

Jan PRACZYK
Krzysztof KAWALEC
Jacek BREJNAK

Instytut Lotnictwa, Warszawa

WYSOKOSPRAWNY NADDŹWIĘKOWY STOPIEŃ OSIOWY SPRĘŻARKI LOTNICZEJ

Streszczenie: W pracy omówiono sposób przeprowadzania obliczeń gazodynamicznych i profilowania wysokosprawnego osiowego stopnia naddźwiękowego sprężarki lotniczej oraz podano jego osiągi uzyskane na stoisku badawczym.

Naddźwiękowe, wysokosprawne stopnie osiowe, będące zazwyczaj pierwszymi stopniami osiowych i osiowo-promieniowych sprężarek znalazły szerokie zastosowanie w nowoczesnych konstrukcjach lotniczych silników turbinowych. Palisady naddźwiękowych stopni osiowych znajdują również zastosowanie przy konstruowaniu zabieraków wysokoobciążonych sprężarek promieniowych. Dlatego też, przy konstruowaniu nowoczesnych osiowych sprężarek lotniczych niezbędne jest opanowanie kompletnych metodyk prac obliczeniowych i projektowych takich stopni. Metodyki takie zostały opracowane i z pozytywnym efektem zastosowane w trakcie prac projektowych prowadzonych w Instytucie Lotnictwa.

Omawiany proces projektowania można podzielić na cztery zasadnicze etapy: Etap 1. Założenia wstępne i przyjęcie koncepcji konstrukcji sprężarki.

Danymi wyjściowymi są: spręż i sprawność sprężarki oraz wydatek masowy czynnika roboczego. W etapie tym określa się ilość stopni i ich obciążenia aerodynamiczne łącznie ze wstępnym oszacowaniem ich sprawności. Ustala się wartość prędkości obrotowej wirnika oraz wstępny kształt kanału sprężarki. Ustala się typy profili w poszczególnych palisadach łącznie z rozkładem wzdłuż promienia względnej grubości łopatek. Przyjmuje się wielkość szczelin międzywieńcowych i luzów promieniowych nad wierzchołkami łopatek.

Etap 2. Wyjściowe obliczenia gazodynamiczne przepływu dla znamionowych warunków pracy sprężarki.

Przekroje obliczeniowe umieszczane są na krawędziach natarcia i spływu każdej palisady oraz dodatkowo po kilka przekrojów w kanale sprężarkowym przed pierwszym i za ostatnim wieńcem łopatkowym sprężarki. Przepływ przez sprężarkę uważany jest za uśredniony, osiowo-symetryczny i nielepki. Dla rozwiązania przepływu wykorzystane równania zachowania masy, pędu i energii stosując metodę krzywizny powierzchni linii prądu. W obliczeniach uwzględnia się dodatkowo wpływ promieniowego rozkładu

względnej grubości łopatek na wielkość krzywizny linii prądu w szczelinach międzywieńcowych oraz zacięnienie efektywnego przekroju przez warstwę przyscienną. W podprogramach zawarta jest informacja uzyskana z badań o rozkładzie strat wzdłuż wysokości łopatki dla kilku rodzajów profili stosowanych w sprężarkach w zależności od wartości liczby Macha napływającego strumienia w ruchu względnym, kąta natarcia, współczynnika obciążenia stopnia i charakterystyki geometrycznej profilu. Zadaniem tego etapu oprócz przygotowania danych do profilowania poszczególnych wieńców łopatkowych jest optymalizacja kształtu kanału przepływowego sprężarki oraz optymalizacja pola ciśnień całkowitych za poszczególnymi wieńcami łopatkowymi w celu uzyskania wysokiej sprawności tych stopni przy jednoczesnym zachowaniu niezbędnego zapasu pracy statycznej.

Etap 3. Profilowanie kształtu łopatki.

Proces profilowania jest realizowany automatycznie za pomocą specjalnego programu, dzięki któremu uzyskuje się wydruki współrzędnych profili w przekrojach obliczeniowych i dodatkowo w przekrojach technologicznych łopatki poza obszarem przepływu. Po wykonaniu obliczeń przepływu czynnika przez stopień dysponujemy rozkładem parametrów przepływowych wzdłuż wysokości łopatki. Dysponujemy również promieniowym rozkładem kąta odstawiania strumienia na krawędzi spływu. Należy jedynie wprowadzić nieznaczną korektę tego kąta w skrajnych obliczeniowych przekrojach łopatki w pobliżu ścianki zewnętrznej i piasty. Zakładając dodatkowo rozkład parametrów geometrycznych wzdłuż wysokości łopatki, takich jak grubość krawędzi natarcia, grubość maksymalna, grubość krawędzi spływu, cięciwa profilu, położenie maksymalnej grubości oraz położenie punktu przejściowego, można zaprojektować kształt całej łopatki. Konieczność zmniejszenia strat w kanale przydźwiękowej sprężarki doprowadziła do zastosowania profili wielołukowych /multi circular arc MCA/. Profil wielołukowy składa się z dwóch umownych łuków kołowych stanowiących stronę podciśnieniową i dwóch innych stanowiących stronę ciśnieniową profilu. Ten typ łopatki pozwala sterować wygięciem części wlotowej i wylotowej profilu wzdłuż wysokości łopatki, co umożliwi kontrolowanie strat uderzeniowych w kanale o przepływie naddźwiękowym. Element profilu, który posiadałby kołową szkieletową na płaszczyźnie, może być odwzorowany na powierzchni stożkowej na wiele różnych sposobów. Najbardziej korzystnym przypadkiem ze względów przepływowych jest zachowanie stałego współczynnika zmiany lokalnego kąta łopatki dk/ds na powierzchni stożkowej wzdłuż długości krzywej stanowiącej przecięcie rozważanej powierzchni linii prądu z ciałem łopatki. Przyjęto, że szkieletowa oraz strona podciśnieniowa i ciśnieniowa profilu składają się z dwóch części: wlotowej i wylotowej. Każda część posiada stałą wartość dk/ds , która w ogólnym przypadku jest różna od wszystkich pozostałych. Dla uzyskania wysokiej sprawności osiowego stopnia naddźwiękowego istotny jest prawidłowy wybór położenia punktu przejściowego na powierzchni łopatki oraz właściwy wybór pochodnych dk/ds na powierz-

chni podciśnieniowej profilu w jego wlotowej i wylotowej części dla tych obszarów łopatki, które pracują w przepływie naddźwiękowym. Celem jest dokonanie jakościowej analizy za pomocą metody kroczenia w czasie dla kilku wariantów $(dk/ds)_{\text{wlot}}$ i $(dk/ds)_{\text{wylot}}$ zmieniając odpowiednio stosunek wygięcia części wlotowej profilu do jego wygięcia całkowitego oraz wielkość cięciwy szczególnie w przekroju leżącym w pobliżu wierzchołka łopatki, co pozwala wybrać wariant optymalny. Następnie można określić kształt strony podciśnieniowej i ciśnieniowej profilu na powierzchniach stożkowych zastępujących powierzchnie linii prądu. Powierzchnie profilu muszą spełniać warunek styczności w punkcie przejściowym oraz warunek narzuconej grubości maksymalnej, grubości na krawędzi natarcia i spływu. W punkcie maksymalnej grubości kąty: stycznej do szkieletowej, stycznej do powierzchni podciśnieniowej i stycznej do powierzchni ciśnieniowej są sobie równe. Ze względów wykonawczych ostateczny kształt łopatki jest wyznaczany za pomocą wybranej liczby przekrojów leżących na płaszczyznach prostopadłych do promienia /zazwyczaj 10 do 20 przekrojów kontrolnych/. Przekroje te uzyskuje się z przeliczenia składanych w odpowiedni sposób profili leżących na obliczeniowych powierzchniach stożkowych. Główną zasadą składania jest minimalizacja naprężeń w łopatkce. Uwzględniając kompensację sił aerodynamicznych przyjęto, że linia środków ciężkości poszczególnych przekrojów ma być prostą pochyloną względem promienia o zadane kąty w kierunku stycznym i osiowym. Procedura składania polega na takim usytuowaniu profili na odpowiadających im powierzchniach stożkowych, aby środki ciężkości poszczególnych przekrojów znalazły się na zadanej linii środków ciężkości. Na zakończenie obliczeń podawane są współrzędne przekrojów łopatki na poszczególnych promieniach wraz z całym szeregiem parametrów geometryczno-wytrzymałościowych, takich jak pole przekroju, momenty bezwładności itp. oraz przygotowywane są dane geometryczne potrzebne do graficznego przedstawienia kształtu przekroju i szczegółowej analizy gazodynamicznej. Dzięki wykorzystaniu automatycznych urządzeń kreślących i odpowiednich programów możliwa jest szybka wizualna kontrola zaprojektowanych kształtów przekrojów. Wykonane rysunki ostatecznej wersji ułopatkowania stopnia służą jednocześnie jako szablony i wzorce w procesie produkcyjnym.

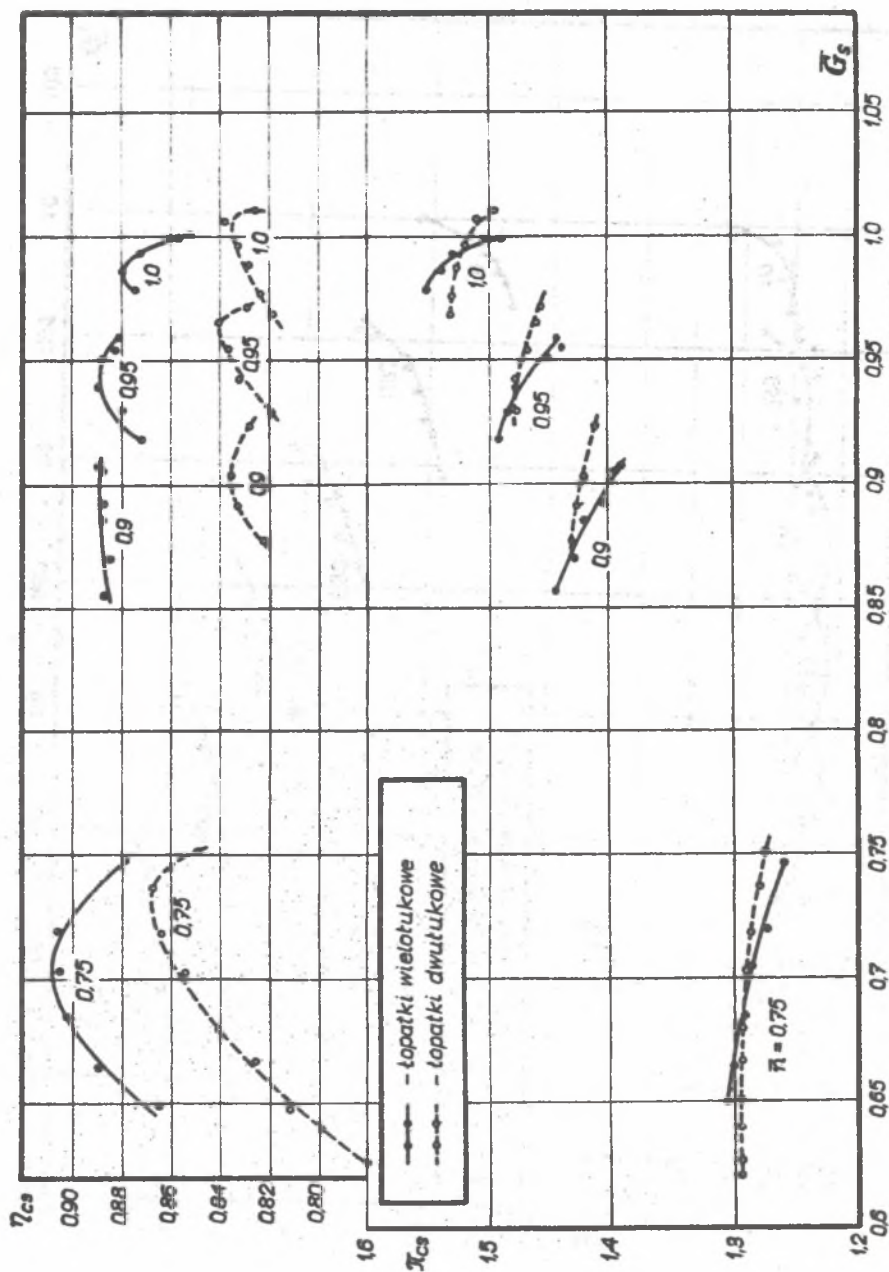
Etap 4. Szczegółowa analiza gazodynamiczna osiągow zaprojektowanej palisady w warunkach pozaobliczeniowych przy jej współpracy z pozostałymi stopniami sprężarki.

Zakończenie procesu profilowania łopatki umożliwia rozpoczęcie czwartego etapu procesu projektowego - szczegółowej analizy gazodynamicznej. Analiza taka umożliwia stwierdzenie, czy parametry pracy palisad i ich osiągi są zgodne z osiąganymi pożądanymi, przyjętymi na początku obliczeń, jak również umożliwia określenie parametrów pracy palisad i ich osiągow poza punktem obliczeniowym, co jest równoznaczne z wyznaczeniem całej charakterystyki stopnia naddźwiękowego. Charakterystyka taka jest niezbędna do określenia linii współpracy i zapasu pracy statecznej sto-

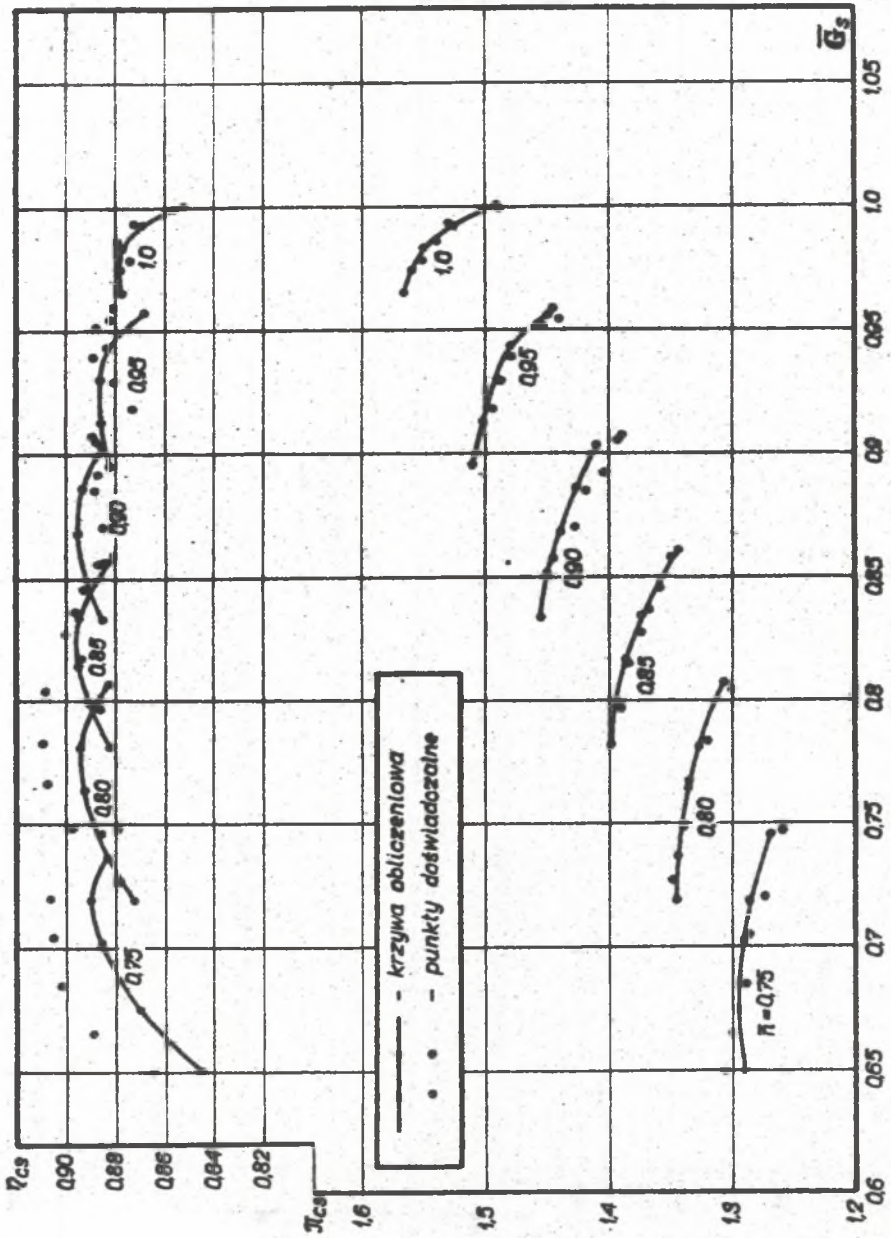
pnia. Możliwe jest również liczenie charakterystyki kilku kolejnych stopni jednocześnie, co prowadzi do otrzymania charakterystyki całej sprężarki. Przepływ przez sprężarkę liczony w tym etapie uważany jest również za uśredniony, osiowo-symetryczny i nielepki. Dodatkowo zostały do programu wprowadzone dwa zjawiska fizyczne, a mianowicie turbulenty mieszanie się strumienia czynnika oraz promieniowy transport strat. Uwzględniono również efekty związane z istnieniem warstwy przyściennej na ściankach bocznych i śladu aerodynamicznego łopatek. W przedstawionej metodzie przekroje obliczeniowe zostały umieszczone w charakterystycznych punktach strumienia płynącego czynnika. Preferowane jest ortogonalne umieszczenie przekrojów obliczeniowych w stosunku do kierunku meridionalnego przepływu czynnika. Zazwyczaj kilka przekrojów obliczeniowych umieszczonych jest przed pierwszą palisadą łopatkową, po jednym na krawędzi natarcia i spływu każdej palisady i kilka za ostatnią palisadą. Dodatkowo przekroje obliczeniowe mogą być umieszczone w obszarze łopatki, i tak się zwykle czyni, gdy łopatka pracuje w warunkach okołodźwiękowych. Przekroje obliczeniowe mogą być usytuowane dowolnie, nie muszą mieć kierunku promieniowego i nie muszą być liniami prostymi. Siatka obliczeniowa jest zbudowana poprzez przecięcie przekrojów obliczeniowych z powierzchniami linii prądu, których rozmieszczenie określane jest drogą kolejnych przybliżeń. Do obliczeń wykorzystano metodę krzywizny linii prądu. Rozkład prędkości meridionalnej strumienia czynnika w poszczególnych przekrojach obliczeniowych jest określane poprzez scałkowanie równania pędu i równania energii. Równanie zachowania masy dostarcza niezbędnych stałych całkowania. Program zawiera dwa podstawowe równania pędu w postaciach odpowiadających przepływowi czynnika w przestrzeni łopatkowej oraz w przestrzeni bezłopatkowej. Równania te zostały skonstruowane na podstawie równania przedstawionego przez Wenerstrom'a [1]. Możliwość obliczania parametrów pracy stopnia poza jego punktem obliczeniowym uzyskano dzięki uzależnieniu strat przepływowych od parametrów przepływu strumienia czynnika dla zadanej geometrii profili wieńców łopatkowych. Program między innymi uwzględnia własności aerodynamiczne profili wielołukowych stosowanych w palisadach sprężarek przydźwiękowych, które są obecnie powszechnie wprowadzane do lotniczych silników turbinowych, jak również przygotowuje dane uwzględniające kształt łopatek oraz rozkład sił aerodynamicznych na powierzchni profili w postaci przystosowanej do dalszego prowadzenia analizy naprężeń za pomocą specjalnie opracowanych programów wytrzymałościowych.

Trzy ostatnie etapy procesu projektowego /2,3,4/ charakteryzują się istnieniem wielu sprzężeń zwrotnych.

Posługując się wyżej wymienionymi metodami w Instytucie Lotnictwa obliczono, zaprofilowano oraz wykonano wysokosprawną, naddźwiękową stopień osiowy o dużej przepustowości czynnika roboczego przy umiarkowanym stopniu sprężania. Obliczeniowy spręż stopnia wynosił 1.5 przy sprawności izentropowej $\eta_c = 0.855$. Obliczeniowa wartość liczby Macha na średnicy



Rys. 1



Rys. 2

зewnętrznej w ruchu względnym na wlocie była równa 1.270 przy średniej wartości prędkości osiowej na wlocie $c_{0a} = 165$ m/s. W stopniu tym zastosowano profile wielolukowe. Dodatkowo wykonano analogiczny wirnik, w którym zastosowano profile dwulukowe. Następnie stopień ten z obydwoma wariantami ucięcia wirnika poddano próbie gazodynamicznej. Uzyskano charakterystyki zewnętrzne obydwu stopni dla kilku sprawdzonych prędkości obrotowych. Na rys. 1 przedstawiono doświadczalną charakterystykę stopnia nadźwiękowego z łopatkami wielolukowymi. Dla porównania przedstawiono również osiągi stopnia z łopatkami dwulukowymi. Jak wynika z przeprowadzonych badań gazodynamicznych, stopień z łopatkami wielolukowymi uzyskuje w warunkach nominalnych obliczeniowy spręż i wymagany sprężność oraz zapewnia dostatecznie duży zapas pracy statycznej przy nominalnej i pozaobliczeniowych prędkościach obrotowych. Wirnik z łopatkami dwulukowymi pozwala uzyskać założony wydatek i spręż, jednak przebieg wartości sprężu jest bardziej płaski, a maksymalna sprężność takiego stopnia jest niższa o około 4% od sprawności uzyskiwanej przez stopień z łopatkami wielolukowymi.

Doświadczalna weryfikacja opracowanych w Instytucie Lotnictwa metod obliczeniowych całkowicie potwierdziła ich praktyczną przydatność, co ilustruje rys. 2, na którym przedstawiono porównanie obliczeniowej i doświadczalnej charakterystyki wyżej wymienionego stopnia osiowego.

LITERATURA

- [1] Wennerstrom: On the Treatment of Body Forces in the Radial Equilibrium Equation of Turbomachinery, NRL 74-0150, Aerospace Research Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 1974

СВЕРХЗВУКОВАЯ СТУПЕНЬ ОСЕВОГО АВИАЦИОННОГО КОМПРЕССОРА С ПОВЫШЕННЫМ К.П.Д.

Резюме

В статье изложен метод газодинамического расчета и профилирования сверхзвуковой ступени осевого авиационного компрессора, обеспечивающей получение коэффициента полезного действия повышенного значения. Приведены результаты отендовых испытаний этой ступени.

HIGH-EFFICIENT, SUPERSONIC, AXIAL COMPRESSOR STAGE

Summary

A method for the gas-dynamic calculations and the design procedure of the profile geometry of a high-efficient, supersonic, axial compressor stage is presented.

The performances of the stage are discussed.