Budowa modelu algorytmu genetycznego na potrzeby optymalizacji elementów konstrukcji silnika turbinowego

Creating of model of genetic algorithm used to optimization of construction of jet engine element

ADAM KOZAKIEWICZ
RAFAŁ KIESZEK*

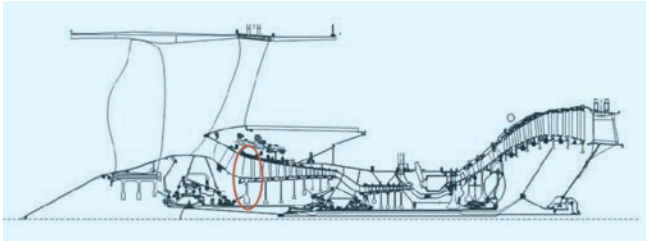
DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.86

Przedstawiono wyniki optymalizacji tarcz sprężarek lotniczych silników turbinowych. Optymalizację grubości tarczy sprowadzono do problemu NP-zupełnego, który rozwiązano za pomocą jednego z algorytmów genetycznych (ewolucyjnego). Na kolejnych etapach pracy sprawdzano poprawność działania algorytmu optymalizacyjnego i algorytmu generującego dane. Porównano zoptymalizowaną tarczę wykonaną według technologii klasycznej z tarczą wykonaną w technologii BLISK.
SŁOWA KLUCZOWE: optymalizacja, lotnicze silniki turbinowe, algorytm ewolucyjny, technologia BLISK

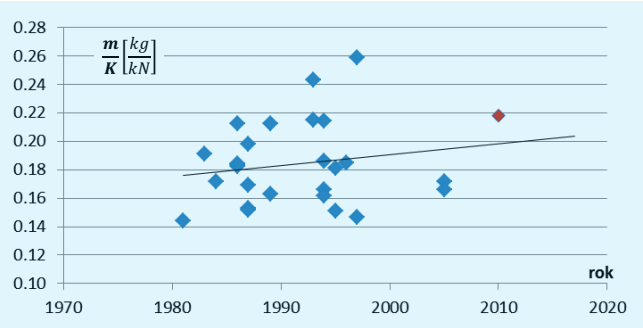
In this paper authors show results of optimization of compressor discs in turbine engines. The problem of optimizing the thickness of the disc brought to the NP-complete problem, and solved it by using one of the genetic algorithms – evolutionary algorithm. Correctness of model and optimization algorithm were constantly checked. At the end of this paper, compressor disc created due to traditional technology and disc created by BLISK technology were compared.
KEYWORDS: optimization, turbine engine, evolutionary algorithm, BLISK

Przeanalizowano możliwość stworzenia uniwersalnego algorytmu optymalizującego tarczę sprężarki dwuprzepływowego lotniczego silnika odrzutowego. Na podstawie przeglądu współczesnych rozwiązań konstrukcyjnych silników lotniczych wybranej klasy określono ich najistotniejsze parametry z punktu widzenia optymalizacji sprężarki. Opracowano algorytm w języku M, oparty na MES, do obliczania naprężeń. Algorytm napisany w języku GRIP wykorzystuje MES do określania ograniczenia funkcji optymalizowanej poprzez algorytm ewolucyjny. Ze względu na złożoność wirnika i ograniczone możliwości sprawdzenia poprawności działania algorytmu skupiono się na obliczeniach i optymalizacji pojedynczej tarczy (rys. 1).

Spośród trendów w rozwiązaniach konstrukcyjnych (rys. 2) wybrano rozwiązanie bazowe do dalszych obliczeń. Jako bazowy silnik wybrano Trent XWB (rys. 1). Optymalizowano tarczę pierwszego stopnia sprężarki średniego ciśnienia.



Rys. 1. Przekrój silnika Trent XWB [9]; na czerwono zaznaczono optymalizowaną tarczę



Rys. 2. Zmiana stosunku masy do ciągu wybranych silników na przestrzeni lat; na czerwono – Trent XWB

Coraz częściej wdraża się kilkustopniowe wirniki wykonane w technologii BLISK. W stopniach tego rodzaju łopatki i tarcza stanowią jeden element i nie da się łatwo zdemontować łopatek. Wymiana uszkodzonych łopatek lub naprawa stopni wykonanych w technologii BLISK polegają zazwyczaj na wycięciu uszkodzonego elementu i np. wspawaniu nowego. Ponieważ stopnie te nie mają zamków, można zastosować mniejsze wieńce. Zmniejsza to masę zewnętrznej części tarczy, a w konsekwencji także siłę wynikającą z jej obrotów. Pozwala to na zredukowanie grubości zarówno tarczy, jak i jej piasty. Dodatkowo sąsiednie stopnie wirników wykonanych w technologii BLISK łączone są zazwyczaj za pomocą zgrzewania tarciowego, co także daje oszczędności na masie.

Parametry wpływające na stopień obciążenia tarcz wirnikowych

Tarcze zespołów wirnikowych są obciążone różnymi siłami. Zadaniem tarczy jest – w przypadku sprężarki – przenoszenie pracy i sił z wału na palisadę łopatek. W zależności od źródła obciążenia te można podzielić na trzy grupy:

- obciążenia pochodzące od przepływającego czynnika roboczego – zalicza się do nich siły pochodzenia aerodynamicznego wywołane różnicą ciśnień, działające na łopatki, i siły boczne działające na powierzchnie tarczy;
- siły masowe;
- obciążenia cieplne powstałe w wyniku gradientu temperatury w czasie pracy maszyny przepływowej.

Aby określić najistotniejsze parametry z punktu widzenia obciążenia tarczy, wychodzi się z ogólnego równania różniczkowego tarczy wirującej o grubości zmiennej [10].

* Dr hab. inż. Adam Kozakiewicz (adam.kozakiewicz@wat.edu.pl), mgr inż. Rafał Kieszek (rafal.kieszek@wat.edu.pl) – Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki Wojskowej Akademii Technicznej

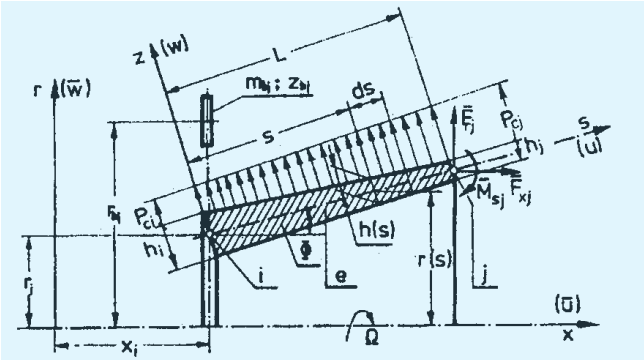
$$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}r^2}+\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r}\left[r\left(\frac{1}{h}\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}r}+\frac{1}{E}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}r}\right)+1\right]-\frac{u}{r^2}\left[1-\nu r\left(\frac{1}{h}\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}r}+\frac{1}{E}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}r}\right)\right]=-Ar+(1+\nu)(\alpha T)\left[\frac{1}{h}\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}r}+\frac{1}{E}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}r}+\frac{1}{(\alpha T)}\frac{\mathrm{d}(\alpha T)}{\mathrm{d}r}\right] \quad (1)$$

gdzie: u – przemieszczenia (m); r – promień bieżący (m); h – grubość tarczy (m); E – moduł Younga (Pa); ν – współczynnik Poissona; α – współczynnik rozszerzalności cieplnej; T – temperatura (K); $A = \rho\Omega^2\frac{1-\nu^2}{E}$; ρ – gęstość ($\frac{kg}{m^3}$); Ω – prędkość kątowa ($\frac{rad}{s}$).

W warunkach brzegowo-początkowych ukryto promienie wewnętrzny i zewnętrzny. Siły pochodzące od wieńca łopatkowego w omawianym równaniu uwzględniono jako warunek brzegowy dla $r = r_{zew}$ w postaci ciągnienia wynikającego z masy łopatki, wraz z zamkiem i wieńcem niezbędnym do osadzenia łopatki. Wpływ ΔT nie został uwzględniony, ponieważ w pierwszych stopniach sprężarki jego znaczenie dla właściwości materiałowych i naprężeń termicznych można zaniedbać. Algorytm ten umożliwia implementację wpływu gradientu temperatury na właściwości materiałowe tarczy.

Analiza wytrzymałościowa tarczy sprężarki

Do wyznaczenia naprężeń wykorzystano metodę zaproponowaną w [11]. Polega ona na aproksymacji tarczy przez jednowymiarowe elementy powłoki stożkowej o liniowo zmiennej grubości. Pojedynczy element zastosowany do obliczeń przedstawiono na rys. 3. Metoda ta została zmodyfikowana w oparciu o pracę [12]. Dodatkowo z wykorzystaniem [13] wyznaczono rozmiar i masę części zamkowej tarczy wykonanej technologią tradycyjną i BLISK.



Rys. 3. Wymiary geometryczne i obciążenia jednowymiarowego elementu powłoki stożkowej o liniowo zmiennej grubości [12]

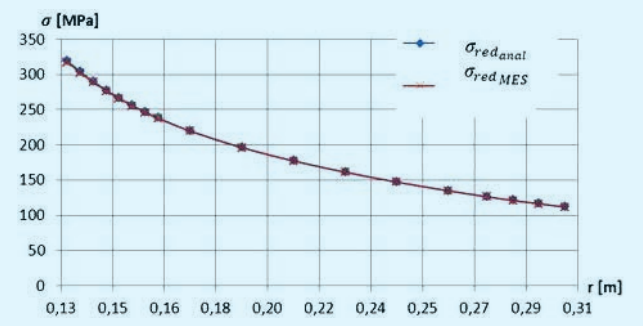
W celu sprawdzenia poprawności napisanego programu bazującego na MES wyniki uzyskane dla tarczy testowej porównano z wynikami analitycznymi (rys. 4 i 5).

Na rys. 5 przedstawiono błąd względny dla poszczególnych elementów. Widać wyraźnie, że nie przekracza on 0,6%, co świadczy o dużej dokładności metody.

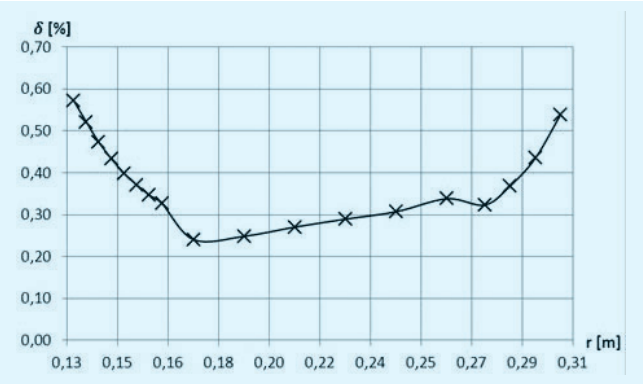
Wybór metody optymalizacji

Za funkcję celu w wybranej metodzie optymalizacji przyjęto minimalizację masy tarczy. Aby tarcza spełniała warunek wytrzymałościowy, zastosowano funkcję kary. Metodę optymalizacji wybrano na podstawie opracowań [14, 15].

Z uwagi na czynnik losowy w algorytmach niedeterministycznych nie można mieć pewności, że algorytm znalazł



Rys. 4. Naprężenia zredukowane w funkcji promienia bieżącego dla tarczy prostej



Rys. 5. Błąd względny δ dla naprężeń zredukowanych w funkcji promienia bieżącego dla ważkiej tarczy prostej

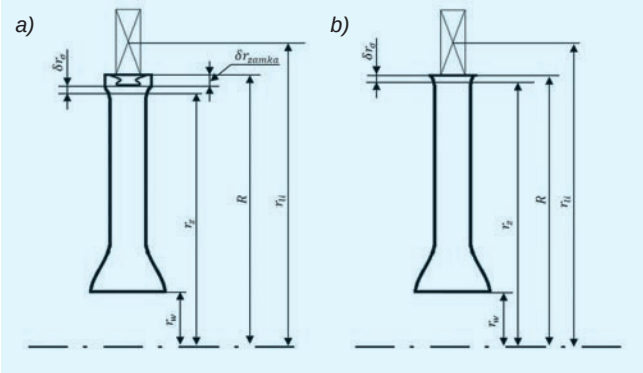
minimum globalne. Jednak zbliżenie się do niego lub znalezienie zadowalającego minimum lokalnego jest wysoce prawdopodobne.

Algorytm genetyczny opiera się na kilku podstawowych krokach i działa na wartościach dyskretnych. Na początku określa się dyskretny charakter zadania i decyduje się, w jaki sposób i za pomocą ilu bitów opisać pojedyncze rozwiązania. Kolejnym krokiem jest losowanie generacji rozwiązań początkowych. Następnie wybiera się rozwiązania, które będą się krzyżować.

W tym celu zastosowano metodę turnieju. Ze wszystkich rozwiązań losowano kilka, a spośród nich, metodą turnieju, wybierano dwa najlepsze. Rozwiązania te wymieniają się ze sobą odpowiednimi częściami bitów, tworząc nowe rozwiązania. Operacje powtarza się. Następnym krokiem jest wybranie części rozwiązań, w których neguje się losową liczbę losowo wybranych bitów. Zabieg ten ma opóźnić dominację rozwiązań odpowiadających minimom lokalnym i zwiększyć prawdopodobieństwo osiągnięcia minimum globalnego. Kolejny krok to utworzenie nowej generacji rozwiązań ze zwycięzców turnieju, rozwiązań utworzonych w wyniku ich krzyżowania i rozwiązań, w których stosowano negacje.

Wyniki obliczeń

Głównym celem pracy było porównanie kształtu i masy zoptymalizowanej tarczy wykonanej w technologii klasycznej i BLISK. W tym celu obydwie tarcze uproszczono do obliczeń numerycznych. W tarczy wykonanej w technologii BLISK pominięto zamek. Założono, że optymalizowana część tarczy wykonanej w technologii BLISK będzie dłuższa o wysokość zamka. Pozostałe parametry tarcz pozostają bez zmian. Różnice w wymiarach geometrycznych modeli obu tarcz przedstawiono na rys. 6.

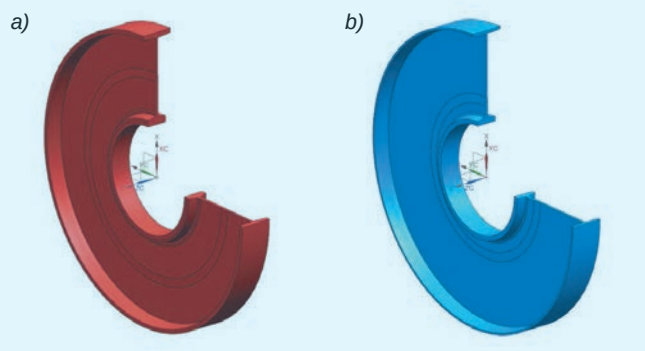


Rys. 6. Model geometryczny tarczy: *a*) wykonanej w technologii tradycyjnej i *b*) tarczy wykonanej w technologii BLISK

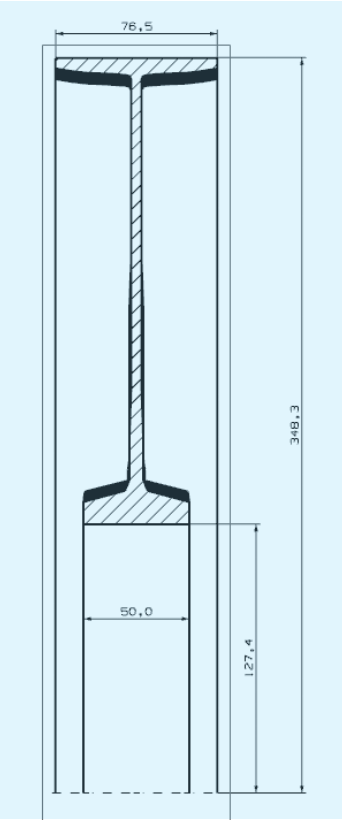
Wyniki optymalizacji zostały zaprezentowane na rys. 7. Przedstawia on przekroje tarczy wykonanej w technologii tradycyjnej (kolor czerwony) i w technologii BLISK (kolor niebieski). W procesie optymalizacji wygenerowana została piasta. Można zauważyć, że tarcza wykonana w technologii BLISK jest węższa i przede wszystkim ma mniejszą piastę. Dodatkowo masa optymalizowanej części jest o ok. 1 kg mniejsza (przy masie optymalizowanej tarczy BLISK ok. 9,4 kg) niż tarczy wykonanej w technologii klasycznej. Różnica ta rośnie, gdy uwzględni się różnicę mas części nieoptymalizowanych. Różnica mas części zamkowych wynosi ok. 3,5 kg, co przy całkowitej masie tarczy zoptymalizowanej (BLISK 14,5 kg i tradycyjnej 19,1 kg) daje zysk na masie całego elementu, przy zmianie technologii wykonania rzędu 4,6 kg.

Na rys. 8 przedstawiono przekrój obu tarcz. Na czarno zaznaczono tarczę wykonaną w technologii tradycyjnej. Kontrast uwypukla różnice.

Aby sprawdzić poprawność wszystkich wyników, tzn. czy geometria spełnia kryterium wytrzymałościowe, przeprowadzono analizy wytrzymałościowe w programie Siemens NX 7.5. W tarczy klasycznej rozkład naprężeń był stosunkowo jednorodny, co świadczy o tym, że została ona zoptymalizowana w sposób dość dobry. W tarczy BLISK naprężenia miały charakter wyraźnie malejący wraz ze wzrostem obliczeniowego promienia bieżącego. Spowodowane jest to tym, że minimalna dopuszczalna grubość tarczy została osiągnięta już dla ósmego z 12 elementów.



Rys. 7. Rzut aksonometryczny trójwymiarowy tarczy: *a*) wykonanej w technologii tradycyjnej, *b*) wykonanej w technologii BLISK



Rys. 8. Prekrój tarczy wykonanej w technologii tradycyjnej (ciemna) i tarczy wykonanej w technologii BLISK (zakreskowana). Tarcza BLISK znajduje się na pierwszym planie

Podsumowanie

Przedstawiony algorytm genetyczny, korzystający z MES, pomimo uproszczeń osiąga wyniki zbieżne z wynikami uzyskanymi innymi metodami. Dokładność ta jest tym większa, im większa jest tarcza. Algorytm genetyczny zapewnia stosunkowo dobrą jakość rozwiązania. Wprowadzenie elementu losowego może wydłużać czas jego działania. Zaletą algorytmu jest duża szansa na znalezienie minimum globalnego.

Zysk na masie przy zmianie technologii wykonania tarczy można było przewidzieć. Zaskakująca jest jednak wielkość różnicy. Na podstawie optymalizacji tarczy można wywnioskować, że największy wpływ na masę tarczy przy zmianie technologii jej wykonania ma stosunek masy części wieńca zajmowanego przez zamki i masy całej tarczy, a także wielkość obciążenia wieńcowego.

Kolejnym etapem prac w tym zakresie będzie zwiększenie szybkości działania algorytmu.

LITERATURA

1. Balicki W., Chachurski R., Głowacki P., Godzimirski, J., Kawalec K., Kozakiewicz A., Pągowski Z., Rowiński A., Szczeciński J., Szczeciński S. „*Lotnicze silniki turbinowe. Konstrukcja-eksploatacja-diagnostyka*". Cz. I. Warszawa: Wydawnictwa Naukowe Instytutu Lotnictwa 2010.
2. www.etc10.eu/mat/Whurr.pdf (dostęp: 2016).
3. Lipka J. *„Wytrzymałość maszyn wirnikowych"*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1967.
4. Nowotarski I. „*Obliczenia statyczne i dynamiczne turbinowych silników lotniczych metodą elementów skończonych*". Warszawa: Wydawnictwa Naukowe Instytutu Lotnictwa, 2001.
5. Rakowski G., Kacprzyk Z. *„Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji"*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
6. Łagosz M., Szczeciński S. „*Konstrukcja silników lotniczych. Wybrane zagadnienia wytrzymałości i dynamiki konstrukcji*". Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna, 1985.
7. Danielewska-Tułecka A., Kusiak J., Oprocha P. *„Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań"*. Warszawa: PWN, 2009.
8. Amborski K. „*Podstawy metod optymalizacji"*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.