

Robert JAKUBOWSKI

## MODELOWANIE OSIĄGÓW SILNIKÓW TURBINOWYCH W ŚRODOWISKU MATLAB Z WYKORZYSTANIEM MODELI BLOKÓW FUNKCJONALNYCH

### Streszczenie

W artykule omówiono problematykę modelowania silnika turbinowego ze względu na wyznaczanie jego osiągow. Przedstawiono problematykę modelowania silnika turbinowego z wykorzystaniem bloków funkcjonalnych zespołów silnika. Pokazano proces dekompozycji struktury silnika turbinowego na podstawowe bloki funkcjonalne. Następnie zaproponowano schemat struktury modelu silnika, a także model silnika zbudowany z bloków zespołów funkcjonalnych opracowany w środowisku MATLAB. Przedstawiono strukturę wybranych bloków funkcjonalnych uwzględniających metodykę modelowania oraz funkcjonalność reprezentowanych zespołów. Omówiono zalety wykorzystania takiego podejścia podczas opracowywania modeli silnika o dowolnej strukturze - silniki jedno i wielowirnikowe, jedno i dwuprzepływowe oraz rozwiązania koncepcyjne. Na koniec zaprezentowano metodykę tworzenia programów, które umożliwiają automatyczne generowanie wybranych charakterystyk silnika w oparciu o opracowane modele silnika.

### WSTĘP

Współcześnie coraz powszechniej realizowane są badania numeryczne, wykorzystujące symulacje komputerowe, w celu wyznaczenia osiągow silników lotniczych [5,8,10]. Jest to spowodowane wieloma czynnikami, ale przede wszystkim znacząco niższym kosztem realizacji takich badań niż na rzeczywistych obiektach, oraz możliwości badań dla różnych wariantów rozwiązania w stosunkowo krótkim czasie i przy nieznacznym nakładzie pracy [8,9]. Wzrost znaczenia badań modelowych w lotnictwie jest także efektem powstania odpowiednich narzędzi umożliwiających kreowanie własnych modeli, lub wykorzystywania gotowych pakietów obliczeniowych dedykowanych dla określonej rodziny silników, lub nawet specjalizowanych dla konkretnego typu silnika. Dostępność programów jest też mocno zróżnicowana. Najprostsze modele do obliczeń osiągow można np. pozyskać bezpłatnie z Internetu lub nabyć w stosunkowo niskiej cenie np. z publikacjami książkowymi np. z poz. [2]. Bardziej zaawansowane narzędzia dostępne są w postaci opracowań komercyjnych (np. GSP lub GasTurb), ale koszty pozyskania takiego oprogramowania są już znacząco wyższe.

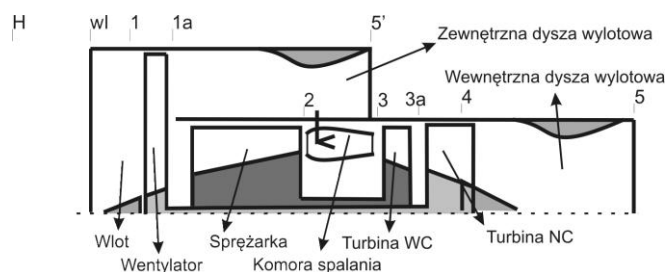
Pomimo dostępności na rynku szeregu programów do modelowania osiągow silnika, z poznawczego i badawczego punktu widzenia korzystnie jest opracować własne narzędzia obliczeniowe. Takie rozwiązanie umożliwia swobodne operowanie na programie poprzez pełną świadomość jego możliwości i ograniczeń. Umożliwia jego modyfikację, rozwój oraz szybką adaptację do realizowanych zadań badawczych i obliczeniowych.

Analizując istniejące rozwiązania programów do obliczeń osiągow turbinowego silnika lotniczego [11,12,13] oraz literaturę w tym zakresie [2,4,8,9] można stwierdzić, że najbardziej poprawnym działaniem przy tworzeniu uniwersalnych narzędzi obliczeniowych dedykowanych do różnych typów silników turbinowych jest tworzenie modelu w oparciu o bloki funkcjonalne zespołów występujących w silniku turbinowym. Wymaga to odpowiedniego, nierzadko czasochłonnego, przygotowania modeli numerycznych poszczególnych bloków silnika, ale później tworzenie struktur złożonych rozwiązań konstrukcyjnych silnika turbinowego jest już sprawą stosunkowo prostą i szybką. Również łatwo można dokonywać modyfikacji struktury silnika w celu np. badania koncepcyjnych rozwiązań jak chociażby silnika z dodatkową komorą spalania [3], wymiennikiem ciepła itp.

### 1. PODZIAŁ SILNIKA NA BLOKI FUNKCJONALNE

W wyniku dekompozycji silnika turbinowego można w nim wyróżnić 7 podstawowych elementów, na bazie których można modelować dowolnie złożoną strukturę silnika [9]. Są to: otoczenie, wlot, sprężarka, komora spalania, turbina, dysza wylotowa i mieszalnik strumieni. Ze względu na podobieństwo modelowanych procesów w zespołach wentylatora i sprężarki oraz komory spalania i dopalacza zespoły te można przedstawić przy użyciu tego samego bloku, ale o odpowiednio zdefiniowanych parametrach wejściowych.

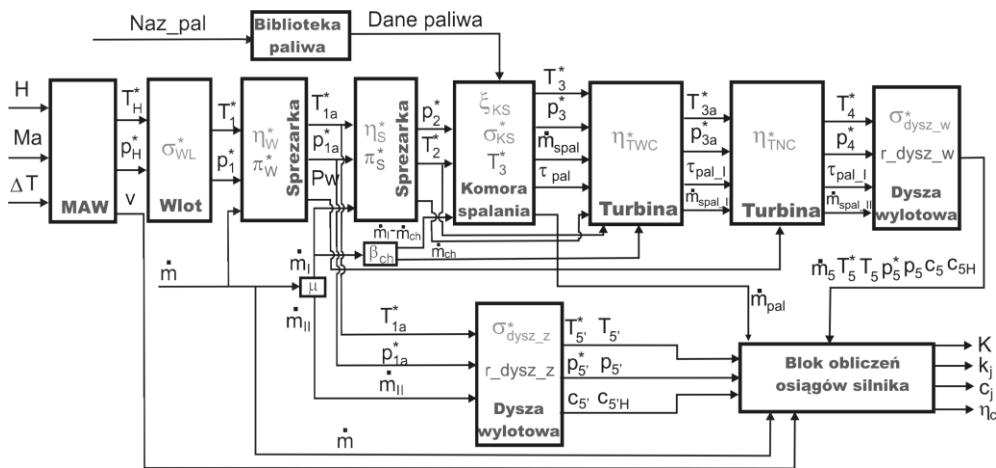
Na etapie tworzenia modelu numerycznego silnika turbinowego o dowolnej strukturze należy uwzględnić powiązania gazodynamiczne i kinematyczne występujące pomiędzy blokami zespołów silnika. Takie podejście jest możliwe poprzez narzucenie odpowiednich zmiennych przekazywanych pomiędzy blokami, których indeksy są zgodne z przyjętą nomenklaturą oznaczeń dla silnika turbinowego. W ten sposób tworząc model silnika z elementów składowych w łatwy sposób można kontrolować poprawność przepływu informacji pomiędzy poszczególnymi blokami obliczeniowymi. Przykład takiego podejścia przedstawiono na rysunkach 1 i 2, gdzie pokazano schematyczny model silnika oraz jego blokową strukturę.



Rys. 1. Schemat dwuprzepływowego turbinowego silnika odrzutowego

#### 1.1. Bloki funkcjonalne poszczególnych modułów silnika

Na etapie opracowywania modelu wybranego bloku funkcjonalnego należy rozpatrzyć jego rolę w modelowanym systemie. Powinna zostać wykonana analiza odnośnie tego jakie dane powinny być wykorzystane jako wejściowe, które jako wyjściowe, a które jako opisujące cechy obiektu zaszyte bezpośrednio w module bloku funkcjonalnego.



Rys. 2. Koncepcja modelu numerycznego do obliczeń osiągow turbinowego silnika dwuprzepływowego z wykorzystaniem bloków zespołów funkcjonalnych silnika

Następnie cechy opisujące funkcjonowanie bloku należy przedstawić stosownymi zależnościami.

Dodatkowo należy zwrócić uwagę na te bloki, które stanowią opis numeryczny kilku zespołów silnika, gdzie występują podobne zjawiska, które jednak mogą różnić się co do pewnych szczególnych rozwiązań. Przykładowo blok turbiny może opisywać proces w turbinie bez chłodzenia lub z chłodzeniem łopatek, blok dyszy może modelować pracę dyszy zbieżnej lub zbieżno-rozbieżnej, pracującej gdy przepływa przez nią powietrze (w kanale zewnętrznym silnika dwuprzepływowego) lub spaliny itp. Dlatego, aby podobne moduły silnika były możliwe do modelowania poprzez jeden wspólny blok, należy na etapie tworzenia danego bloku obliczeniowego uwzględnić wszelkie możliwości jego zastosowania, tak, aby z jednej strony umożliwiał uwzględnienie zjawisk, które są istotne dla rozpatrywanego zespołu w jego najbardziej rozbudowanej postaci, a z drugiej strony aby prosto dało się go wykorzystać dla modelowania podstawowych cech funkcjonalnych reprezentowanego zespołu. Równocześnie należy rozpatrzyć możliwy stopień uproszczenia modelu dopuszczalny ze względu na postawione zadanie obliczeniowe tak, aby przyjęte założenia upraszczające pozwoliły odtworzyć badane zjawiska.

Jedno z możliwych rozwiązań zostanie przedstawiony na przykładzie bloku funkcjonalnego turbiny, który umożliwiał modelowanie procesów z uwzględnieniem turbiny chłodzonej jak również turbiny niechłodzonej.

Analiza funkcjonowania turbiny w odrzutowym silniku turbiny ze względu na modelowanie osiągow pozwala zidentyfikować ten element jako zespół pracujący na rzecz napędu sprężarki lub wentylatora plus dodatkowych urządzeń i agregatów na silniku. Stąd też identyfikując strukturę funkcjonalną zespołu turbiny, należy stwierdzić, że kluczowymi parametrami wejściowymi modelu będą parametry gazu na wlocie oraz moc, jaką turbina ma wytwarzać przy zadanym masowym natężeniu przepływu spalin. W przypadku turbiny chłodzonej dodatkowo należy uwzględnić masę czynnika chłodzącego oraz jego temperaturę. W opracowywanym modelu pominięto rozkład czynnika chłodzącego na poszczególne stopnie turbiny upraszczając to do zagadnienia, w którym chłodzenie uwzględnione zostanie jako czynnik wpływający na zmianę entalpii w całej turbinie [4].

Równanie pracy turbiny z uwzględnieniem wpływu czynnika chłodzącego na obniżenie entalpii gazów wylotowych można przedstawić następująco [4]:

$$P_T = \dot{m}_{spal} \cdot \bar{c}_{p\_spal} (T_1^* - T_2^*) + \dot{m}_{ch} \cdot \bar{c}_{p\_pow} (T_{ch}^* - T_2^*) \quad (1)$$

gdzie:

$P_T$  – moc turbiny,

$\dot{m}_{spal}, \dot{m}_{ch}$  - wydatek masowy spalin na wejściu do turbiny, czynnika chłodzącego,

$T_1^*, T_2^*, T_{ch}^*$  - temperatura spiętrzenia odpowiednio na wejściu do turbiny, wyjściu z turbiny i czynnika chłodzącego.

Dla wyznaczenia rozprężu gazów na turbinie wykorzystuje się sprawność turbiny. W zastosowaniach lotniczych powszechnie funkcjonuje dwa pojęcia sprawności turbiny - izentropowa lub politropowa. Są one nieco inaczej definiowane czego konsekwencją jest inny zapis relacji pomiędzy ciśnieniami i temperaturą. Przykładowo dla sprawności izentropowej obowiązuje zależność:

$$\eta_T = \frac{1 - T_2^*/T_1^*}{1 - (p_2^*/p_1^*)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (2)$$

a dla sprawności politropowej obowiązuje zależność

$$\eta_{T\_pol} = \frac{k \ln(T_2^*/T_1^*)}{k - 1 \ln(p_2^*/p_1^*)} \quad (2)$$

gdzie:

$\eta_T, \eta_{T\_pol}$  – sprawność izentropowa i politropowa turbiny,

$k$  - średnia wartość wykładnika izentropy,

$p_1^*, p_2^*$  - ciśnienia spiętrzenia na wejściu do turbiny, wyjściu z turbiny

Aby umożliwić obliczenia przy uwzględnieniu obydwu przedstawionych sprawności, wprowadzono w modelu turbiny zmienną wejściową zawierającą wartość sprawności, jak też zmienną zawierającą informację o rodzaju zdefiniowanej sprawności.

Pozostałymi zmiennymi wejściowymi modułu są dane dotyczące właściwości spalin. W przyjętym sposobie modelowania wykorzystano informację o stosunku masowym paliwa do powietrza w mieszaninie gazów stanowiących spaliny oraz o udziałach masowych poszczególnych pierwiastków tworzących paliwo w zależności od rodzaju paliwa np. ropy lotniczej, wodoru czy też innego odpowiednio zdefiniowanego paliwa. Dane te są wykorzystywane w modelowaniu właściwości gazu, który został opisany modelem gazu półdoskonałego wg modelu przedstawionego w pracy [1].

Wielkościami, które są pozyskiwane w wyniku obliczeń dla modułu turbiny są parametry stanu gazu na wyjściu: ciśnienie i temperatura, rozpręż oraz masowe natężenie przepływu spalin na wlocie turbiny i nowy skład spalin, który ulega zmianie w wyniku dostarczania do nich powietrza chłodzącego.

Opracowano model numeryczny modułu turbiny środowisku MATLAB w postaci m-file: turbina.m. Początkowa część kodu modułu została przedstawiona na rys 3. Moduł zawiera następujące zmienne wejściowe T1t - temperatura spiętrzenia spalin na wejściu do turbiny, p1t - ciśnienie spiętrzenia spalin na wejściu do turbiny, Lt - moc turbiny, eta\_t - sprawność turbiny, r\_eta - zmienna typu litera określająca rodzaj sprawności turbiny, pal\_pow - stosunek masowy paliwa do powietrza w spalinach, naz\_pal - nazwa paliwa z którego powstały spaliny, m - masowe natężenie spalin na wejściu do turbiny, m\_ch -masowe natężenie przepływu czynnika chłodzącego turbinę, Tch - temperatura czynnika chłodzącego turbinę. Zmienne wyjściowe to: p2t- ciśnienie spiętrzenia na wyjściu z turbiny, T2t - temperatura spiętrzenia na wyjściu z turbiny, Pit - rozpręż na turbinie, m2 - strumień masowy gazów na wylocie z turbiny, pal\_pow2- masowy stosunek paliwa do powietrza na wylocie z turbiny. Funkcja w MATLABie została tak przygotowana, że dwie ostatnie zmienne wejściowe nie są wymagane w przypadku gdy obliczenia są prowadzone dla turbiny bez chłodzenia. Program działa poprawnie dzięki dwóm pierwszym pętlom kodu zaczynającym się od polecenia if, które mają na celu sprawdzenie istnienia zmiennych dotyczących chłodzenia i w przypadku, gdy nie są one zadane, aktywują stosowne zmienne i dokonują podstawienia w ich miejsce takich wartości, aby obliczenia były realizowane poprawnie. Dlatego funkcję można

wywoływać bez dwóch ostatnich zmiennych wejściowych i wtedy będzie ona służyła do obliczeń turbiny bez chłodzenia, a gdy zostaną te zmienne podane, to obliczenia będą realizowane dla turbiny z chłodzeniem.

Przykładowe wyniki obliczeń z wykorzystaniem funkcji **turbina** przedstawiono w tab. 1. Zamieszczone oznaczenia zmiennych są zgodne z wcześniejszym opisem.

Wyniki przedstawione w tab. 1 wskazują, że funkcja działa poprawnie. W przypadku pracy turbiny bez chłodzenia turbina osiąga zadaną moc przy mniejszym spadku ciśnienia i temperatury spiętrzenia. Wprowadzając chłodzenie zadaną moc uzyskuje się przy zwiększonym spadku ciśnienia i temperatury spiętrzenia na turbinie. Spadek jest tym większy, im więcej czynnika chłodzącego dostarczone jest do turbiny, i gdy jest on o niższej temperaturze. Wynika to z zależności 1, skąd otrzymuje się, że zmiana entalpii zasadniczego strumienia spalin wpływających do turbiny jest wynikiem wytworzenia określonej mocy i ogrzania czynnika chłodzącego do temperatury gazów wylotowych. Dodatkowo na skutek dopływu czynnika chłodzącego - powietrza do turbiny następuje zmiana stosunku masowego paliwa do powietrza w spalinach, co w dalszych obliczeniach wpływa na właściwości gazu [1,4].

```

File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base f
- 1.0 + ÷ × |
1 function [p2t,T2t,Pit,m2,pal_pow2]=turbina(p1t,T1t,Lt,eta_t,r_eta,pal_pow,naz_pal,m,m_ch,Tch)
2
3 % [p2t,T2t,Pit,m2,pal_pow2]=turbina_ch..
4 % (p1t,T1t,Lt,eta_t,r_eta,pal_pow,naz_pal,m,m_ch,Tch)
5 %
6 %
7 %Funkcja oblicza parametry za turbiną, która wytwarza określoną moc Lt,
8 %gdy turbina jest chłodzona to należy podać doadkowo:
9 %m_ch - masa chłodząca turbinę, Tch - tempertaura czynnika chłodzącego
10 %
11
12 if exist('Tch','var')==0,
13     Tch=0;
14 end;
15 if exist('m_ch','var')==0,
16     m_ch=0;
17 end;
18
19
20 m_pow=m./(1+pal_pow);
21 m_pal=m-m_pow;
22 m2=m+m_ch;
23
24 lt=Lt./m;
25 cp1=ciep_w(T1t,pal_pow,naz_pal);
26 T2tp=T1t-lt./(cp1);
27 cp12=cp_sr(T1t,T2tp,pal_pow,naz_pal);
28 T2t=T1t-lt./(cp12);
29 pal_pow2=m_pal./(m_pow+m_ch);
30
31
32 while abs(T2t-T2tp)/T2t>0.0001,
33     T2tp=T2t;
34     cp12=cp_sr(T1t,T2t,pal_pow,naz_pal);
35     cp2p=cp_sr(Tch,T2t);
36     T2t=(cp12*T1t.*m+cp2p*m_ch*Tch-Lt)./(cp12*m+cp2p*m_ch);

```

Rys. 3. Początkowa część modelu bloku do obliczeń turbiny zrealizowanego w środowisku MATLAB

Tab. 1. Wyniki obliczeń dla turbiny chłodzonej i niechłodzonej silnika lotniczego wykonane w środowisku MATLAB z wykorzystaniem funkcji turbina

Lp.	Zmienne wejściowe							Zmienne wyjściowe							
	p1t kPa	T1t K	Lt MW	eta_t	r_eta	pal- pow	naz_pal	m kg/s	m_ch kg/s	Tch K	p2t kPa	T2t K	Pit	m2 kg/s	pal_pow2
1	1000	1500	13	0,9	'p'	0,02	nafta lot	50	-	-	0,728	1291	2,06	50	0,02
2									2	600	0,665	1266	2,26	52	0,0192
3									2	700	0,673	1270	2,23	52	0,0192
4									7	700	0,564	1223	2,66	57	0,0175

## 1.2. Tworzenie modeli blokowych zespołów o złożonych strukturach

Opracowane modele podstawowe zespołów można wykorzystać w tworzeniu bardziej złożonych struktur zespołów silnika lotniczego. Przykładowo do obliczeń sprężarki z upustem powietrza można wykorzystać podstawowy moduł sprężarki, który zostanie umieszczony w odpowiednio przygotowanej funkcji do obliczeń sprężarki z upustem.

Założono, że podstawowy model sprężarki zawarty w funkcji **sprezarka.m** zawiera obliczenia strumienia gazów na wylocie ze sprężarki w postaci ciśnienia spiętrzenia - **p2t**, temperatury spiętrzenia **T2t** oraz mocy potrzebnej do napędu sprężarki **Ps**. Danymi wejściowymi modułu są: temperatura spiętrzenia **T1t** i ciśnienie spiętrzenia **p1t** na wejściu do sprężarki, spręż **Pis**, masowe natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę - **m**, sprawności sprężarki - **e\_s**, i definicja rodzaju sprawności sprężarki **r\_s**, która może mieć wartość "p" dla sprawności politropowej i "i" dla sprawności izentropowej. W środowisku Matlab funkcja została zdefiniowana następująco:

```
function [p2t,T2t,Ps]=sprezarka(p1t,T1t,Pis,e_s,r_e,m)
```

W modelowaniu sprężarki z upustem powietrza zadana jest dodatkowo wartość ciśnienia, przy którym następuje upust powietrza - zmienna **Pi\_up**, i wydatku upuszczanego powietrza - zmienna **m\_up**. Funkcję zrealizowano zgodnie z następującym opisem:

```
function [p2t,T2t,pupt,Tupt,Ps]=
```

```
    sprezarka_z_up(p1t,T1t,Pis,Pi_up,e_s,m,m_up)
```

**r\_s='p'** % założenie dotyczące sprawności politropowej

```
[pupt,Tupt,Ps1]=sprezarka(p1t,T1t,Pi_up,e_s,r_s,m);
[p2t,T2t,Ps2]=sprezarka(pupt,Tupt,Pis/Pi_up,e_s,r_s,m-m_up);
Ps=ps1+Ps2;
```

Przedstawiona funkcja została opracowana z wykorzystaniem wcześniej zrealizowanej funkcji do obliczeń sprężarki. Założono, że w pierwszej kolejności prowadzone są obliczenia sprężarki do przekroju wystąpienia upustu, a następnie od tego przekroju do wylotu sprężarki. Stąd w wywołanej po raz drugi funkcji **sprezarka** jako ciśnienie i temperatura spiętrzenia podstawione są wyniki otrzymane z obliczeń w pierwszej funkcji. W obliczaniu mocy potrzebnej do napędu sprężarki uwzględniono, że w części od upustu do jej końca przepływa powietrze w ilości pomniejszonej o masę powietrza upuszczonego. Jako parametr charakteryzujący pracę sprężarki wykorzystano sprawność politropową, którą można przybliżyć dla całej sprężarki i niezależnie od ilości stopni. Wykorzystanie w tym względzie sprawności izentropowej wymagałoby podania dwóch wartości sprawności dla części sprężarki do wystąpienia upustu oraz dla całej sprężarki lub od wystąpienia upustu do końca sprężarki [8]. Dlatego też w danych wejściowych nie jest uwzględniana dana odnośnie rodzaju sprawności sprężarki **r\_s**, natomiast jest ona zdefiniowana wewnątrz funkcji **sprezarka\_z\_up** i przypisuje jej indeks odpowiadający sprawności politropowej.

Przedstawiony przykład tworzenia funkcji do obliczeń bardziej rozbudowanych zespołów w oparciu o modele dla zespołów podstawowych pokazuje, że jest to stosunkowo szybkie, a cały moduł obliczeniowy składa się z kilku linii kodu numerycznego odwołującego się do opracowanych wcześniej funkcji.

```

1 function [K,kj,bj,mpal]=sil_dw(H,Ma,st_dw,T3t,Piw,Pis,naz_pal,r_dw,r_dz,spr,m,Pi_u,Bu)
2
3 % [K,kj,bj,mpal]=sil_dw(H,Ma,st_dw,T3t,Piw,Pis,naz_pal,r_dw,r_dz,spr,m)
4 % Funkcja oblicza parametry przepływowe silnika dwuprzepływowego z
5 % oddzielnymi dyszami wylotowymi. Zmienna wejściowa spr jest wektorem
6 % zawierającym wskaźniki charakteryzujące sprawności i straty w
7 % poszczególnych zespołach silnika, Pi_u - wartość sprężu sprężarki WC,
8 % przy którym występuje upust powietrza Bu - zmienna zawierająca informacje
9 % o upuszczanym powietrzu ze sprężarki i z za sprężarki w ilości odniesionej
10 % do masy m1 Bu=[Bu(Pi_u),Bu(Pis)]
11
12 % wyznaczenie masy powietrza dla kanałów wewnętrznego i zewnętrznego
13 m1=m./(1+st_dw);
14 mII=m-m1;
15 mu=Bu*m1;
16
17 [Th,ph]=otoczenie(H);
18 [T1t,p1t,pht,vh]=wlot(Th,ph,Ma,spr(1),m);
19 [p1at,T1at,Pw]=sprezarka(p1t,T1t,Piw,spr(2),'p',m);
20 [p2t,T2t,pupt,Tupt,Ps]=sprezarka_z_up(p1t,T1t,Pis,Pi_u,spr(3),m,mu(1));
21 m01=m1-mu(1)-mu(2);
22 [p3t,mpal,pal_pow,m2]=komora_spalania(p2t,T2t,T3t,spr(4),spr(5),naz_pal,m01);
23 [p3at,T3at,Pit_wc,m3,pal_pow3]=turbina(p3t,T3t,Ps/spr(7),spr(6),pal_pow,naz_pal,m2,T2t,mu2);
24 [p4t,T4t,Pit_nc,m4,pal_pow4]=turbina(p3at,T3at,Lw/spr(9),spr(7),pal_pow3,naz_pal,m3,Tupt,mu1);
25
26 % obliczenia dyszy wewnętrznej
27 if r_dw=='z',
28     [p5t,p5,T5,c5h]=dysza_zbiezna(T4t,p4t,ph,spr(10),m4,pal_pow4,naz_pal);
29     K1=m4.*c5_h-m1*vh;
30 else
31     [p5t,p5,T5,c5h]=dysza_zb_rozb(T4t,p4t,ph,spr(10),m4,pal_pow4,naz_pal);
32     K1=m3.*c5-m1*vh;
33 end;
34
35 % obliczenia dyszy zewnętrznej
36 if r_dz(1)=='z',
37     [p5zt,p5z,T5z,c5z_h]=dysza_zbiezna(T1at,p1at,ph,spr(11),mII);
38     K2=mII*(c5z_h-vh);
39 else
40     [p5zt,p5z,T5z,c5z]=dysza_zb_rozb(T1at,p1at,ph,spr(11),mII);
41     K2=mII*(c5z-vh);
42 end;
43 K=K1+K2;
44 kj=K/m;
45 bj=mpal./K;

```

Rys. 4. Model do obliczeń osiągow silnika dwuprzepływowego opracowany w środowisku MATLAB z wykorzystaniem modeli blokowych zespołów funkcjonalnych silnika

## 2. MODELOWANIE SILNIKA TURBINOWEGO Z WYKORZYSTANIEM BLOKÓW FUNKCJONALNYCH

Opracowane bloki funkcjonalne zespołów silnika pozwalają przygotowywać modele do obliczeń osiągowo dowolnego typu silnika turbinowego - począwszy od najprostszych rozwiązań silnika jedno-przepływowego, jednowirnikowego, poprzez bardziej złożone konstrukcje silnika dwuwirnikowego, silnika z upustem powietrza ze sprężarki, silnika z dopalaczem do tych najbardziej złożonych jak silnik dwuprzepływowy dwuwirnikowy z mieszalnikiem strumieni i dopalaczem.

Przykładowy model numeryczny przedstawiono dla silnika dwuprzepływowego, dwuwirnikowego z oddzielnymi dyszami wylotowymi strumieni, którego schemat konstrukcyjny i blokowy zawarto na rys. 1 i 2. W modelu uwzględniono dodatkowo upust ze sprężarki na chłodzenie turbiny niskiego ciśnienia oraz upust z za sprężarki na chłodzenie turbiny wysokiego ciśnienia. Wartości upuszczanego powietrza wyrażono w postaci względnej jako odniesienie masy upuszczonego powietrza do masy powietrza na wlocie do kanału wewnętrznego silnika. Zostały one zawarte w wektorze dwuelementowym **Bu**. Zmiennymi wyjściowymi funkcji są **K** - ciąg, **kj** - ciąg jednostkowy, **cj** - jednostkowe zużycie paliwa, **mpal** - masowe natężenie przepływu paliwa. Zmiennymi wejściowymi są: **H** - wysokość, **Ma** - prędkość lotu, **st\_dw** - stopień dwuprzepływowości silnika, **Piw**, **Pis** - spręż wentylatora i sprężarki, **naz\_pal** - nazwa paliwa, **r\_dw**, **r\_dz** - rodzaj dyszy wewnętrznej i zewnętrznej, **spr** - wektor jedenastoelementowy ze wskaźnikami doskonałości procesów w poszczególnych zespołach silnika, **m** - masowe natężenie przepływu powietrza na wlocie do silnika, **Pi\_u** - spręż sprężarki przy którym następuje upust powietrza, **Bu** - względny wydatek powietrza do chłodzenia turbin.

Model numeryczny silnika zaprezentowany na rys. 4 pozwala na obliczenia silnika dla pojedynczego punktu pracy. Podstawiając w miejsce zmiennych wejściowych odpowiednie wartości charakteryzujące pracę poszczególnych zespołów silnika można wyznaczyć jego wybrane wskaźniki pracy. Gdyby występowała konieczność wyznaczenia dodatkowych parametrów charakteryzujących pracę silnika jak na przykład sprawności: cieplną, napędową i ogólną model silnika należy uzupełnić o stosowne równania dodane w kolejnych liniach kodu programu. Równocześnie w danych wyjściowych należy dodać odwołanie do tych zmiennych, w celu wydobycia ich na zewnątrz programu.

Zaletą prezentowanego podejścia do modelowania silnika jest możliwość stosunkowo szybkiego tworzenia modelu silnika turbino-owego o dowolnej strukturze, w tym rozwiązań koncepcyjne, jak np. prezentowany w pracy [3] silnik z dodatkową komorą spalania pomiędzy turbinami. Dostęp do kodów źródłowych silnika pozwala na łatwą modyfikację ich struktury w celu pozyskania dodatkowych informacji, co często jest bardzo trudne w przypadku komercyjnych programów o zamkniętej strukturze.

## 3. GENEROWANIE CHARAKTERYSTYK SILNIKA

Wykonanie obliczeń w celu opracowania charakterystyk silnika wymaga wykonania obliczeń iteracyjnych. Wprawdzie środowisko Matlab umożliwia realizację obliczeń dla zmiennych będących wektorami, lub nawet macierzami, gdzie od razu można otrzymywać wyniki obliczeń w postaci zależności od jednej lub kilku zmiennych.

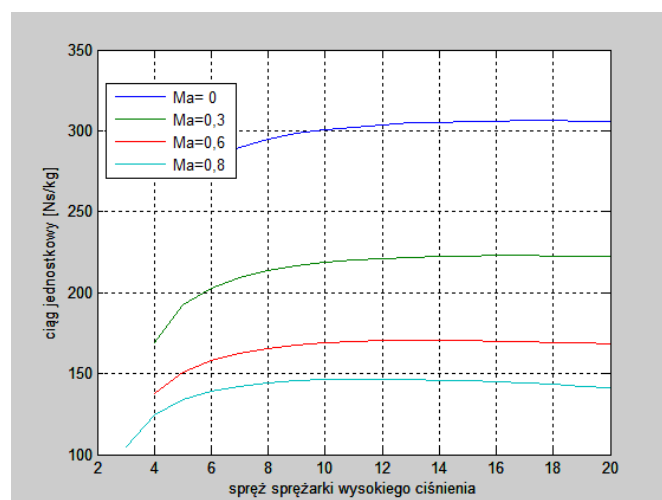
W przedstawionej koncepcji budowy modelu do obliczeń osiągowo silnika zaproponowano przygotować stosowną funkcję, która w sposób iteracyjny będzie realizowała obliczenia z wykorzystaniem przygotowanego wcześniej modelu całego silnika, a następnie zbierała dane w postaci wektora lub macierzy i generowała stosowne wykresy.

Przykładowo w celu optymalizacji obiegu silnika w funkcji sprężu sprężarki silnika dla różnych wysokości lotu można przygotować funkcję w której podstawowymi danymi wejściowymi będą zadawane w postaci wektorów parametry wejściowe spręż sprężarki i wysokość lotu, a pozostałe parametry pracy silnika będą mogły być definiowane wewnątrz funkcji. Določenie graficznego zobrazowania wyników wymaga następnie narysowania wykresów z wykorzystaniem funkcji **plot** dla rysunków płaskich, lub któregoś z poleceń w środowisku MATLAB dla rysunków w układzie trójwymiarowym.

Przykładowy kod programu do realizacji charakterystyk ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa silnika dwuprzepływowego od sprężu sprężarki dla różnych prędkości lotu przedstawiono poniżej. Zmiennymi wejściowymi są spręż sprężarki i prędkość lotu zadawane jako wektory. Pozostałe parametry charakteryzujące pracę silnika powinny zostać podane wewnątrz funkcji obliczeniowej. Jako wynik obliczeń otrzymuje się macierz ciągu jednostkowego **kj** i jednostkowego zużycia paliwa **cj**, w których poszczególne wiersze będą odpowiadały wynikom obliczeń tych parametrów od sprężu dla zadanych prędkości lotu. Dodatkowo zostaną wygenerowane dwa wykresy przebiegu wyznaczonych wielkości od sprężu dla różnych prędkości lotu.

```
function [kj,cj]=optymalizacja[Pis, Ma]
%przypisanie wartości poszczególnym zmiennym
H=0;
T3t=1600;
% itd. Aż do zdefiniowania wartości wszystkich wymaganych zmiennych
for i=1:length(Ma)
    for j=1:length(Pis)
        [kj(i,j),cj(i,j)]=
            silnik(H, Ma(i), st_dw, T3t, Piw, Pis(j), naz_pal, r_dw, r_dw, spr, 1);
    end;
end;
subplot(1,2,1)
plot(Pis,kj);
subplot(1,2,2);
plot(Pis,cj);
```

Przykładowe wyniki obliczeń dla ciągu jednostkowego w funkcji sprężu sprężarki wysokiego ciśnienia i prędkości lotu dla silnika dwuprzepływowego w formie graficznej przedstawiono na rys. 5. Opis, który przedstawiono na wykresie jest wynikiem dodania dodatkowych linijek kodu z opisem osi i legendy.



Rys. 5. Wyniki obliczeń ciągu jednostkowego silnika dwuprzepływowego od sprężu sprężarki wysokiego ciśnienia dla różnych prędkości lotu wyrażonych liczbą Macha

Takie przygotowanie wyników obliczeń pozwala na łatwą ich analizę, interpretację i formułowanie wniosków odnośnie realizowanego tematu. Równocześnie pozyskuje się wyniki w postaci pakietu danych, które można archiwizować i dalej obrabiać oraz zamieszczać w raportach i sprawozdaniach z badań.

## PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy podejście do modelowania silnika turbinowego w celu wyznaczenia jego charakterystyk osiągowych jest często wykorzystywane w wielu współcześnie opracowywanych modelach silnika. Niewątpliwą zaletą takiego podejścia do modelowania silnika z wykorzystaniem bloków jego zespołów funkcjonalnych jest stosunkowo proste tworzenie dowolnych struktur silnika z wykorzystaniem tychże bloków. Bardzo szybko i łatwo można "budować" dowolnie wybrany silnik turbinowy – jedno lub dwuprzepływowy, jedno lub dwuprzepływowy. Umożliwia to także budowę modeli silników koncepcyjnych o nieco innym układzie struktury silnika, jak np. silnik z dodatkową komorą spalania pomiędzy turbinami.

Przedstawione rozwiązanie struktury silnika w środowisku Matlab daje możliwość dokonywania szybkich zmian w wybranych zespołach silnika w celu dostosowania warunków obliczeń do realizowanego zadania obliczeniowego. Umożliwia to łatwą modyfikację kodu programu oraz łatwe śledzenie kodu programu obliczeniowego, ponieważ cały program numeryczny do obliczeń silnika rozbitý jest na mniejsze moduły.

Pomimo istnienia szeregu komercyjnych opracowań w zakresie modelowania osiągow silnika, to jednak ciągle istnieje uzasadnienie dla opracowania własnych modeli silnika. Przede wszystkim dają one możliwość ingerencji w kod wewnętrzny programu, umożliwiając rozbudowę systemu o dodatkowe moduły realizujące dodatkowe zadania obliczeniowe. Poza tym w znane są możliwości i ograniczenia programu, co umożliwia świadome wykorzystanie takiego oprogramowania na etapie realizowanych obliczeń osiągow wybranych form konstrukcyjnych silnika.

## BIBLIOGRAFIA

1. Guha A. An efficient generic method for calculating the properties of combustion products. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2001; A3(215): 375-387
2. Gieras M., *Obliczenia parametrów użytkowych lotniczych silników turbinowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2013
3. Jakubowski R. Evaluation of performance properties of two combustor turbofan engine. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17 (4): 575–581, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.4.13>
4. Jakubowski R. *Modeling and analysis of jet engine with cooling turbine*, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 19, No. 2, str. 235-243, 2012
5. Jakubowski R., *Symulacja charakterystyk eksploatacyjnych silnika dwuprzepływowego z wykorzystaniem wirtualnej hamowni silnika - WESTT CS/BV*. *Logistyka* 2014, nr 6, str. 4762-4770
6. Jakubowski R., Krawczyk K., *Modeling of jet engine with cooling turbine*. *Silniki Spalinowe*, T 50, nr 3, 2011
7. Jakubowski R., Orkisz M., *Wpływ zmian procesów przepływo-ciepnych w silniku turbinowym na jego charakterystyki użytkowe*. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. 2002; 2(14): str. 4-25

8. Orkisz M., Muszyński M., *Modelowanie turbinowych silników odrzutowych*. Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 1997
9. Orkisz M. i in., *Podstawy doboru turbinowych silników odrzutowych do płatowca*. Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2002.
10. Pawlak W., *Turbinowy silnik odrzutowy. Elementy symulacji, sterowania i monitorowania*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2011
11. [www.gasturb.de/index.html](http://www.gasturb.de/index.html)
12. [www.gspteam.com](http://www.gspteam.com)
13. [www.price-induction.com](http://www.price-induction.com)

## TURBO ENGINES MODELLING WITH BLOCKS OF FUNCTIONAL ENGINE COMPONENTS APPLICATION FOR ITS PERFORMANCE EVALUATION

### Abstract

*The turbo engine numerical modeling for its performance evaluation is a scope of this paper. The turbo engine modeling with blocks of functional components application is presented. In the beginning the engine decomposition for functional elements is described. The scheme of engine model of functional components blocks is presented and explained. The numerical code of some functional blocks prepared in MATLAB is presented. The profits of such turbojet engine modeling concept is described. It is pointed that the engine model preparation of different scheme – single spool, two-spool, bypass engine is easy and low time consumed. As a last topic the code of program for engine performance evaluation is presented.*

Autorzy:

dr inż. **Robert Jakubowski** – Politechnika Rzeszowska, Katedra Samolotów i Silników Lotniczych, [robert.Jakubowski@prz.edu.pl](mailto:robert.Jakubowski@prz.edu.pl)