STRUMIENIE SYNTETYZOWANE – WYBRANE ZASTOSOWANIA

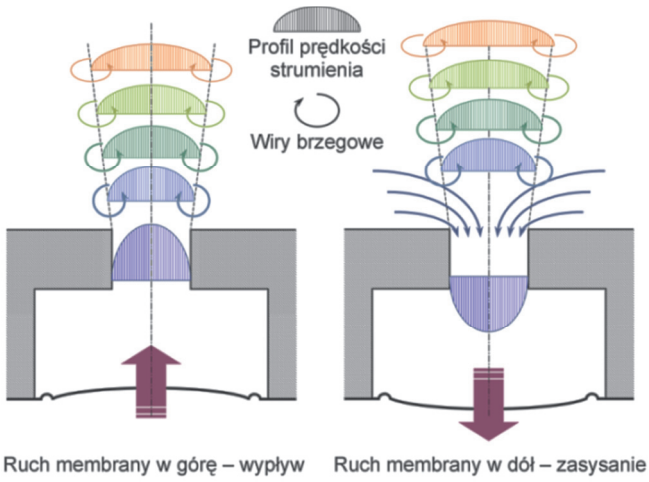
Emil Smyk[1]

1. WSTĘP

Strumienie syntetyzowane (ang. *synthetic jet*, SJ) powstają na skutek naprzemiennego wtłaczania i wytłaczania płynu roboczego przez dyszę do zamkniętej przestrzeni, zwanej komorą roboczą [Smith i Glezer 1998, Glezer i Amitay 2002]. Uśredniony masowy przepływ płynu przez dyszę generatora strumieni syntetyzowanych jest zerowy, dlatego strumienie te nazywa się strumieniami o zerowym przepływie masy (ang. *zero-net mass-flux*, ZNMF). Należy zaznaczyć, że przy pewnej częstotliwości pracy generatora wydmuchiwany strumień płynu nie jest powtórnie zasysany do jego komory, ale oddala się od dyszy, tworząc jednocześnie prądy brzegowe (rys. 1) [Broučková 2010, Mohseni i Mittal 2014].

Proces tworzenia strumieni syntetyzowanych realizuje się przez zastąpienie jednej lub kilku ze ścian komory siłownika elementem wykonawczym. W zależności od rodzaju elementu wykonawczego wyróżnia się siłowniki [Mohseni i Mittal 2014]:

- mechaniczne (tłok, membrana),
- akustyczne (głośnik),
- piezoelektryczne (piezoelektryki),
- elektromechaniczne (elektromagnesy),
- inne.



Rys. 1. Idea powstawania strumieni syntetyzowanych w generatorze z membraną (opracowanie własne)

[1] Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Mechatroniki i Automatyzacji Procesów, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: emismy001@utp.edu.pl

Intensywne badania doświadczalne i analizy teoretyczne [Smith i Glezer 1998, Glezer i Amitay 2002, Trávníček i in. 2006, Travnicek i in. 2012, Gil i Strzelczyk 2016] potwierdzają korzystne właściwości strumieni syntetyzowanych i są przyczyną dużego zainteresowania nimi ze względu na ich zastosowania praktyczne [Tesař i Peszynski 2010, Trávníček i in. 2014]. Wykorzystuje się je np. do chłodzenia elementów elektronicznych, w inżynierii chemicznej, do aktywnego sterowania strumieniami.

W pracy zebrano i przedstawiono niektóre z zastosowań strumieni syntetyzowanych w technice i nauce. Należy nadmienić, iż wskazane zastosowania nie są wszystkimi, z jakimi można się zetknąć w literaturze światowej.

2. AKTYWNE STEROWANIE STRUMIENIAMI

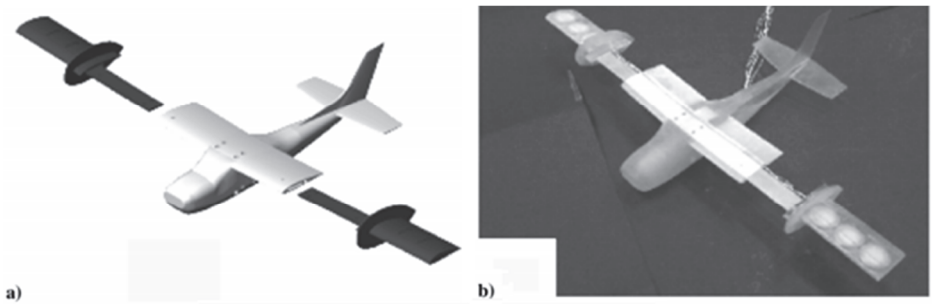
Strumienie syntetyzowane znalazły najszersze zastosowanie w aktywnym sterowaniu strumieniami (sterowaniu warstwą przyścienną oraz warstwą graniczną). W literaturze można znaleźć wiele przykładów zastosowania strumieni syntetyzowanych w tym celu zarówno w zagadnieniach dwu-, jak i trójwymiarowych [Ciuryla i in. 2007, Broučková 2010, Tesař i Peszynski 2010, Trávníček i in. 2014]. Poniżej przedstawiono najciekawsze (zdaniem autora) przykłady zastosowania strumieni syntetyzowanych w aktywnym sterowaniu strumieniami.

2.1. Cesna 182

Optymalne parametry opływu powietrza wokół płatu nośnego samolotu otrzymuje się przez nadanie mu odpowiednich kształtów. Jednakże gdy na projekt kształtu skrzydeł wpływają aspekty inne niż aerodynamiczne (np. estetyka), ich nośność może być niższa niż w przypadku płatów konwencjonalnych. W takim przypadku stosuje się zarówno aktywne, jak i pasywne sterowanie strumieniami, aby poprawić ich własności aerodynamiczne. Jedną z takich metod jest właśnie zastosowanie strumieni syntetyzowanych.

Jednym z najbardziej znanych eksperymentów obrazujących zastosowanie generatorów strumieni syntetyzowanych do aktywnego sterowania strumieniem opływającym płat samolotu (sterowanie warstwą graniczną i momentem oddzielenia się strugi od opływanej powierzchni) są badania przeprowadzone na modelu samolotu Cessna 182 przedstawionego na rysunku 2 (model został wykonany w skali 1/24), szerzej zaprezentowane w [Ciuryla i in. 2007]. Podsumowanie i szersze omówienie eksperymentu można znaleźć w [Mohseni i Mittal 2014].

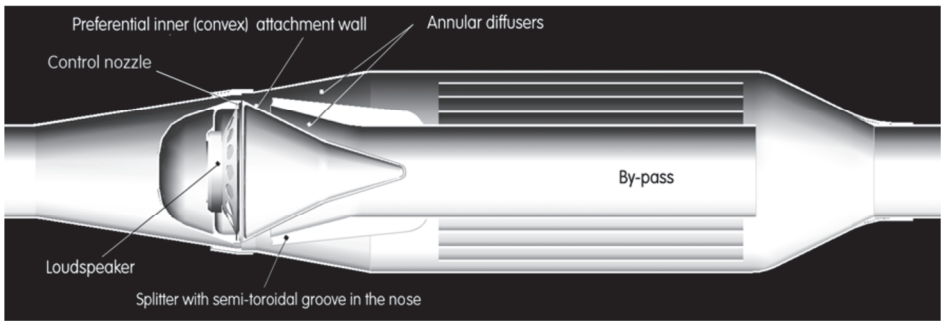
Eksperyment polegał na umieszczeniu w skrzydłach samolotu siłowników strumieni syntetyzowanych i przebadaniu zmian w sile nośnej dla różnych kątów natarcia skrzydła. Badania wykazały, że przy załączonych siłownikach strumieni syntetyzowanych, dla odpowiedniego kąta natarcia (powyżej 6°) siła nośna skrzydeł wzrasta nawet o 15% w stosunku do siły nośnej uzyskanej bez załączenia strumieni syntetyzowanych. Stwierdzono ponadto, że zastosowanie strumieni syntetyzowanych pozwoliło na opóźnienie oddzielenia się strumienia powietrza od skrzydła o 2°. Uzyskane wyniki potwierdziły, że można zastąpić lotki samolotu przez wbudowane w płat generatory strumieni syntetyzowanych dla kątów natarcia skrzydła większych niż 6° [Ciuryla i in. 2007].



Rys. 2. Model samolotu Cessna 182 badany w tunelu aerodynamicznym: a) model samolotu, b) rzeczywisty obiekt badany (opracowano na podstawie [Ciuryla i in. 2007])

2.2. Zawór osiowosymetryczny

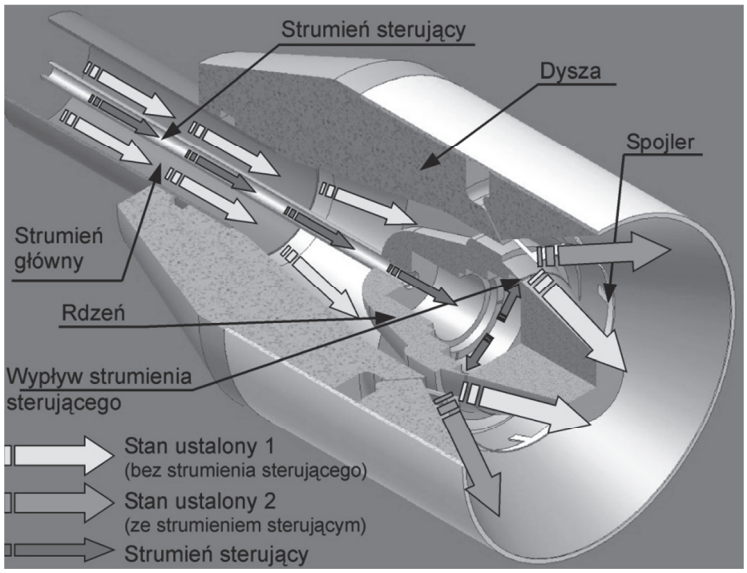
Strumienie syntetyzowane znalazły również zastosowanie w pewnym typie zaworu osiowosymetrycznego. Zawór ten pozwala na przesterowanie strumienia powietrza i skierowanie go do jednego z dwóch przewodów, wewnętrznego i zewnętrznego (pierścieniowego), (rys. 3). Jego głównym elementem jest dysza z wbudowanym generatorem strumieni syntetyzowanych. Dokładny opis oraz badania eksperymentalne takiego zaworu można znaleźć w pracach [Tesař 1995, Wawrzyniak 2008, Broučková i in. 2009, Broučková 2010, Tesař i Trávníček 2010].



Rys. 3. Osiowosymetryczny zawór sterowany za pomocą strumieni syntetyzowanych [Tesař i Trávníček 2010]

Zawór tego typu pozwala na osiągnięcie dwóch stanów stabilnej pracy. W pierwszym z nich strumień główny, opływający rdzeń dyszy, wskutek efektu Coandy przylega do stożka wewnętrznego, będącego rdzeniem dyszy i jest (strumień główny) przekierowywany do by-passu (przewodu wewnętrznego), (rys. 3). Żeby przekierować strumień główny i osiągnąć drugi stan stabilnej pracy, rdzeń dyszy musi mieć odpowiednio umiejscowioną szczelinę na obwodzie, przez którą wydostawać się będą strumienie syntetyzowane. W czasie załączenia generatora (wypływ strumieni syntetyzowanych ze szczeliny w rdzeniu dyszy) strumienie syntetyzowane odrywają strumień główny od rdzenia dyszy, przekierowując go do przewodu pierścieniowego otaczającego by-pass (rys. 3). Należy nadmienić, że dzieje się tak na skutek pokonania sił adhezji pomiędzy strumieniem a rdzeniem dyszy, przez siły oddziaływania strumieni syntetyzowanych i zaistnieniem sił adhezji między strumieniem głównym a ściankami zewnętrznymi

przewodu pierścieniowego (efekt Coandy). Po wyłączeniu siłownika strumieni syntetyzowanych strumień główny wraca do stanu pierwszego. Ideę omówionego sposobu przesterowania strumienia głównego doskonale zaprezentowano na rysunku 4, na którym przedstawiono stanowisko do badań własności przepływowych dyszy osiowosymetrycznej, przeanalizowane szerzej w [Wawrzyniak 2008].



Rys. 4. Schemat dyszy osiowosymetrycznej z rdzeniem wewnętrznym [Wawrzyniak 2008]

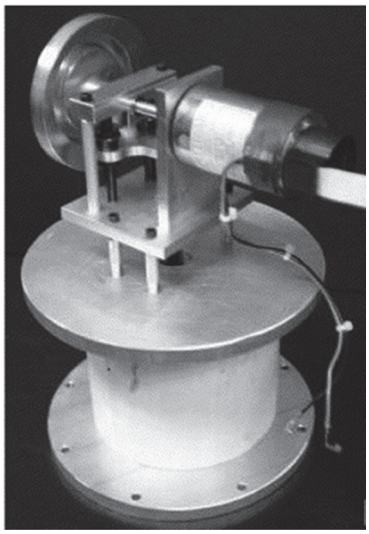
Zawory tego typu mają najczęściej generatory akustyczne wyposażone w jeden głośnik [Tesař 1995, Broučková i in. 2009, Broučková 2010]. Generator można wbudować w rdzeń lub umieścić poza układem. W drugim przypadku należy zapewnić odpowiednie połączenie pomiędzy rdzeniem a siłownikiem strumieni syntetyzowanych.

3. TECHNOLOGIA NAPĘDOWA

Generatory strumieni syntetyzowanych znalazły również zastosowanie jako silniki (zamieniają energię elektryczną zasilania na energię kinetyczną, ruch ciała) wykorzystywane w napędzie różnorodnych układów. Zauważono, że sposób poruszania się gatunków takich jak meduzy, kałamarnice czy ośmiornice jest podobny do wykorzystywanego w trakcie tworzenia strumieni syntetyzowanych. Gatunki te sukcesywnie zasysają i wydmuchują wodę w taki sposób, aby wytworzyć strumień o pędzie skierowanym przeciwnie do kierunku ich poruszania. Pozwala to im na poruszanie się z stosunkowo dużymi prędkościami (nawet 10 $m \cdot s^{-1}$ w przypadku kałamarnic). Stało się to inspiracją do skonstruowania nowego typu napędów pojazdów podwodnych.

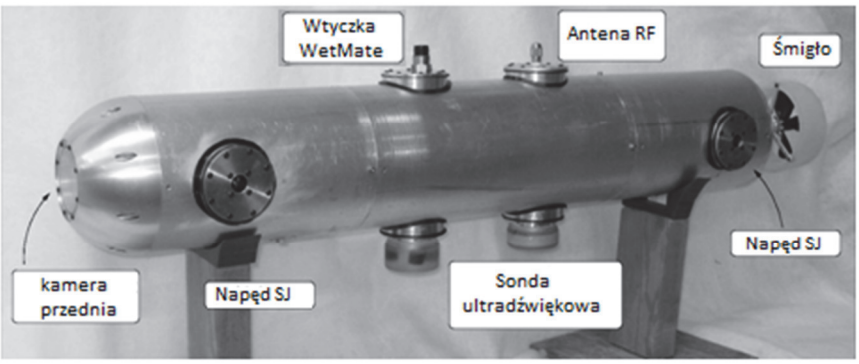
Jeden z pierwszych tego typu napędów został przedstawiony na rysunku 5. Urządzenie składa się z komory roboczej z oscylującym w środku tłokiem mającym na celu wypychać i zasysać ciecz z i do komory. Odbywa się to poprzez zmianę objętości komory roboczej. Tłok zasilany jest w sposób mechaniczny za pomocą silnika, z możliwością regulacji częstotliwości pracy. Komora siłownika jest otwarta i można w niej zamontować dodatkową dyszę wylotową.

W trakcie badań napędu wykonano eksperyment polegający na zbadaniu przesunięcia napędu zanurzonego w wodzie w czasie jednego cyklu pracy. Dla badanego modelu udało się uzyskać prędkość maksymalną (w trakcie jednego cyklu pracy) wynoszącą ok. 4,5 $m \cdot s^{-1}$.



Rys. 5. Projekt napędu wodnego działającego na bazie strumieni syntetyzowanych [Mohseni 2006]

Potwierdzeniem możliwości zastosowania generatorów strumieni syntetyzowanych jako napędów stał się projekt KRAKEN (rys. 6) [Krieg i in. 2011]. Prototyp pojazdu został zaopatrzony w dwa napędy opierające się na zjawisku strumieni syntetyzowanych, dzięki czemu może poruszać się nie tylko w przód (śmigło umieszczone na końcu wehikułu), ale również bezpośrednio na boki. Dało to możliwość dokowania w stacji dokującej znajdującej się pod wodą. Manewr ten był wcześniej niemożliwy, ponieważ wymagał wpłynięcia do stacji bokiem i konieczne było dokładne manewrowanie wehikułem.



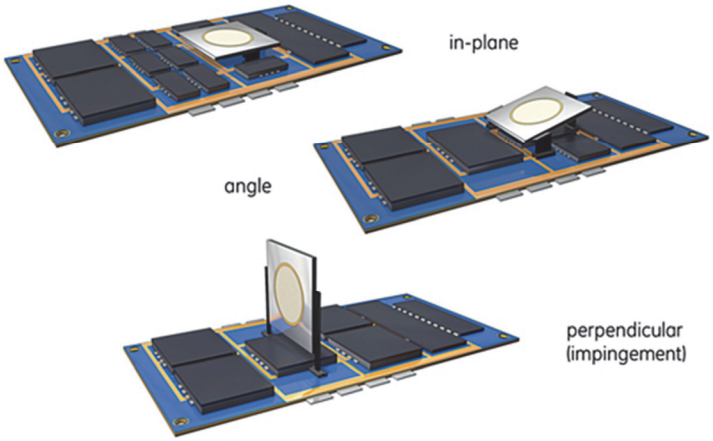
Rys. 6. Prototypowy wehikuł do testowania możliwości sterowania za pomocą napędów opierających się na zjawisku strumieni syntetyzowanych (opracowano na podstawie [Krieg i in. 2011])

Zagadnienie używania napędu wykorzystującego zjawisko strumieni syntetyzowanych jest skomplikowane. Ma to związek z tworzeniem się wirów wokół wylotu dyszy, które zaburzają prace generatora. Jest to zagadnienie, na które należy zwrócić uwagę w szczególności w przypadku zastosowania siłowników o wysokiej częstotliwości pracy. Problem ten szerzej omówiono w [Mohseni 2006, Krieg i in. 2011, Mohseni i Mittal 2014]. Napędy wykorzystujące strumienie syntetyzowane nie zostały jeszcze użyte jako napędy główne.

4. WYMIANA CIEPŁA

Generatory strumieni syntetyzowanych znalazły również zastosowanie jako elementy chłodzące. Pulsacyjny charakter strumieni syntetyzowanych oraz brak zapotrzebowania w dodatkowe źródło zasilania płynu roboczego (generator pobiera płyn roboczy z otoczenia) spowodowały, że są one wykorzystywane w szczególności do chłodzenia elektroniki [Travnicek i Tesar 2003]. Szczególne zainteresowanie w tym przypadku budzą generatory piezoelektryczne, które wyróżniają się niewielkimi rozmiarami oraz niskim zapotrzebowaniem w energię elektryczną. Należy również zaznaczyć, że generatory strumieni syntetyzowanych wyróżnia większa wydajność i efektywność (nawet o 35%) niż klasyczne wentylatory używane w chłodzeniu elektroniki [Beratlis i Smith 2003, Mann i Whalen 2016].

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe zastosowanie generatorów strumieni syntetyzowanych do chłodzenia elektroniki. Można zauważyć, że zastosowanie takiego typu chłodzenia praktycznie nie zwiększa rozmiarów chłodzonego elementu. Efekt ten jest jeszcze bardziej dostrzegalny w przypadku generatorów umieszczonych na radiatorach. Szersze omówienie zastosowania generatorów strumieni syntetyzowanych do chłodzenia można znaleźć w [Mohseni i Mittal 2014, Mann i Whalen 2016]. Należy ponadto zwrócić uwagę na prace [Mahalingam 2007, Harinaldia i Defriadic 2011] poświęcone aspektowi projektowania generatorów pod zastosowania chłodnicze.



Rys. 7. Przykładowe zastosowania generatorów strumieni syntetyzowanych w chłodzeniu elektroniki [Mann i Whalen 2016]

5. ZASTOSOWANIA PRZEMYSŁOWE

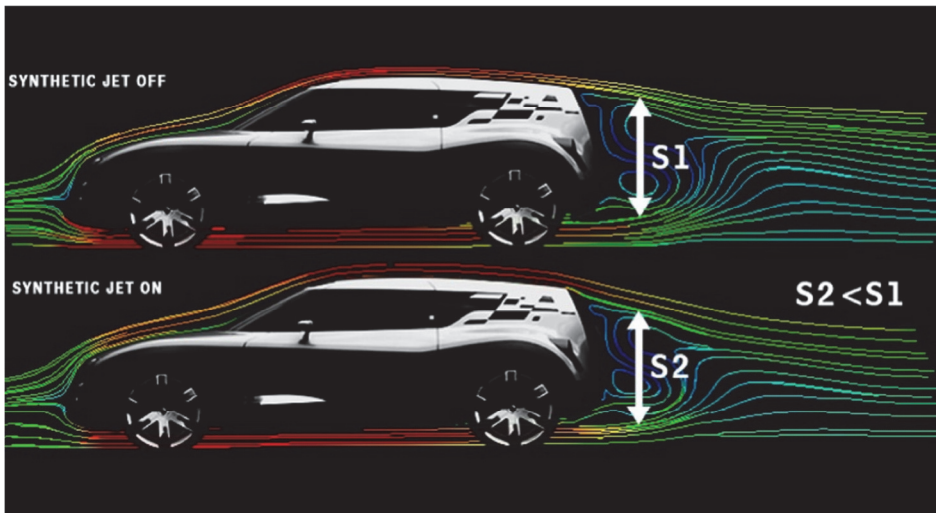
Strumienie syntetyzowane są również wykorzystywane w przemyśle. W tym rozdziale przedstawiono trzy przemysłowe zastosowania strumieni syntetyzowanych. Zostały one wybrane w taki sposób, aby wskazać ich szerokie możliwości zastosowań.

5.1. Renault Altica – aktywne sterowanie strumieniami

Jednym z ciekawszych komercyjnych zastosowań strumieni syntetyzowanych jest rozwiązanie zaproponowane przez Grupę Renault w samochodzie Renault Altica. Prototyp tego samochodu (rys. 8) został zaprezentowany w 2006 roku na targach motoryzacyjnych w Genewie (Geneva Motor Show). Samochód ma zamontowane w tylnej części dachu siłowniki strumieni syntetyzowanych o mocy maksymalnej 10 W. Producent samochodu twierdzi, że przy prędkości jazdy 130 $km \cdot h^{-1}$ załączenie siłowników pozwala na obniżenie współczynnika oporów ruchu nawet o 15%. Należy nadmienić, że moc zasilania siłowników regulowana jest w sposób automatyczny i zależy od prędkości jazdy. Samochód nigdy nie trafił do produkcji masowej.

Rys. 8. Samochód Renault Altica zaprezentowany w 2006 roku na targach motoryzacyjnych w Genewie [https://en.wikipedia.org/wiki/Renault_Altica]

W przypadku opływu powietrza wokół samochodu w pewnym momencie strumień odrywa się od niego, tworząc prądy wirowe, w efekcie czego za samochodem powstaje pewna strefa podciśnienia, która powoduje zwiększenie się współczynnika oporów aerodynamicznych (rys. 9 S1). Strumienie syntetyzowane zostały użyte do kontroli momentu oderwania się strugi od dachu pojazdu. W efekcie spowodowało to zmniejszenie prądów wirowych, a więc również obszaru podciśnienia powstającego za pojazdem (rys. 9 S2), co w konsekwencji wywołało spadek współczynnika oporów aerodynamicznych.



Rys. 9. Opływ samochodu w przypadku włączonych
oraz wyłączonych strumieni syntetyzowanych
[http://www.mad4wheels.com/models/2006_Renault_Altica_concept/model.asp?id_car=1129]

5.2. Żarówki LED – generator jako element chłodzący

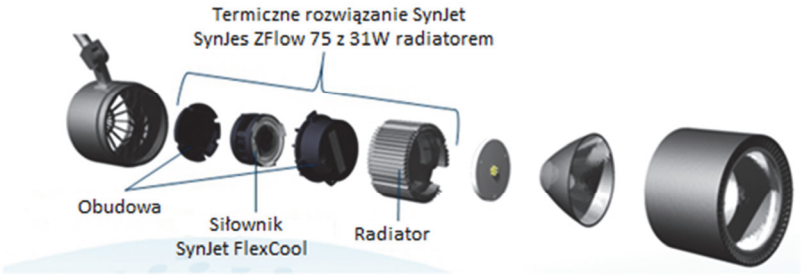
Kolejne komercyjne zastosowanie strumieni syntetyzowanych wdrożyła firma General Electric [http://pressroom.gelighting.com/news/ge-plans-world-debut-of-led-bulb-233556#.V-jwKTXpy5k, http://www.geglobalresearch.com/]. Pierwszym wdrożonym do powszechnej sprzedaży jest zastosowanie generatorów strumieni syntetyzowanych w żarówkach LED wysokiej mocy. Żarówki GE Energy Smart® (rys. 10) o mocy 27 Watt zawierają wbudowane generatory strumieni syntetyzowanych pełniące funkcję chłodzącą (żarówki LED tej mocy bez odpowiedniego chłodzenia ulegają szybkiemu zniszczeniu termicznemu). Niewielki generator z piezoelektrycznym elementem wykonawczym umiejscowiony jest w zamkniętej obudowie żarówki i zasilany z tego samego źródła (co żarówka). Ruch powietrza wewnątrz obudowy przyśpiesza rozpraszanie się ciepła i tym samym odprowadzanie ciepła z elementów elektrycznych oraz przekazywanie na obudowę, skąd ciepło odprowadzane jest do otoczenia. Warto nadmienić, że żarówka taka odpowiada mocą świecenia klasycznej 100-watowej żarówce, a jej trwałość godzinowa to 25 tysięcy godzin (22,8 lat przy 3 godzinach pracy dziennie). Trzeba wspomnieć, że tak wysoka trwałość produktu jest możliwa między innymi dzięki kompaktowej konstrukcji generatora, który nie zawiera części ruchomych (piezoelektryk w generatorze zamocowany jest w sposób trwały do obudowy).

Rys. 10. Żarówka LED o mocy 27 Watt z serii GE Energy Smart® firmy General Electric [http://pressroom.gelighting.com/news/ge-plans-world-debut-of-led-bulb-233556#.V-jwKTXpy5k]

Innym zastosowaniem strumieni syntetyzowanych zaproponowanym i badanym przez firmę General Electric jest wykorzystanie siłowników do redukcji turbulencji przepływu wzdłuż skrzydeł samolotowych oraz łopatek turbin [http://www.geglobal research.com/].

5.3. Digy-Key Electronics

Kolejnym przykładem komercyjnego zastosowania strumieni syntetyzowanych jest rozwiązanie zaproponowane przez firmę Digi-Key Electronics [http://dkc1.digikey.com/dk/en/tod/nuventix/synjet-coolers_noaudio/synjet-coolers_noaudio.html]. Strumienie syntetyzowane zostały zastosowane do przyspieszenia odprowadzania ciepła z radiatorów. Firma oferuje szeroki wybór różnego rodzaju radiatorów dla różnych zastosowań. Przykładowe rozwiązanie zaproponowane przez Digi-Key Electronics przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Przykładowe rozwiązanie zastosowania strumieni syntetyzowanych do odprowadzania ciepła, zaproponowane przez firmę Digi-Key Electronics (opracowano na podstawie http://dkc1.digikey.com/dk/en/tod/nuventix/synjet-coolers_noaudio/synjet-coolers_noaudio.html]

PODZIĘKOWANIA

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2015/2018 jako projekt badawczy w ramach programu pod nazwą „Diamentowy Grant”.

LITERATURA

Beratlis N., Smith M.K., 2003. Optimization of synthetic jet cooling for microelectronics applications [VCSEL array example]. SEMI-THERM 2003 proceedings, 66-73.

Broučková Z., 2010. Řízení proudu vzduchu syntetizovaným proudem (Flow control by a synthetic jet). PhD thesis, CTU Mechanical Engineering Prague.

Broučková Z., Kordik J., Travnicek Z., 2009. Aktivní řízení anulárního proudu radiálním syntetizovaným proudem (Active annular flow control with radial synthetic jets), research report Z-Z 1438/09. Institute of Thermomechanics of the ASCR, v. I.

Ciuryla M., Liu Y., Farnsworth J., Kwan C., Amitay M., 2007. Flight control using synthetic jets on a Cessna 182 model. J. Aircr. 44(2), 642-653.

Gil P., Strzelczyk P., 2016. Performance and efficiency of loudspeaker driven synthetic jet actuator. Exp. Therm. Fluid Sci. 78, 163-174.

Glezer A., Amitay M., 2002. Synthetic jets. Annu. Rev. Fluid Mech. 34(1), 503--529.

Harinaldia D.R., Defriadic R., 2011. Flow and Heat Transfer Characteristics of an Impinging Synthetic Air Jet under Sinusoidal and Triangular Wave Forcing. Int. J. Eng. Technol. 11(3), 29-36.

Krieg M., Klein P., Hodgkinson R., Mohseni K., 2011. A hybrid class underwater vehicle: Bioinspired propulsion, embedded system, and acoustic communication and localization system. Mar. Technol. Soc. J. 45(4), 153-164.

Mahalingam R., 2007. Modeling of synthetic jet ejectors for electronics cooling. 23rd Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 196-199.

Mann A., Whalen B., 2012. Evaluation and Opportunities for Use of Thin Form Factor Synthetic Jets to Low Profile Electronics Cooling Applications, http://www.electronics-cooling.com/2012/12/evaluation-and-opportunities-for-use-of-thin-form-factor-synthetic-jets-to-low-profile-electronics-cooling-applications-2/ (dostęp: 26.09.2016).

Mohseni K., 2006. Pulsatile vortex generators for low-speed maneuvering of small underwater vehicles. Ocean Eng. 33(16), 2209-2223.

Mohseni K., Mittal R. (eds.), 2014. Synthetic Jets: Fundamentals and Applications. CRC Press Boca Raton.

Smith B.L., Glezer A., 1998. The formation and evolution of synthetic jets. Phys. Fluids 10(9), 2281-2297.

Tesař V., 1995. Use of radially switched jet attachment in an exhaust gas flow control valve. [W:] Workshop 95, Proceedings of the 4th Annual University-wide Seminar, Prague, 265.

Tesař V., Peszynski K., 2010. Experiments with synthetic jet for detecting potential terrorists. J. Pol. CIMAC 5(3), 215-220.

Tesař V., Trávníček Z., Způsob dvourežimového řízení průtoku tekutiny a zařízení k provádění tohoto způsobu (Sposoby i środki kontroli dwóch stanów

przepływu płynu). Dokument patentowy Czeskiej Republiki 303280, złożono 30.07.2010.

Travnicek Z., Broucková Z., Kordík J., 2012. Formation criterion for axisymmetric synthetic jets at high Stokes numbers. AIAA J. 50(9), 2012.

Travnicek Z., Tesar V., 2003. Annular Synthetic Jet Used For Impinging Flow Mass Transfer. Int. J. Heat Mass Transfer 46(17), 3291-3297.

Trávníček Z., Tesař V., Broučková Z., Peszyński K., 2014. Annular impinging jet controlled by radial synthetic jets. Heat Transfer Eng. 35(16-17), 1450-1461.

Trávníček Z., Tomas V., Tesař V., 2006. Hybridic synthetic jet as the nonzero-net-mass-flux synthetic jet. Phys. Fluids 18(8).

Wawrzyniak S., 2008. Stanowisko do badania właściwości przepływowych dyszy osiowosymetrycznej. Pneumatyka – przemysłowe systemy sprężonego powietrza 3(68), 25-28.

Źródła internetowe

http://dkc1.digikey.com/dk/en/tod/nuventix/synjet-coolers_noaudio/synjet-coolers _noaudio.html (dostęp: 26.09.2016).

http://pressroom.gelighting.com/news/ge-plans-world-debut-of-led-bulb-233556#. V-jwKTXpy5k (dostęp: 26.09.2016).

http://www.geglobalresearch.com/ (dostęp: 26.09.2016).

http://www.mad4wheels.com/models/2006_Renault_Altica_concept/model.asp?id_car= 1129 (dostęp: 26.09. 2016).

https://en.wikipedia.org/wiki/Renault_Altica (dostęp: 26.09.2016).