowiązujące normy ISO lub normy wcześniej obowiązujące. Jest to bardzo ważne, ponieważ pozwala na zestawianie ze sobą poszczególnych wyników pomiarów i wyciąganie spójnych wniosków.

W trakcie omawiania artykułów porównywano ze sobą poziom ciśnienia akustycznego (SPL, ang. *sound pressure level*):

$$SPL = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} \quad (1)$$

gdzie p to wartość ciśnienia akustycznego [Pa], p_0 to wartość ciśnienia akustycznego odniesienia.

Termin poziom ciśnienia akustycznego obejmuje wszystkie określenia używane w niniejszej pracy, takie jak poziom hałasu lub poziom dźwięku. Są to określenia powszechnie używane w języku naukowym zarówno w polsko-, jak i angielskojęzycznej literaturze.

3. Poziom hałasu w siłownikach

Poniżej omówiono, jak poszczególne aspekty budowy lub zasilania wpływają na poziom generowanego hałasu. Przedstawiono ponadto metody mogące wpłynąć na poziom ciśnienia akustycznego generowany przez urządzenie.

3.1. Poziom hałasu a wysokość dyszy

W pracy [3] badano poziom ciśnienia akustycznego dla generatorów z różnym kształtem i wysokością dyszy. Badania prowadzone były dla częstotliwości rezonansowej urządzenia (różnej dla każdego przypadku), jednak dla porównywanych ze sobą generatorów zastosowano takie same proporcje kształtu (AR , ang. *aspect ratio*):

$$AR = t/d \quad (2)$$

gdzie d to średnica hydrauliczna dyszy [mm], t to wysokość dyszy [mm].

Jest to szczególnie ważne, gdyż proporcje kształtu uznawane są za jedną z bezwymiarowych liczb kryterialnych.

Pomimo tego, że częstotliwość pracy generatora różniła się o 20 Hz w obu przypadkach (może to prowadzić do wzrostu poziomu hałasu o 8 dB), autorzy są przekonani, że wysokość dyszy ma istotny wpływ na poziom ciśnienia akustycznego. Zwiększenie wysokości dyszy z 2 mm do 5 mm spowodowało wzrost poziomu ciśnienia akustycznego o 3 do 6 dB (4–10%). Podobne wyniki potwierdziły pomiary dla generatora z dyszą okrągłą, kwadratową i prostokątną.

Odwrotną zależność zaobserwowali Kanase i inni [14], którzy badali generatory strugi syntetyzowanej dla takich samych parametrów zasilania oraz średnicy dyszy. Oznacza, to że wraz z zmianą wysokości dyszy ($t = 3, 5, 8, 12$) zmieniały się również proporcje kształtu dyszy generatora. Tym niemniej wyniki przeprowadzone dla pięciu różnych średnic dyszy ($d = 3, 5, 8, 12, 14$) potwierdziły, że wzrost wysokości dyszy powoduje spadek poziomu ciśnienia akustycznego. Zależność ta była stała w całym badanym zakresie. Podobne zależności uzyskano w pracy [16].

Bazując na tych badaniach, należy zauważyć, że Bhapkar i inni [3] w trakcie badań popełnili błąd wnioskowania. Zachowując bowiem taki sam współczynnik kształtu, ocenili, że to wysokość dyszy wpływa na generowany poziom ciśnienia akustycznego, a nie średnica dyszy, która w tym przypadku okazała się czynnikiem decydującym.

3.2. Poziom hałasu a średnica dyszy

Kanase i inni [14] wykazali, że poziom ciśnienia akustycznego rośnie wraz ze wzrostem średnicy hydraulicznej dyszy. Przykładowo dla dyszy okrągłej o średnicy $d = 14$ mm, $SPL = 65$ dB, podczas gdy dla $d = 5$ mm, $SPL = 60$ dB przy takich samych parametrach zasilania generatora.

Podobną zależność wykazano w [16]. Badano poziom dźwięku generowany przez różne generatory strugi syntetyzowanej i wentylatory wykorzystywane do chłodzenia elektroniki. Przykładowo dla generatora o wysokości dyszy $t = 30$ mm i średnicy dyszy $d = 3$ mm uzyskano poziom ciśnienia akustycznego o 3,3 dB mniejszy niż dla podobnego generatora o średnicy dyszy $d = 4$ mm. Wyniki potwierdziły się dla wysokości dyszy $t = 90$ mm (różnica 6,6 dB) oraz $t = 120$ mm (różnica 12,1 dB). Warto dodać, że w zależności od generatora generowany poziom ciśnienia akustycznego wynosił $SPL = 36,9\text{--}49$ dB, podczas gdy poziomu ciśnienia akustycznego generowany przez badane wentylatory wynosił $SPL = 36,6; 49,5$ dB. Współczynnik wymiany ciepła dla wszystkich badanych przypadków był podobny.

Bhappkar i inni [2] badali poziom ciśnienia akustycznego dla generatorów z dyszami o przekroju okrągłym dla 4 różnych średnic i 5 częstotliwości. Wykazali, że im większa średnica dyszy, tym większy poziom ciśnienia akustycznego. Wyniki badania omówione zostały jednak pobieżnie.

Jak więc widać w tym przypadku wszystkie przedstawione źródła są zgodne. Im większa średnica dyszy, tym wyższy poziom ciśnienia akustycznego generowanego przez generator strugi syntetyzowanej.

3.3. Poziom hałasu a kształt dyszy

Kształt dyszy generatora strugi syntetyzowanej jest jednym z najczęściej badanych parametrów. Choć zazwyczaj stosowane są dysze okrągłe i prostokątne, to badane są również dysze o innych kształtach. Mangate i Chaudhari [19] badali dysze o kształcie przekroju okrągłym, diamentowym (romb) oraz owalnym. Wykazali, że najwyższy poziom ciśnienia akustycznego był generowany przez siłownik z dyszą okrągłą. Hałas ten był nawet o 5 dB wyższy niż w przypadku siłownika z dyszą owalną. Generator z dyszą o kształcie diamentowym generował najniższy poziom hałasu dla niskich akustycznych liczb Reynoldsa ($Re \leq 6\ 000$, różnica od 1 do 5 dB). Dla akustycznej liczby Reynoldsa większej niż 6 000 to owalna dysza charakteryzowała się najniższym poziomem ciśnienia akustycznego. W przypadku $Re = 10\ 000$ siłownik z dyszą owalną generował hałas o 8 dB niższy niż siłownik z dyszą diamentową i 13 dB niższy niż siłownik z dyszą okrągłą.

Bhappkar i inni [3] wykonali podobne badania dla siłowników z dyszą o kształcie eliptycznym, prostokątnym, okrągłym i kwadratowym dla takiej samej średnicy hydraulicznej ($d = 12$ mm). Pomiary wykonano dla 4 różnych częstotliwości. Należy zauważyć, że badane siłowniki posiadały inne częstotliwości rezonansowe, a hałas generowany przy częstotliwości rezonansowej był zawsze niższy o 8–12 dB niż poziom ciśnienia akustycznego dla innych częstotliwości. Podobną zależność zauważono w [14].

Warto nadmienić, że dysze o podobnych kształtach badano również w [20], jednak pominięto aspekty geometryczne dysz. Natomiast obecny stan wiedzy pozwala jedynie ocenić, że dysze o kształcie okrągłym przyczyniają się do najwyższego generowanego poziomu dźwięku.

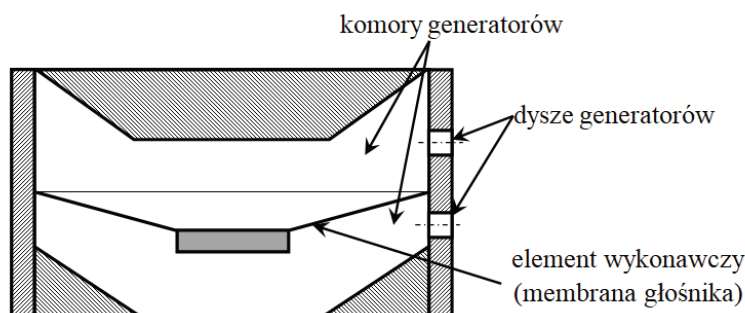
3.4. Inne parametry mające wpływ na poziom hałasu

Istnieje szereg innych parametrów mających wpływ na poziom generowanego hałasu. Najoczywistszym z nich jest moc zasilająca generator (lub wartość napięcia skutecznego). Jest to jednak zależność oczywista, która wiąże się z zasadą działania urządzeń stosowanych jako elementy wykonawcze (głośniki, elementy piezoelektryczne). Proporcjonalność mocy zasilania do poziomu ciśnienia akustycznego została potwierdzona między innymi w [1, 14].

Na poziom generowanego hałasu może mieć ponadto wpływ wybrany element wykonawczy, np. typ głośnika czy wielkość lub kształt komory generatora. Jednak te aspekty nie były dotychczas badane.

3.5. Inne typy generatorów strugi syntetyzowanej

Istnieje wiele typów generatorów strugi syntetyzowanej. Wśród najpowszechniejszych wymienić można generatory hybrydowe [4], z wieloma dyszami [7] i generatory bliźniacze [8]. To właśnie tym ostatnim Jabbal i Jeyalingam [12] poświęcili swoją pracę i porównali je z klasycznymi generatorami z jedną dyszą. Przykładowy model bliźniaczego generatora pokazano na rys. 2.



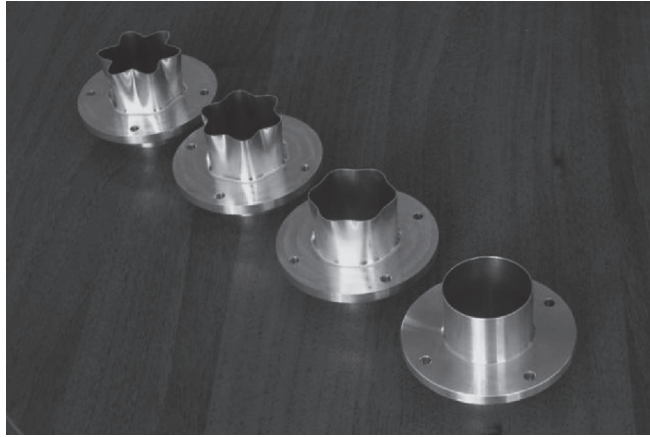
Rys. 2. Bliźniaczy generator strugi syntetyzowanej [opracowanie własne]

Fig. 2. Twin synthetic jet actuator [own study]

Jabbal i Jeyalingam [12] badali generatory bliźniacze z dyszami o kształcie okrągłym i falistym (rys. 3). Naukowcy badali generator bliźniaczy albo klasyczny, który uzyskiwano poprzez zapchanie jednej z dysz generatora bliźniaczego. Badania przeprowadzono dla częstotliwości w przedziale od 800 Hz do 3 000 Hz. Wyniki jednoznacznie pokazały, że generatory z jedną dyszą generują wyższy poziom ciśnienia akustycznego. Autorzy sugerują, że jest to związane z efektem przeciwfazowym – w przypadku dwóch dysz fale dźwiękowe przesunięte są ze sobą w fazie o około 180° i nakładają się na siebie, powodując redukcję poziomu ciśnienia akustycznego.

Generator z dyszą falistą generuje wyższy poziom ciśnienia akustycznego dla częstotliwości powyżej 2 000 Hz. Natomiast dla niższych częstotliwości poziom ciśnienia akustycznego jest niższy dla dyszy o przekroju okrągłym. Warto zaznaczyć, że zakres częstotliwości, dla jakich badany generator powinien pracować, to 1 600–1 900 Hz. W związku z tym pod względem akustycznym bardziej korzystne wydaje się stosowanie dysz o kształcie falistym (rys. 3). Autorzy zdecydowali się na

taki kształt, ponieważ jest on powszechnie stosowany w lotnictwie właśnie ze względu na generowanie niższego poziomu ciśnienia akustycznego w przypadku strumieni ciągłych.



Rys. 3. Dysze okrągłe i faliste [15]

Fig. 3. Circular and corrugated nozzles [15]

3.6. Metody tłumienia hałasu

Arik [1] badał siłowniki piezoelektryczne. Generowały one hałas o natężeniu 60–73,2 dB. W związku z tym, aby zredukować hałas, badacz umieścił generator w niewielkim sześciacie o długości boku wynoszącej 3 cale. Na jednej ze ścian sześciangu umieszczono niewielki tłumik połączony otworem o średnicy 10 mm z komorą i 1-, 2- lub 3-milimetrowym otworem na przeciwległej ścianie. Otwór pozwalał na swobodny przepływ powietrza pomiędzy atmosferą i wnętrzem tłumika i komory.

Wykazano, że skuteczność tłumienia maleje wraz z wzrostem średnicy dyszy w tłumiku. Wskazano ponadto najbardziej korzystną długość tłumika, która wynosiła ok. 2 cm. Pozwoliło to na zredukowanie poziomu ciśnienia akustycznego z 65 dB do 25 dB. Pomimo tego, że wynik jest naprawdę imponujący, należy zaznaczyć, że w praktyce stosowanie tego rozwiązania jest niemożliwe lub bardzo trudne, gdyż generatory musiałyby zostać zamknięte razem z obiektem, z którego odbierają ciepło lub w którym pełnią funkcje aktywnego sterowania strumieniami.

4. Podsumowanie

W pracy przywołano artykuły poświęcone badaniu poziomu hałasu generatorów strugi syntetyzowanej. W omawianych artykułach wykazano że:

- poziom hałasu jest odwrotnie proporcjonalny do wysokości dyszy;
- poziom hałasu jest wprost proporcjonalny do średnicy dyszy;
- poziom hałasu jest wprost proporcjonalny do mocy zasilania;
- kształt dyszy ma istotny wpływ na poziom generowanego dźwięku; generator z dyszą o kształcie przekroju okrągłym generuje największy hałas;
- dysze o kształcie przekroju falistym generują niższy poziom hałasu niż dysze o kształcie przekroju okrągłym.

Wciąż brakuje kompleksowych badań dotyczących hałasu generowanego przez generatory strugi syntetyzowanej. Wśród badań, które należałoby podjąć, jest przede wszystkim badanie wpływu wielkości komory generatora na poziom generowanego hałasu. Należałoby ponadto zbadać pod tym względem również inne generatory, np. z wieloma dyszami. Jest szczególnie istotne, biorąc pod uwagę obecny kierunek rozwoju generatorów strugi syntetyzowanej.

Podziękowania: Artykuł został wykonany w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, nr grantu: LIDER/6/0024/L-10/18/NCBR/2019.

Bibliografia

- [1] Arik, M., "An investigation into feasibility of impingement heat transfer and acoustic abatement of meso scale synthetic jets", *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007), 1483–1494, doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.09.027.
- [2] Bhapkar, U.S., Srivastava, A., Agrawal, A., "Acoustic and heat transfer aspects of an inclined impinging synthetic jet", *Int. J. Therm. Sci.* 74 (2013), 145–155, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2013.06.007.
- [3] Bhapkar, U.S., Srivastava, A., Agrawal, A., "Acoustic and heat transfer characteristics of an impinging elliptical synthetic jet generated by acoustic actuator", *Int. J. Heat Mass Transf.* 79 (2014), 12–23, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.083.
- [4] Broučková, Z., Trávníček, Z., "Visualization study of hybrid synthetic jets", *J. Vis.* 18 (2015), 581–593, doi:10.1007/s12650-014-0256-8.
- [5] Catalin, A.M., Florin, F., "Numerical simulations of synthetic jets in aerodynamic applications", *Incas Bull.* 6 (2014), 81–93, doi:10.13111/2066-8201.2014.6.S1.9.
- [6] de Luca, L., Girfoglio, M., Chiatto, M., Coppola, G., "Scaling properties of resonant cavities driven by piezo-electric actuators", *Sensors Actuators, A Phys.* 247 (2016), 465–474, doi:10.1016/j.sna.2016.06.016.
- [7] Gil, P., "Synthetic jet Reynolds number based on reaction force measurement", *J. Fluids Struct.* 81 (2018), 466–478, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2018.05.011.
- [8] Greco, C.S., Ianiro, A., Astarita, T., Cardone, G., "On the near field of single and twin circular synthetic air jets", *Int. J. Heat Fluid Flow* 44, (2013), 41–52, doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.03.018.
- [9] Hanfeng, W., Yu, Z., Chao, Z., Xuhui, H., "Aerodynamic drag reduction of an Ahmed body based on deflectors", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 148 (2016), 34–44, doi:10.1016/j.jweia.2015.11.004.
- [10] International Organization for Standardization (ISO) Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane (ISO 3746:2010); ISO: Geneva, Switzerland, 2010, p. 48.
- [11] International Organization for Standardization (ISO) EN ISO 9241-6:2002. Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) – Part 6: Guidance on the work environment (ISO 9241-6:1999); ISO: Geneva, Switzerland, 1999, 32.
- [12] Jabbal, M., Jeyalingam, J., "Towards the noise reduction of piezoelectrical-driven synthetic jet actuators", *Sensors Actuators, A Phys.* 266 (2017), 273–284, doi:10.1016/j.sna.2017.09.036.
- [13] Jeyalingam, J., Jabbal, M., "Experimental investigation of the aeroacoustics of synthetic jet actuators in quiescent conditions", *Sensors Actuators, A Phys.* 280 (2018), 52–60, doi:10.1016/j.sna.2018.07.007.
- [14] Kanase, M.M., Mangate, L.D., Chaudhari, M.B., "Acoustic aspects of synthetic jet generated by acoustic actuator", *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control* 37 (2018), 31–47, doi:10.1177/1461348418757879.
- [15] Kopiev, V.F., Zaytsev, M.Y., Ostrikov, N.N., "Subsonic jet noise suppression by a corrugated nozzle", *Acoust. Phys.* 59 (2013), 207–209, doi:10.1134/S1063771013010090.

- [16] Lasance, C.J.M., Aarts, R.M., Ouweltjes, O., “Synthetic jet cooling part II: Experimental results of an acoustic dipole cooler”, *Proceedings of the 2008 Twenty-fourth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 2008, 26–31.
- [17] Le, L. Van, Bui, T.T., Nguyen, C.N., Nguyen, A.N., Dinh, T.X., Dang, L.B., Tran, C.D., Chu, T.D., Dau, V.T., “Simulation and Experimental Study of a Synthetic Jet Valveless Pump”, *IEEE/ASME Trans. Mechatro.* 25/3 (2020), 1162–1170, doi:10.1109/TMECH.2019.2960332.
- [18] Mahalingam, R., Heffington, S., Jones, L., Williams, R., “Synthetic Jets for Forced Air Cooling of Electronics”, *Electron. Cool.* 13 (2007), 1–5.
- [19] Mangate, L.D., Chaudhari, M.B., “Heat transfer and acoustic study of impinging synthetic jet using diamond and oval shape orifice”, *Int. J. Therm. Sci.* 89 (2015), 100–109, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.006.
- [20] Mangate, L., Yadav, H., Agrawal, A., Chaudhari, M., “Experimental investigation on thermal and flow characteristics of synthetic jet with multiple-orifice of different shapes”, *Int. J. Therm. Sci.* 140 (2019), 344–357, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.036.
- [21] Mohseni, K., Mittal, R. (eds.), “Synthetic jets: fundamentals and applications”, CRC Press, 2014.
- [22] Schwickert, M.M. “SynJet ® Thermal Management Technology Increases LED Lighting System Reliability”, *IEEE Trans. Reliab.* 29 (2009), 449–482.
- [23] Smyk, E., Wawrzyniak, S., Peszyński, K., “Synthetic jet actuator with two opposite diaphragms”, *Mech. Mech. Eng.* 24 (2020), 17–25, doi:https://doi.org/10.2478/mme-2020-0004.
- [24] Sun, C.L., Sun, C.Y., “Effective mixing in a microfluidic oscillator using an impinging jet on a concave surface”, *Microsyst. Technol.* 17 (2011), 911–922, doi:10.1007/s00542-010-1177-7.
- [25] Yu, Q., Mei, Z., Bai, M., Xie, D., Ding, Y., Li, Y., “Cooling performance improvement of impingement hybrid synthetic jets in a confined space with the aid of a fluid diode”, *Appl. Therm. Eng.* 157 (2019), 113749, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.113749.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).