

Mgr inż. Łukasz WITANOWSKI

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.317

Dr inż. Piotr KLONOWICZ

Dr hab. inż. Piotr LAMPART

Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Energetyki Ciepłej – Zakład Turbin

OPTYMALIZACJA KSZTAŁTU ŁOPATKI WIRNIKA TURBINY OSIOWEJ PRACUJĄCEJ NA CZYNNIKU MDM

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono metodę optymalizacji profilu łopatki wirnikowej turbiny osiowej pracującej w obiegu ORC. W pierwszej części opisano przypadek poddany modyfikacjom, a następnie przedstawiono budowę funkcji celu, wykorzystane algorytmy oraz metodę parametryzacji kształtu wirnika. Ostatecznie omówiono wyniki całego procesu optymalizacji oraz porównano je z oryginalnym układem przepływowym.

OPTIMIZATION OF BLADE PROFILES OF AXIAL TURBINE WORKING WITH MDM

Abstract: The paper presents an optimization method of a rotor blade profile of an axial turbine working in an ORC cycle. In the first part the case subjected to modification has been described and next the structure of the objective function, used algorithms and the parametrization method have been presented. Finally, the results of the whole optimization process have been discussed and compared with the original case.

Słowa kluczowe: optymalizacja, ORC, łopatka wirnikowa, filtrowanie niejawne, sprawność

Keywords: optimizaion, ORC, rotor blade, implicit filtering, efficiency

1. WPROWADZENIE

Technologia ORC (Organic Rankine Cycle) wydaje się być bardzo obiecującym rozwiązaniem służącym do produkcji energii mechanicznej, a w konsekwencji elektrycznej, ze źródeł nisko- i średniotemperaturowych. W minionych latach zastosowano tego typu siłownie do komercyjnego wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł takich jak: ciepło ze spalania biomasy, ciepło odpadowe z turbin gazowych i silników spalinowych, ciepło odpadowe z procesów technologicznych, energia geotermalna oraz energia słoneczna. Ze względu na duży potencjał tej technologii odnotowuje się w ostatnich latach jej dynamiczny rozwój. Dotyczy to praktycznie wszystkich elementów wchodzących w skład układu siłowni, np. wymienników ciepła, pomp, turbin, rodzaju czynnika itd. Ciecz MDM oraz pozostałe substancje z klasy olejów silikonowych nie są związkami organicznymi, jednakże, co należy uznać za powszechnie akceptowany błąd w nomenklaturze, wykorzystuje się je

w średniotemperaturowych obiegach ORC. Wynika to przede wszystkim z termodynamicznej charakterystyki tych czynników. Duże rozmiary molekuł prowadzą do dużych gęstości pary oraz niskich spadków entalpii, co w konsekwencji znacznie zmniejsza rozmiary jednostki ekspansyjnej, podnosi sprawność i obniża cenę. Dodatkowo, ciecze te zaliczają się do tzw. czynników suchych, co oznacza, że podczas rozprężania ulegają przegrzaniu. Eliminuje to znane z klasycznych turbin parowych zjawisko erozji łopatek turbinowych i znacznie przedłuża żywotność jednostek ekspansyjnych [1].

Sprawna i poprawnie pracująca turbina dla układu ORC wymaga odpowiedniej metody projektowej. Składa się na nią w dużej mierze poprawna ewaluacja strat, które są bezpośrednio związane ze sprawnością maszyny [2-5]. Skuteczną metodą weryfikacji projektu układu przepływowego, oprócz drogich metod doświadczalnych, są obliczenia CFD. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że wciąż są one dużym wyzwaniem, szczególnie dla wielkocząsteczkowych gazów ze względu na równania stanu, nieklasyczne zachowania z punktu widzenia dynamiki gazów [6] oraz trudności z rozwiązaniem warstwy przyściennej (ze względu na duże gęstości trudno jest uzyskać maksymalne wartości parametru y^+ w granicach 1). Pomimo tych trudności wiele uzyskanych wyników obliczeń CFD dla tych substancji znajduje potwierdzenie w badaniach eksperymentalnych [7, 8].

Nawet dobrze zaprojektowana maszyna może być poprawiona. Udoskonalić można takie aspekty jak:

- sprawność,
- wytrzymałość,
- dynamika,
- hałas,
- szczelność,
- proces technologiczny (obróbki),
- inne.

W komercyjnych zastosowaniach dąży się przede wszystkim do optymalizacji ceny, a w konsekwencji zysków. Te aspekty trudno jest wiarygodnie ująć w postaci funkcji celu, jednakże najczęściej zależą one od bardziej elementarnych własności. Sam proces ulepszania, zwany optymalizacją, jest z reguły opłacalny, ponieważ za pomocą często niewielkich zmian, np. czysto geometrycznych, można uzyskać zauważalny przyrost sprawności, redukcję hałasu, zmniejszenie drgań itd.

W tej pracy przedstawiono optymalizację kształtu cylindrycznej łopatki wirnika drugiego stopnia turbiny osiowej zaprojektowanej na czynnik MDM.

2. OPIS

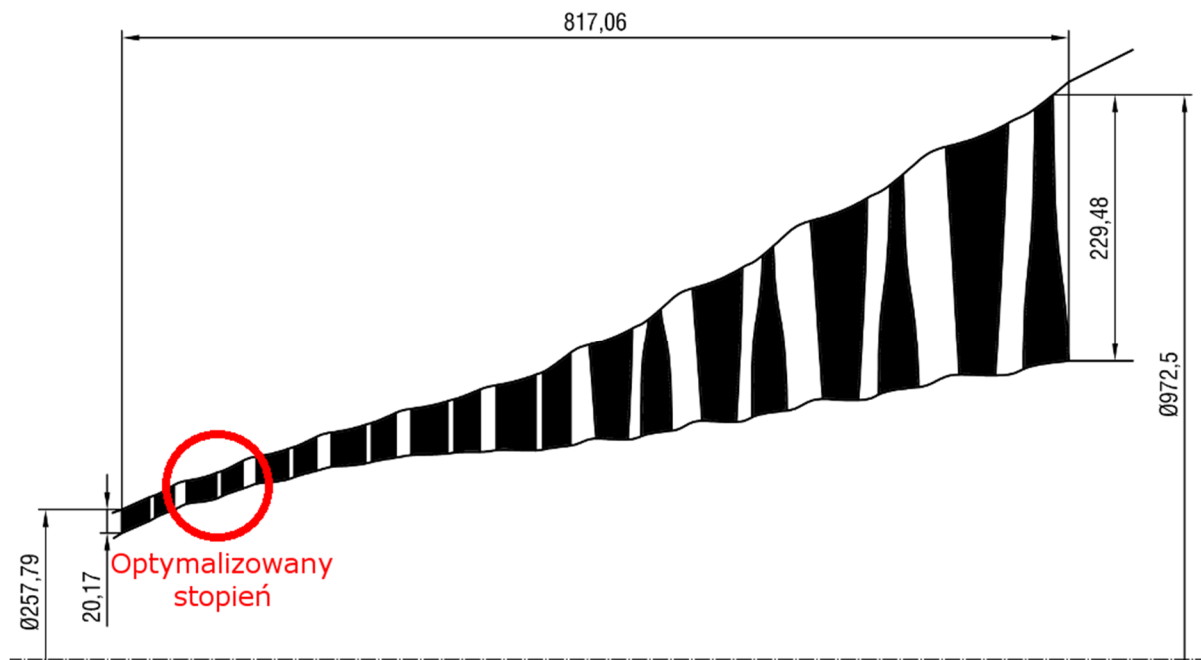
Parametry projektowe opisywanej turbiny przedstawiono w tabeli 1. Turbinę wstępnie zaprojektowano metodą 1D, uwzględniając model strat wg Traupla [4, 9]. Następnie zaprojektowano geometrię układu przepływowego i przeprowadzono obliczenia numeryczne, aby uzyskać bardziej szczegółowy wgląd w pole przepływu przez kanały łopatkowe i uwidocznić straty. Aby uzyskać wiarygodne wyniki w obliczeniach zarówno 1D, jak i 3D czynnik MDM był opisywany równaniem stanu Helmholtza dedykowanym dla tej cieczy. Model ten został zaimplementowany w bibliotece NIST Refprop 9.0 [10, 11]. Moc wewnętrzna turbiny wyznaczona z obliczeń CFD wynosi 1.08 MW, co odpowiada sprawności 93%. Do optymalizacji wybrano wirnik drugiego stopnia. Wybór ten był podyktowany z jednej strony chęcią odsunięcia się od linii nasycenia (dlatego pominięto pierwszy stopień)

i uniknięcia tym samym ew. błędów numerycznych, a z drugiej strony chęcią ograniczenia liczby węzłów i uproszczeniem zadania obliczeniowego (względnie krótka łopatka). Poza tym wybrany stopień jest cylindryczny, czyli jest opisywany przez tylko jeden profil.

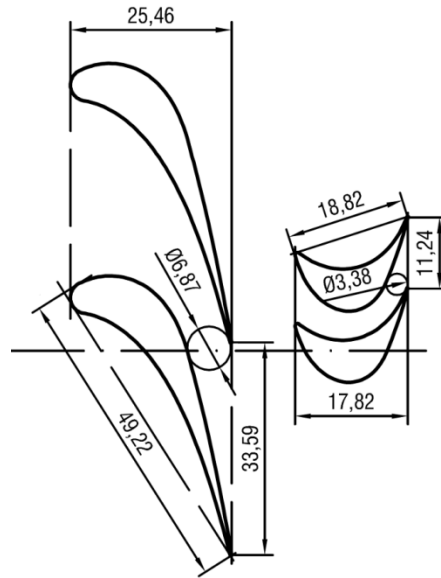
Tabela 1. Parametry projektowe turbiny zaprojektowanej na czynnik MDM

Prędkość obrotowa	3000 obr/min
Ciśnienie wlotowe	1200 kPa
Temperatura wlotowa	554 K
Ciśnienie wylotowe	17 kPa
Strumień masy	16.6kg/s

Przekrój merydionalny układu przepływowego wraz z zaznaczonym optymalizowanym stopniem pokazano na rys. 1. Widok ułopatkowania optymalizowanego stopnia wraz z wymiarami pokazano na rys. 2.



Rys. 1. Rzut merydionalny układu przepływowego turbiny MDM wraz z zaznaczonym optymalizowanym stopniem

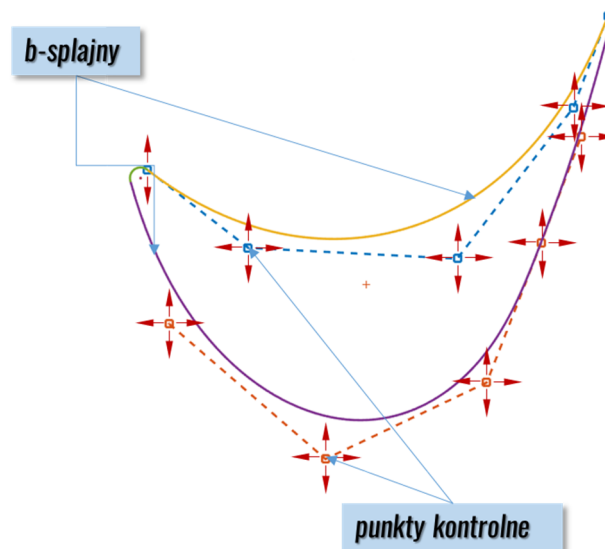


Rys. 2. Ułopatkowanie drugiego stopnia turbiny MDM

3. METODOLOGIA I OBLICZENIA OPTYMALIZACYJNE

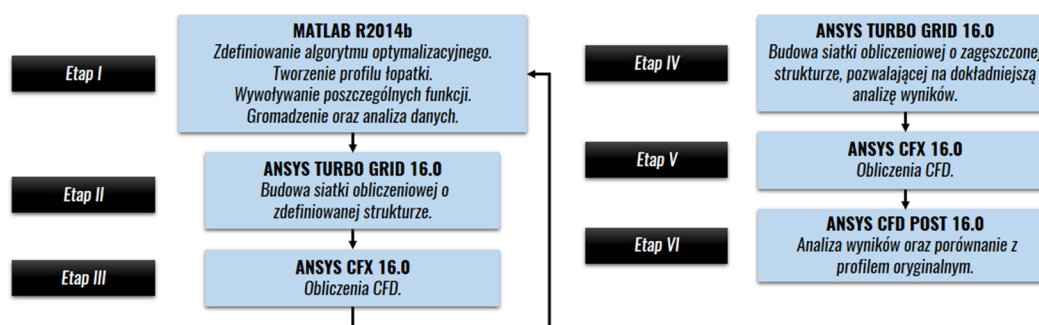
Optymalizacja oznacza poszukiwanie najlepszego rozwiązania – ekstremum funkcji zwanej funkcją celu – w dziedzinie określonej zbiorem tzw. zmiennych decyzyjnych. W przypadku prezentowanych obliczeń optymalizacyjnych zmiennymi decyzyjnymi są parametry geometryczne profilu. Parametryzacja kształtu jest ważnym problemem, być może nawet ważniejszym od doboru algorytmu optymalizacyjnego, który decyduje o sukcesie optymalizacji. Różne metody parametryzacji kształtu profilu omówiono w [1].

W prezentowanych obliczeniach profil wirnika składa się z dwóch b-splajnów, które tworzą część ciśnieniową i ssącą, połączonych ze sobą łukami okręgów tworzącymi krawędzie natarcia i spływu, rys. 3.



Rys. 3. Model parametryczny profilu wirnika wraz z zaznaczonymi stopniami swobody punktów kontrolnych

Procedurę optymalizacyjną podzielono na sześć etapów. Pierwsze trzy etapy obejmują część iteracyjną procesu. W każdej iteracji w wyniku działania algorytmu optymalizacyjnego modyfikowano kształt profilu, korzystając z autorskiego kodu napisanego w środowisku Matlab. W etapie drugim dyskretyzowano obszar obliczeniowy, korzystając z programu Ansys TurboGrid 16.0, który jest w stanie efektywnie generować wysokiej jakości siatki heksahedralne dla kanałów międzyłopatkowych. Liczbę elementów siatki obliczeniowej wieńca wirnikowego zdefiniowano na poziomie 200 tys. węzłów. Dla każdej geometrii jakość siatki była monitorowana. W ostatnim etapie części iteracyjnej przeprowadzono obliczenia CFD nowo powstałej domeny. Obliczenia typu RANS wykonywano przy zastosowaniu przestrzennej dyskretyzacji drugiego rzędu. Trójwymiarowe, ściśliwe przepływy czynnika MDM rozpatrywano w pojedynczych układach łopatkowych z zastosowaniem warunków periodyczności. Pomędzy nieruchomymi i wirującymi domenami zastosowano interfejs „Stage”, który uśrednia obwodowo parametry w przestrzeni między wieńcami. Zastosowano model turbulencji $k-\omega$ SST. Etapy IV-VI wchodziły w skład weryfikacji otrzymanego profilu. Korzystając z wcześniej wymienionych programów, budowano siatkę obliczeniową (rys. 5) zawierającą 1 mln, wykonywano obliczenia i porównywano otrzymane wyniki z geometrią wzorcową. Jako funkcję celu przyjęto sprawność typu total-to-total. W stopniach turbiny wielostopniowej z reguły dąży się do podniesienia właśnie tej sprawności, ponieważ w jej definicji uznaje się energię kinetyczną na wylocie za użyteczną (niestraconą). Z reguły optymalizacja sprawności total-to-total skutkuje także podniesieniem sprawności typu total-to-static. Schemat procedury przedstawiono na rys. 4.



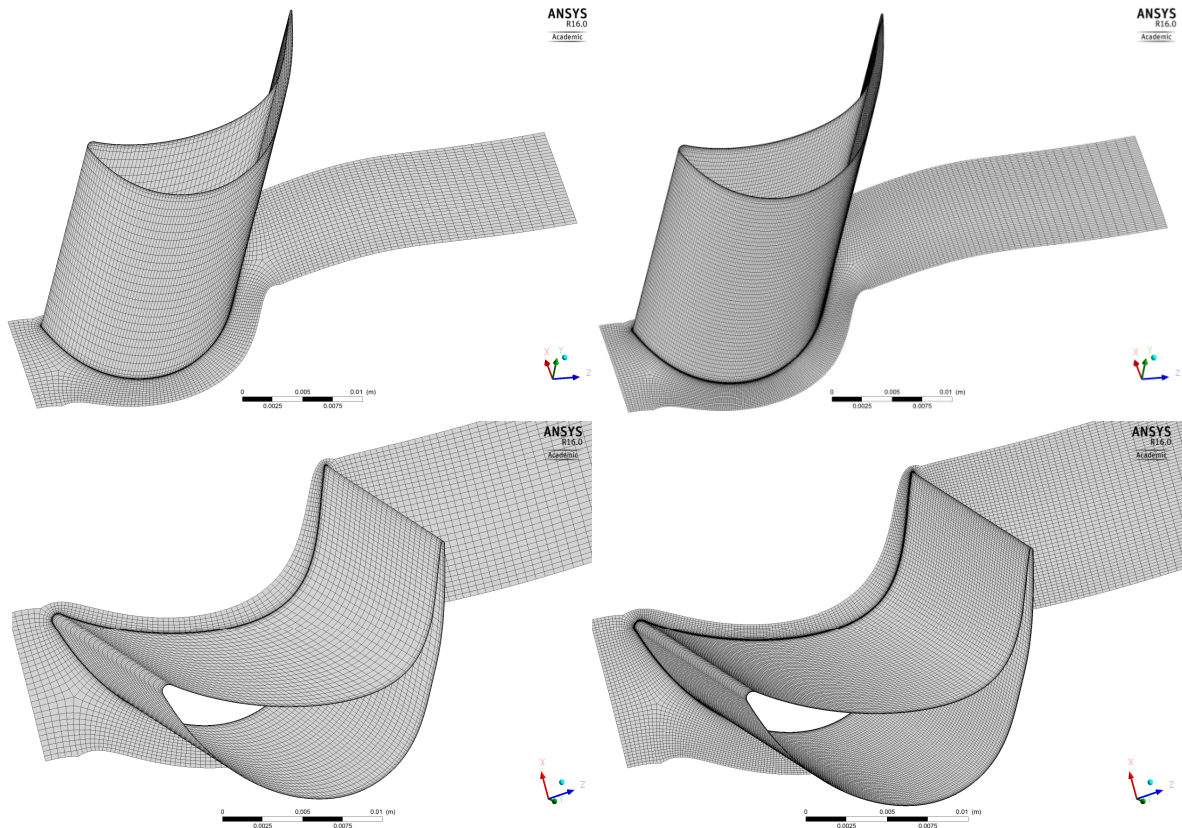
Rys. 4. Schemat procedury optymalizacji

W procesie optymalizacji wykorzystano trzy algorytmy, które zostały zaimplementowane w środowisku Matlab. Pierwszym algorytmem jest deterministyczna metoda sympleksu Nelder-Meada (DS) zaproponowana przez Lagarias [12]. Kolejnym z zastosowanych algorytmów jest filtrowanie niejawne (IF), którego twórcą jest Tim Kelly [13]. Ostatnią metodą wykorzystaną w pracy jest algorytm pszczeleli (ABC) pochodzący z grupy algorytmów rojowych [14,15]. Algorytm ten pozwala przeszukać dużą przestrzeń rozwiązań w oparciu o proces zdobywania nektaru przez rój pszczół.

Parametry określające podstawowe parametry algorytmów użytych w pracy przedstawiono poniżej:

1. Algorytm sympleksu Nelder-Meada (DS)
 - brak zdefiniowanych granic działania algorytmu,
 - tolerancja funkcji: $1e-4$.
2. Filtrowanie niejawne (IF)

- zdefiniowano granice pracy algorytmu,
 - budżet funkcji: 500,
 - wartość skali w punkcie startu: 2,
 - głębokość skali: 8.
3. Algorytm pszczele (ABC)
- liczba źródeł pożywienia: 10
 - maksymalna liczba prób poprawy źródła: 100.

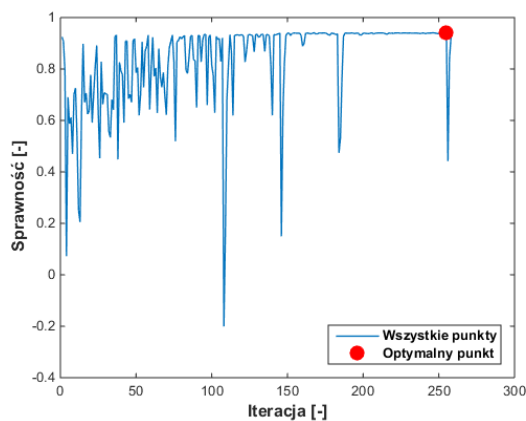


Rys. 5. Siatka obliczeniowa łopatki wirnika wykorzystana w etapie optymalizacji (rys. lewy), w etapie weryfikacji (rys. prawy)

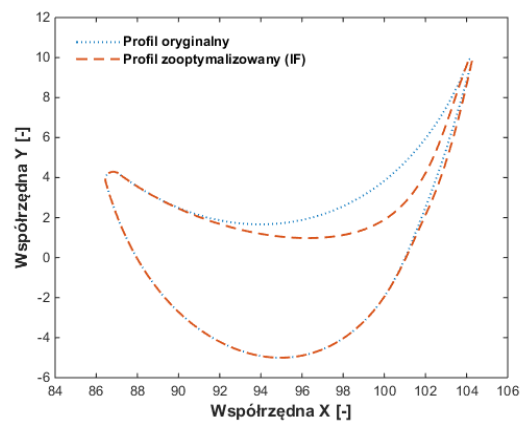
4. WYNIKI I WERYFIKACJA OBLICZEŃ

Przykładowy przebieg obliczeń optymalizacyjnych przedstawiono na rys. 6. Uzyskane zoptymalizowane kształty dla poszczególnych algorytmów pokazano w odniesieniu do oryginalnej geometrii profilu na rys. od 7 do 9. Wyniki ilościowe, tzn. uzyskane sprawności, liczby wywołań funkcji celu i liczbę wywołań solwera CFD, zamieszczono w tabeli 2. Okazuje się, że najlepsze wyniki uzyskano dla metody filtracji niejawnej, co widać na rys. 9, gdzie porównanie sprawności przedstawiono w formie graficznej. Najlepszy wynik uzyskano dla algorytmu filtracji niejawnej, tzn. udało się podnieść sprawność typu total-to-total o 0,56 punktu procentowego. Sprawność typu total-to-static wzrosła aż o 1,23 punktu procentowego. Rys. od 11 do 13 pokazują obrazy przepływu dla wszystkich analizowanych kształtów profilu. Największą zmianę można zaobserwować w rozkładzie ciśnienia statycznego wokół profilu,

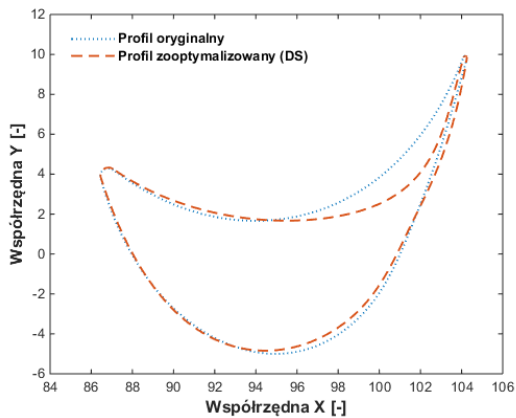
co dokładniej widać także na rys. 11. Można zaobserwować, że wszystkie algorytmy optymalizacyjne dążyły do odciążenia profilu w jego środkowej części i dociążenia go po stronie krawędzi spływu. Zbieżny kanał międzyłopatkowy w oryginalnym wariancie został zastąpiony kanałem, który jest rozbieżny w pierwszej części, a następnie jego szerokość zaczyna maleć. Rozkłady wektorów prędkości widoczne na rys. 12 pokazują brak separacji strugi pomimo tak ukształtowanych kanałów. Na rys. 13 można zaobserwować redukcję entropii w śladzie załopatkowym dla zoptymalizowanych przypadków w stosunku do oryginalnego. Za każdym razem proces optymalizacyjny miał tendencję do „odchudzania” profilu na części spływowej, konieczne jest zatem w przyszłości sprawdzenie, jak te zmiany wpływają na naprężenia w łopacie.



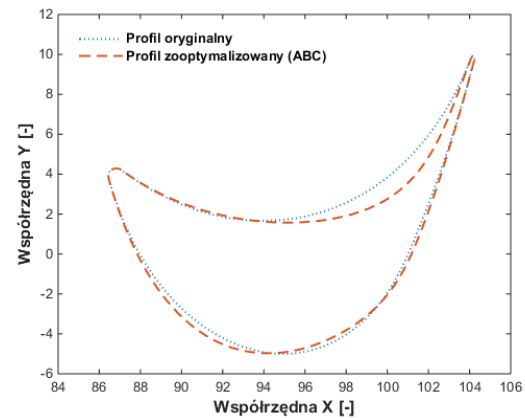
Rys. 6. Przykładowy przebieg obliczeń optymalizacyjnych



Rys. 7. Profil zoptymalizowany metodą filtracji niejawnej



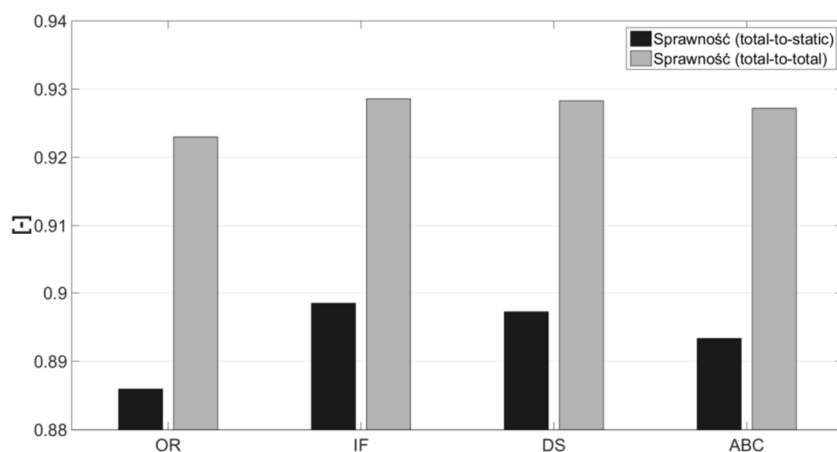
Rys. 8. Profil zoptymalizowany metodą przeszukiwania bezpośredniego



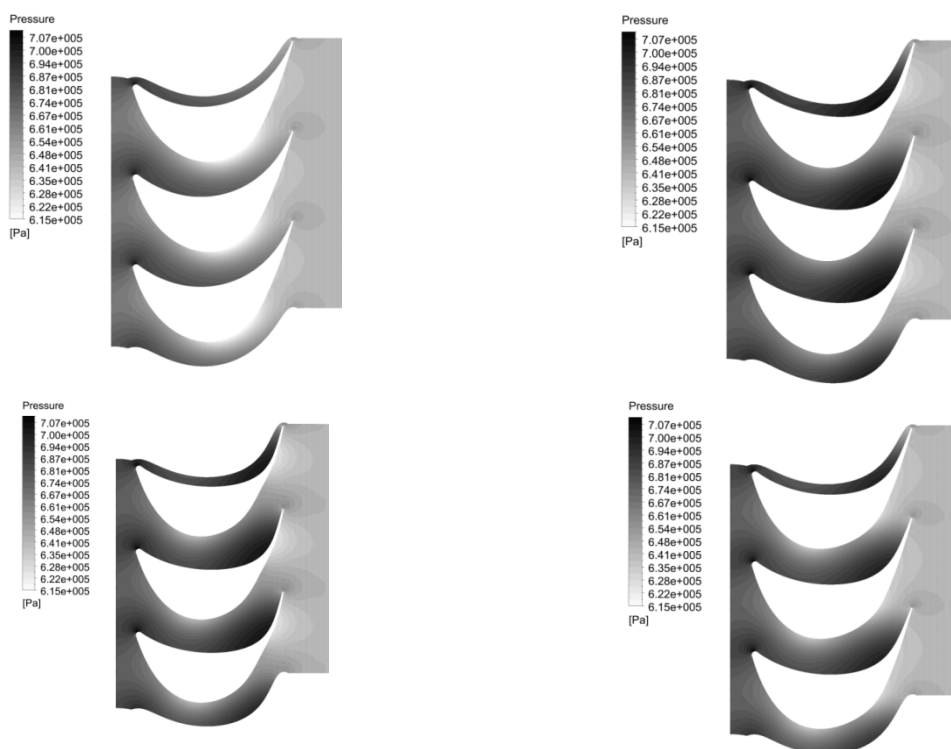
Rys. 9. Profil uzyskany przy zastosowaniu algorytmu pszczelego

Tabela 2. Wyniki obliczeń optymalizacyjnych

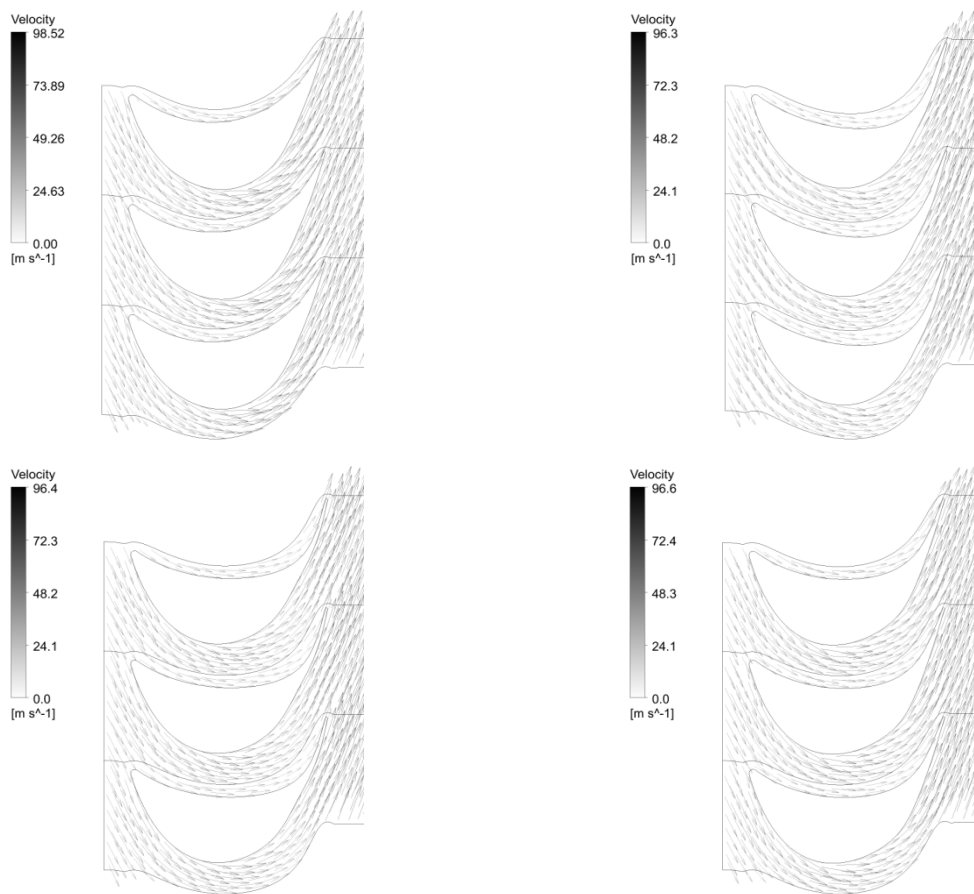
Opis	Sprawność Total to total	Sprawność Total to static	Moc	Masowe natężenie przepływu	c1	p1	Maks. Liczba Macha	Ilość iteracji	Ilość wywołań CFD
	[-]	[-]	[kW]	[kg/s]	[m/s]	[kPa]	[-]	[-]	[-]
OR	0.9230	0.88595	66.361	16.824	85.448	671.37	0.9176	-	-
ZIS	0.9286	0.89850	66.802	16.699	83.365	679.99	0.9017	260	176
ZDS	0.9283	0.89725	66.724	16.703	83.421	679.75	0.902	354	325
ABC	0.9272	0.89336	66.481	16.714	83.612	678.99	0.9034	193	34



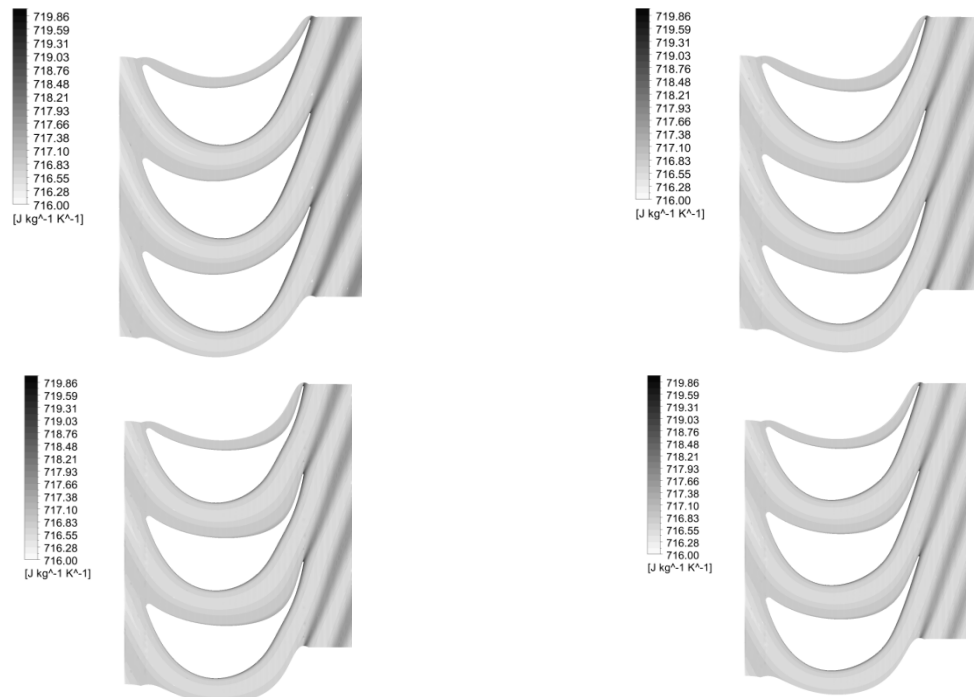
Rys. 10. Zestawienie zoptymalizowanych sprawności w porównaniu z wartością pierwotną



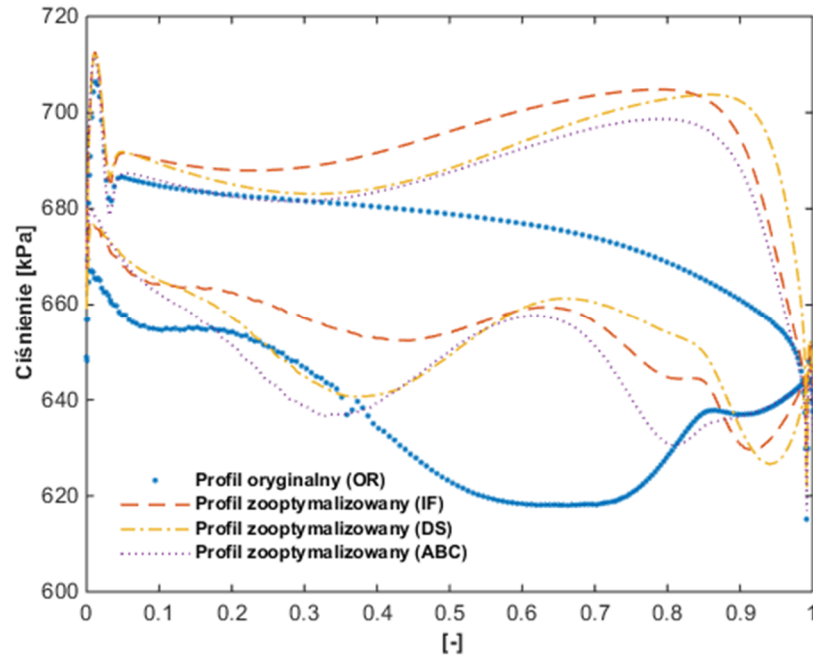
Rys. 11. Porównanie rozkładu ciśnień wokół poszczególnych profili – kolejno od góry: oryginalny, uzyskany metodą IF, uzyskany metodą DS. i uzyskany metodą ABC



Rys. 12. Porównanie wektorów prędkości wokół poszczególnych profili – kolejno od góry: oryginalny, uzyskany metodą IF, uzyskany metodą DS. i uzyskany metodą ABC



Rys. 13. Porównanie rozkładu entropii wokół poszczególnych profili – kolejno od góry: oryginalny, uzyskany metodą IF, uzyskany metodą DS. i uzyskany metodą ABC



Rys. 14. Rozkład ciśnienia wokół profilu na średnicy podziałowej

5. WNIOSKI

Obliczenia potwierdzają, że możliwe jest skuteczne zwiększenie sprawności stopnia, a w konsekwencji całej turbiny jedynie poprzez zmianę geometrii samego profilu. Pomimo że zmiana sprawności na poziomie 0,5 punktu procentowego nie wydaje się znacząca, należy zwrócić uwagę, że wynika ona jedynie z prostej geometrycznej zmiany, która być może w ogóle nie wpłynęłaby na technologię wykonania.

Najlepszy wynik uzyskano dla algorytmu filtracji niejawnej, co potwierdza skuteczność tej metody dla optymalizacji przepływów [16]. Trzeba jednak zaznaczyć, że kształty uzyskane różnymi metodami różnią się od siebie dość znacznie. Oznacza to, że znalezienie minimum globalnego dla zadanej funkcji celu jest bardzo dużym wyzwaniem (o ile w ogóle jest to możliwe). W przyszłości będą testowane także inne parametry zaprezentowanych algorytmów oraz inne metody optymalizacji. Zmieniane będą również parametry krzywych opisujących kształt profilu, tzn. rząd krzywych oraz liczby punktów.

Aby uzyskać jeszcze lepsze wyniki, należy w następnych etapach poszerzyć dziedzinę poszukiwań tzn. sparametryzować kształt krzywej tworzącej profilu, dołożyć dodatkowe profile opisujące geometrię (zwijanie łopatek), zmienić obrysy merydionalne, a także przeprowadzić optymalizację wieńca kierowniczego.

W kolejnych pracach zostaną wykonane obliczenia weryfikacyjne za pomocą innych kodów obliczeniowych.

LITERATURA

- [1] Klonowicz P., *Optymizacja turbin przeznaczonych do pracy w niskotemperaturowych obiegach ORC (Organic Rankine Cycle)*, Lodz University of Technology, 2012.
- [2] Macchi E., Predichizzi A., *Efficiency Prediction for Axial-Flow Turbines Operating with Nonconventional Fluids*, J. Eng. Power. 4 ,1981, 718-724.
- [3] Lozza G., *A comparison between the Craig-Cox and the Kacker-Okapuu methods of turbine performance prediction*, "Meccanica", 17 (1982) 211-221.
- [4] Wei N., *Significance of Loss Models in Aerothermodynamic Simulation for Axial Turbines*, KTH, 2000.
- [5] Klonowicz P., Heberle F., Preißinger M., Brüggemann D., *Significance of loss correlations in performance prediction of small scale, highly loaded turbine stages working in Organic Rankine Cycles*, Energy, 2014.
- [6] Guardone A., Colonna P., Casati E., Rinaldi E., *Non-classical gas dynamics of vapour mixtures*, J. Fluid Mech. 741, 2014, 681-701.
- [7] Harinck J., Pasquale D., Pecnik R., van Buijtenen J., Colonna P., *Performance improvement of a radial organic Rankine cycle turbine by means of automated computational fluid dynamic design*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy. 227, 2013, 637-645.
- [8] Kang S.H., *Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid*, "Energy", 41, 2012, 514-524.
- [9] Traupel W., *Thermische Turbomaschinen*, Springer Singapore Pte. Limited, 2001.
- [10] Colonna P., Nannan N.R., Guardone A., *Multiparameter equations of state for siloxanes: $[(CH_3)_3Si-O]_2-[O-Si-(CH_3)_2]_i$, $i=1, \dots, 3$, and $[O-Si-(CH_3)_2]_6$* , Fluid Phase Equilib. 263, 2008, 115-130.
- [11] Lemmon E., Huber M., McLinden M., REFPROP, National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [12] Lagarias J., Reeds J., Wright M., Wright P., *Convergence Properties of Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions*, SIAM J. OPTIM. 9, 1998, 112-147.
- [13] Kelly C.T., *Implicit Filtering, Software*, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2011.
- [14] Karaboga D., Bahriye A., *A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm*, Appl. Math. Comput. 214, 2009, 108-132.
- [15] Kumar S., Kumar Sharma V., Kumari R., *An Improved Memetic Search in Artificial Bee Colony Algorithm*, Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol. Vol. 5, 2014, 1237-1247, 2014, 11.

- [16] Papierski A., *Wielokryterialna i wielopoziomowa optymalizacja kształtu półotwartych wirników pomp o niskich wyróżnikach szybkobieżności*, Politechnika Łódzka, 2010.

PODZIĘKOWANIA

Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PL Grid oraz na licencji Matlab 2014b otrzymanej z Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.



PROGRAM STRATEGICZNY NCBR

Realizacja zadania badawczego jest dofinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych pt: "Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii" oraz współfinansowana przez ENERGA SA

Zadanie Badawcze nr 4

OPRACOWANIE ZINTEGROWANYCH TECHNOLOGII WYTWARZANIA PALIW I ENERGII Z BIOMASY, ODPADÓW ROLNICZYCH I INNYCH