

WPLYW ZMIAN KĄTA USTAWIENIA ŁOPATEK KIEROWNICY WLOTOWEJ SPRĘŻARKI OSIOWEJ NA PARAMETRY PRACY OKRĘTOWEGO TURBINOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Paweł WIRKOWSKI

Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów
81-103 Gdynia, ul. Śmidowicza 69, tel. 0 58 626 27 56, e-mail: p.wirkowski@amw.gdynia.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano analizę teoretyczną zagadnienia wpływu zmian ustawienia regulowanych łopatek kierownicy stopnia osiowego sprężarki turbinowego silnika spalinowego na parametry pracy samej sprężarki jak i całego silnika. Przedstawiono również wyniki badań własnych na obiekcie rzeczywistym. Wprowadzane zakłócenia w prawidłowym funkcjonowaniu układu zmian nastawy regulowanych łopatek kierownic miały swoje odzwierciedlenie w wartościach mierzonych parametrów.

Słowa kluczowe: silnik turbinowy, sprężarka osiowa, regulowane łopatki kierownicy.

INFLUANCE OF AXIAL COMPRESSOR INLET STATOR VANES ANGLE SETTING ON MARINE GAS TURBINE ENGINE WORK PARAMETERS

Summary

This paper presents theoretical analysis of problem influence of changes settings variable stator vanes axial compressor of gas turbine engine on work parameters of compressor and engine. Results of own researches on real engine are presented too. Incorrect operation of change setting system of variable vanes caused changes of measured parameters values.

Keywords: gas turbine engine, axial compressor, variable stator vanes.

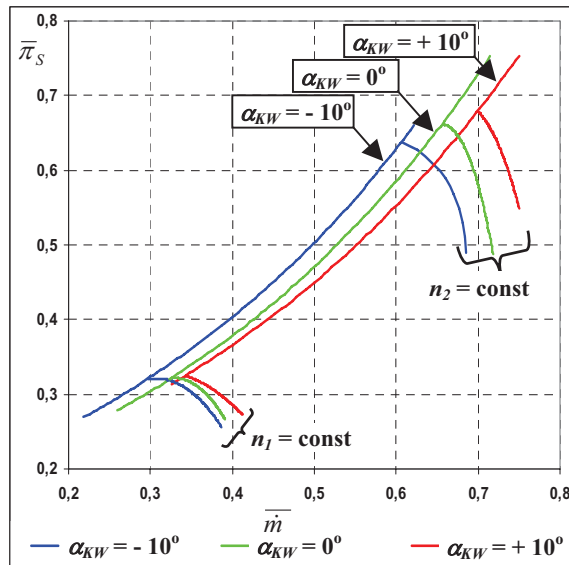
Wykaz parametrów, skrótów i oznaczeń:

α_1	- kąt splywu strumienia powietrza z łopatek wieńca kierownicy,
α_{KW}	- kąt ustawienia regulowanych łopatek kierownic,
β_1, β_2	- kąty natarcia i splywu strumienia powietrza z łopatek wirnika,
c_a	- składowa osiowa prędkości bezwzględnej strumienia,
c_{1a}	- składowa osiowa prędkości bezwzględnej strumienia na wlocie wieńca wirnika,
c_{1aobl}	- 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	- współczynnik zawirowanie strumienia powietrza w wirniku,
z	- liczba łopatek kierownicy wstępnego zawirowania.

1. WSTĘP

Jeżeli w konstrukcji sprężarki silnika turbinowego 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 zakresu pracy sprężarki i silnika o charakterze podobnym jaki powodują zmiany prędkości obrotowej wirnika czy też zanieczyszczone kanały międzyłopatkowe sprężarki. Na rys. 1 przedstawiono ogólną charakterystykę sprężarki osiowej silnika turbinowego uwzględniającą zmianę kąta ustawienia nastawnych łopatek kierownic.



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

2. CEL BADAŃ

Praca jednostkowa stopnia sprężarki na danym promieniu definiowana z wykorzystaniem równania momentu ilości ruchu ma postać:

$$l_{st} = \omega r (c_{2u} - c_{1u}) = u \Delta c_u = u \Delta w_u \quad (1)$$

gdzie: ω – prędkość kątowa wirnika, u – prędkość obwodowa, r – promień wirnika, c_{1u}, c_{2u} – składowe obwodowe prędkości bezwzględnej strumienia przed i za wieńcem wirnika na promieniu r , $\Delta c_u, \Delta w_u$ – współczynnik zawirowania strumienia.

Praca ta jest stała na całej wysokości łopatki wirnika a suma tych prac jest pracą jednostkową stopnia [2]. Wprowadzenie zmiany ustawienia kąтового łopatek kierownicy przy utrzymaniu stałej prędkości obrotowej (stałe u) powoduje zmianę kąta natarcia β_1 (rys. 2). Skutkuje to zmianą składowej osiowej prędkości bezwzględnej c_{1a} a więc zmianą natężenia przepływu strumienia powietrza \dot{m} oraz zmianą współczynnika zawirowania powietrza Δw_u . Wpływa to na sprawność i pracę stopnia.

Celem badań 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 sprawności efektywnej η_s^* sprężarki od strumienia masy przepływającego przez nią powietrza \dot{m} i prędkości obrotowej n , umożliwia określenie najdogodniejszych warunków współpracy

sprężarki z innymi podzespołami silnika. Służy ona doborowi optymalnych warunków regulacji przepływu powietrza i oceny wpływu czynników eksploatacyjnych na parametry sprężarki.

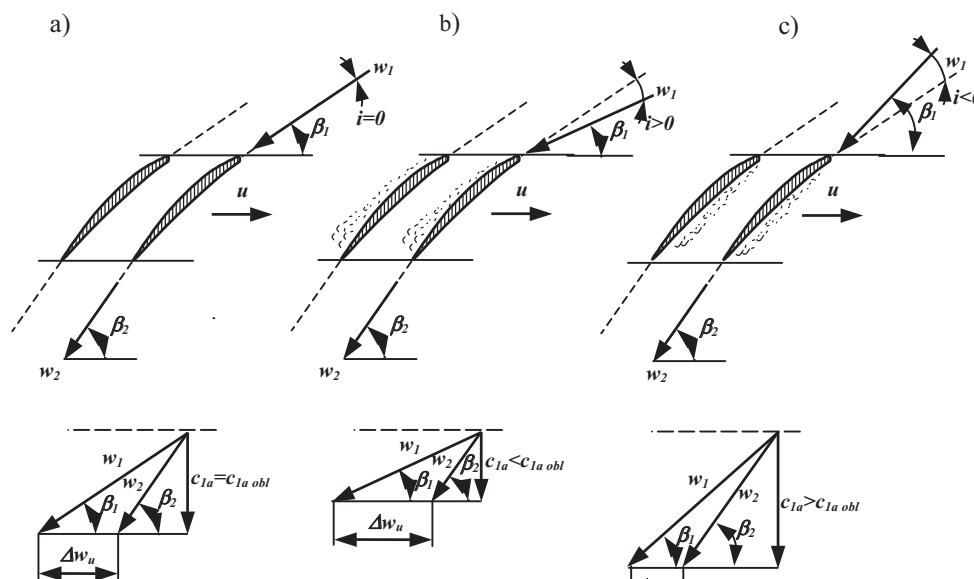
Powstawanie zjawiska pracy niestatecznej przedstawia rys. 2. Zaprezentowano na nim schemat opływu łopatki wirnika stopnia osiowego będącego w ruchu ze stałą prędkością obrotową n , dla którego dokonywana jest zmiana natężenia przepływu powietrza \dot{m} . Rys. 2a przedstawia schemat opływu w warunkach, dla których natężenie przepływu powietrza odpowiada optymalnej sprawności stopnia. Wektory prędkości względnej w_1 i w_2 mają wówczas kierunek równoległy do linii szkieletowej profilu łopatki, co sprzyja niezakłóconemu przepływowi strumienia w kanałach międzyłopatkowych. Zmniejszenie natężenia przepływu powietrza (rys. 2b) w porównaniu do warunków obliczeniowych, przy utrzymaniu 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 pompażem, 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].

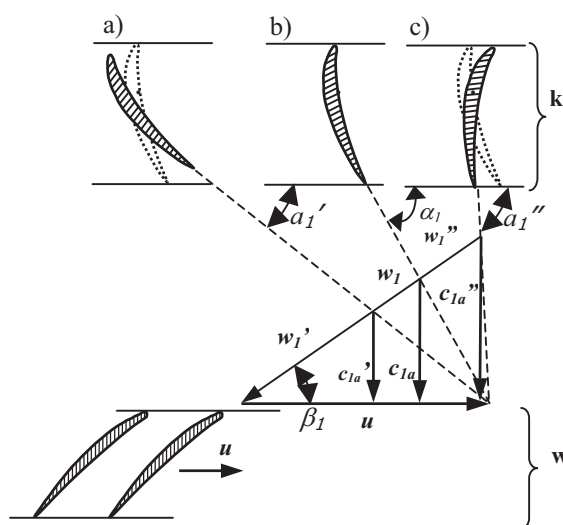
W związku z powyższym opisanym zjawiskiem sprężarka powinna być tak regulowana, aby w zakresie eksploatacyjnych prędkości obrotowych linia współpracy sprężarki z siecią przebiegała z pewnym zapasem pracy statecznej. Główną zasadą regulacji sprężarek podczas zmiany jej prędkości obrotowej lub natężenia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



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

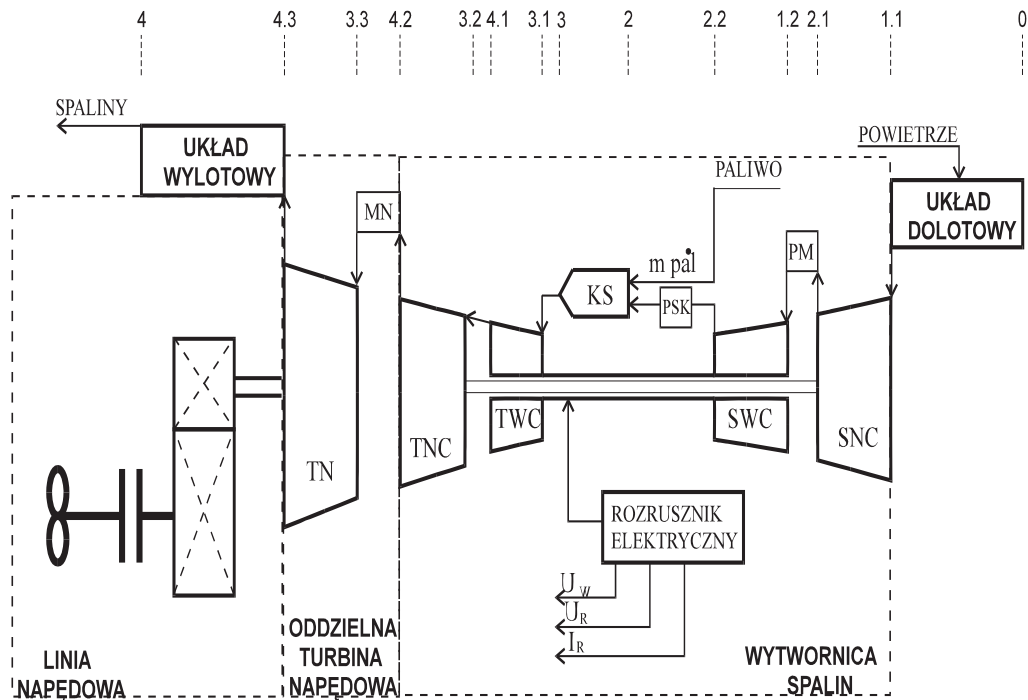
Takie rozwiązanie umożliwia dokonanie jednoczesnych zmian kąta napływu strumienia na łopatkach wieńców wirnikowych stopni poprzez zmianę kątów ustawienia łopatek kierownic w trakcie zmian prędkości obrotowej sprężarki. Rys. 3 przedstawia istotę regulacji łopatek nastawnych kierownic na przykładzie jednego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

Dla średnich wartości eksploatacyjnego zakresu prędkości obrotowej wirnika sprężarki odpowiada sytuacja na rys. 3b, dla której przyporządkowane są kierunki i wartości prędkości z indeksem 1. Występuje wówczas pośrednie ustawienie kątowe łopatek wieńca kierownicy, dla którego kąt napływu strumienia na łopatkach 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 splywu strumienia α_1 z regulowanych łopatek wieńca kierownicy (rys. 3a) w takim zakresie, aby utrzymać taką samą wartość kąta napływu strumienia na łopatkach wirnika β_1 . 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 łopatkach wirnika, należy zwiększyć kąt splywu strumienia z łopatek kierownicy – rys. 3c.



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; k – wieńiec regulowanych łopatek kierownic, w – wieńiec łopatek wirnika

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



Rys. 4. Schemat ideowy okrętowego turbinowego silnika spalinowego z oddzielną nawrotną turbiną napędową; TN – turbina napędowa, MN – przestrzeń między TN a TNC, TNC – turbina niskiego ciśnienia, TWC – turbina wysokiego ciśnienia, KS – komora spalania, m_{pal} – strumień masy paliwa, PSK – przestrzeń między KS a SWC, SWC – sprężarka wysokiego ciśnienia, SNC – sprężarka niskiego ciśnienia, PM – przestrzeń między sprężarkami [4]

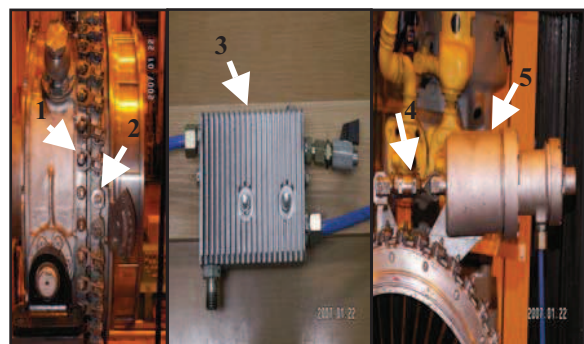
3. OBIEKT BADAŃ

Badania wpływu sposobu regulacji silnika turbinowego na parametry jego pracy prowadzone były na silniku typu DR 77, który wchodzi w skład układu napędowego okrętu raketowego. Jest to silnik trójwimkowy ze zwrotną komorą spalania typu pierścieniowo – rurowego oraz nawrotną turbiną napędową. Na rys. 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 z za sprężarki wysokiego ciśnienia. Elementy układu regulacji nastawnych łopatek zostały przedstawione na rys. 5.

Schemat przepływu sygnału sterującego przedstawia rys. 6. Powietrze z za 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 kadłuba sprężarki. Pierścień za pomocą dźwigni połączony jest z łopatkami kierownic, które na skutek przesuwania się pierścienia wykonują ruch obrotowy, zmieniając tym samym kąt splotu α_1 .

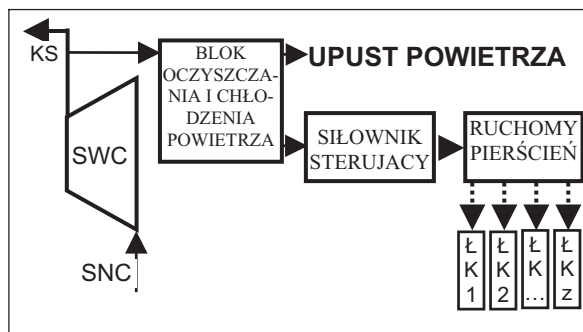


Rys. 5. Elementy układu regulacji nastawnych łopatek silnika typu DR 77:

- 1 – pierścień ruchomy, 2 – łopatka kierownicy,
- 3 – blok chłodzenia i oczyszczania, 4 – ciągnio,
- 5 – siłownik sterujący

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 silownika, upuszczając je do atmosfery. Skutkowało to zmianą kąta ustawienia łopatek α_{KW} , a w konsekwencji tego zmianą geometrii kanału przepływowego.



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

Badania przeprowadzono dla obciążenia silnika $0,5P_{nom}$, uwzględniając wpływ warunków atmosferycznych. Dla tego obciążenia 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 tab. 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— $\alpha_{KW} = -18^\circ$.

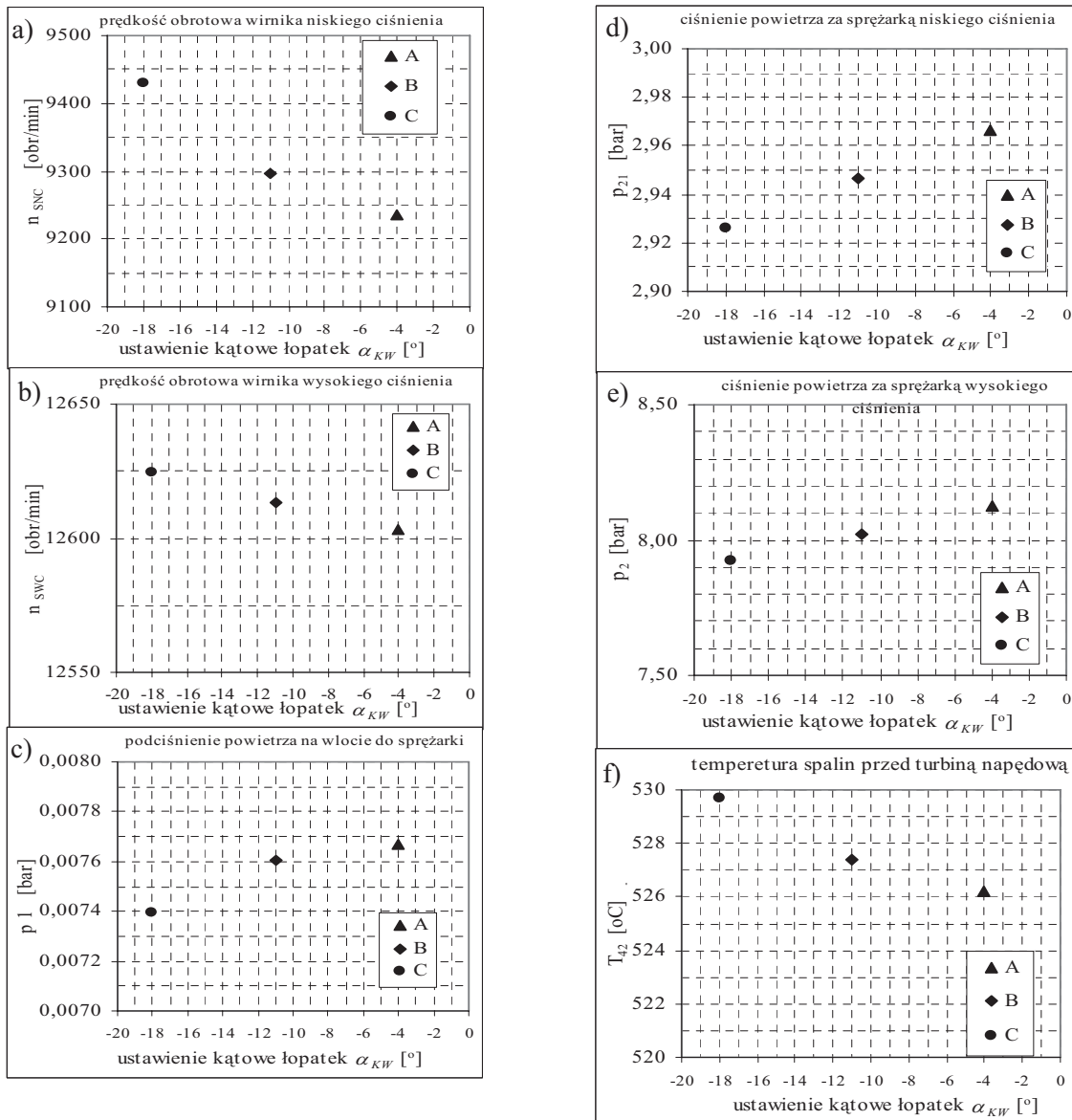
Tab. 1. Zakresy pomiarowe parametrów pracy silnika typu DR77 mierzonych podczas badań

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	$-0,04 \div 0$ [MPa]	podciśnienie powietrza na wlocie do sprężarki
P_{21}	$0 \div 0,6$ [MPa]	ciśnienie powietrza za sprężarką niskiego ciśnienia
P_2	$0 \div 1,6$ [MPa]	ciśnienie powietrza za sprężarką wysokiego ciśnienia
P_p	$0 \div 10,0$ [MPa]	ciśnienie paliwa przed wtryskiwaczami
T_1	$-70 \div 180$ [°C]	temperatura powietrza na wlocie do sprężarki
T_{42}	$0 \div 1000$ [°C]	średnia temperatura spalin przed turbiną napędową

Zmiennym ustawieniom kątowym odpowiadają różne wartości strumienia upuszczanego powietrza \dot{m}_A , \dot{m}_B , \dot{m}_C , o najmniejszej wartości w przypadku A i największej w przypadku C.

4. WYNIKI BADAŃ

Wyniki przeprowadzonych badań w postaci relacji pomiędzy wartościami mierzonych parametrów a rozpatrywanymi ustawieniami kątowymi łopatek regulowanej kierownicy wlotowej przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Zmiana parametrów pracy silnika DR77 w funkcji kąta ustawienia regulowanych łopatek kierownicy wlotowej:

$$A - \alpha_{KW} = -4^\circ, B - \alpha_{KW} = -11^\circ, C - \alpha_{KW} = -18^\circ$$

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_1 na wlocie kierownicy wstępnego zawirowania (rys. 7c). Skutkuje to spadkiem ciśnienia w dalszej części kanału przepływowego sprężarki i silnika (rys. 7de). 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 tą sprężarkę. Zakres zmian tego parametru wynosi ponad 2% wartości prędkości obrotowej dla niezakłóconego ustawienia kąтового łopatek.

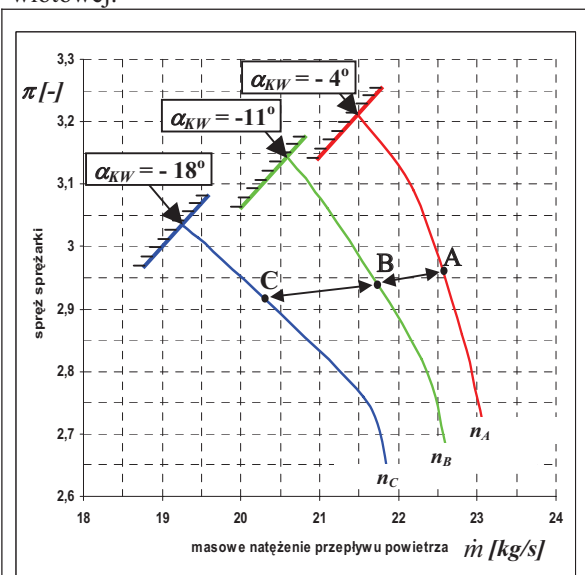
Występujące połączenie gazodynamiczne między sprężarkami niskiego i wysokiego ciśnienia łagodzi przenoszone na sprężarkę wysokiego ciśnienia zakłócenia pracy sprężarki niskiego ciśnienia. W związku z tym zakres zmian prędkości obrotowej wirnika SWC jest mniejszy. Dla przeprowadzonego doświadczenia wynosi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

Zmiany podciśnienia powietrza wynoszą ponad 5% niezakłóconej wartości 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 katowego 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 katowego ustawienia łopatek kierownicy wlotowej przedstawia również rys. 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. 8. Charakterystyka sprężarki niskiego ciśnienia silnika DR dla zmiennych ustawień katowych 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 SNC

Przedstawione wyniki badań mogą być wykorzystane w diagnozowaniu układów sterowania silnika, wspomagając istniejący od 1986 roku i stale modernizowany system diagnozowania okrętowych turbinowych silników spalinowych.

5. 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 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.

LITERATURA

- [1] Charchalis A.: *Diagnozowanie okrętowych silników turbinowych*. Wyd. AMW Gdynia 1991
- [2] Dźygadło 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, Wyd. Politechnika Gdańska, str. 227÷236, Gdańsk 2005.
- [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.



Mgr inż. **Paweł WIRKOWSKI**
– kierownik Laboratorium Eksploatacji Siłowni Okrętowych Akademii Marynarki Wojennej. Absolwent Wydziału Mechaniczno – Elektrycznego AMW. Po odbyciu stażu w dywizjonie okrętów raketowych w 2000 roku rozpoczął pracę w Instytucie Konstrukcji i Napędów Okrętowych AMW (obecnie Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów). Głównym obszarem zainteresowania jest diagnostyka okrętowych silników turbinowych oraz modelowanie procesów gazodynamicznych w silnikach turbinowych. Członek Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej oraz Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych.