

BADANIA SPRĘŻAREK SILNIKÓW TURBINOWYCH

KRZYSZTOF KAWALEC

Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Znajomość charakterystyk elementów przepływowych silnika turbinowego takich jak sprężarka, komora spalania i turbina jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania silnika odrzutowego czy śmigłowego oraz zaprogramowania działania układu paliwowego i sterowania silnika. Właściwe oprogramowanie układu sterowania zapewnia stabilną pracę silnika w całym zakresie jego pracy, a w szczególności nie pozwala na przekroczenie granicy pracy niestatecznej sprężarki przy akceleracji lub deceleracji niezależnie od prędkości zmiany położenia „dźwigni gazu” oraz warunków lotu.

Artykuł powstał z potrzeby podzielenia się z następnymi badaczami swoim doświadczeniem ukazując metodykę wyznaczania charakterystyk sprężarki wraz z podstawowymi zależnościami obliczeniowymi.

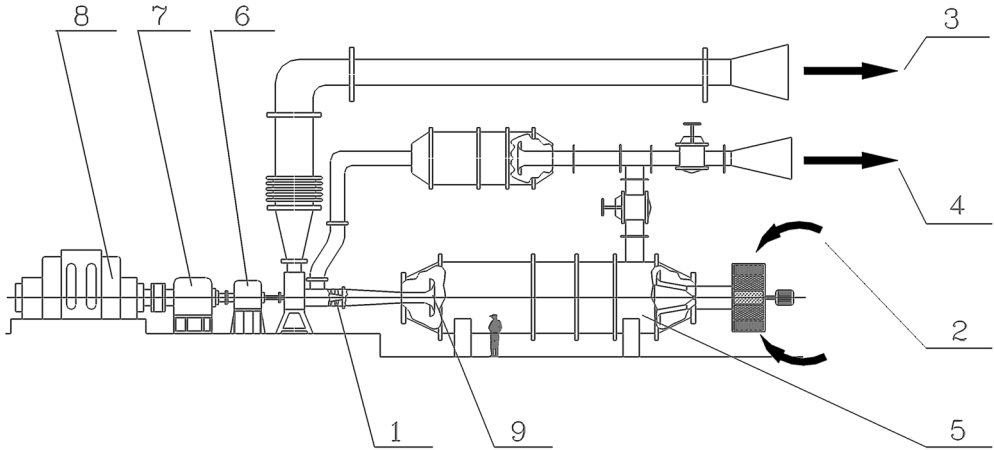
Słowa kluczowe: charakterystyki przepływowe sprężarki, zakres pracy silnika i lotu SP, akceleracja i deceleracja, optymalizacja współpracy sprężarki.

Charakterystykę sprężarki można wyznaczyć drogą obliczeniową, lecz wymaga to specjalistycznego i bardzo drogiego oprogramowania wymagającego uzupełnień dla konkretnej sprężarki oraz wieloletniego doświadczenia, a często wymaga również doświadczalnej weryfikacji – walidacji metod obliczeniowych.

Doświadczalne wyznaczenie charakterystyki sprężarki praktycznie nie jest możliwe w trakcie badań kompletnego silnika. Praktycznie możliwe jest tylko wyznaczenie charakterystyki w bardzo ograniczonym zakresie w pobliżu linii współpracy „sprężarka-turbina”.

Najlepszą sposobem wyznaczenia charakterystyki sprężarki oraz metodą walidacji programów obliczeniowych jest wyznaczenie jej na specjalistycznym stoisku badawczym, na którym możliwe jest utrzymanie dowolnej prędkości obrotowej badanej sprężarki przy jednoczesnej zmianie jej warunków pracy.

Schemat stoiska do badań sprężarek pokazany jest na rys. 1. W ILOT sprężarka badawcza (1) napędzana jest silnikiem prądu stałego (8) o mocy 2,25 MW i maksymalnej prędkości obrotowej 600 obr/min poprzez przekładnię wolnobieżną (7) oraz szybkobieżną (6) z wymiennym kompletem kół zębatach, co umożliwi osiągnięcie maksymalnej prędkości obrotowej badanej sprężarki do ok. 16 600, 32 100 lub 44 600 obr/min. Układ sterowania napędem umożliwia utrzymanie stałej prędkości obrotowej niezależnie od obciążenia nie przekraczającego jego maksymalnej wartości.



Rys. 1. Schemat stoiska do badań sprężarek: 1- Sprężarka badawcza, 2- Wlot powietrza, 3- Wylot powietrza, 4- Pomocniczy wylot powietrza, 5- Barokomor, 6- Przekładnia szybkobieźna, 7- Przekładnia wolnobieźna, 8- Silnik elektryczny, 9- Lemniskata pomiarowa

Powietrze zasysane poprzez wlot (2) przepływa przez barokomorę (5) uporządkowującą przepływ, umieszczoną w niej lemniskatą (9) służącą do pomiaru masowego natężenia przepływu przy względnie małych oporach przepływu, sprężane jest przez sprężarkę badawczą (1) i wypływa poprzez wylot (3).

Na wlocie do barokomory umieszczona jest dławica umożliwiająca uzyskanie podciśnienia co pozwala badać sprężarki o większym zapotrzebowaniu mocy niż moc zainstalowanego napędu elektrycznego. Podciśnienie w barokomorze realizowane jest przez sprężarkę badawczą, a jego wartość jest ograniczona ciśnieniem statycznym na wylocie, które nie może być niższe od ciśnienia atmosferycznego. Kolejnym ograniczeniem podciśnienia w barokomorze jest wartość ok. 50 000 Pa (0.5 bara). Przy większym podciśnieniu na wlocie do sprężarki wyniki badań przestają być wiarygodne, co wynika z braku zachowania warunków podobieństwa.

Za badaną sprężarką umieszczona jest dławica umożliwiająca wyznaczenie danej gałęzi charakterystyki sprężarki od punktu maksymalnego oddławienia (maksymalnej przepustowości i minimalnego sprężu) aż do granicy pracy niestatecznej (pompażu). Dławica jest urządzeniem działającym stosunkowo wolno i z tego względu pomiędzy sprężarką i dławicą umieszczony jest szybkodziałający zawór przeciwpompażowy umożliwiający natychmiastowe wyprowadzenie sprężarki z pompażu poprzez jego otwarcie.

W celu wyeliminowania wpływu warunków atmosferycznych na wyniki badań sprężarki redukuje się je do warunków normalnych tzn. $T=288.15 [K]$, $p_c=101325[Pa]$ (760[mm Hg]).

Zredukowaną prędkość obrotową oraz zredukowane masowe natężenie przepływu wyznacza się z zależności:

$$\bar{n}_{zr} = \bar{n} \sqrt{\frac{288.15}{T_{c1}}}; \quad \dot{m}_{zr} = \dot{m} \frac{101325}{p_{c1}} \sqrt{\frac{T_{c1}}{288.15}}$$

gdzie:

- \bar{n}_{zr} [%] - zredukowana względna prędkość obrotowa sprężarki;
- \bar{n} [%] - rzeczywista względna prędkość obrotowa sprężarki;

T_{c1}	[K]	- temperatura całkowita powietrza na wlocie do sprężarki (w barokomorze);
\dot{m}_{zr}	[kg/s]	- zredukowane masowe natężenie przepływu powietrza na wlocie do sprężarki;
\dot{m}	[kg/s]	- masowe natężenie przepływu powietrza na wlocie do sprężarki;
p_{c1}	[Pa]	- ciśnienie całkowite powietrza na wlocie do sprężarki (w barokomorze)

Badania sprężarki prowadzi się dla wybranych zredukowanych prędkości obrotowych ustawiając rzeczywistą prędkość obrotową na podstawie mierzonej temperatury całkowitej powietrza w barokomorze.

Znając spodziewane zapotrzebowanie mocy dla danej sprężarki badawczej dobierane jest odpowiednie podciśnienie w barokomorze.

Dla ustalonej zredukowanej prędkości obrotowej $\bar{n}_{zr} = const$ badania zaczyna się przy całkowicie otwartej dławicy na wylocie sprężarki – maksymalnej przepustowości i minimalnym sprężu dokonując stosownych pomiarów. Kolejne pomiary wykonuje się po częściowym przydławieniu przepływu przez sprężarkę, czyli przymknięciu dławicy za sprężarką, aż do osiągnięcia granicy pracy statecznej. Przydławianie przepływu przez sprężarkę powoduje wzrost ciśnienia za sprężarką i stopniowe zmniejszanie się masowego natężenia przepływu w trakcie wyznaczania gałęzi charakterystyki. Podczas badań monitorowane jest ciśnienie za sprężarką – szczególnie starannie gdy spodziewane jest osiągnięcie granicy pracy statecznej gdyż tylko ten zapis wyznacza punkt pomiarowy. Wynika to z faktu, że sprężarkę trzeba niezwłocznie wyprowadzić z pompażu poprzez bardzo szybkie oddławienie przepływu (otwarcie zaworu przeciwpompazowego) i nie ma czasu na dokonywanie kolejnych zapisów pomiarów. Po osiągnięciu granicy pracy statecznej przepływ za sprężarką należy całkowicie oddławić, a po całkowitym otwarciu dławicy zawór przeciwpompazowy zamknąć. Następnie cykl badań jest powtarzany dla tej samej lub kolejnej prędkości obrotowej.

Niedopuszczalne są zmniejszania prędkości obrotowej przed całkowitym oddławieniem przepływu za sprężarką, gdyż może to skutkować wprowadzeniem sprężarki głęboko w zakres pracy niestatecznej - co może grozić trwałym uszkodzeniem obiektu badań. Nie wolno też zapomnieć o zamknięciu zaworu przeciwpompazowego przed rozpoczęciem wyznaczania kolejnej gałęzi charakterystyki.

Spręż całkowity sprężarki π_{cs} oraz jej całkowitą sprawność η_{cs} w danym punkcie pomiarowym można obliczyć mierząc ciśnienia całkowite oraz temperatury całkowite przed sprężarką p_{c1}, T_{c1} (w barokomorze) i za sprężarką p_{c2}, T_{c2} (przed dławicą):

$$\pi_{cs} = \frac{p_{c2}}{p_{c1}}; \quad \eta_{cs} = \frac{\pi_{cs}^{\frac{k-1}{k}}}{\frac{T_{c2}}{T_{c1}} - 1}$$

Natomiast określenie masowego natężenia przepływu powietrza na wlocie do sprężarki dokonuje się wykorzystując lemniskatę pomiarową składającą się z krzywoliniowego odcinka wlotowego, cylindrycznego kanału pomiarowego i kanału dolotowego do badanej sprężarki. Określenie masowego natężenia przepływu w lemniskacie pomiarowej polega na wykorzystaniu jej szczególnej właściwości, t.j. stałego pola prędkości (ciśnień statycznych) w kanale pomiarowym w odległości $0.3 \div 0.5$ średnicy mierzonej od końca krzywoliniowego odcinka

wlotowego. Znając średnicę kanału pomiarowego $d[m]$ oraz mierząc różnicę ciśnień statycznego i całkowitego powietrza przy ścianie kanału $H_{rz}[Pa]$ zredukowane masowe natężenie przepływu powietrza $\dot{m}_{zr} = f(H)_{rz}$ w lemniskacie pomiarowej można określić z zależności gazodynamicznych:

$$\dot{m}_{zr} = A \lambda \varepsilon(\lambda)$$

gdzie:

$$A = P_c \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{1}{R_G T_c}} \frac{\pi d^2}{4} K_G; \lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{P_{c1} - H_{rz}}{P_{c1}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}; \varepsilon(\lambda) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

przy:

$$k = 1.4$$

$$T_c = 288.15 [K]$$

$$p_c = 101325 [Pa]$$

$$R_G = 287.053 \left[\frac{J}{kgK} \right]$$

$$K_G = 0.995$$

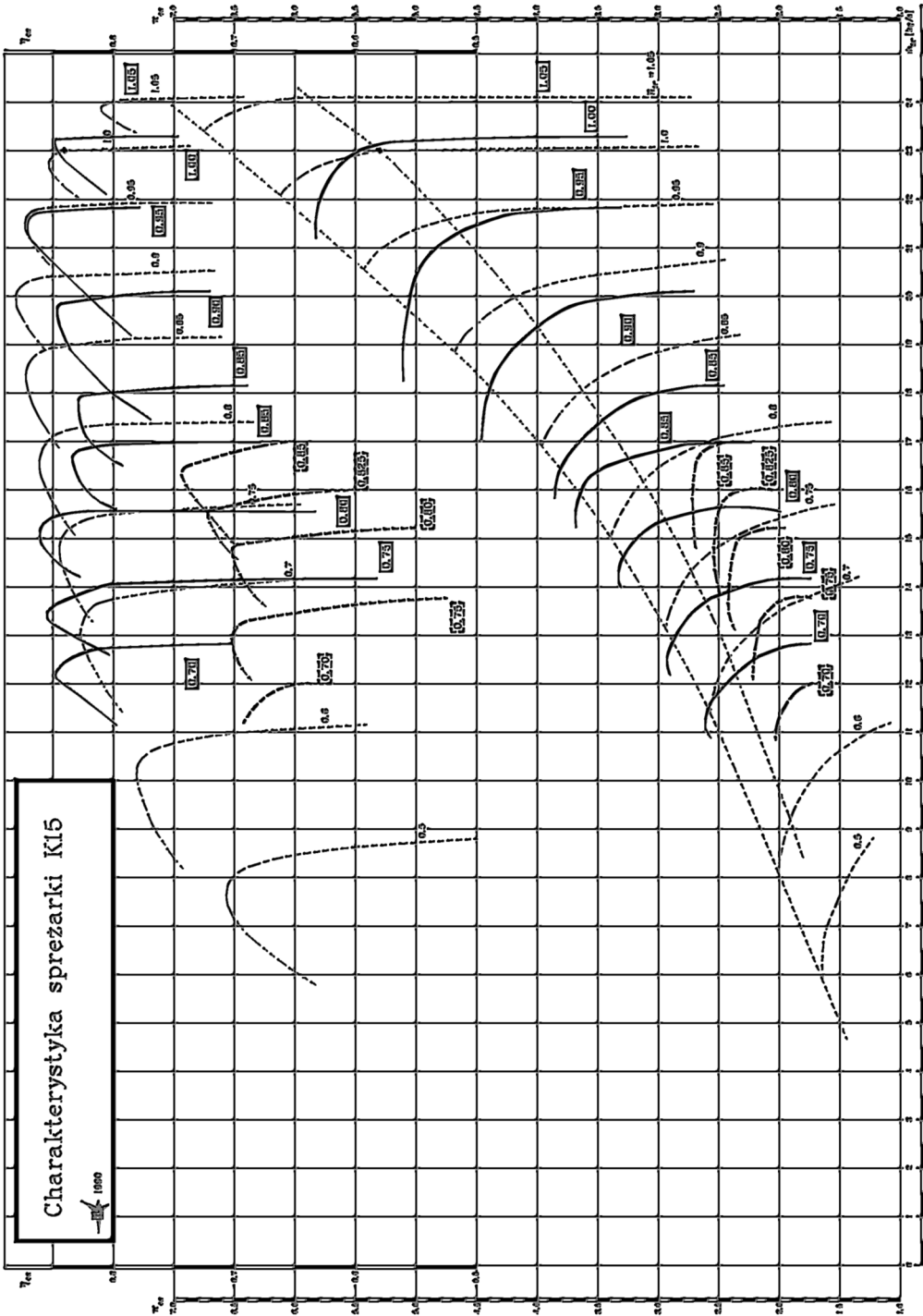
$p_{c1} [Pa]$ - aktualne ciśnienie całkowite panujące w barokomorze

Przed rozpoczęciem prób konieczne jest wzorcowanie lub przynajmniej sprawdzenie poszczególnych przetworników i torów pomiarowych przewidzianych do pomiarów parametrów badawczych sprężarki. W celu możliwości eliminacji błędnych wyników pomiary poszczególnych parametrów sprężarki są zwielokrotniane i realizowane niezależnymi torami pomiarowymi, a wyniki weryfikowane po każdej serii prób. Sprawdzenie układów pomiarowych realizowane jest również przed każdą serią badań szczególnie gdy stwierdzone zostały nieprawidłowości.

W trakcie badań konieczne jest monitorowanie szeregu dodatkowych parametrów pracy zarówno sprężarki jak i samego stoiska badawczego takich jak poziomy dopuszczalnych drgań, ciśnień i temperatur układów smarowania oraz układów chłodzenia, co wymaga wyszkolonego i zgranego zespołu, gdzie każdy zna swoje zadania lecz jednocześnie w razie potrzeby może zastąpić innego uczestnika badań.

Wyniki badań zazwyczaj przedstawiane są w postaci wykresu zależności sprężu całkowitego sprężarki π_{cs} i sprawności całkowitej sprężarki η_{cs} w funkcji zredukowanego masowego natężenia przepływu \dot{m}_{zr} dla danych zredukowanych względnych (lub bezwzględnych) prędkości obrotowych \bar{n}_{zr} (lub n_{zr}).

Na rys. 2 przedstawiono wyniki badań sprężarki silnika K15 zaprojektowanego w ILOT na tle obliczeniowej charakterystyki sprężarki. Pogrubione linie przedstawiają charakterystykę badawczą. Pogrubione linie ciągłe wyznaczone są przy zamkniętym zaworze upustowym znajdującym się za trzecim stopniem sprężarki, natomiast pogrubione linie przerywane wyznaczone są przy otwartym zaworze upustowym. Linie cienkie przerywane przedstawiają obliczeniową charakterystykę sprężarki, obliczeniową linię współpracy „sprężarka-turbina” oraz obliczeniową granicę pracy statecznej. Na wykresie pokazane jest również położenie punktu obliczeniowego.



Rys. 2. Badawcza charakterystyka sprężarki K15 z otwartym (linia pogrubiona przerywana) i zamkniętym zaworem upustowym (linia ciągła pogrubiona) na tle charakterystyki obliczeniowej (linia cienka przerywana)

W punkcie obliczeniowym sprężarka silnika K15 pobiera 4,5 MW mocy, co wobec mocy silnika napędzającego sprężarkę 2,25 MW wymagało maksymalnie możliwego poddławienia przepływu przez barokomorę i sprężarkę.

Rozbieżności pomiędzy charakterystyką badawczą i obliczeniową pomimo iż wyniki badań obarczone są także błędami świadczą o niedoskonałości metod obliczeniowych, które były dostępne w Instytucie Lotnictwa na etapie projektowania silnika K15, a brak funduszy uniemożliwił ich dopracowanie i nie pozwolił na określenie wpływu niedokładności na etapie produkcyjnym elementów sprężarki ze szczególnym uwzględnieniem rzeczywistych odchyłek kształtów łopatek na charakterystykę sprężarki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Balicki W. [i inni]: Lotnicze silniki turbinowe, konstrukcja – eksploatacja – diagnostyka, Część , Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2010.
- [2] Dźygadło Z. [i inni]: Zespoły wirnikowe silników turbinowych w: „Napędy lotnicze”, WKiŁ, Warszawa 1982.
- [3] Archiwum ILOT: Raporty i Sprawozdania z badań