

## WPLYW REGULACJI SPRĘŻARKI UPUSTEM POWIETRZA NA ZAPAS STATECZNEJ PRACY

MAREK O R K I S Z (DEBLIN)

Przedstawiono analizę wpływu regulacji sprężarki upustem powietrza na zapas stateczności jej pracy oraz ocenę wpływu ilości upuszczanego powietrza na przemieszczenie linii współpracy turbiny i sprężarki w stanach ustalonych.

### 1. WSTĘP

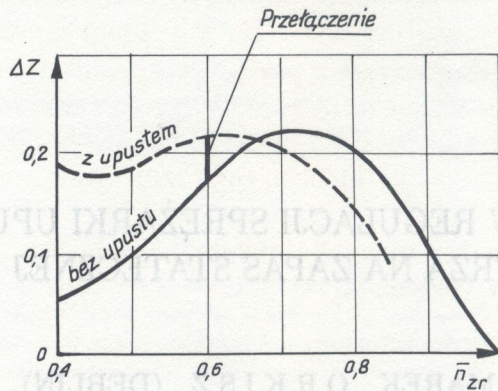
Zależnie od formy konstrukcyjnej turbinowego silnika odrzutowego i wartości sprężu, w celu niedopuszczenia do wystąpienia zjawiska pracy niestatecznej sprężarki należy ją regulować. Powszechnie przyjmuje się, że jeżeli spręż sprężarki ma wartość [3]:

$\Pi_{sobl}^* > 6...9$  - stosuje się upust powietrza z dwu lub trzech stopni środkowych sprężarki,

$\Pi_{sobl}^* > 8...10$  - sprężarkę (silnik) konstruuje się wielowirnikową,

$\Pi_{sobl}^* > 10$  - stosuje się sterowanie łopatek wieńca dyfuzorowego sprężarki pierwszych i ostatnich jej stopni. Niekiedy w konstrukcjach o  $\Pi_{sobl}^* = 6...10$  reguluje się łopatki wieńca dyfuzorowego tylko pierwszych stopni.

W konstrukcjach wielowirnikowych o bardzo dużych sprężach dla zachowania wymaganej wartości zapasu stateczności w całym zakresie eksploatacyjnych prędkości obrotowych silnika stosuje się jednocześnie upust powietrza i sterowanie łopatek wieńca dyfuzorowego. Czasami, dla zachowania wymaganych parametrów użytkowych, oba sposoby regulacji występują już w silnikach ze sprężarkami o umiarkowanych sprężach np. silnik "31" serii 5 ( $\Pi_{sobl}^* = 9, 1$ ).



Rys. 1. Zależność zapasu stateczności sprężarki  $\Delta Z$  bez upustu i z upustem od prędkości obrotowej silnika [3]

Zmniejszając prędkość obrotową silnika w stosunku do prędkości obrotowej obliczeniowej, kąt natarcia łopatek środkowych stopni sprężarki prawie się nie zmienia. Natomiast znacznie zmniejsza się na pierwszych stopniach. Prowadzi to do spadku wartości sprężu sprężarki, jej sprawności oraz zapasu stateczności. Upuszczając część powietrza z kanału przepływowego sprężarki (ze środkowych stopni) na zewnątrz silnika lub w przypadku silników dwuprzepływowych do kanału zewnętrznego, powoduje się wzrost natężenia przepływu powietrza przez pierwsze stopnie, a tym samym zmianę kąta natarcia łopatek tych stopni. Dobierając odpowiednio ilość upuszczonego powietrza można zapewnić opływ łopatek bliski obliczeniowemu, pozwalając tym samym na zachowanie wysokiej wartości sprawności sprężarki i wymaganego zapasu stateczności w całym zakresie eksploatacyjnych prędkości obrotowych silnika.

Na ogół ilość upuszczonego powietrza stanowi ok. 15, ..., 25% ilości powietrza przepływającego przez sprężarkę w tym zakresie pracy [2, 3].

Regulacja sprężarki upustem jest efektywna dla małych i średnich prędkości obrotowych silnika. W przypadku silników jednowirnikowych w zakresie tych prędkości obrotowych występuje znaczne obniżenie zapasu stateczności sprężarki w stosunku do warunków obliczeniowych. Na rys.1. przedstawiono zależność zapasu stateczności sprężarki, bez upustu i z upustem [3], od prędkości obrotowej silnika. Z przebiegu krzywych wynika, że w zakresie prędkości obrotowej biegu jałowego obniżenie

wartości zapasu stateczności w stosunku do sprężarki z upustem wynosi ok. 75% i osiąga wartość bliską tej, która jest dopuszczalna dla przyspieszania zespołu wirnikowego [5].

## 2. MODEL OBLICZENIOWY

Równanie bilansu mocy dla turbiny i sprężarki z upustem powietrza można napisać w postaci [4]

$$(2.1) \quad \dot{m}_T l_T = \dot{m}_T l_s + (\dot{m}_1 - \dot{m}_T) l'_s,$$

gdzie  $\dot{m}_T$  oznacza natężenie przepływu spalin przez turbinę,  $\dot{m}_1$  – natężenie przepływu powietrza w przekroju wejściowym sprężarki,  $l_T$  – pracę turbiny,  $l_s$  – pracę sprężarki oraz  $l'_s$  – pracę sprężarki konieczną do sprężenia upuszczonego powietrza.

Podstawiając do (2.1) zależność na pracę sprężarki w postaci

$$(2.2) \quad l_s = c_p T_H^* (\Pi_s^{*\frac{k-1}{k}} - 1) \frac{1}{\eta_s^*}$$

i na pracę turbiny w postaci

$$(2.3) \quad l_T = c'_p T_3^* \left( 1 - \frac{1}{\Pi_T^{*\frac{k'-1}{k'}}} \right) \eta_T^*,$$

gdzie  $c_p, c'_p$  oznacza odpowiednio ciepło właściwe powietrza i spalin,  $k, k'$  – odpowiednio wykładnik izentropy powietrza i spalin,  $\Pi_s^*$  – spręż sprężarki,  $\Pi_T^*$  – spadek ciśnienia w turbinie,  $\eta_s^*$  – sprawność sprężarki oraz  $\eta_T^*$  – sprawność turbiny.

Przyjmując, że dla eksploatacyjnych zakresów pracy silnika spadek ciśnienia w dyszy wylotowej i w wieńcu dyszowym turbiny jest krytyczny [1], czyli  $\Pi_T^* = \text{const}$ , po przekształceniach stopień podgrzania strumienia ma postać

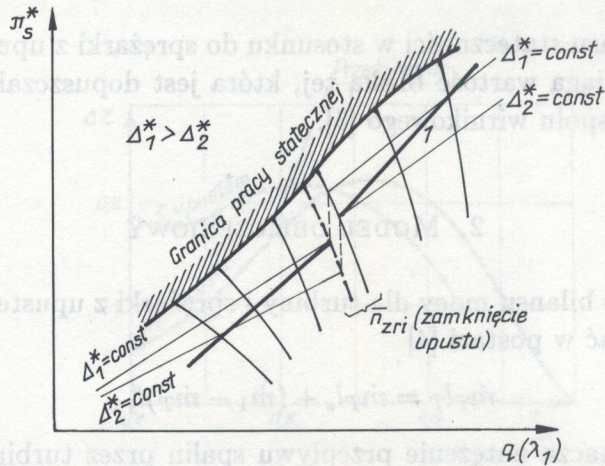
$$(2.4) \quad \Delta^* = \frac{T_3^*}{T_H^*} = \frac{\Pi_s^{*\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_s^* \eta_T^* C} [1 + \bar{l}_s (\nu - 1)],$$

gdzie dla uproszczenia zapisu

$\bar{l}_s = l'_s / l_s$  podział pracy sprężarki z upustem,

$\nu = \dot{m}_1 / \dot{m}_2$  stosunek natężeń przepływu,

$C = 1 - 1 / \Pi_T^{*\frac{k'-1}{k'}} = \text{const}$  (z założenia).



Rys. 2. Charakterystyka sprężarki z upustem powietrza [4]  $\Pi_s^*$  - spręż;  $\Delta^*$  - stopień podgrzania strumienia; 1 - linia współpracy turbiny i sprężarki w stanie ustalonym

Jeżeli upust powietrza jest zza sprężarki, co ma często miejsce gdy jest ono wykorzystywane do zasilania kabiny pilota, to wówczas  $l'_s = l_s$  i zależność (2.4) przyjmuje postać [4]:

$$(2.4') \quad \Delta^* = \frac{\Pi_s^{*\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_s^* \eta_T C} \nu.$$

Z zależności (2.4') wynika, że dla zachowania tej samej wartości względnej gęstości strumienia  $q(\lambda_1)$  i sprężu sprężarki  $\Pi_s^*$  należy zwiększyć temperaturę  $T_3^*$  wraz ze wzrostem ilości upuszczonego powietrza. Jeżeli natomiast silnik jest regulowany wg programu  $\Delta^* = \text{const}$  i pole przekroju dyszy wylotowej ma wartość stałą  $A_5 = \text{const}$ , to linia współpracy turbiny ze sprężarką oddala się od granicy pracy statecznej w stronę większych wartości względnej gęstości strumienia i niższych wartości sprężu sprężarki. Powyższe przedstawiono na rys. 2.

Podział pracy sprężarki z upustem można obliczyć w przybliżeniu zakładając, że spręż każdego z jej stopni jest identyczny. Jeżeli sprężarka jest o "j" stopniach a upust jest ze stopniem "i", to spręż sprężarki w miejscu upustu ma wartość

$$\Pi_{\text{sup}}^{*i} = \sqrt[j]{\Pi_s^{*i}}.$$

Stąd wykorzystując znaną zależność na pracę sprężarki, podział jej pracy

można opisać wzorem

$$(2.5) \quad \bar{l}_s = \frac{\Pi_s^{* \frac{i(k-1)}{jk}} - 1}{\Pi_s^{* \frac{k-1}{k}} - 1}.$$

Dla programu regulacji silnika  $\Delta^* = \text{const}$  spręż sprężarki z upustem otrzymuje się po przekształceniu zależności (2.4), w postaci

$$(2.6) \quad \Pi_{\text{sup}}^* = \left( \frac{\eta_s^* \eta_T^* C \Delta^*}{1 + \bar{l}_s (\nu - 1)} + 1 \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Wykorzystując pojęcie współczynnika zapasu stateczności sprężarki opisanego wzorem [5]

$$Z = \frac{\Pi_{\text{gr}}^*}{\Pi_s^*}$$

można oszacować wpływ upustu powietrza na przemieszczenie się linii współpracy turbiny ze sprężarką, w stosunku do sprężarki bez upustu, a tym samym na wartość współczynnika zapasu stateczności za pomocą zależności na względną wartość współczynnika stateczności sprężarki, opisaną wzorem

$$\bar{Z} = \frac{\text{współczynnik stateczności sprężarki z upustem}}{\text{współczynnik stateczności sprężarki bez upustu}} - 1,$$

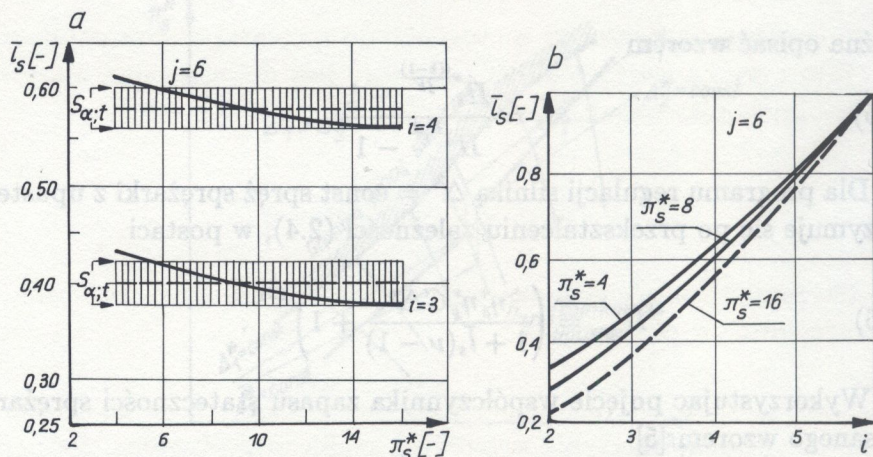
a po podstawieniu odpowiednich wartości

$$(2.7) \quad \bar{Z} = \frac{(\eta_s^* \eta_T^* C \Delta^* + 1)^{\frac{k}{k-1}}}{\left( \frac{\eta_s^* \eta_T^* C \Delta^*}{1 + \bar{l}_s (\nu - 1)} + 1 \right)^{\frac{k}{k-1}}} - 1.$$

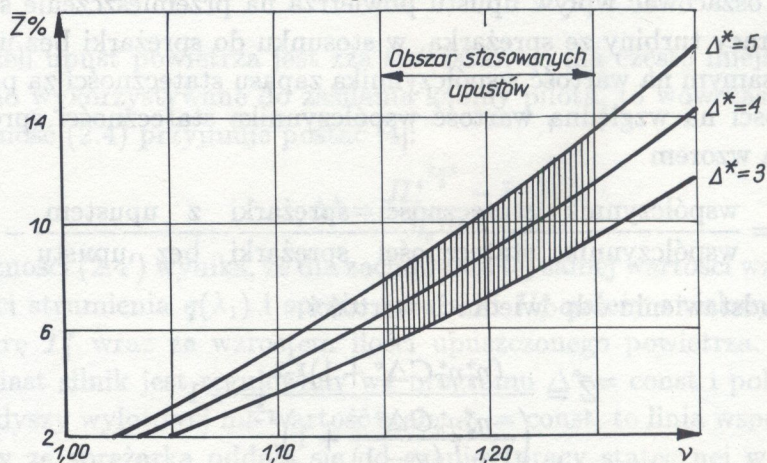
Z przedstawionej zależności wynika, że dla wyżej określonego programu regulacji silnika, przemieszczenie linii współpracy turbiny ze sprężarką z upustem zależy od podziału pracy sprężarki  $\bar{l}_s$  i stosunku natężeń przepływu  $\nu$ .

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ

Na rys. 3 przedstawiono zależność podziału pracy sprężarki z upustem powietrza od sprężu sprężarki i miejsca usytuowania tego upustu. Do analizy przyjęto sprężarkę o sześciu stopniach. Z przebiegu wykresu



Rys. 3. Zależność podziału pracy sprężarki  $\bar{l}_s$  z upustem powietrza a - od sprężu sprężarki; b - od miejsca usytuowania upustu;  $i$  - liczba stopni sprężarki przed upustem;  $j$  - liczba stopni sprężarki



Rys. 4. Zależność przyrostu zapasu stateczności sprężarki  $Z$  od ilości upuszczonego powietrza  $\nu$  i stopnia podgrzania strumienia  $\Delta^*$

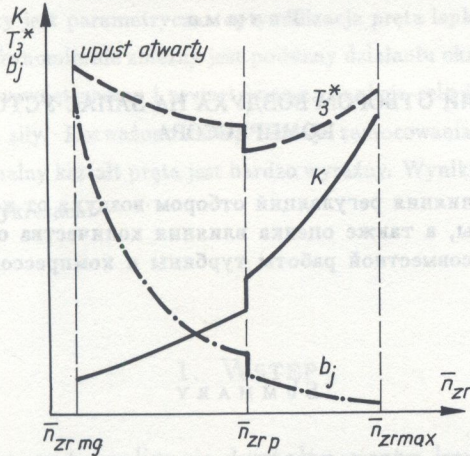
na rys. 3a wynika, że dla danego usytuowania upustu, spręż całkowity sprężarki nie jest czynnikiem decydującym o podziale pracy sprężarki. Do rozważań modelowych można przyjąć, że  $\bar{l}_s = f(\Pi_s^*) = \text{const}$ . Odchylenie standardowe takiego założenia jest na poziomie  $S_{\alpha,t} = 0,02$ , co stanowi w zależności od usytuowania upustu ok. 4%. Decydujący wpływ na podział pracy sprężarki ma usytuowanie upustu, co wynika z zależności (2.5) i co przedstawiono na rys. 3b.

Na rys. 4 przedstawiono zależność przyrostu zapasu stateczności

sprężarki od ilości upuszczonego powietrza i stopnia podgrzania strumienia. Z przebiegu krzywych wynika, że stosując upust powietrza można zwiększyć zapas stateczności sprężarki od 5,5% do 13,5%.

#### 4. WNIOSKI

Upust powietrza nie jest najefektywniejszym sposobem zabezpieczenia sprężarki przed niestateczną jej pracą. Jednak w sprężarkach o małych sprężach pozwala na zachowanie prostszej konstrukcji silnika w stosunku do silników wielowirnikowych lub z nastawnymi łopatkami wieńca dyfuzorowego. Sposób ten jest czasami wykorzystywany do zwiększenia zapasu stateczności sprężarki także silników wielowirnikowych podczas ich rozruchu np. silnik R-11-F300.



Rys. 5. Charakterystyka obrotowa silnika ze sprężarką regulowaną upustem powietrza:  $K$  - ciąg silnika;  $T_3^*$  - temperatura spalin przed turbiną;  $b_j$  - jednostkowe zużycie paliwa

W silnikach turbinowych ze sprężarką regulowaną upustem powietrza dla zachowania przyjętej prędkości obrotowej, w zakresie jego otwarcia, należy zwiększyć temperaturę spalin przed turbiną. Towarzyszy jednak temu zmniejszenie się wartości ciągu i ekonomiczności silnika. Powyższe przedstawiono na charakterystyce obrotowej (rys.5).

Porównując otrzymane wyniki z danymi zawartymi w literaturze można stwierdzić, że opisany sposób jest wystarczająco dokładny do wstępnego oszacowania ilości powietrza upuszczonego, niezbędnej do zapewnienia statecznej pracy sprężarki.

## LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. P.DZIERŻANOWSKI i in., *Napędy lotnicze. Turbinowe silniki odrzutowe*, WKŁ, Warszawa 1988.
2. Z.DŻYGADŁO i in., *Napędy lotnicze. Zespoły wirnikowe silników turbinowych*, WKŁ, Warszawa 1982.
3. П.К.Казанджан, *Теория авиационных газотурбинных двигателей*, Изд. М. О. СССР, Москва 1967.
4. И.И.Кульягин, *Основы теория авиационных газотурбинных двигателей*, Изд. М.О. СССР, Москва 1967.
5. M.ORKISZ, *Ocena wpływu zapasu stateczności sprężarki na czas rozprędzania zespołu wirnikowego* [w druku].

## Резюме

**ВЛИЯНИЕ РЕГУЛЯЦИЙ ОТБОРОМ ВОЗДУХА НА ЗАПАС УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ КОМПРЕССОРА**

Указаны анализ влияния регуляций отбором воздуха от компрессора на запас его устойчивой работы, а также оценка влияния количества отбираемого воздуха на положение линий совместной работы турбины и компрессора в установленных режимах.

## SUMMARY

**THE INFLUENCE OF AIR-COMPRESSOR ADJUSTMENT BY MEANS OF AIR-BLEED ON THE RESERVE OF ITS STABLE OPERATION**

Here is presented the analysis of the influence of air-compressor adjustment by means of air-bleed on the stability reserve of its operation and the estimation of the influence of carried away air amount on the shift of turbine and air-compressor cooperation line in stable states.

**WYŻSZA OFICERSKA SZKOŁA LOTNICZA  
ZAKŁAD TECHNIKI LOTNICZEJ, DEBLIN**

*Praca została złożona w Redakcji dnia 7 lipca 1989 r.*