

PRACA NIESTATECZNA SILNIKÓW TURBINOWYCH – – PRZYCZYNY POWSTANIA I SPOSOBY ZAPOBIEGANIA

W. Balicki, K. Kawalec, S. Szczeciński

Instytut Lotnictwa

R. Chachurski, A. Kozakiewicz

Wojskowa Akademia Techniczna

Streszczenie

W artykule opisano przyczyny i przebiegi fizyczne zjawiska w kanałach przepływowych silników oraz w samych sprężarkach promieniowych i osiowych. Sposoby wyjścia z zaistniałej już pracy niestatecznej oraz sposoby konstrukcyjne unikania możliwości pompażu. Charakterystyki współpracy sprężarki z turbiną i występujące zagrożenia.

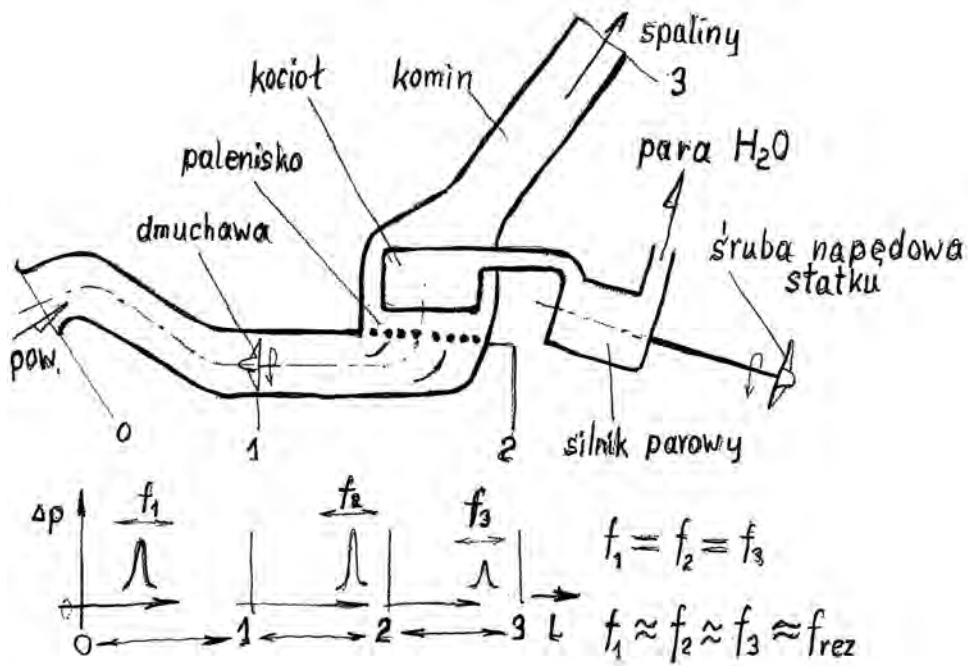
Słowa kluczowe: pompaż, nastawne kierownice, upust powietrza, wielowirnikowość sprężarki

Już na przełomie XIX/XX wieku zaobserwowano w parowych silnikach okrętowych pojawiające się dudniące odgłosy z kanałów dolotowych powietrza do palenisk, samych palenisk i kominów oraz towarzyszące im drgania okrętowych pokładów o dużych amplitudach (rys. 1). Wkrótce okazało się, że zmiana zakresu pracy maszyny parowej ogranicza to zjawisko (ale i moc siłowni), a likwiduje zmiana wysokości komina. Były to pierwsze przypadki tzw. (później) pompażu siłowni¹.

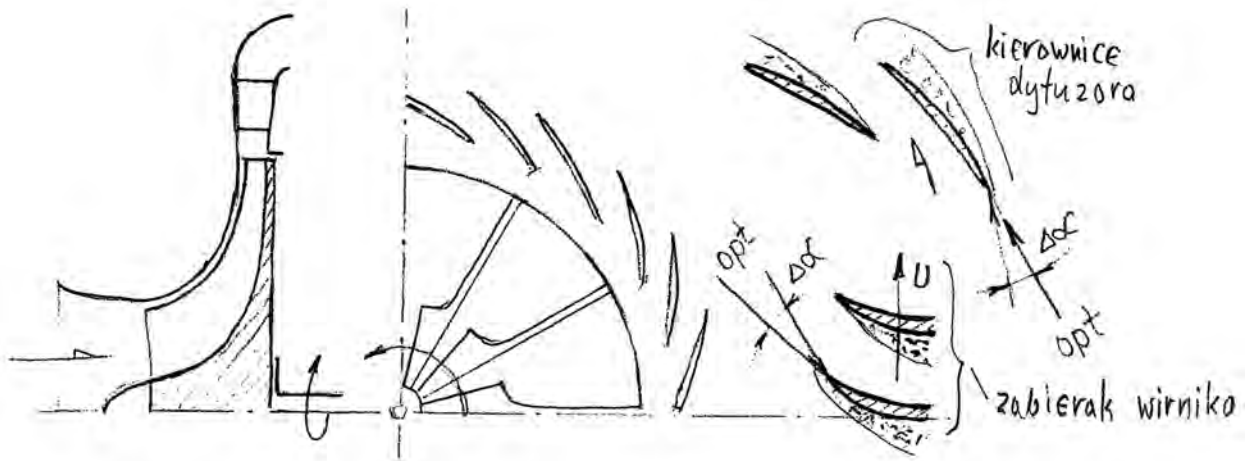
Problem pompażu turbinowych silników odrzutowych pojawił się w naszym lotnictwie wraz z przeobrażeniem go ze „śmigłowo – tłokowego” w „turbinowo – odrzutowe” i masowym wprowadzaniem samolotów MiG – 15 z silnikiem będącym kopią angielskich RR – Nene. Jedyną „praprzyczyną” tego zjawiska było oderwanie strug powietrza na łopatkach zabieraka wirnika sprężarki promieniowej lub kierownic jej dyfuzora rozwijające się w samowzbudne drgania „słupa” powietrza w kanale przepływowym silnika przeradzające się w analogiczne zjawisko do występującego dawniej w siłowniach okrętowych (rys. 2). Instrukcje dla pilotów nakazywały, w przypadku zaistnienia tego zjawiska, przejście w lot nurkowy z jednoczesnym przestawieniem silnika na bieg jałowy. Bardzo szybko zmodyfikowano kolejne wersje silników przez „esowe” ukształtowanie kierownic dyfuzora sprężarki, a w wariantach silników do napędu bombowców IŁ – 28, wprowadzono upust powietrza z za dyfuzora sprężarki (rys. 3).

Masowe wprowadzenie do lotnictwa silników odrzutowych ze sprężarkami osiowymi (większy spręż i sprawność, mniejsze gabaryty poprzeczne silników) (rys. 4) pogłębiło skłonność silników do pracy niestatecznej. Jej przyczynę stanowi skłonność do oderwań strumienia powietrza od wypukłej powierzchni piór łopatek (zwykle wirnikowych) całego lub części wieńca sprężarki w jakimś zakresie pracy silnika i warunkach lotu samolotu.

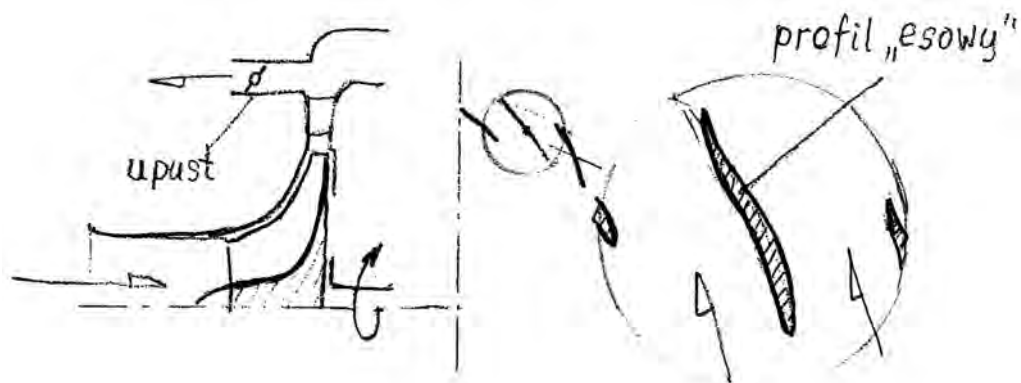
¹ takie zjawisko (w miniaturze) udało nam się zauważyć w naszej katedrze (tylko raz!) na przepływowym stanowisku badawczym gaźnika silnika samochodowego „Malucha”.



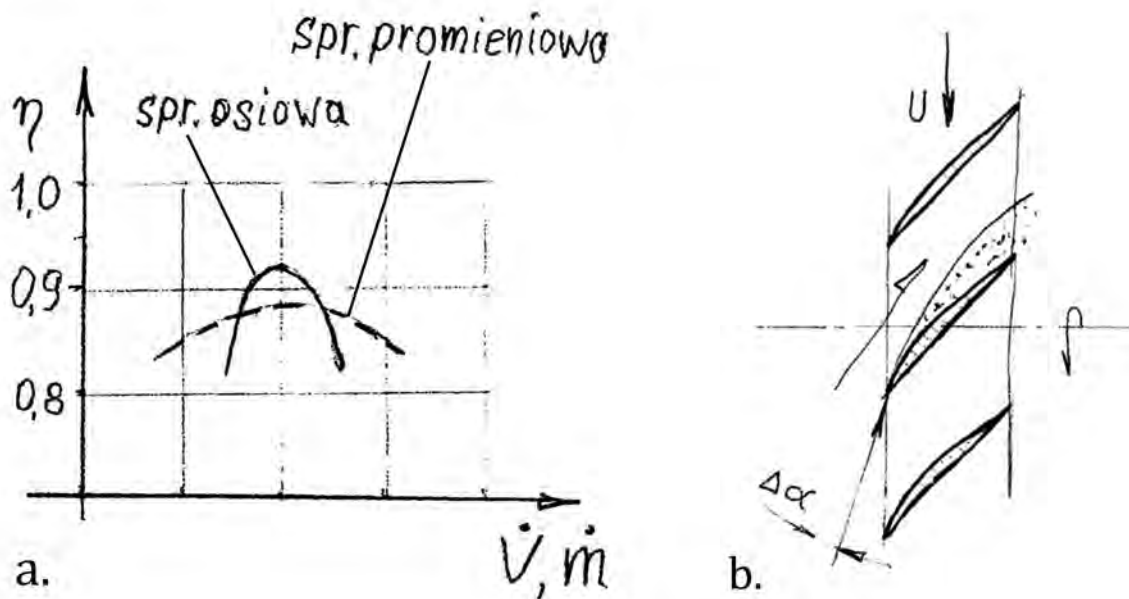
Rys. 1. Schemat parowej siłowni okrętowej z zaznaczeniem obszarów zagrożonych powstaniem samowzbudnych drgań wzdłużnych w kanałach przepływowych powietrza i spalin siłowni mogących wywołać jej pracę niestateczną (pompaż) i uszkodzenie



Rys. 2. Schemat sprężarki promieniowej z pokazaniem miejsc podatnych na oderwanie strumienia powietrza- mogące wywołać jej niestateczną pracę

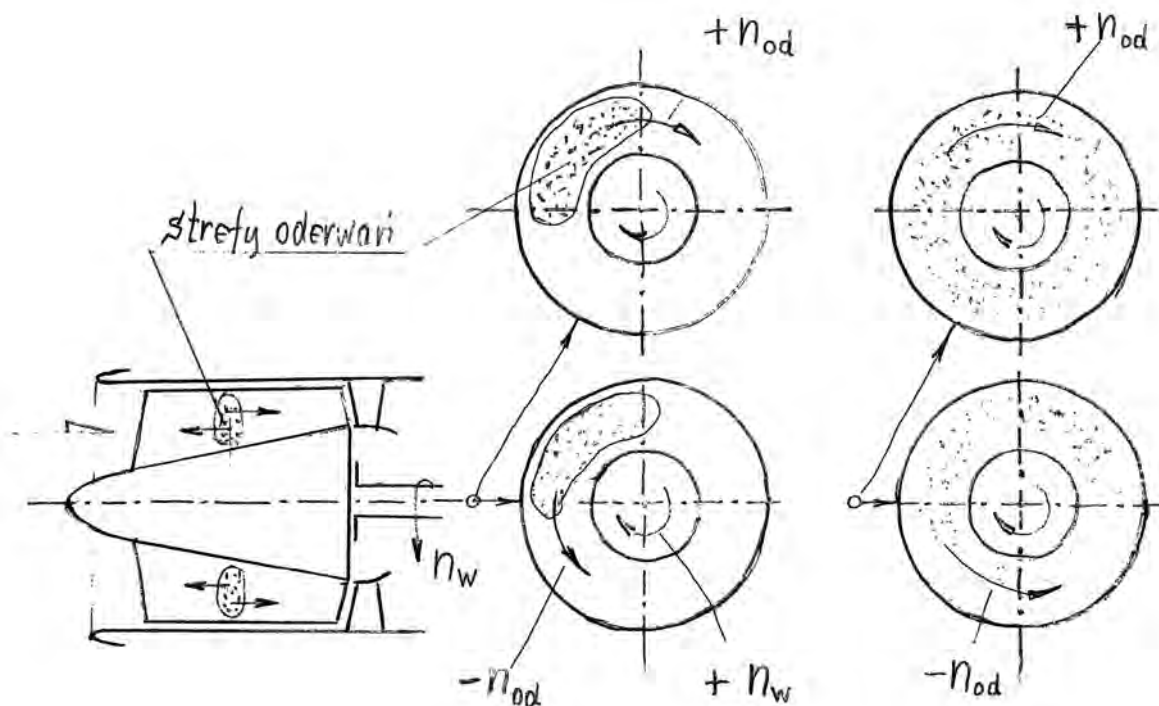


Rys. 3. Zastosowanie w sprężarce promieniowej upustu powietrza i „esowego” ukształtowania profili łopatek dyfuzora jako sposobu uniemożliwiającego wystąpienie „pompażu” silnika podczas lotu (modyfikacja radziecka silników rodziny RR-Nene)



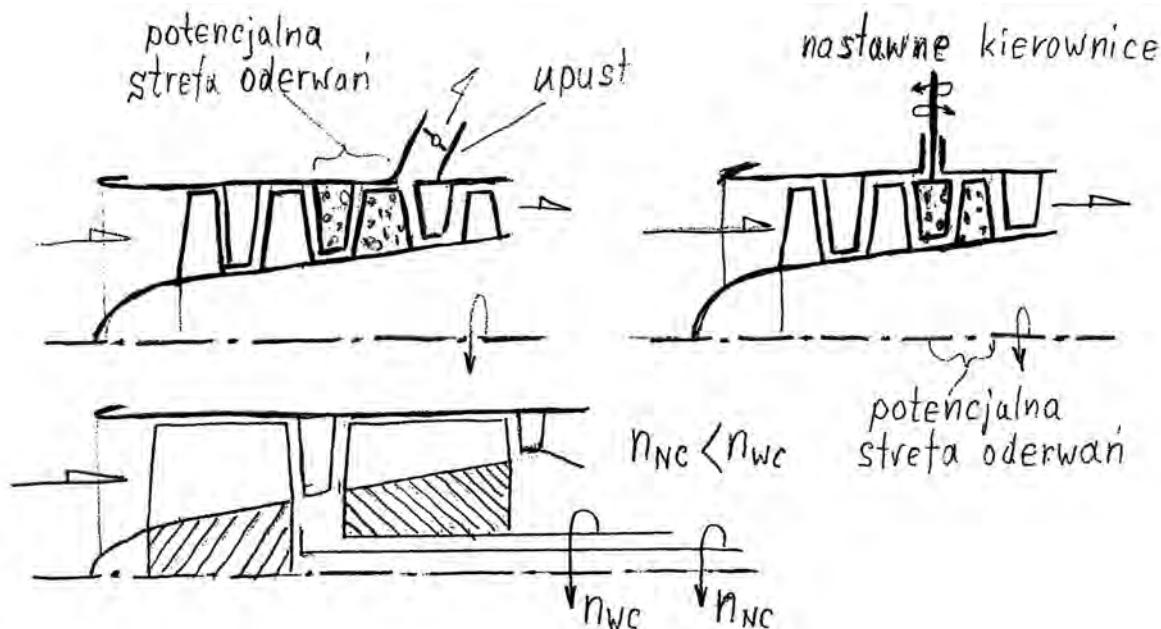
Rys. 4. (a) Porównanie charakterystyk sprawnościowych sprężarek promieniowych i osiowych; (b) Strefy oderwań strumienia powietrza na łopatkach palisad wirnikowych sprężarek osiowych

Oderwania mogą występować (co trudno przewidzieć podczas projektowania silnika) na całym obwodzie stopnia lub jego części. W każdym przypadku strefa oderwań może zajmować stałe położenie (zazwyczaj), ale i zmienne. Strefa oderwań może przemieszczać obwodowo – w kierunku zgodnym lub niezgodnym z kierunkiem obrotowym silnika, ale zazwyczaj z różnymi prędkościami. Strefy oderwań mogą się także przemieszczać cyklicznie, a od stopnia na którym powstało oderwanie, do wlotu sprężarki i do jej wylotu. Ten przypadek jest szczególnie groźny, gdyż może spowodować rezonansowe drgania w innych zespołach silnika aż do ich uszkodzenia mechanicznego lub zgaśnięcia silnika. Ten opis słowny uzupełnia graficznie rys. 5.



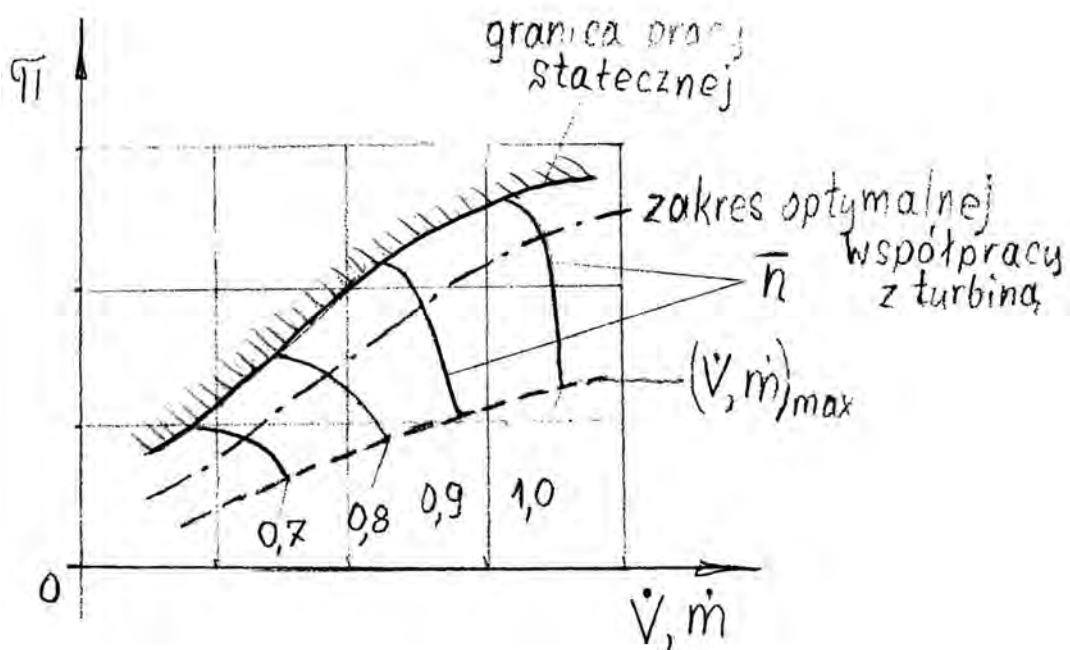
Rys. 5. Strefy występowania oderwań i ich przemieszczeń obwodowych oraz wzdłużnych w kanale przepływowym sprężarki osiowej

Dla uniknięcia tych groźnych zjawisk, dla bezpieczeństwa latania i trwałości silników stosunkowo wcześnie wymyślono kilka sposobów konstrukcyjnych ograniczenia, lub nawet wykluczenia, możliwości powstania zjawiska pracy niestatecznej sprężarki i całości silnika. Należą do nich przede wszystkim upusty powietrza za stopniem spodziewanych oderwań, nastawne wieńce kierownic przed stopniami „skłonnymi” do oderwań strumienia od łopatek wirnikowych oraz wielowirnikowe konstrukcje sprężarek. Odpowiednie schematy „idei” takich konstrukcji przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Sposoby ograniczania występowania pracy niestatecznej sprężarek osiowych na drodze zastosowania upustów powietrza, nastawnych wieńców kierownic oraz dwuwirnikowości sprężarek

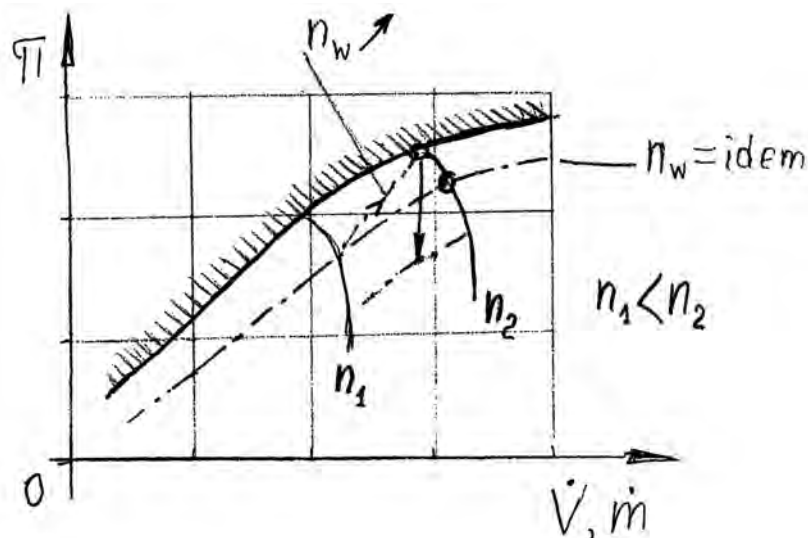
Niebezpieczeństwo skłonności sprężarek (osiowych- obecnie powszechnie stosowanych w silnikach odrzutowych) do niestatecznej pracy można przewidywać na podstawie zbudowanej charakterystyki (jak na rys. 7) podczas jej badań przepływowych.



Rys. 7. Charakterystyka sprężarki z zaznaczeniem linii współpracy z napędzającą ją turbiną oraz granica pracy statecznej. π -spręż sprężarki, \dot{V}, \dot{m} - objętościowe i masowe natężenie przepływu

Zapewnienie stabilności pracy silnika osiąga się na drodze ustalenia linii współpracy sprężarki z napędzającą ją turbiną dostatecznie oddalonej od granicy pracy statecznej sprężarki. Zachodzi tu jednak bardzo skomplikowany problem optymalizacyjny: granica pracy statecznej sprężarki niebezpiecznie się zbliża do linii współpracy z turbiną wraz ze wzrostem wysokości lotu - ale i temperatury otoczenia (gdy maleje gęstość powietrza) a przebieg linii współpracy stanowi kompromis między dopuszczalną temperaturą spalin oraz przewidywanym czasem akceleracji w różnych warunkach lotu samolotu i warunkach klimatycznych. Na rys. 8 przedstawiono jak zmienia się linia współpracy sprężarki z turbiną w warunkach przejścia (tu - akceleracji: $n \uparrow$) od prędkości obrotowej n_1 do n_2 .

Przekroczenie granicy pracy statecznej sprężarki przez linię współpracy grozi wyłączeniem się silnika- nie wykluczając uszkodzeń przeciążonych jego części. Stąd też wynikają ustalenia; w silnikach samolotów bojowych czasy przebiegu akceleracji wynoszą kilka sekund, a w silnikach samolotów transportowych- kilkadziesiąt sekund, co rzutuje na ich trwałość.



Rys. 8. Charakterystyka sprężarki z zaznaczeniem linii współpracy z turbiną podczas akceleracji i jej spadkiem po przekroczeniu granicy pracy statecznej

Z powyższego opisu wynika fakt ogromnego skomplikowania procesów współpracy sprężarki (z jej indywidualnymi cechami przepływowymi i ograniczeniami) z turbiną (także z różnymi ograniczeniami) wymagających indywidualnego zbadania i dostosowanego do potrzeb danego rodzaju lotnictwa. Jak trudne jest to zadanie dowodzi fakt wspólnego stosowania nastawności kierownic wielu stopni sprężarki (z jednoczesnością dwuwirnikowością konstrukcji i upustem powietrza), regulowanej intensywności chłodzenia kadłubów turbin oraz wykorzystywania nastawności dysz wylotowych spalin w różnych zakresach pracy - jeśli jest to silnik z dopalaczem samolotu bojowego.

LITERATURA

- [1] **Antas S.:** *Analityczna metoda wyznaczania parametrów kinematycznych strumienia wzdłuż pióra łopatki sprężającej*. Doktorat, Politechnika Rzeszowska, 1994
- [2] **Cholszewnikow K. [i inni]:** *Teoria i rasczot awiacyjnych łopacocznych maszyn, Maszynostrojenie*, Moskwa 1986
- [3] **Hartog Den.:** *Mechanical vibrations*, New York, Macbraw-Hill, 1947
- [4] **Dźygadło Z. [i inni]:** *Zespoły wirnikowe silników turbinowych w: „Napędy lotnicze”*, WKiŁ, Warszawa 1982
- [5] **Eckert B.:** *Sprężarki osiowe i promieniowe*, PWT, Warszawa 1959
- [6] **Orkisz M.:** *Charakterystyki użytkowe turbinowych silników odrzutowych, a stateczność pracy sprężarki*. Wydawnictwo WOSL, Dęblin 1990

- [7] **Tuliszka E.:** *Sprężarki, dmuchawy i wentylatory*, WNT Warszawa 1969
- [8] **Szczeciński S.:** *Zjawisko pompażu w silnikach odrzutowych ze sprężarkami odśrodkowymi*, Przegląd Wojsk Lotniczych, zeszyt VIII, 1955
- [9] **Szczeciński S.:** *Niestateczna praca silnika odrzutowego i jej wpływ na konstrukcję sprężarek*, Technika Lotnicza, zeszyt 4, 1957