

INVESTIGATION OF THE TURBOFAN WITH MIXER ENGINE MODEL SENSITIVITY OF THERMAL - FLOW PROCESSES MODIFICATION IN THE ENGINE'S COMPONENTS

Robert Jakubowski

*Rzeszow University of Technology
Department of Aircrafts and Aircraft Engines
W. Pola 3, 35-959 Rzeszów, Poland
tel.: +48 17 8651466 fax.: +48 17 8651942
e-mail: roberski@prz.edu.pl*

Abstract

The turbofan with mixer engine model sensitivity of the thermal-flow processes effectiveness in the engine components changes was analyzed. The model of turbofan engine with the mixed exhaust stream is so complicated to use the small deviation methods to solve this problem. On that reason the own author methods to analyze this problem was proposed. During investigation it was revealed that the changes of some processes effectiveness leads to change of pressure inflow to the mixer and this cause to change of mixer process effectiveness. The mixer pressure drop coefficient decreses so slightly but it should be taking into consideration during exact calculations.

In the main parts of paper the results of simulation of engine work parameters sensitivity of the thermal-flow processes effectiveness changes is presented and discussed. The specific thrust and specific fuel consumption were chosen as the engine work parameters. The model responds for change of internal process effectiveness in all range and for small step was analyzed. The conclusions are presented in final parts of the paper. The essential influence on relations between the change of the efficiency of rotor sets and with specific parameters has compression rate of compressor. Generally the improvement performers of the excellence processes give better effects at the lower temperature value in front of the turbine.

Keywords: aircraft engines, turbojet engines, modelling of turbojet engines, turbojet engine characteristics

BADANIA WRAŻLIWOŚCI MODELU SILNIKA DWUPRZEPLYWOWEGO Z MIESZALNIKIEM STRUMIENI NA ZMIANĘ EFEKTYWNOŚCI PROCESÓW PRZEPLYWOWO-CIEPLNYCH W ZESPOŁACH SILNIKA

Streszczenie

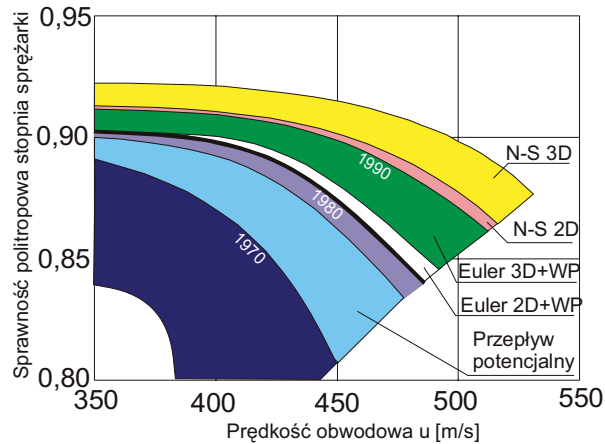
W pracy przeprowadzono analizę wrażliwości modelu silnika dwuprzepływowego z mieszalnikiem strumieni na zmianę efektywności procesów przepływowo-cieplnych w zespołach silnika. Ze względu na dużą złożoność modelu silnika z mieszalnikiem do analizy nie wykorzystano klasycznie stosowanej metody małych odchyłeń, tylko zaproponowano własne rozwiązanie. Dodatkowo wskazano, że zmiany sprawności procesów w niektórych zespołach silnika powodują zmiany parametrów strumieni na wejściu do mieszalnika, w wyniku czego zmienia się również sprawność mieszania, którą należałoby uwzględnić podczas dokładnych obliczeń. Następnie w pracy przedstawiono i omówiono wyniki badań symulacyjnych wpływu zmiany efektywności procesów w zespołach silnika na parametry jednostkowe silnika, tj. ciąg jednostkowy i jednostkowe zużycie paliwa. Zamieszczone wyniki dotyczą zmian parametrów jednostkowych dla przyrostu sprawności procesów od umownie przyjętych za obowiązujące do jedności (proces doskonały) oraz dla elementarnych przyrostów tychże wskaźników doskonałości. Ustalono, że na relacje pomiędzy zmianą sprawności zespołów wirnikowych, a parametrami jednostkowymi istotny wpływ ma spręż sprężarki. Generalnie poprawa wskaźników doskonałości procesów daje lepsze efekty im niższa jest wartość temperatury przed turbiną.

Słowa kluczowe: silniki lotnicze, silniki odrzutowe, modelowanie silników odrzutowych, charakterystyki silnika odrzutowego

1. Wstęp

Zagadnienie wpływu zmiany efektywności procesów przepływowo-ciepłych w zespołach silnika na jego charakterystyki użytkowe jest istotne z dwóch zasadniczych powodów. Jednym z nich jest ocena możliwości poprawy właściwości użytkowych silnika poprzez podnoszenie sprawności zachodzących w nim procesów. Drugim jest wskazanie tych zespołów, których nawet nieznaczne zużycie eksploatacyjne istotnie pogarsza właściwości użytkowe silnika.

Należy zauważyć, że na przestrzeni rozwoju lotnictwa oprócz innych aspektów, właśnie doskonalenie procesów przepływowo-ciepłych odegrało decydującą rolę w doskonaleniu konstrukcji silników lotniczych. Stało się to możliwe dzięki wykorzystywaniu coraz nowszych technik pomiarowych oraz narzędzi obliczeniowych w zakresie badań, co pozwoliło poznać i wyjaśnić szereg zjawisk występujących w silniku turbinowym. Dzięki temu zaistniała możliwość uwzględnienia tego podczas tworzenia nowych konstrukcji. Przykładem może być chociażby prezentowany na rys 1 wzrost sprawności politropowej sprężarki, który wynika z wykorzystania nowoczesnych narzędzi projektowych oraz technik obliczeniowych pozwalających precyzyjnie uwzględnić złożoność zjawisk zachodzących w procesie sprężania.



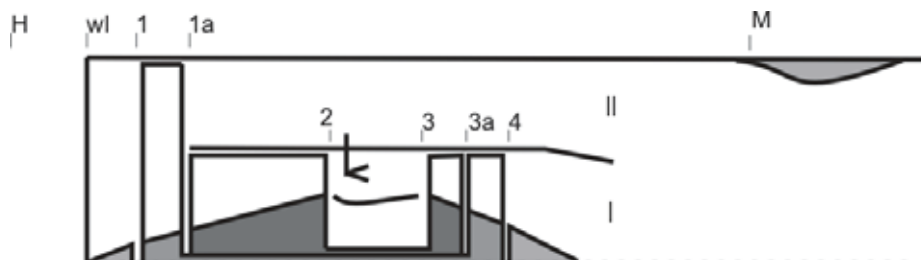
Rys. 1. Wpływ użytych technika obliczeniowych na sprawność stopnia sprężarki osiowej [1]
 Fig. 1. The design calculation technique influence on the axial compressor stage efficiency [1]

Eksploatacja silnika powoduje zużywanie się jego elementów, przez co obniża się ich sprawność. Konsekwencją tego jest pogorszenia charakterystyk użytkowych zespołu napędowego. Znajomość relacji pomiędzy obniżeniem sprawności poszczególnych zespołów, a pogorszeniem właściwości użytkowych silnika pozwala wskazać te zespoły, których degradacja istotnie wpływa na zmniejszenie osiąarów silnika. Niewątpliwie stanowi to ważną informację wskazującą, że dany zespół powinien być projektowany i wykonany tak, aby możliwie ograniczyć możliwość jego zużywania się. Jest to także przesłanka do prowadzenia bieżącej kontroli jego stanu technicznego w czasie pracy.

Określenie relacji pomiędzy efektywnością procesów przepływowo-ciepłych w zespołach, a właściwościami użytkowymi silnika prowadzi się poprzez poszukiwanie zależności pomiędzy wskaźnikami charakteryzującymi efektywność procesów, a parametrami charakteryzującymi efektywność pracy silnika. Dla silnika turbinowego wskaźnikami efektywności procesów w zespołach są: sprawności sprężarek i turbin, sprawność cieplna komory spalania i dopalacza oraz wskaźniki strat ciśnienia w nieruchomych zespołach silnika. Zaś jako parametry charakteryzujące pracę silnika przyjmuje się przeważnie ciąg jednostkowy oraz jednostkowe zużycie paliwa, pracą obiegu bądź sprawności silnika. Do badania tych relacji powszechnie wykorzystuje się metodę małych odchyłań [6,7], która pozwala określić wartości i kierunki zmian badanych wielkości. O ile stosunkowo prosto można tę metodę zastosować do prostych form konstrukcyjnych silnika (silnik jednoprzepływowy) przy znaczącym uproszczeniu modelu silnika

(np. dla gazu doskonałego), to dla bardziej skomplikowanych modeli silników turbinowych metoda ta jest prawie nie możliwa do wykorzystania [4]. Szczególnie dotyczy to silnika dwuprzepływowego z mieszalnikiem strumieni, gdzie występują rozbudowane relacje pomiędzy parametrami pracy poszczególnych zespołów, a jednostkowymi wskaźnikami pracy silnika. W niniejszej pracy ocenę wrażliwości modelu przeprowadzono poprzez analizę przyrostów badanych parametrów spowodowanych przyrostem wybranych wskaźników charakteryzujących doskonałość procesów wewnętrznych w silniku.

2. Model silnika dwuprzepływowego z mieszalnikiem strumieni



Rys. 2. Silnik dwuprzepływowy z mieszalnikiem strumieni
Fig. 2. By-pass engine with a mixer stream

Do badań symulacyjnych wykorzystano model silnika dwuprzepływowego z mieszalnikiem strumieni, który został zbudowany w celu analizy pracy samolotu wielozadaniowego wyposażonego w ten typ napędu. Podstawowe założenia jakie on uwzględniał to: jednowymiarowy model przepływu spełniający zasadę zachowania masy, pędu i energii, w oparciu o które wyznaczono średnie wartości parametrów termodynamicznych przepływu w przekrojach kontrolnych (rys 1.) oraz ujęcie czynnika roboczego jako gaz półdoskonały (wg zależności z pracy [2]). Dodatkowo uwzględniono upust powietrza z za sprężarki na chłodzenie turbiny wysokiego ciśnienia.

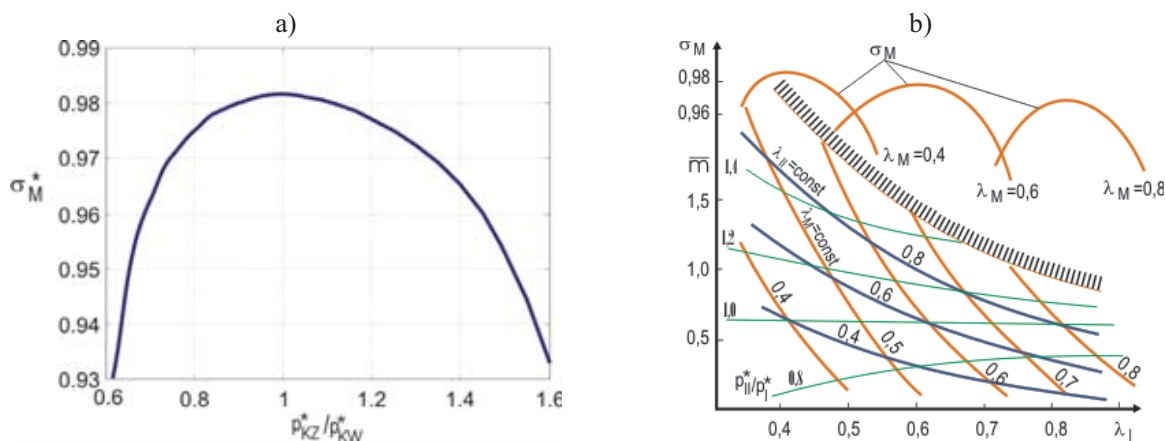
Dokładny opis modelu silnika został przedstawiony w pracy [3]. W niniejszym opracowaniu zostanie zaprezentowany jedynie model mieszalnika, ponieważ temu elementowi poświęcone jest znacznie mniej miejsca w literaturze. Model start mieszalnika opracowano na podstawie charakterystyki przedstawionej w pracy [5] rys 3.

Strata ciśnienia w mieszalniku wyraża się następującą zależnością:

$$P_M^* = \sigma_M^* P_{sr_wej}^* \quad (1)$$

gdzie średnie ciśnienie czynnika na wejściu do mieszalnika:

$$P_{sr_wej}^* = \frac{P_{KW}^* A_I + P_{KZ}^* A_{II}}{A_I + A_{II}} \quad (2)$$



Rys. 3. a) Model strat mieszalnika, b) charakterystyka mieszalnika silnika dwuprzepływowego [5]
Fig. 3. a) Mixer pressure losses model, b) characteristic of constant area mixer [5]

Oznaczenia występujące w zamieszczonej charakterystyce mieszalnika (rys. 3b) wyrażają:

$\bar{m}_M = \dot{m}_{KZ} / \dot{m}_{KW} \sqrt{T_{II}^* / T_I^*}$ - zredukowany stosunek wydatków strumieni na wejściu do mieszalnika,

$\lambda = \frac{V}{a_{kr}} = Ma \sqrt{\frac{T}{T_{kr}}}$ - liczba Laval'a.

σ_M^* - strata ciśnienia całkowitego w mieszalniku.

Przyjęty model wynika z analizy charakterystyki zamieszczonej na rys. 3b, z której wynika, że straty mieszania istotnie zależą od stosunku prędkości, co przekłada się na zależność od stosunku ciśnień całkowitych strumieni napływających do mieszalnika. Gdy prędkości strumieni są równe, to ciśnienia całkowite na wejściu do mieszalnika są równe $p_{II}^* / p_I^* = 1$. Wtedy wartość współczynnika strat ciśnienia w mieszalniku σ_M osiąga najwyższą wartość, która wynosi nawet pow. 98%. Gdy stosunek ciśnień jest inny, to proces mieszania zachodzi z większymi stratami. Jednakże nawet przy najmniej korzystnych stosunkach ciśnień strumieni wpływających do mieszalnika, wartość współczynnika strat ciśnienia w mieszalniku nie spada poniżej 90%. Można natomiast zauważyć, że wartość prędkości po zmieszaniu w znikomym stopniu wpływa na straty ciśnienia w mieszalniku. Pozwoliło to na przyjęcie zaproponowanego modelu strat w mieszalniku, gdzie wartość współczynnika strat zależy jedynie od wartości ciśnienia strumieni na wejściu do mieszalnika.

3. Metodyka badań wrażliwości modelu silnika dwuprzepływowego z mieszalnikiem strumieni na zmianę efektywności procesów przeplywowo-cieplnych w zespołach silnika

W badaniach skoncentrowano się nad oceną zmian ciągu jednostkowego k_j oraz jednostkowego zużycia paliwa c_j w zależności od zmiany wskaźników doskonałości procesów wewnętrznych w silniku dla różnych wartości parametrów obiegu termodynamicznego silnika. Na podstawie opracowanego modelu silnika [3] badane wielkości można przedstawić jako funkcje następujących grup parametrów:

$$\begin{bmatrix} k_j \\ c_j \end{bmatrix} = f(\text{warunki_lotu}, \text{parametry_pracy}, [\eta]), \quad (3)$$

gdzie:

$$\text{warunki_lotu} = [H, Ma],$$

$$\text{parametry_pracy} = [\mu, \pi_w^*, \pi_s^*, T_3^*],$$

$$[\eta] = [\sigma_{WL}^*, \sigma_{KS}^*, \sigma_M^*, \sigma_{dysz}^*, \eta_w^*, \eta_s^*, \eta_{TWC}^*, \eta_{TNC}^*, \eta_{mWC}^*, \eta_{mNC}^*, \eta_{KS}^*]. \quad (4)$$

Na podstawie analizy danych literaturowych silników wartości wskaźników doskonałości procesów przeplywowo-cieplnych dla wspólnego silnika dwuprzepływowego przyjęto wg danych w tabeli 1. Wielkości te określono jako parametry wyjściowe oznaczając ogólnie jako η_{sil_wyj} .

Tab. 1 Wartości wskaźników jakości przyjęte dla dwuprzepływowego z mieszalnikiem strumieni
Tab. 1 Heat-flow efficiency coefficients for turbofan engine with the mixed streams

σ_{WL}^*	η_w^*	η_{SWC}^*	σ_{KS}^*	η_{KS}	η_{TWC}^*	η_{TNC}^*	$\sigma_{kan_z}^*$	σ_{miesz}^*	σ_{dysz}^*
0,97	0,9	0,87	0,98	0,99	0,88	0,9	0,97	0,98	0,97

Dla tak dobranych parametrów określono ciąg jednostkowy i jednostkowe zużycie paliwa, które przyjęto jako parametry odniesienia i oznaczono je przez P_{sil_wyj} . Następnie zmieniając wybrany wskaźnik doskonałości procesu w zespole silnika w zakresie od przyjętej wartości

wyjściowej do jedyńki (proces idealny) badano jego wpływ na zmianę jednostkowych parametrów pracy silnika. W celu porównania wyniku zdefiniowano parametry względne. Względna wartość wskaźnika jakości została wyrażona jako odniesienie wartości zmienianego wskaźnika (i-tego) do jego wartości wyjściowej:

$$\bar{\eta}_i = \frac{\eta_i}{\eta_{i_sil_wyj}} \quad (5)$$

gdzie:

η_i - wartość wskaźnika jakości i-tego procesu w silniku,

$\eta_{i_sil_wyj}$ - wartość wskaźnika jakości i-tego procesu przyjęta jako wartość odniesienia.

Względna wartość parametru jednostkowego została zdefiniowana przez analogię wg zależności:

$$\bar{P}_{\eta_i} = \frac{P_{\eta_i}}{P_{sil_wyj}} \quad (6)$$

gdzie:

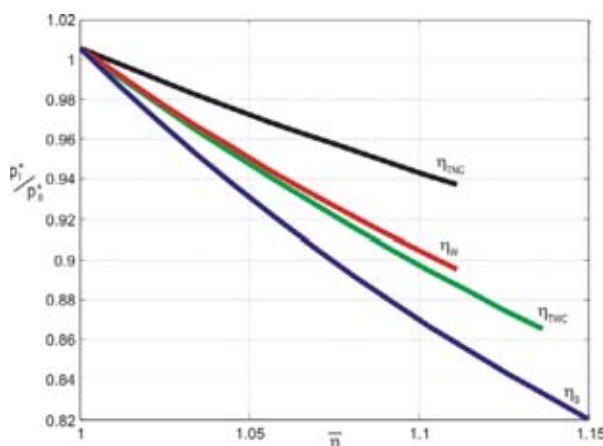
P_{η_i} - wartość badanego wskaźnika pracy silnika przy zmianie dla i-tego wskaźnika (η_i),

P_{sil_wyj} - wartość badanego wskaźnika efektywności eksploatacyjnej dla wyjściowych wartości wskaźników jakości $\eta_{i_sil_wyj}$.

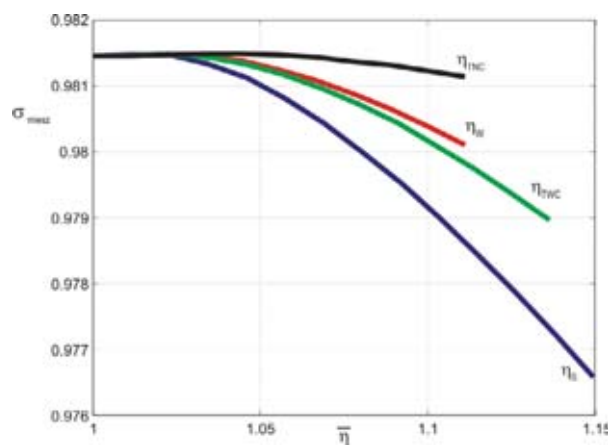
Dało to możliwość porównania wyników badań i zestawienia ich na wspólnym wykresie.

4. Wyniki badań

Na podstawie wyników badań w szerokim zakresie zmian wskaźników efektywności procesów, należy stwierdzić, że powodują one zmianę parametrów strumienia napływającego do mieszalnika, a przez to zmieniają warunki pracy tego zespołu. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys 4. Badany silnik, miał stopień dwuprzepływowości $\mu = 1$, temperaturę przed turbiną $T_3^* = 1500$ K, spręż wentylatora $\pi_W^* = 2,53$, spręż kanału wewnętrznego $\pi_{KW}^* = 18$. Przy tak dobranych parametrach pracy silnika, strumienie czynnika na wejściu do mieszalnika miały równe wartości ciśnienia, a współczynnik strat mieszania był powyżej 0,98.



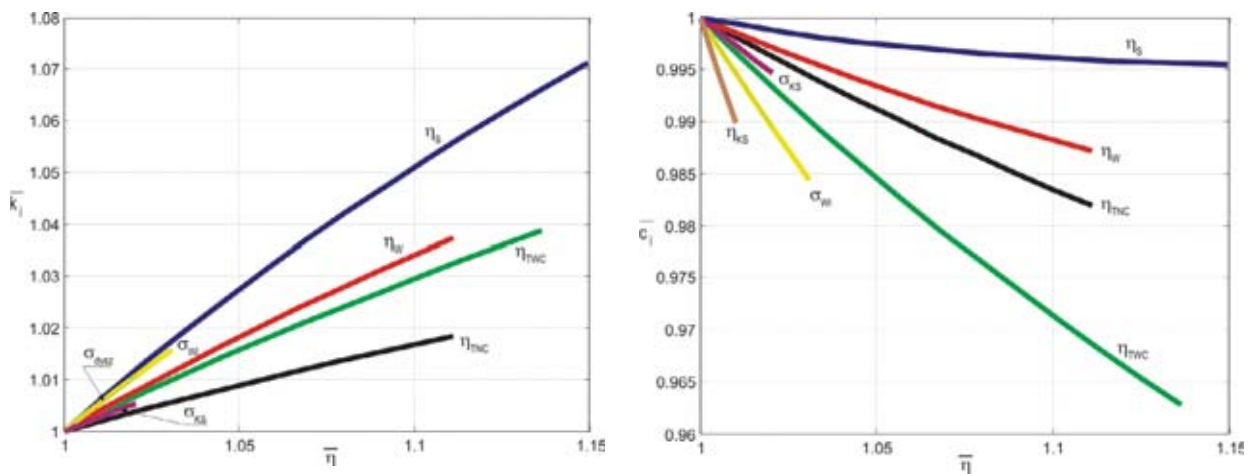
Rys. 4. Zmiana stosunku ciśnień całkowitych na wejściu do mieszalnika w wyniku podnoszenia sprawności zespołów wirnikowych silnika
Fig. 4. The stream inflow into the mixer pressure change as a results of the engine turbomachinery efficiency increasing



Rys. 5. Zmiana współczynnika strat ciśnienia w mieszalniku w wyniku podnoszenia sprawności zespołów wirnikowych silnika
Fig. 5. The mixer pressure droop coefficient change as a results of the engine turbomachinery efficiency increasing

Zmiany sprawności zespołów wirnikowych powodowały zmianę stosunku ciśnień na wejściu do mieszalnika, co początkowo nie wywoływało zmian współczynnika strat ciśnienia mieszania, natomiast później przyczyniało się do obniżenia jego wartości. W analizowanym zakresie zmian wskaźników efektywności procesów największe zmiany sprawności sprężarki (η_s) z 0,97 do 1 powodowały obniżenie współczynnika strat ciśnienia w mieszalniku σ_{miesz} z 0,981 do 0,977, czyli stosunkowo nieznacznie. Zmiana sprawności turbiny niskiego ciśnienia η_{TNC} od 0.9 do 1 powodowała że, σ_{miesz} była cały czas powyżej 0,98.

Pozwala to przyjąć założenie, że zmiany sprawności zespołów silnika, szczególnie w małym zakresie, nie powodują istotnej zmiany doskonałości procesu mieszania i można to pominąć podczas analizy nie powodując istotnego błędu w obliczeniach. Natomiast model silnika wykorzystany do badań w celu podniesienia dokładności obliczeń, uwzględniał te zmiany. Wyniki oceny wrażliwości modelu na zmianę efektywności procesów przeplywowo-ciepnych, dla silnika o parametrach pracy jak powyżej, przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Zmiana ciągu jednostkowego k_j i jednostkowego zużycia paliwa c_j w wyniku zmiany wybranych wskaźników doskonałości procesów przeplywowo-ciepnych w silniku

Fig. 6. The specific thrust k_j and the specific fuel consumption c_j changes as the results of the chosen engine internal processes efficiency changes

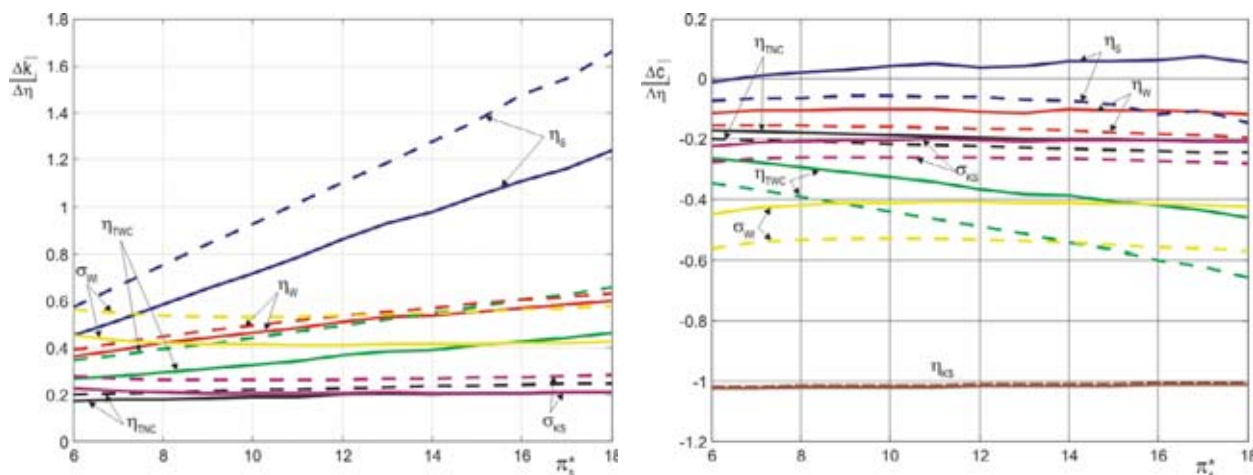
W wyniku badań stwierdzono, że największe możliwości podniesienia ciągu jednostkowego wynikają z poprawy sprawności sprężarki. Gdyby udało się doprowadzić ten proces do przemiany odwracalnej to względny przyrost ciągu jednostkowego byłby na poziomie 7%. 4-0% wzrost k_j można uzyskać poprzez podnoszenie sprawności wentylatora i turbiny wysokiego ciśnienia. Poprawa sprawności turbiny wysokiego ciśnienia powoduje najistotniejsze obniżenie jednostkowego zużycia paliwa do poziomu 0,96 wartości dla silnika wyjściowego. Natomiast poprawa sprawności wentylatora, turbiny niskiego ciśnienia i procesów przeplywowych we wlocie oraz dyszy wylotowej (tożsama zmiana z σ_{wL}) powoduje obniżenie c_j na poziomie 1 do ponad 1,5%.

Analizując przedstawiony wykres bardziej istotne wydaje się określenie jakie zmiany parametrów jednostkowych będzie powodowała stosunkowo nieznaczna zmiana wybranego wskaźnika efektywności procesu wewnętrznego w silniku. W tym celu wyznaczono wartość przyrostu względnego ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa wynikające ze zwiększenia wybranego wskaźnika doskonałości procesu o 0,1% ($\eta_i - \eta_{i_{sil_wyj}} = 0,001$), czyli:

$$\frac{\Delta k_j}{\Delta \eta} = \frac{\bar{k}_j (\eta_{sil_wyj} + 0,001) - \bar{k}_j (\eta_{sil_wyj})}{0,001}, \quad (7)$$

$$\frac{\Delta c_j}{\Delta \eta} = \frac{\bar{c}_j(\eta_{sil_wyj} + 0,001) - \bar{c}_j(\eta_{sil_wyj})}{0,001} \quad (8)$$

Wyniki badań dla zmiany sprężu sprężarki i dwóch wartości temperatury przed turbiną $T_3=1500K$ (linia przerywana) i $T_3=1700K$ (linia ciągła) przedstawiono na rys 7. W badanym silniku stopień dwuprzepływowości wynosił $\mu=1$, a spręż wentylatora był zmieniany, aby wyrównać ciśnienia na wejściu do mieszalnika.



Rys. 7. Zmiana względnego ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa dla od przyrostu wskaźników doskonałości procesu o 0,1% (linia ciągła $T_3=1700K$, linia przerywana $T_3=1500K$)

Fig. 7. The change of the relative specific thrust and specific fuel consumption with the thermal-flow process coefficient increasing of 0,1% (continuous line $T_3=1700K$, dashed line $T_3=1500K$)

Analizując przedstawione wykresy można zauważyć, że największy przyrost ciągu jednostkowego wiąże się ze zwiększaniem sprawności sprężarki. Jest on tym większy im wyższy jest spręż i niższa temperatura przed turbiną. Istotny wzrost ciągu jednostkowego powoduje elementarne podnoszenie sprawności wentylatora i turbiny wysokiego ciśnienia. Podobnie jak poprzednio efekt poprawy k_j wzrasta ze wzrostem sprężu sprężarki oraz obniżeniem wartości temperatury przed turbiną. Znaczący przyrost ciągu jednostkowego można uzyskać także poprawiając współczynnik strat ciśnienia we wlocie i dyszy wylotowej. Dodatkowo jest on niezależny od sprężu sprężarki, natomiast jest większy dla mniejszych wartości temperatury przed turbiną.

Badania zmian jednostkowego zużycia paliwa wskazują, że najefektywniejsze obniżanie tego parametru następuje poprzez zwiększanie sprawności cieplnej komory spalania (poprawa η_{KS} 0,001 powoduje obniżenie c_j o ok. 1%). Dodatkowo efekt ten nie zależy od parametrów termodynamicznych obiegu silnika. Poprawa pozostałych wskaźników jakości powoduje znacznie mniejsze efekty obniżenia jednostkowego zużycia paliwa (przynajmniej o połowę). Ciekawe może być to, że bardziej opłaca się dopracowywanie pod względem obniżenia strat przepływowych wlot i dyszę wylotową niż zespoły wirnikowe. Natomiast w niektórych przypadkach podnoszenie sprawności sprężarki prowadzi do zwiększenia jednostkowego zużycia paliwa ($T_3=1700K$ linia ciągła).

Ze względu na ograniczenia w niniejszym materiale nie zamieszczono wszystkich wyników tylko te najistotniejsze, które pozwalają wskazać ogólną tendencję zmian parametrów jednostkowych silnika spowodowanych podnoszeniem doskonałości procesów w silniku. W dalszych badaniach w tym zakresie zostanie przeanalizowany wpływ stopnia dwuprzepływowości. W silnikach tego typu zakres zmian tego parametru jest nieznaczny od 0,3 do ok. 1,5, a większość ma stopień dwuprzepływowości $\mu=0,8-1$.

5. Podsumowanie i wnioski

Wyniki prowadzonych badań pozwoliły określić jak zmiana efektywności procesów przepływowo-ciepłnych wpływa na parametry jednostkowe silnika. W wyniku badań ustalono, że na relacje pomiędzy zmianą sprawności zespołów wirnikowych, a parametrami jednostkowymi istotny wpływ ma spręż sprężarki. Im jest on większy tym efekty poprawy ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa poprzez zwiększanie doskonałości tych procesów są lepsze.

Kolejnym wnioskiem jest to, że generalnie poprawa wskaźników doskonałości procesów daje lepsze efekty im niższa jest wartość temperatury przed turbiną. Nie dotyczy to relacji pomiędzy obniżeniem jednostkowego zużycia paliwa a podnoszeniem sprawności cieplnej komory spalania. W ten sposób uzyskuje się najkorzystniejszy stosunek obniżenia jednostkowego zużycia paliwa do poprawy sprawności procesy, który nie zależy od parametrów termodynamicznych obiegu silnika.

Podnoszenie sprężu sprężarki powoduje najistotniejszy wzrost ciągu jednostkowego, jednakże w niektórych przypadkach (dla wyższych wartości temperatury przed turbiną powoduje także wzrost jednostkowego zużycia paliwa).

Literatura

- [1] Górski, J., *Problemy doskonalenia konstrukcji wirnikowych lotniczych napędów turbinowych*, III Sympozjum Naukowe: Problemy techniczno – eksploatacyjne w kształceniu pilotów, Dęblin, 1996.
- [2] Guha, A., *An efficient generic method for calculating the properties of combustion products*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A, Vol. 215, Iss. 3, Londyn, 2001.
- [3] Jakubowski, R., *Badanie wpływu jakości procesów energetycznych w turbinowym silniku odrzutowym na efektywność eksploatacyjną metodą bilansu energetycznego*, Rozprawa doktorska, Rzeszów, 2004.
- [4] Jakubowski, R. Orkisz, M., *Wpływ zmian sprawności procesów przepływowo-ciepłnych w turbinowym silniku odrzutowym na jego charakterystyki użytkowe*, Niezawodność i Eksploatacja nr 2(14)/2002, Lublin, 2002.
- [5] Nieciajew, Ju. I., *Awiacionnyje turboreaktibnyje dwigatieli c izmieniajemym rabocim procesom dla mnogoreżumnych samoleto*, Maszynostrojenia, Moskwa, 1988.
- [6] Orkisz, M., i in., *Podstawy doboru turbinowych silników odrzutowych do płatowca*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2002.
- [7] Orkisz, M., Wygonik, P., *Diagnozowanie kanału przepływowego silnika turbinowego w stanach ustalonych*, Prace Instytutu Lotnictwa Nr 152, Warszawa, 1998.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy