

Mirosław MUSZYŃSKI, Marek ORKISZ

Zakład Techniki Lotniczej  
Wyższa Oficerska Szkoła Lotnicza

#### SYMULACJA PRACY TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO W SYTUACJI AWARYJNEJ

Streszczenie. Przedstawiono ogólne postępowanie podczas modelowania stanów przejściowych turbinowych silników odrzutowych. Jego celem było określenie parametrów termogazodynamicznych i użytkowych silnika w sytuacji awaryjnej. Przedstawiono przykład wyników obliczeń symulacyjnych w przypadku gwałtownego wyłączenia dopływu paliwa.

#### SIMULATION OF TURBOJET ENGINE OPERATION IN EMERGENCY SITUATION

Summary. We have describen a general procedure of turbojet engines transition stage's modelling. It have aimed designation of thermodynamics and usefull parameters of engine in emergency situation. Exemple of simulations findings mentioned in instance just sudden fuel flow disconnection.

#### СИМУЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Резюме. Приведено общие указания по моделированию переходных процессов турбореактивных двигателей. Моделирование создано с целью определения основных газодинамических и эксплуатационных характеристик двигателя в особых ситуациях. приведено примерные результаты симуляционных вычислений в случае внезапного выключения подачи топлива.

#### 1. WSTĘP

Bezpieczeństwu lotów zagraża pojawienie się tak zwanych szczególnych sytuacji, czyli sytuacji powodujących konieczność wykonywania przez pilota czynności odbiegających od przyjętych dla normalnego lotu. Szczególną sytuację w tym rozumieniu stanowi zbiór warunków związanych z potencjalnym obniżeniem poziomu bezpieczeństwa lotu, który przedstawiono np w [2]. Jednym z rodzajów sytuacji szczególnych są sytuacje awaryjne, tzn. takie, po

zaistnieniu których rezultaty uszkodzeń nie prowadzą bezpośrednio do katastrofy, ale mogą być przesłanką.

Podstawą do rozpatrywania dynamiki silnika w sytuacjach awaryjnych jest symulacyjny model obliczeniowy konkretnego silnika ze znanymi charakterystykami przepływowymi jego podstawowych zespołów i nieliniowy model jego systemu sterowania i regulacji. Za pomocą takiego rodzaju modeli możliwe jest modelowanie procesów w silniku przy różnorodnych jego uszkodzeniach i niesprawnościach, poszukiwanie wartości parametrów na nowych zakresach pracy: ustalonych i przejściowych. Jako obiekt badań wybrano jednoprzepływowy, jednowirnikowy silnik turbinowy bez regulowanej dyszy wylotowej (np. SO-3).

## 2. MODEL FIZYCZNY

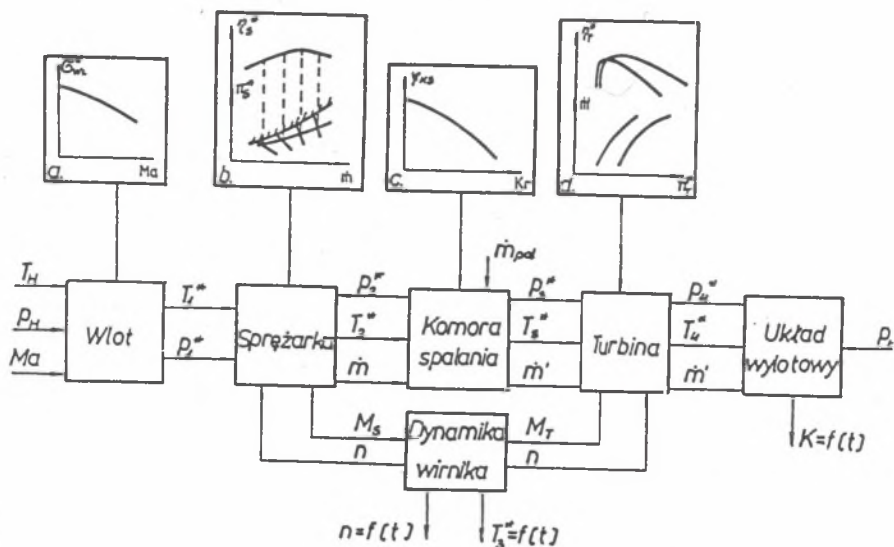
Na rys.1. przedstawiono model fizyczny jednoprzepływowego turbinowego silnika odrzutowego, z uwzględnieniem parametrów wejściowych i wyjściowych w kontrolnych przekrojach oraz pomocnicze charakterystyki podzespołów konstrukcyjnych, które tworzą strukturę modelu obliczeniowego. Efektem końcowym są spodziewane charakterystyki dynamiczne silnika.

Podstawą do zbudowania modelu są następujące założenia upraszczające:

- przemiany przyjęte do opisu pracy zespołów konstrukcyjnych silnika są porównawczymi przemianami izentropowymi [3];
- brak wymiany ciepła między czynnikiem roboczym a elementami konstrukcyjnymi silnika i między elementami konstrukcyjnymi a otoczeniem;
- brak dysocjacji termicznej spalin;
- przepływ czynnika roboczego przez silnik jest jednowymiarowy;
- charakterystyki sprężarek i turbin opisane wielomianami są quasi-statyczne dla ustalonych i przejściowych stanów pracy [4];
- zespoły silnika opisane są parametrami dyskretnymi.

W celu opracowania jak najpełniejszych charakterystyk dynamicznych silnika uwzględniono:

- akumulację ciepła i masy czynnika roboczego w przestrzeni komory spalania i w przestrzeni między turbiną a dyszą wylotową;
- zależność współczynnika wydzielania ciepła  $\xi_{KS}$  od ciśnienia, temperatury i współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ ;
- zależność ciepła właściwego i wykładnika izentropy czynnika roboczego od temperatury i współczynnika nadmiaru powietrza;



Rys. 1. Model fizyczny jednaprzepływowego turbinowego silnika odrzutowego.

- a) charakterystyka wlotu; b) charakterystyka sprężarki;  
 c) charakterystyka komory spalania; d) charakterystyka turbiny;

Fig. 1. Physics model of turbojet engine

- a) inlet characteristics; b) compressor performance map;  
 c) burner characteristics; d) turbine characteristics;

### 3. MODEL MATEMATYCZNY

Do rozwiązania postawionych zadań wykorzystano nieliniowy model symulacyjny, zbudowany zgodnie z dość dokładnym opisem procesów zachodzących w głównych zespołach i agregatach silnika. Przedstawia on sobą układ nieliniowych równań różniczkowych i związany z nim układ nieliniowych równań algebraicznych, o postaci ogólnej;

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = L \underline{F}_1 ; \quad \dots [x_{n+1}, \dots, x_m]^T = \underline{F}_2 \quad (1)$$

gdzie;  $x_1, \dots, x_m$  - współrzędne stanu

W badaniach stosowany był opis teoretyczny prawie zawsze, gdy znane były podstawowe prawa rządzące zjawiskami występującymi w badanych procesach. Opis na podstawie danych eksperymentalnych tylko wtedy, gdy

metody teoretyczne zawodziły np. ze względu na niepełną znajomość rozpatrywanych zjawisk. Do charakterystyk opisanych na podstawie danych eksperymentalnych należą charakterystyki sprężarki i turbiny.

#### 4. SYMULACYJNY MODEL CYFROWY

Model cyfrowy otrzymano po zaprogramowaniu modelu matematycznego. Przy tworzeniu algorytmu obliczeń procesów termogazodynamicznych w silniku wykorzystano zasadę modułowego programowania w powiązaniu z zasadą blokowego budowania modelu obliczeniowego. Moduły stanowią odrębne podprogramy (procedury) i tworzą funkcjonalne całości kompleksowego algorytmu modelu symulacyjnego. Takimi modułami są: algorytmy opracowania wejściowej i wyjściowej informacji, ogólne algorytmy do obliczenia funkcji gazodynamicznych, ciepła właściwych itd. Program umożliwia obliczanie statycznych i dynamicznych charakterystyk silnika w pełnym przedziale zmian jego zakresu pracy i warunków lotu.

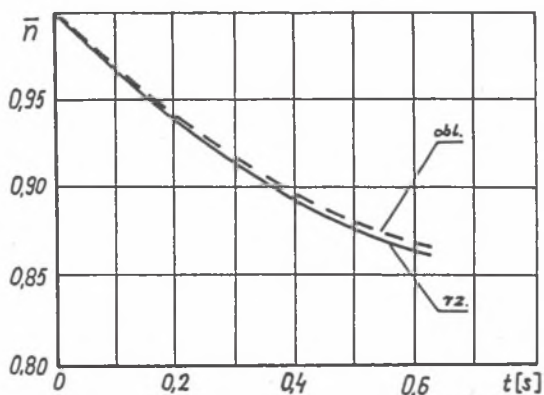
##### 4.1. Symulacja pracy silnika po wyłączeniu dopływu paliwa

Uszkodzenia i niesprawności poszczególnych elementów funkcjonalnych instalacji, zespołów i urządzeń silnika są ważną grupą warunków prowadzących do zaistnienia sytuacji awaryjnej. Analiza statystyczna uszkodzeń silników eksploatowanych w lotnictwie wojskowym, przeprowadzona przez ITWL, dowiodła, że najbardziej zawodnymi układami silnika SO-3 są: układ zasilania paliwem, zespół sprężarki i układ olejenia.

Wśród uszkodzeń układu zasilania paliwem ważną rolę odgrywiają samoczynne wyłączenia się silnika. Pomimo że na tle ogólnej liczby uszkodzeń są nieliczne (ok. 4,5% wszystkich przypadków), jednak wśród nich, 80% zaistniało z następstwami w postaci przesłanek wypadku lotniczego lub przerwania wykonywania zadania.

Dla sprawdzenia poprawności zbudowanego modelu porównano zmianę wartości prędkości obrotowej silnika SO-3 w czasie, po wyłączeniu dopływu paliwa na zakresie startowym. Na rys. 2. przedstawiono wyniki badań analitycznych i otrzymane z eksperymentu.

Różnica między wartościami rzeczywistymi i obliczonymi nie przekracza 5%.

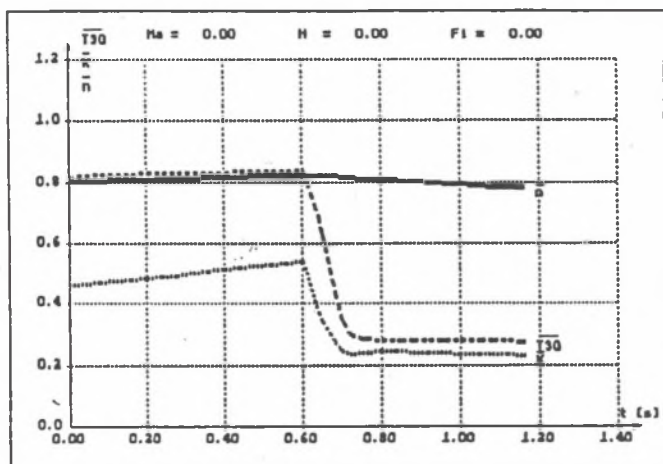


Rys.2. Zależność osiągania kolejnych prędkości obrotowych silnika od czasu, po wyłączeniu dopływu paliwa

Indeksy : rz - z ekperymentu; obl - z obliczeń

Fig.2. An effect upon the time of rotation engine's speed comes up after fuel flow disconnected

indexes: rz- test; obl- calculation



Rys.3. Zależność parametrów pracy silnika od czasu, po wyłączeniu dopływu paliwa w czasie  $\tau = 0.1$  s podczas akceleracji.

$\bar{n}$  - prędkość obrotowa silnika;  $\bar{K}$  - ciąg silnika; T30 - temperatura spalin

Fig.3. An effect upon the time of engine's operation parameters after fuel flow disconnected at  $t = 0.1$  sec during acceleration

$\bar{n}$ - rotation speed;  $\bar{K}$ - thrust; T30- inlet turbine gas turbine

W dalszej kolejności przeprowadzono badania analityczne pracy silnika po wyłączeniu dopływu paliwa podczas akceleracji silnika i jego deceleracji. Przykładowe wyniki obliczeń dla pierwszego przypadku przedstawiono na rys.3.

## 5. PODSUMOWANIE

Zbudowany model obliczeniowy jednoprzepływowego turbinowego silnika odrzutowego pozwala na dość precyzyjną symulację pracy silnika w stanie awaryjnym. Konstrukcja programu opisującego model umożliwia jego modułową rozbudowę, zależnie od układu konstrukcyjnego silnika i badanego stanu awaryjnego.

## LITERATURA

- [1] Dobrjanskij G.W., Martjanowa T.S.: *Dynamika awiacyjonych GTD. Maszyno-strojenie*, Moskwa 1989.
- [2] Jaźwiński J. Borgoń J.: *Niezawodność eksploatacyjna i bezpieczeństwo lotów*. WKiŁ, Warszawa 1989.
- [3] Orkisz M.: *Charakterystyki użytkowe turbinowych silników odrzutowych a stateczność pracy sprężarki*. WOSL, Dęblin 1990.
- [4] Tuliszka E.: *Turbiny cieplne. Zagadnienia termodynamiczne i przepływo-we*. WNT, Warszawa 1973.

Recenzent: Doc. dr hab. Andrzej Buchacz

Wpłynęło do Redakcji dnia 14. 09. 1992

## Abstract

Initial part of work get a definition about emergency situation. As well designed common requirements for simulation models, as let's analyse turbojet engine's operation after one come into being. Specified physics model is shown in fig.1. Designed simplification assume, that they help to describe engine in relationship (1). Part 4 presents general notion of numeral simulation model. For illustrate numeral's model operation have performed calculations for turbojet engine in case of sudden fuel flow disconnection. A fig.2. shows calculate's results and experimental data of rotation speed chnges in max. range since fuel flow suddenly disconnected. Results as we get testify of suggested model's usefullness for engine operation in emergency situation. Fig.3. shows changes of rotation speed, thrust and inlet turbin gas temperature in case, that during acceleration the flow of fuel sudennly gets down.