

Paweł Wirkowski
Akademia Marynarki Wojennej

WPLYW ZMIAN USTAWIENIA ŁOPATEK KIEROWNICY SPRĘŻARKI OSIOWEJ NA PRACĘ TURBINOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

STRESZCZENIE

Artykuł dotyczy zagadnienia wpływu zmian ustawienia regulowanych łopatek kierownicy stopnia osiowego sprężarki turbinowego silnika spalinowego na parametry pracy samej sprężarki i całego silnika. Nieprawidłowe funkcjonowanie układu zmian nastawy regulowanych łopatek może prowadzić w skrajnych przypadkach do pracy niestatecznej sprężarki i silnika. Jest to sytuacja niedopuszczalna ze względu na powstające wówczas przeciążenia mechaniczne i cieplne silnika skutkujące jego uszkodzeniem. W artykule zaprezentowano analizę teoretyczną powyższego zjawiska oraz przedstawiono wyniki badań własnych na obiekcie rzeczywistym.

Słowa kluczowe:

silnik turbinowy, sprężarka osiowa, regulowane łopatki kierownicy.

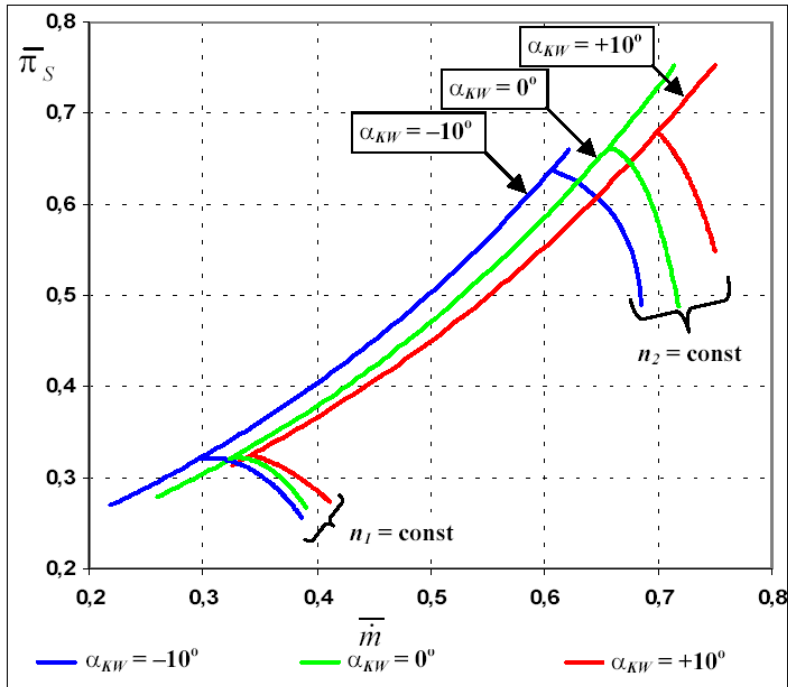
Parametry, skróty i oznaczenia:

- α_l – kąt spływu strumienia powietrza z łopatek wieńca kierownicy
- α_{KW} – kąt ustawienia regulowanych łopatek kierownic
- β_1, β_2 – kąty natarcia i spływu strumienia powietrza z łopatek wirnika
- c_a – składowa osiowa prędkości bezwzględnej strumienia
- c_{1a} – składowa osiowa prędkości bezwzględnej strumienia na wlocie wieńca wirnika
- $c_{1a\text{obl}}$ – wartość obliczeniowa składowej osiowej prędkości bezwzględnej na wlocie wieńca wirnika
- η_s^* – sprawność efektywna sprężarki
- i – kąt napływu strumienia powietrza na łopatki wirnika

| | |
|--------------|---|
| KS | – komora spalania |
| \dot{m} | – masowe natężenie przepływu powietrza |
| n | – prędkość obrotowa wirnika sprężarki |
| p_{pal} | – ciśnienie paliwa |
| P_{nom} | – moc nominalna silnika |
| π^*_s | – spręż sprężarki |
| SNC | – sprężarka niskiego ciśnienia |
| SWC | – sprężarka wysokiego ciśnienia |
| TNC | – turbina niskiego ciśnienia |
| TWC | – turbina wysokiego ciśnienia |
| u | – prędkość obwodowa |
| w_1, w_2 | – prędkość względna strumienia powietrza na wlocie i wylocie z wieńca wirnika |
| Δw_u | – zawirowanie strumienia powietrza w wirniku |
| z | – liczba łopatek kierownicy wstępnego zawirowania |

WSTĘP

Podzespołem turbinowego silnika spalinowego, szczególnie wrażliwym na zmianę swego stanu technicznego w procesie eksploatacji, jest sprężarka. Dopływające do sprężarki zanieczyszczone powietrze atmosferyczne powoduje między innymi ciągłą zmianę kształtu kanałów międzyłopatkowych, zwiększa chropowatość powierzchni łopatek oraz zmianę masy wirnika sprężarki. Wpływa to w istotny sposób na stateczną pracę sprężarki, zmianę jej charakterystyki oraz osiągi i sprawność silnika. Jeżeli w konstrukcji sprężarki występuje układ zmiany ustawienia regulowanych łopatek kierownic, mający za zadanie optymalne kojarzenie współpracy wszystkich zespołów silnika turbinowego poprzez ciągłą korektę charakterystyki sprężarki, to występujące zakłócenia w pracy tego układu będą powodowały zmiany pracy sprężarki i silnika o charakterze podobnym jak zmiany prędkości obrotowej czy też zanieczyszczone kanały międzyłopatkowe sprężarki. Na rysunku 1. przedstawiona jest ogólna charakterystyka sprężarki osiowej silnika turbinowego uwzględniająca zmianę kąta ustawienia nastawnych łopatek kierownic.

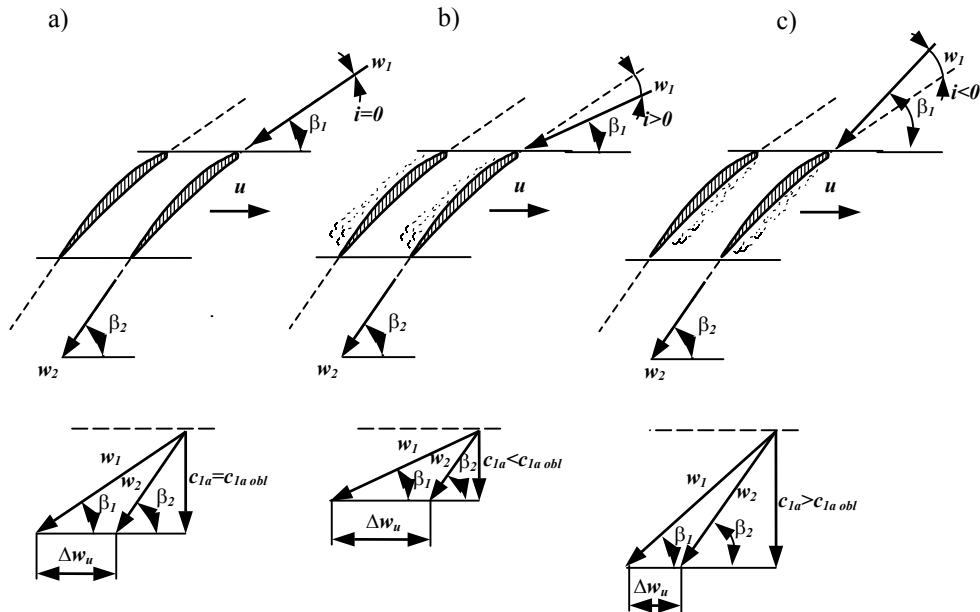


Rys. 1. Charakterystyka sprężarki osiowej wyposażonej w nastawne łopatki kierownic:
 α_{KW} – kąt ustawienia nastawnych łopatek kierownic;
 n_1, n_2 – prędkość obrotowa wirnika sprężarki; $\bar{\pi}_S$ – względny spręż sprężarki;
 \bar{m} – względne masowe natężenie przepływu powietrza

CEL BADAŃ

Celem badań przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym było określenie wpływu nieprawidłowego funkcjonowania układu sterującego nastawnymi łopatkami kierownicy wstępnego zawirowania sprężarki osiowej silnika turbinowego na parametry pracy sprężarki i silnika.

Charakterystyka sprężarki będąca zależnością sprężu π^*_S i sprawność efektywnej η^*_S sprężarki od strumienia masy przepływającego przez nią powietrza \dot{m} i prędkości obrotowej n umożliwi określenie najdogodniejszych warunków współpracy sprężarki z innymi podzespołami silnika. Służy ona dla doboru optymalnych warunków regulacji przepływu powietrza i oceny wpływu czynników eksploatacyjnych na parametry sprężarki.



Rys. 2. Schemat opływu łopatek wieńca wirnikowego stopnia osiowego sprężarki przy stałej prędkości obrotowej wirnika i zmiennych kątach napływu strumienia powietrza:
 a) obliczeniowy kąt napływu; b) dodatni kąt napływu; c) ujemny kąt napływu

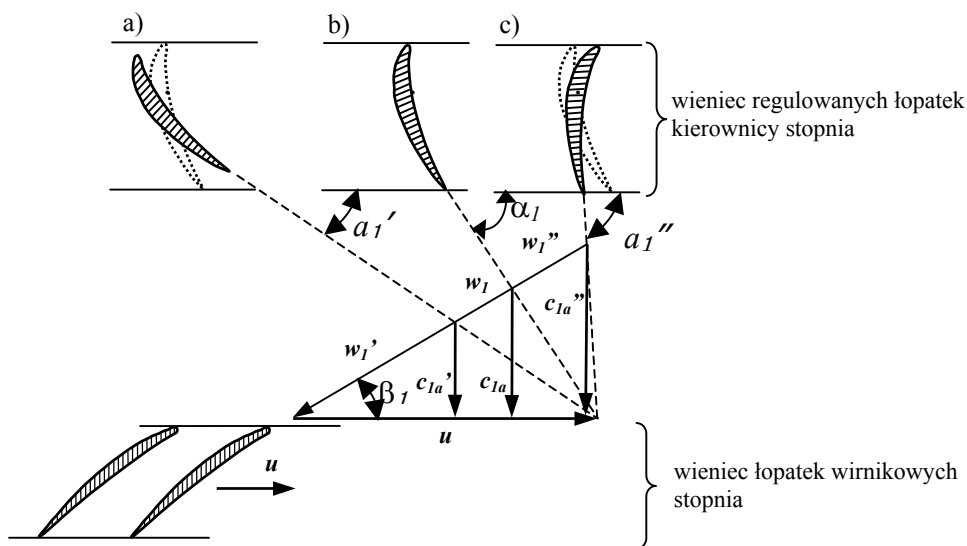
Powstawanie zjawiska pracy niestatecznej wyjaśnia rysunek 2. Przedstawiony jest na nim schemat opływu łopatki wirnika stopnia osiowego będącego w ruchu ze stałą prędkością obrotową n , dla którego dokonywana jest zmiana natężenia przepływu powietrza \dot{m} . Rysunek 2a przedstawia schemat opływu w warunkach, dla których natężenie przepływu powietrza odpowiada optymalnej sprawności stopnia. Wektory prędkości względnej w_1 i w_2 mają kierunek równoległy do linii szkieletowej profilu łopatki, co sprzyja laminarnemu przepływowi strumienia w kanałach międzyłopatkowych. Zmniejszenie natężenia przepływu powietrza (rys. 2b) w porównaniu do warunków obliczeniowych, przy utrzymanej stałej prędkości obwodowej u , powoduje zmniejszenie składowej osiowej prędkości bezwzględnej c_{1a} , co skutkuje zwiększeniem kąta napływu i strumienia na łopatki wirnika. Sprzyja to odrywaniu się warstwy przyściennej na wypukłych (grzbietowych) powierzchniach łopatek i powstawaniu obszarów wirowych, w których następuje lokalne obniżenie ciśnienia statycznego.

Zjawisko o podobnym charakterze występuje na wklęsłej powierzchni łopatki (rys. 2c), gdy natężenie przepływu powietrza ulega zwiększeniu przy zachowaniu stałej prędkości obwodowej.

Przy krytycznych wartościach kątów napływu i przez powstałe obszary wirowe może nastąpić cofnięcie strumienia powietrza w kierunku wlotu sprężarki zwane pompazem, powodujące gwałtowne pulsacje strumienia przenoszone na konstrukcję silnika w postaci drgań. Jest to zjawisko niepożądane i niebezpieczne ze względu na przeciążenia cieplne i mechaniczne konstrukcji silnika [2].

W związku z opisanym powyżej zjawiskiem sprężarka powinna być tak regulowana, by w zakresie eksploatacyjnych prędkości obrotowych linia współpracy sprężarki z siecią przebiegała z pewnym zapasem pracy statecznej. Główną zasadą regulacji sprężarki podczas zmiany jej prędkości obrotowej lub natężenia przepływu jest utrzymywanie wartości kątów napływu strumienia i zbliżonych do zera. Jednym ze stosowanych sposobów regulacji sprężarki osiowej jest zmiana geometrii jej kanału przepływowego poprzez zastosowanie regulowanej kierownicy wlotowej lub regulowanych kierownic kilku pierwszych stopni sprężania [2].

Takie rozwiązanie umożliwia dokonanie jednoczesnych zmian kąta napływu strumienia na łopatki wieńców wirnikowych stopni poprzez zmianę kątów ustawienia łopatek kierownic w trakcie zmian prędkości obrotowej sprężarki. Rysunek 3. przedstawia istotę regulacji łopatek nastawnych kierownic na przykładzie jednego stopnia sprężania.



Rys. 3. Istota regulacji stopnia osiowego sprężarki za pomocą zmiany kąta ustawienia łopatek wieńców kierownic przy zmieniającej się prędkości przepływu strumienia:
 a) zmniejszona prędkość osiowa; b) obliczeniowa prędkość osiowa;
 c) zwiększona prędkość osiowa

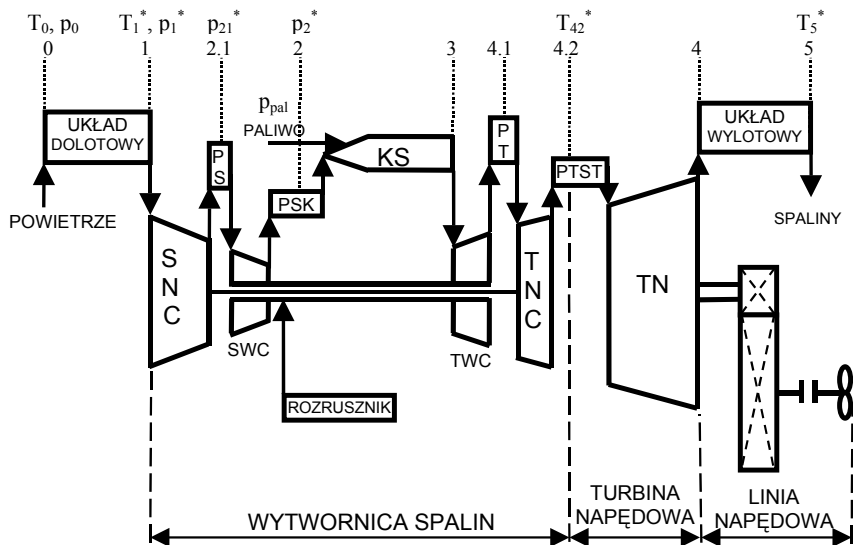
Średnim wartościom eksploatacyjnego zakresu prędkości obrotowej wirnika sprężarki odpowiada sytuacja na rysunku 3b, dla której przyporządkowane są kierunki i wartości prędkości z indeksem I . Występuje wówczas pośrednie ustawienie kątowe łopatek wieńca kierownicy, dla którego kąt napływu strumienia na łopatki wieńca wirnika nie powoduje zaburzeń w przepływie tego strumienia przez kanały międzyłopatkowe. W przypadku realizacji mniejszych wartości prędkości obrotowej sprężarki, a więc występowania mniejszej wartości składowej osiowej prędkości bezwzględnej c_{1a}' , istnieje konieczność zmniejszenia kąta spływu strumienia z regulowanych łopatek wieńca kierownicy (rys. 3a) w takim zakresie, aby utrzymać taką samą wartość kąta napływu strumienia na łopatki wirnika. Analogiczna sytuacja ma miejsce podczas pracy sprężarki z większymi prędkościami obrotowymi wirnika, dla których wzrasta wartość składowej osiowej prędkości bezwzględnej c_{1a}'' . Wówczas w celu utrzymania statecznej pracy sprężarki, a więc stałej wartości kąta napływu strumienia na łopatki wirnika, należy zwiększyć kąt spływu strumienia z łopatek kierownicy – rys. 3c.

Zastosowanie w danej formie konstrukcyjnej silnika turbinowego układu regulacji geometrii kanałów przepływowych wywiera znaczący wpływ na przebieg procesów niustalonych [3].

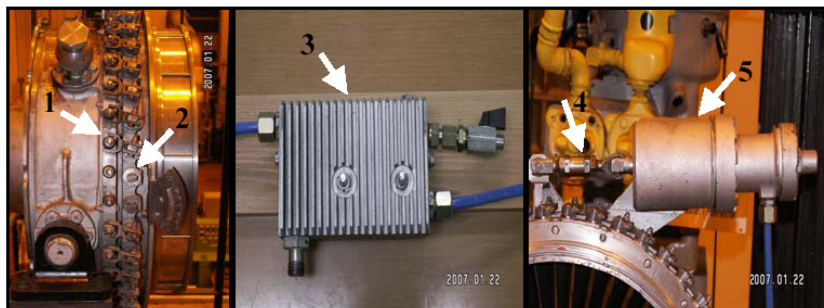
OBIEKT I PRZEBIEG BADAŃ

Obiektem badań jest okrętowy turbinowy silnik spalinowy typu DR 77. Jest to silnik trójwirikowy ze zwrotną komorą spalania typu pierścieniowo-rurowego oraz nawrotną turbiną napędową. Na rysunku 4. przedstawiono schemat ideowy silnika z zaznaczonymi przekrojami kontrolnymi części przepływowej oraz mierzonymi parametrami.

W układzie konstrukcyjnym sprężarki rozpatrywanego silnika zastosowany jest wieniec łopatek kierownicy wlotowej, które mają możliwość zmiany ustawienia kąta natarcia (zmianę geometrii kanału przepływowego sprężarki) w zależności od obciążenia silnika. Procesem tym steruje układ regulacji, którego medium roboczym jest sprężone powietrze uzyskiwane w sposób ciągły zza sprężarki wysokiego ciśnienia. Elementy układu regulacji nastawnych łopatek zostały przedstawione na rysunku 5.

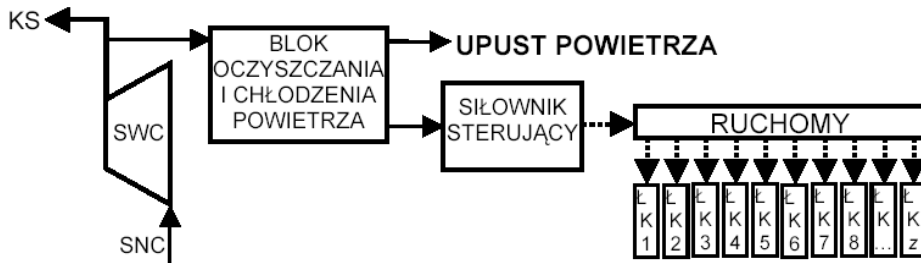


Rys. 4. Schemat ideowy silnika turbinowego typu DR 77



Rys. 5. Elementy układu regulacji nastawnych łopatek silnika typu DR 77:
 1 – pierścień ruchomy; 2 – łopatka kierownicy; 3 – blok chłodzenia i oczyszczania;
 4 – cięgno; 5 – siłownik sterujący

Schemat przepływu sygnału sterującego przedstawia rysunek 6. Powietrze zza sprężarki wysokiego ciśnienia przez blok oczyszczania i chłodzenia doprowadzane jest do przestrzeni roboczych siłownika. Wywierany na elementy siłownika nacisk sprężonego powietrza powoduje przemieszczanie się tłoka sterującego, który połączony jest z ruchomym pierścieniem przemieszczającym się po obwodzie kałuża sprężarki. Pierścień za pomocą dźwigni połączony jest z łopatkami kierownic, które na skutek przesuwania się pierścienia wykonują ruch obrotowy, zmieniając tym samym kąt splywu α_1 .



Rys. 6. Schemat ideowy mechanizmu zmiany nastawy łopatek kierownicy:
KS – komora spalania; SWC – sprężarka wysokiego ciśnienia; ŁK – łopatka kierownicy

W bloku oczyszczania i chłodzenia powietrza znajdują się otwory technologiczne zamknięte podczas pracy silnika, służące do okresowego oczyszczania wewnętrznych kanałów przepływowych bloku. Przez te otwory podczas realizacji badań zmniejszono wartość strumienia powietrza podawanego do siłownika, upuszczając je do atmosfery. Skutkowało to zmianą kąta ustawienia łopatek α_{KW} , a w konsekwencji zmianą geometrii kanału przepływowego.

Badania przeprowadzono dla obciążenia silnika $0,5P_{nom}$, dla którego kąt ustawienia α_{KW} regulowanych łopatek przyjmuje wartość -4° . Podczas zmiany obciążenia w całym zakresie od biegu jałowego do uzyskania mocy nominalnej silnika kąt ustawienia łopatek zmienia się w zakresie od -18° do $+18^\circ$. Podczas badań dokonano pomiaru i rejestracji parametrów pracy silnika przedstawionych w tabeli 1., dla ustalonego obciążenia $0,5P_{nom}$ i zmiennych (poprzez upust) trzech ustawień kątowych regulowanych łopatek: A – $\alpha_{KW} = -4^\circ$, B – $\alpha_{KW} = -11^\circ$, C – $\alpha_{KW} = -18^\circ$. Zmiennym ustawieniom kątowym odpowiada zmienny strumień upuszczanego powietrza \dot{m}_A , \dot{m}_B , \dot{m}_C o najmniejszej wartości w przypadku A i największej w przypadku C.

Tabela 1. Parametry pracy silnika typu DR77 mierzone podczas badań

| Oznaczenie parametru | Zakres pomiarowy | Opis parametru |
|----------------------|--------------------------------------|--|
| n_{SNC} | $0 \div 20000$ [min^{-1}] | prędkość obrotowa wirnika niskiego ciśnienia |
| n_{SWC} | $0 \div 22000$ [min^{-1}] | prędkość obrotowa wirnika wysokiego ciśnienia |
| n_{TN} | $0 \div 10000$ [min^{-1}] | prędkość obrotowa wirnika turbiny napędowej |
| p_1 | $-0,4 \div 0$ [bar] | podciśnienie powietrza na wlocie do sprężarki |
| p_{21} | $0 \div 6,0$ [bar] | ciśnienie powietrza za sprężarką niskiego ciśnienia |
| p_2 | $0 \div 16,0$ [bar] | ciśnienie powietrza za sprężarką wysokiego ciśnienia |
| p_p | $0 \div 100,0$ [bar] | ciśnienie paliwa przed wtryskiwaczami |
| T_1 | $-70 \div 180$ [$^\circ\text{C}$] | temperatura powietrza na wlocie do sprężarki |
| T_{42} | $0 \div 1000$ [$^\circ\text{C}$] | średnia temperatura spalin przed turbiną napędową |

WYNIKI BADAŃ

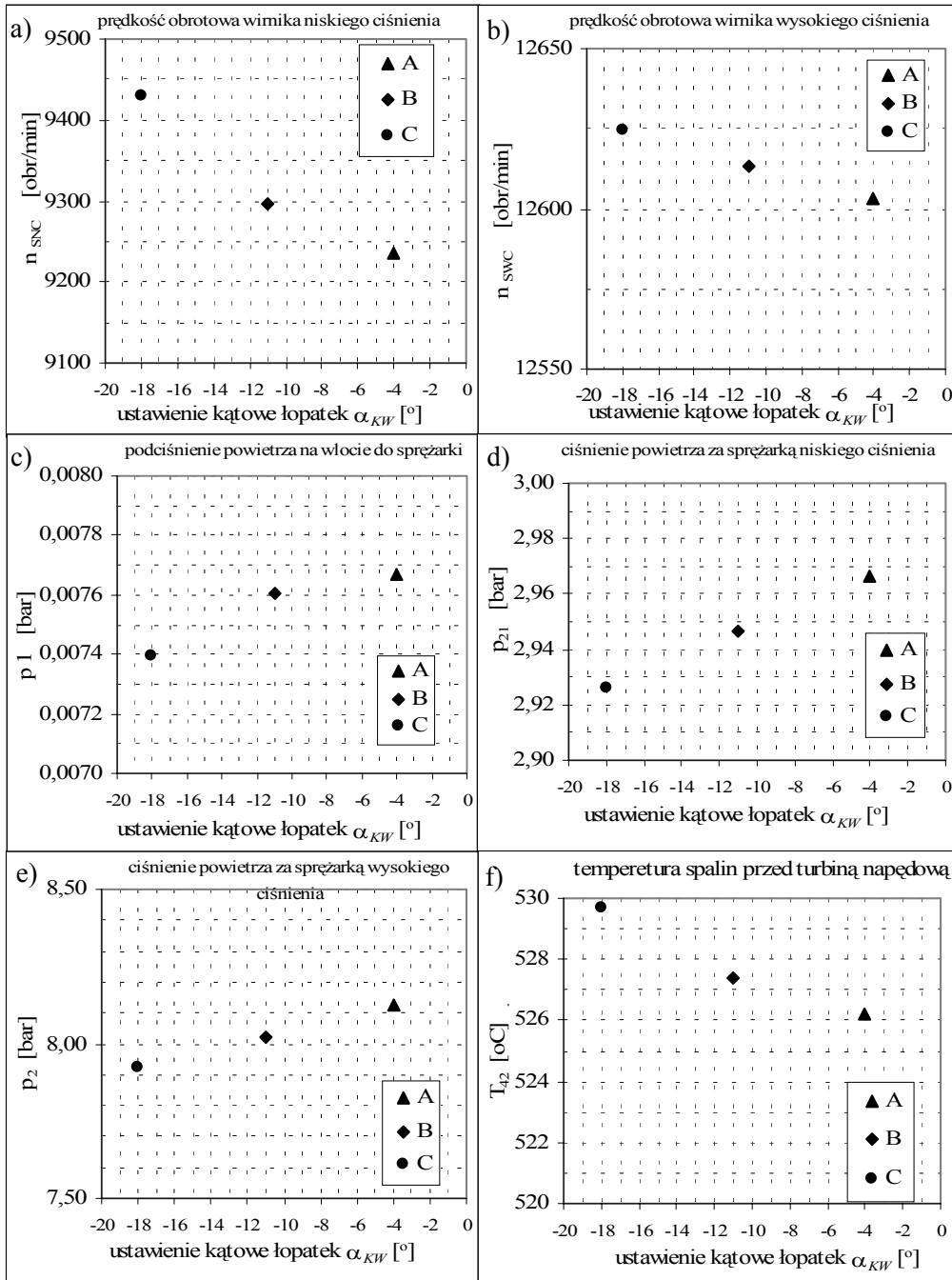
Wyniki przeprowadzonych badań w postaci przebiegu czasowego mierzonych parametrów dla rozpatrywanych ustawień kątowych łopatek regulowanej kierownicy wlotowej przedstawia rysunek 7. Prezentowane są na nim przebiegi tych parametrów, które najbardziej reagują na zmianę ustawienia regulowanych łopatek.

Zmiana ustawienia łopatek z położenia A do położenia C powoduje zwiększenie oporów przepływu powietrza przez wieniec kierownicy. Następstwem tego jest zmniejszenie podciśnienia p_l na wlocie kierownicy wstępnego zawirowania (rys. 7c). Skutkuje to spadkiem ciśnienia w dalszej części kanału przepływowego sprężarki i silnika (rys. 7d, e). Zmiana ustawienia łopatek powoduje również zwiększenie prędkości obrotowej wirników sprężarki. Najbardziej zauważalny jest wzrost prędkości obrotowej sprężarki niskiego ciśnienia (rys. 7a) powodowany bezpośrednim oddziaływaniem nieprawidłowo ustawionych łopatek regulowanej kierownicy na tę sprężarkę. Zakres zmian tego parametru wynosi ponad 2% wartości prędkości obrotowej dla niezakłóconego ustawienia kąтового łopatek.

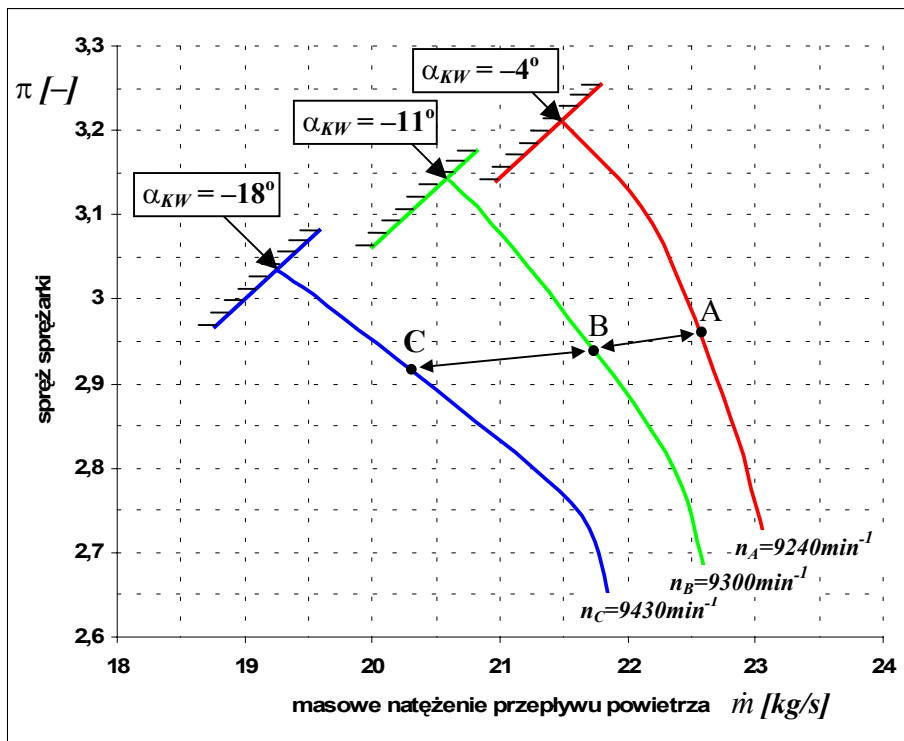
Występujące połączenie gazodynamiczne między sprężarkami niskiego i wysokiego ciśnienia łądodzi przenoszone na sprężarkę wysokiego ciśnienia zakłócenia pracy sprężarki niskiego ciśnienia. W związku z tym zakres zmian prędkości obrotowej wirnika SWC jest mniejszy. Dla przeprowadzonego doświadczenia wynosi on poniżej 1% i znajduje się w zakresie błędu pomiarowego czujnika.

Zmiany podciśnienia powietrza wynoszą ponad 5% wartości niezakłóconej tego parametru. Natomiast zmiany ciśnienia powietrza za sprężarką niskiego i wysokiego ciśnienia wynoszą odpowiednio ponad 1,3% i ponad 2,4% wartości odpowiadającej niezakłóconemu ustawieniu kątowemu $\alpha_{KW} = -4^\circ$. W doświadczeniu zauważona została również zmiana wartości temperatury spalin na skutek zmiany ustawienia kąтового łopatek, pomimo że zakres tych zmian, wynoszący poniżej 1%, znajduje się w zakresie błędu pomiarowego czujnika.

Zmianę parametrów pracy sprężarki niskiego ciśnienia badanego silnika powodowaną zmianą kąтового ustawienia łopatek kierownicy wlotowej przedstawia również rysunek 8. Widoczna jest na nim zmiana wartości sprężu sprężarki oraz masowego natężenia przepływającego przez sprężarkę powietrza występująca na skutek wprowadzanych zmian ustawienia regulowanych łopatek kierownicy wlotowej.



Rys. 7. Zmiana parametrów pracy silnika DR w funkcji kąta ustawienia regulowanych łopatek kierownicy wlotowej: A – $\alpha_{KW} = -4^\circ$; B – $\alpha_{KW} = -11^\circ$; C – $\alpha_{KW} = -18^\circ$



Rys. 8. Charakterystyka sprężarki niskiego ciśnienia silnika DR dla zmiennych ustawień kątowych łopatek kierownicy wlotowej: α_{KW} – kąt ustawienia nastawnych łopatek kierownic; A – $\alpha_{KW} = -4^\circ$, B – $\alpha_{KW} = -11^\circ$, C – $\alpha_{KW} = -18^\circ$; n_A , n_B , n_C – prędkość obrotowa wirnika sprężarki niskiego ciśnienia

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych i badań eksperymentalnych można wnioskować, że nieprawidłowe funkcjonowanie układu regulacji nastawnych łopatek kierownicy wlotowej lub kierownic pierwszych stopni sprężarki silnika turbinowego wywiera, w mniejszym lub większym stopniu, negatywny wpływ na pracę sprężarki i osiągi całego silnika.

Wielowirnikowość silnika turbinowego (dwa stopnie sprężania przy różnych prędkościach obrotowych) zmniejsza skutki wadliwego ustawienia regulowanych łopatek. W związku z tym sprężarki silników trójwirnikowych nie wymagają nastawnych łopatek kierownic tyłu stopni co sprężarka silnika dwuwirnikowego o takich samych osiąгах.

Dotychczasowe wstępne badania potwierdzają konieczność prowadzenia kontroli prawidłowego funkcjonowania układów sterowania nastawnych łopatek kierownic. Podyktowane jest to między innymi eliminacją tego czynnika z szeregu innych świadczących o stanie technicznym silnika, identyfikowanych podczas badań diagnostycznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Balicki W., Szczeciński S., *Diagnozowanie lotniczych silników turbinowych*, Wydawnictwo Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 1997.
- [2] Dzygadlo Z., *Napędy Lotnicze. Zespoły wirnikowe silników turbinowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.
- [3] Korczewski Z., *Identyfikacja procesów gazodynamicznych w zespole sprężarkowym okrętowego turbinowego silnika spalinowego dla potrzeb diagnostyki*, AMW, rozprawa habilitacyjna, Gdynia 1998.
- [4] Korczewski Z., Wirkowski P., *Modelling gasodynamic processes within turbine engines' compressors equipped with variable geometry of flow duct*, IV International Scientifically-Technical Conference „Explo-Diesel & Gas Turbine '05”, Gdańsk – Międzyzdroje – Kopenhaga, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2005, s. 227 – 236.
- [5] Marschal D. J., Muir D. E., Saravanamuttoo H. I. H., *Health Monitoring of Variable Geometry Gas Turbines for the Canadian Navy*, The American Society of Mechanical Engineers 345 E, 47 St., New York, N.Y.10017.

ABSTRACT

The paper deals with the issue of effect of changes in setting blades of adjustable steering wheel in an axial compressor of a turbine internal combustion engine on performance parameters of the compressor and the whole engine. Faulty functioning of the setting system may lead, in extreme cases, to unstable performance of the compressor and engine. This is not acceptable due to mechanical and thermal overloads of the engine resulting in engine damage. The paper presents a theoretical analysis of the phenomenon discussed and the results of investigations done on own real object.

Recenzent kmdr dr hab. inż. Zbigniew Korczewski, prof. AMW