

COMPARISON OF INTERNAL PROCESSES EFFECTIVENESS CHANGE INFLUENCE THE TURBOFAN WITH AND WITHOUT MIXER MODEL SENSITIVITY

Robert Jakubowski

*Rzeszow University of Technology
Department of Aircrafts and Aircraft Engines
W. Pola Street 3, 35-959 Rzeszów, Poland
tel.: +48 17 8651466 fax.: +48 178651942
e-mail: roberski@prz.edu.pl*

Abstract

At the present time one of the way of the aircraft engines improvement is the fuel consumption reduction but the thrust should stay on the same level. One of the way to realize this is the engine internal processes improvement. Nowadays technology and the commuter design methods allows us produce more efficient compressors, fans, turbines etc. To manage the proper process of engine improvement, it is demand to know how the chosen elements improvement influence the engine work parameters. This knowledge allow us to calculate the cost, and evaluate the effects of the improvements.

In the paper the analyzes of chosen internal engine process improvement influence on the specific thrust and the specific fuel consumption is done for turbofan engine. The processes effectiveness is characterized by flow losses coefficients and the processes efficiencies. In the beginning the two types of turbofan engine with and without mixer is described. The main differences in the engines model are presented. Then the process effectiveness coefficients are defined and research method is presented. The analyze based on the small deviation methods is use to calculate the results of the work. Then the results are presented as comparison graphs for the engine with the mixer and without the mixer. The results are analyzed and discussed. In the last parts of the paper the conclusion are presented.

Keywords: *Aircraft engines, turbojet engines, modelling of turbojet engines, turbojet engine characteristics*

PORÓWNANIE WRAŻLIWOŚCI MODELU SILNIKA DWUPRZEPLYWOWEGO Z MIESZALNIKIEM I BEZ MIESZALNIKA NA ZMIANĘ EFEKTYWNOŚCI PROCESÓW WEWNĘTRZNYCH

Streszczenie

Współcześnie jedną z metod poprawy efektywności pracy silników lotniczych jest obniżanie jednostkowego zużycia paliwa, przy jednoczesnym niezmiennianiu jego ciągu. Umożliwia to m.in. doskonalenie procesów wewnętrznych w silniku. Obecna technologia wytwarzania oraz komputerowe wsparcie procesów projektowania pozwala produkować zespoły silnika o coraz wyższej efektywności procesów wewnętrznych. Żeby optymalnie organizować proces podnoszenia efektywności pracy silnika wymagana jest znajomość wpływu modyfikacji efektywności poszczególnych zespołów na parametry użytkowe silnika. Umożliwia to oszacowanie kosztów i ocenę efektywności proponowanych modyfikacji silnika.

W pracy przeprowadzono analizę wrażliwości modelu silnika dwuprzepływowego na zmianę efektywności procesów przeplywowo-ciepnych w zespołach silnika. Efektywność procesów w zespołach silnika opisano poprzez wskaźniki strat ciśnienia oraz sprawności, zaś badanymi parametrami pracy silnika były ciąg jednostkowy i jednostkowe zużycie paliwa. Na początek scharakteryzowano dwa zasadnicze typy silników dwuprzepływowych - z mieszalnikiem i bez. Następnie przedstawiono przyjęty model silnika oraz wskaźniki oceny procesów wewnętrznych w zespołach i metodykę badań. W kolejnym kroku przeprowadzono badania z wykorzystaniem metod bazujących na metodzie małych odchyleń. Wyniki badań przedstawiono w postaci graficznej i omówiono porównując obydwie analizowane konstrukcje. Na koniec zaprezentowano wnioski do pracy.

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

1. Wstęp

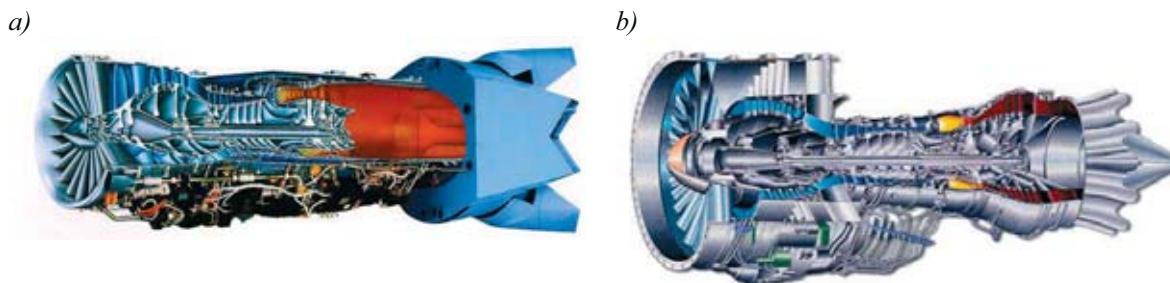
Zagadnienie wpływu zmiany efektywności procesów przepływowo-ciepłych w zespołach silnika na jego charakterystyki użytkowe jest istotne z dwóch zasadniczych powodów. Jednym z nich jest ocena możliwości poprawy właściwości użytkowych silnika poprzez podnoszenie sprawności zachodzących w nim procesów. Drugim jest wskazanie tych zespołów, których nawet nieznaczne zużycie eksploatacyjne istotnie pogarsza jego właściwości użytkowe [4].

Znajomość relacji pomiędzy zmianami efektywności procesów w poszczególnych zespołach oraz właściwościami użytkowymi silnika jest więc bardzo istotna z punktu widzenia jego projektowania i eksploatacji. Pozwala to bowiem wskazać elementy silnika, których doskonalenie powoduje znaczącą poprawę efektywności pracy silnika, a także te, które z tego względu nie opłaca się modernizować.

Innym aspektem badań jest to, że pogorszenie doskonałości procesów w czasie eksploatacji w zespołach, które znacząco wpływają na parametry użytkowe silnika, powoduje istotne zmniejszenie jego osiągnięć [3, 4, 5]. Wyniki badań w tym zakresie stanowią przesłankę do tego, że dany zespół powinien być projektowany i wykonany tak, aby maksymalnie ograniczyć możliwość jego zużywania się w czasie pracy. Równocześnie powinna być przewidziana bieżąca kontrola tego elementu w czasie eksploatacji w celu odpowiednio szybkiego przeciwdziałania obniżaniu sprawności silnika [3].

Podjęcie wspomnianej tematyki badawczej dla silników dwuprzepływowych jest o tyle istotne, że współcześnie silniki te są powszechnie eksploatowane i praktycznie całkowicie wyparły konstrukcyjnie starsze silniki jednoprzepływowe. Z kolei cała teoria w tym względzie oraz publikowane dotychczas wyniki prowadzonych badań dotyczą tamtych konstrukcji, natomiast dla nowszych rozwiązań nie są one publikowane stanowiąc tajemnicę biur konstrukcyjno-projektowych.

2. Silnik dwuprzepływowy o dużym i małym stopniu dwuprzepływowości



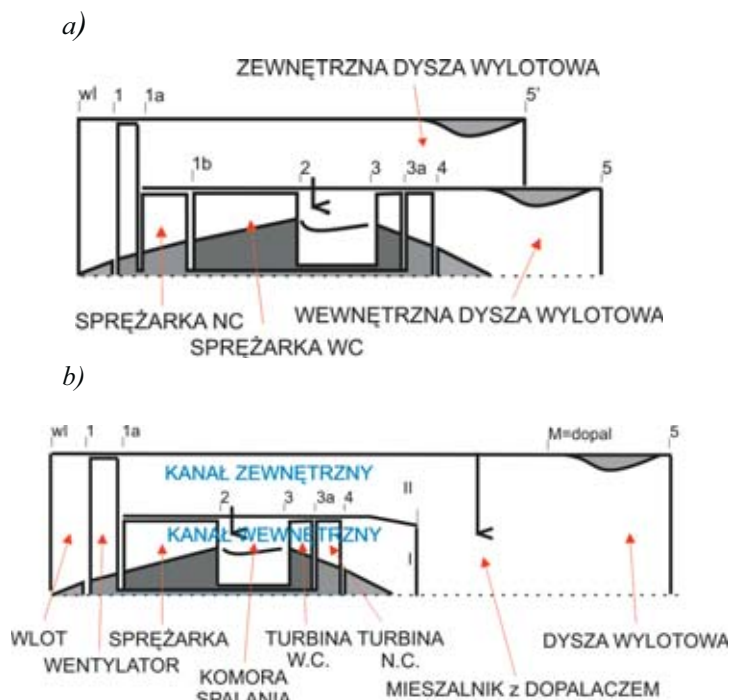
Rys. 1 Silnik dwuprzepływowy a) z mieszalnikiem strumieni, b) bez mieszalnika
Fig. 1 Turbofan engine a) with a mixer, b) without the mixer

Zasadnicze różnice w konstrukcji silnika dwuprzepływowego z mieszalnikiem i bez, wynikają z przeznaczenia obydwu tych typów silników do napędu różnej klasy aparatów latających (Rys. 1). Silniki z mieszalnikiem mają zastosowanie w samolotach wielozadaniowych, gdzie dominujące znaczenia ma duży ciąg jednostkowy, zdolność do szybkiej akceleracji i deceleracji wirnika, natomiast zużycie paliwa jest brane pod uwagę w mniejszym stopniu. Żeby temu sprostać silnik musi się cechować małym stopniem dwuprzepływowości ($\mu = 0,3-1,5$), stosunkowo dużym sprężeniem wentylatora (π_w ok. 3) i umiarkowanym sprężeniem sprężarki ($\pi_s = 7-12$) [7].

Inaczej dla silników bez mieszalnika, które wykorzystuje się do napędu samolotów transportowych i komunikacyjnych. Obszar ich stosowalności jest ograniczony do poddźwiękowych prędkości lotu, a przy tym muszą się one cechować dużym ciągiem, przy jednoczesnym możliwie małym jednostkowym zużyciu paliwa. Dlatego cechują się one dużym masowym natężeniem przepływu ($\dot{m} = 400-800$ kg/s), dużym stopniem dwuprzepływowości ($\mu = 6-8$) i sprężeniem sumarycznym silnika ($\pi = 30-40$), przy znacząco mniejszym sprężeniu samego wentylatora ($\pi_w = 1,6-1,8$) [7].

Wynikające stąd różnice powinny powodować, że w innym stopniu zmiany efektywności procesów przeplywowo-ciepnych w zespołach silnika będzie wpływać na zmianę osiągow silnika. Wyniki tych badań zostaną przedstawione w pracy.

3. Model symulacyjny silnika



Rys. 2. Model silnika dwuprzeplywowego z zaznaczonymi przekrojami kontrolnymi a) silnik bez mieszalnika, b) silnik z mieszalnikiem

Fig. 2. Turbofan engine model with the section index a) engine with the mixer, b) engine without the mixer

Do badań symulacyjnych wykorzystano model silnika dwuprzeplywowego z mieszalnikiem strumieni i bez mieszalnika (Rys. 2). W silniku bez mieszalnika uwzględniono występowanie dodatkowej sprężarki za wentylatorem, która jest napędzana przez turbinę niskiego ciśnienia. Podstawowe założenia jakie on uwzględniał to: jednowymiarowy model przeplywu spełniający zasadę zachowania masy, pędu i energii, w oparciu o które wyznaczono średnie wartości parametrów termodynamicznych przeplywu w przekrojach kontrolnych silnika. Szczegółowy opis modelu zawiera praca [3]. Model czynnika roboczego opisano równaniami gazu półdoskonałego (wg zależności z pracy [2]). Uwzględniono upust powietrza z za sprężarki na chłodzenie turbiny wysokiego ciśnienia. Efektywność procesów wyrażono odpowiednio: dla zespołów nieruchomych tj.: wlotu, komory spalania, dyszy wylotowej, kanałów przeplywowych silnika poprzez współczynniki strat ciśnienia całkowitego σ , dla wentylatora sprężarki i turbin poprzez sprawność izentropową η , dla procesów ciepłych w komorze spalania i dopalaczu poprzez sprawność cieplną ξ . Pozwoliło to wyrazić podstawowe parametry pracy silnika, w tym parametry badane tj. ciąg jednostkowy k_j oraz jednostkowe zużycie paliwa c_j w zależności od zmiany wskaźników doskonałości procesów wewnętrznych w silniku dla różnych wartości parametrów obiegu termodynamicznego silnika następująco [3]:

$$\begin{bmatrix} k_j \\ c_j \end{bmatrix} = f(\text{warunki_lotu}, \text{parametry_pracy}, [\eta]), \quad (1)$$

gdzie:

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

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

$[\eta]$ - wektora wskaźników jakości procesów przeplywowo-cieplnych,

H - wysokość lotu,

Ma - prędkość lotu,

M - stopień dwuprzeplywowości,

π^* - spręż w parametrach spiętrzenia,

W - wentylatora, S- sprężarki

T_3^* - temperatura przed turbiną.

4. Metodyka badań

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. Badania silnika dwuprzeplywowego z oddzielnymi dyszami wylotowymi przeprowadzono dla silnika o schemacie przeplywowym przedstawionym na Rys. 2. Na podstawie analizy danych literaturowych [1, 6, 7] dotyczących parametrów pracy eksploatowanych silników tego typu dla „silnika wyjściowego” przyjęto odpowiednio: spręż wentylatora $\pi_w^* = 1,6$, spręż sprężarki niskiego ciśnienia (booster) $\pi_{SNC}^* = 2$, spręż sprężarki wysokiego ciśnienia $\pi_{SWC}^* = 8$, temperaturę przed turbiną $T_3^* = 1700$ K oraz stopień dwuprzeplywowości $\mu = 6$. Uwzględniono chłodzenie turbiny wysokiego ciśnienia powietrzem pobieranym z za sprężarki w ilości względnej $\beta_{ch} = 10\%$, z czego 3% przypada na chłodzenie aparatu kierującego pierwszym stopnia turbiny. „Wyjściowe” wartości wskaźników jakości procesów przeplywowo-cieplnych zamieszczono w Tab. 1.

Tab. 1 Wartości wskaźników jakości przyjęte dla silnika dwuprzeplywowego bez mieszalnika
Tab. 1 Heat-flow efficiency coefficients for turbofan engine without the mixer

σ_{WL}^*	η_w^*	η_{SNC}^*	η_{SWC}^*	σ_{KS}^*	ξ_{KS}	η_{TWC}^*	η_{TNC}^*	$\sigma_{dysz_I}^*$	$\sigma_{dysz_II}^*$
0,97	0,9	0,89	0,87	0,97	0,98	0,88	0,9	0,97	0,96

Dla silnika dwuprzeplywowego z mieszalnikiem strumieni przyjęto następujące parametry pracy: spręż wentylatora $\pi_w^* = 3$, spręż sprężarki wysokiego ciśnienia $\pi_{SWC}^* = 8$, temperatura spalin przed turbiną $T_3^* = 1700$ K oraz stopień dwuprzeplywowości $\mu = 1$. Dla pracy z włączonym dopalaczem uwzględniono, że temperatura spalin w dopalaczu wynosi $T_{dop}^* = 2000$ K. Przewidziano podobnie jak w silniku dwuprzeplywowym bez mieszalnika chłodzenie turbiny wysokiego ciśnienia powietrzem pobieranym ze sprężarki w ilości względnej $\beta_{ch} = 10\%$, z czego 3% przypada na chłodzenie aparatu kierującego pierwszym stopnia turbiny. „Wyjściowe” wartości wskaźników jakości procesów przeplywowo-cieplnych zamieszczono w Tab. 2.

Tab. 2 Wartości wskaźników jakości przyjęte dla silnika dwuprzeplywowego z mieszalnikiem strumieni
Tab. 2 Heat-flow efficiency coefficients for turbofan engine with the streams mixer.

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	0,88	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 jedynki (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:

$$\bar{\eta}_i = \frac{\eta_i}{\eta_{i_sil_wyj}}, \quad (2)$$

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:

$$\bar{P}_{\eta_i} = \frac{P_{\eta_i}}{P_{sil_wyj}}, \quad (3)$$

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.

5. Wyniki badań

Wyniki badań wpływu zmian sprawności procesów w zespołach silnika na ciąg jednostkowy przedstawiono na Rys. 3a - dla silnika bez mieszalnika, b - dla silnika z mieszalnikiem strumieni.

Porównując wyniki zmian ciągu jednostkowego w skutek podnoszenia efektywności procesów wewnętrznych w analizowanych silnikach, należy zauważyć że, znacząco one się różnią. Oceniając efektywność przyrostu ciągu jednostkowego ze zwiększaniem wybranego wskaźnika efektywności poprzez kąt nachylenia krzywej w silniku o dużym stopniu dwuprzepływowości (bez mieszalnika) najbardziej znaczący jest wzrost tego parametru w wyniku podnoszenia efektywności procesów przepływowych we wlocie oraz w kanale zewnętrznym - zewnętrznej dyszy wylotowej. Zwiększenie sprawności sprężarki powoduje wzrost ciągu jednostkowego na znacznie niższym poziomie. Podobnie wpływa zwiększanie sprawności turbiny wysokiego i niskiego ciśnienia oraz wentylatora. Poprawa procesów przepływowych w komorze spalania i wewnętrznej dyszy wylotowej daje znacząco mniejszy przyrost ciągu jednostkowego, jednakże jeszcze mniej korzystne jest zwiększanie sprawności sprężarki niskiego ciśnienia.

W silniku z mieszalnikiem najkorzystniejsze efekty podnoszenia ciągu jednostkowego uzyskuje się poprzez zwiększanie sprawności sprężarki oraz zmniejszanie strat przepływowych w dyszy wylotowej i we wlocie. Nieco gorsze rezultaty daje podnoszenie sprawności wentylatora i turbiny wysokiego ciśnienia. Natomiast znacząco mniejszy przyrost ciągu jednostkowego powoduje poprawa efektywności procesów w komorze spalania oraz turbinie niskiego ciśnienia.

Należy zauważyć, że sprawności procesów w zespołach wirnikowych ciągle są najbardziej odległe od procesu idealnego, dlatego nawet gdy występuje stosunkowo mały przyrost ciągu ze zwiększaniem ich sprawności, to jednak gdyby zwiększać sprawność tych zespołów w szerszym stopniu, zbliżając się możliwie blisko procesu idealnego, efekt przyrostu ciągu jednostkowego okazuje się znaczący.

paliwa. Poprawia się przez to także efektywność pracy kanału wewnętrznego, lecz ponieważ jego udział w ciągu całego silnika jest nieznaczny, stąd przyrost ciągu jest mniejszy niż przyrost zużycia paliwa. W efekcie jednostkowe zużycie paliwa zamiast maleć rośnie.

Generalnie należy zauważyć, że w silniku o dużym stopniu dwuprzepływowości istotnie wzrasta wpływ procesów w kanałach zewnętrznych, bądź zespołach pracujących na rzecz tych kanałów (turbina niskiego ciśnienia).

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły wstępnie uchwycić relacje pomiędzy zmianami wskaźników doskonałości procesów wewnętrznych w silniku, a jego właściwościami użytkowymi reprezentowanymi poprzez ciąg jednostkowy i jednostkowe zużycie paliwa. Wynika stąd, że szczególne cechy silników z mieszalnikiem i bez mieszalnika wpływają na przebieg badanych relacji intensyfikując wpływ jednych procesów i osłabiając innych.

Należy zauważyć, że jakość procesów przepływowych we wlocie dosyć istotnie wpływa na efektywność pracy silnika dwuprzepływowego, a efekt ten nasila się ze wzrostem stopnia dwuprzepływowości (w silnikach bez mieszalnika).

Na poprawę ciągu jednostkowego w obydwóch silnikach istotnie wpływa sprawność sprężarki, zaś na poprawę jednostkowego zużycia paliwa sprawność cieplna komory spalania.

Należy przy tym uwzględnić fakt, że przedstawione wyniki dotyczą pojedynczych rozwiązań silnika, przez co nie dają pełnego obrazu zależności badanych parametrów. Bowiem na analizowane relacje istotnie wpływa także to, jakie są parametry termodynamiczne silnika (spręż, temperatura przed turbiną stopień dwuprzepływowości) [3]. Dlatego wymaga to dalszych prac badawczych, aby uzupełnić wskazane relacje.

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., *Investigation of the turbofan with mixer engine model sensitivity of thermal-flow processes modification in the engine's components*, Journal of Kones 2007.
- [5] Jakubowski, R., Orkisz, M., *Wpływ zmian sprawności procesów przeplywowo-cieplnych w turbinowym silniku odrzutowym na jego charakterystyki użytkowe*, Niezawodność i Eksploatacja, Nr 2(14)/2002, Lublin 2002.
- [6] Nieciajew, Ju. I., *Awiacionnyje turboreaktibnyje dwigatieli c izmieniajemym rabocim procesom dla mnogoreżumnych samoletow*, Maszynostrojnia, Moskwa 1988.
- [7] Orkisz, M., i in., *Podstawy doboru turbinowych silników odrzutowych do płatowca*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2002.
- [8] *Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy*.

