Modelowanie i wyznaczanie osiągów silników turbinowych z wykorzystaniem środowiska Matlab

Dr inż. Robert JAKUBOWSKI

Polietchnika Rzeszowska

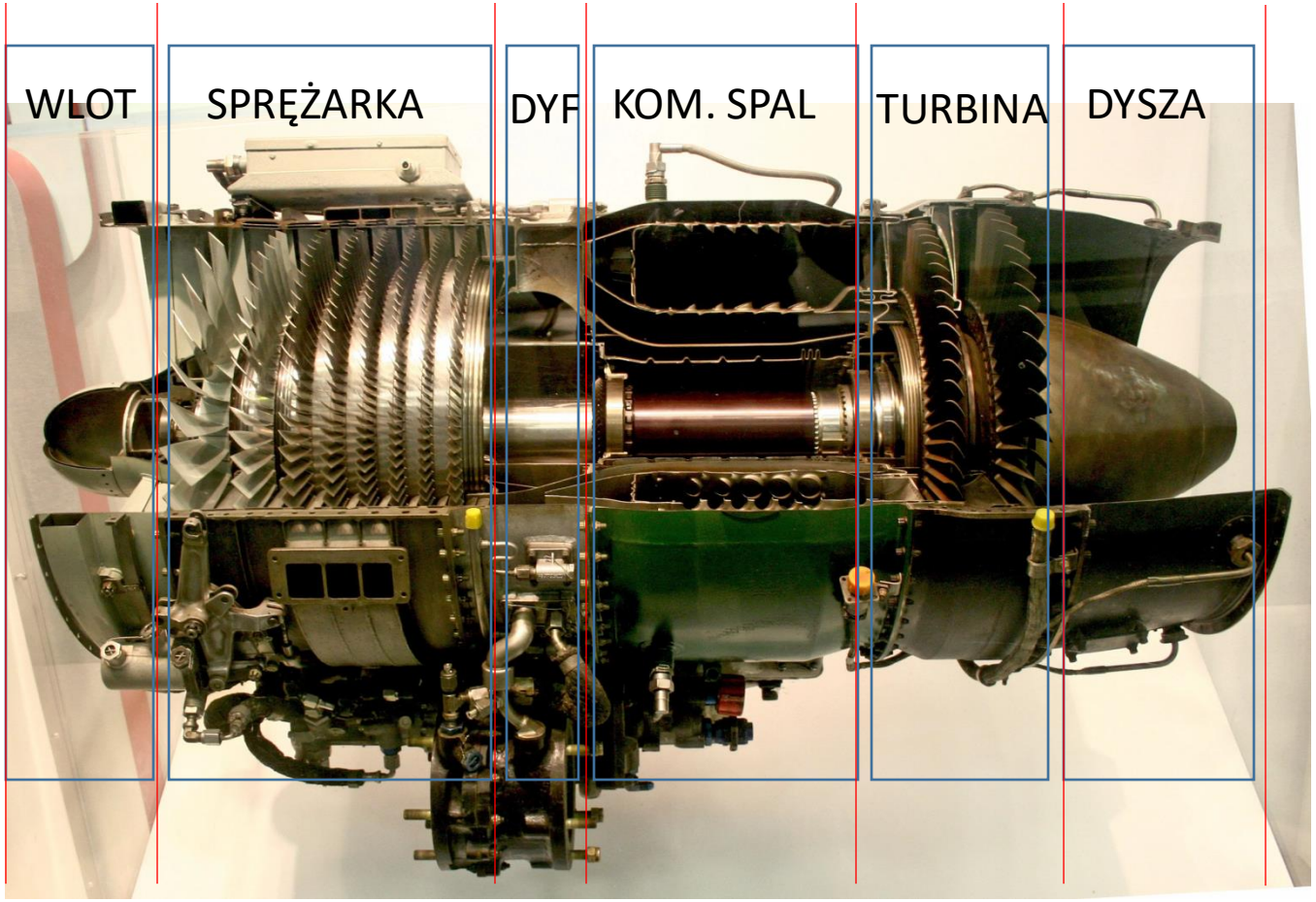
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej

2024

Modelowanie silnika turbinowego – geneza problemu

- Istnieje szereg komercyjnych programów do obliczeń osiągów silników lotniczych: GSP, GasTurb, NPSS
  - Są one płatne i wymagają zakupu oprogramowania i utrzymania licencji
  - Brak znajomości tych narzędzi
- Politechnika Rzeszowska od kilku lat dysponuje ogólnouczelnianą licencją MATLAB, dlatego też jest on najczęściej wykorzystywany w tworzeniu modeli i realizacji obliczeń
  - Łatwą możliwość integracji i tworzenie modeli bardziej złożonych obiektów współdziałajac z innymi naukowcami (np. współpraca silnik – śmigło, model samolotu z zespołem napędowym itp.)
  - Dostęp do wielu przydatnych funkcji, które oferuje MATLAB na etapie tworzenia modelu i realizacji obliczeń.
  - Doświaidczenie, zdobyte przez lata pracy ze środoiskiem MATLAB

Przykład decompozycji modelu silnika na składowe bloki funkcjonalne



- Sprężarka, wentylator
- Turbina, Turbina napędowa
- Komora spalania, dopalacza
- Mieszalnik strumieni
- Dysza wylotowa
- Rozdzielacz strumieni
- Wlot / Kanał przepływowy – generujący straty
- Wymiennik ciepła

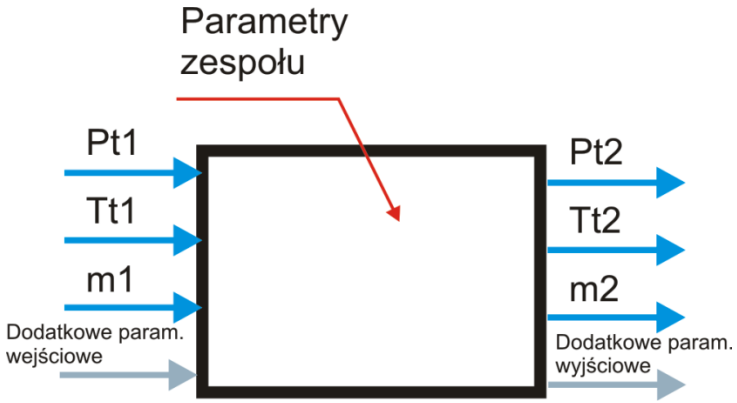
Dodatkowe moduły

- Parametry otoczenia
- Moduł do obliczeń osiągów

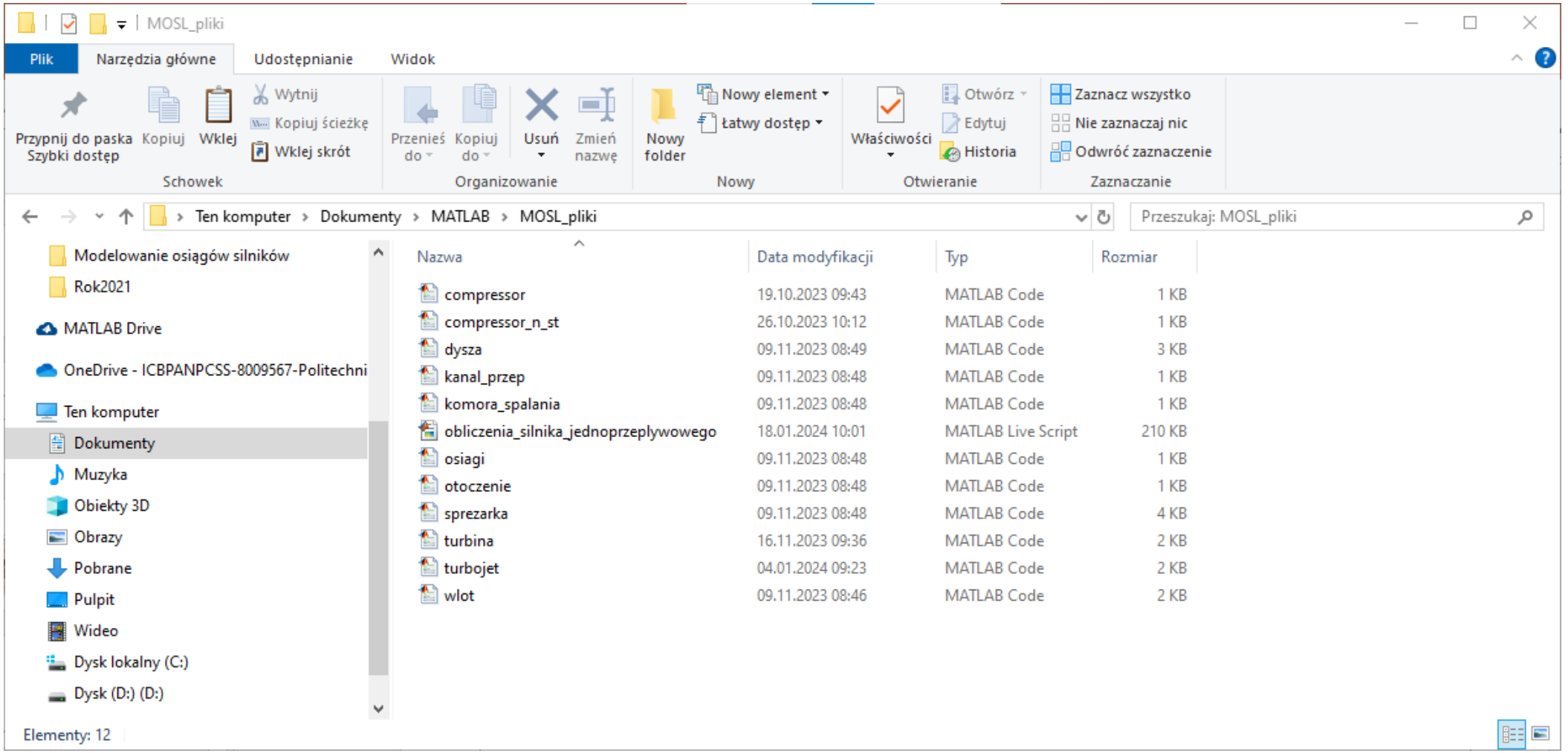
Określenie parametrów wejściowych i wyjściowych bloków obliczeniowych zespołów silnika

- Podstawowe parametry wejścia: ciśnienie całkowite Pt1, temperatura spiętrzenia Tt1, wydatek strumienia masy m1 - dotyczy wszystkich zespołów
- Podstawowe parametry wyjścia: ciśnienie całkowite Pt2, temperatura spiętrzenia Tt2, wydatek strumienia masy m2 - dotyczy wszystkich zespołów
- Parametry zespołu – definiowane wewnątrz zespołu lub wprowadzane z zewnątrz
- Dodatkowe parametry wejściowe
- Dodatkowe parametry wyjściowe

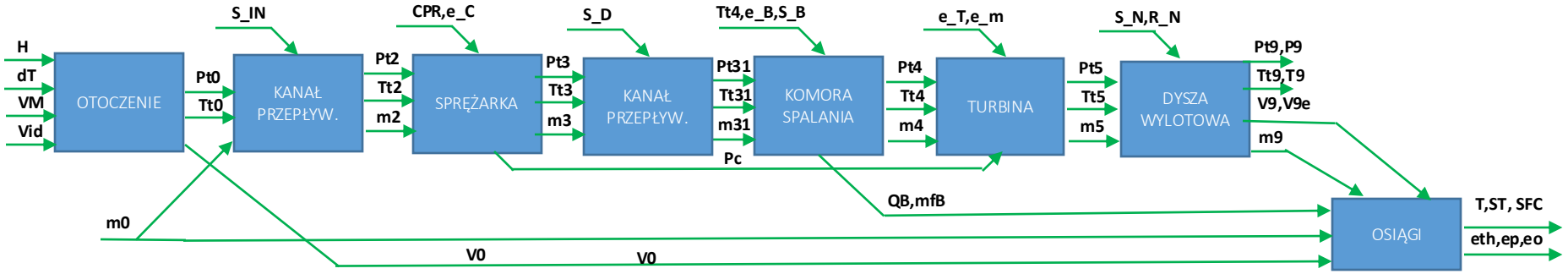
```
function [Pt2,Tt2,m2,Dodat.Par.Wyjść]=
        moduł(Pt1,Tt1,m1,Par.Zespołu, Dodat.Par.Wejść);
```



Folder z plikami modułów silnika oraz przykładowym modelem silnika jednoprzepływowego *turbojet.m*

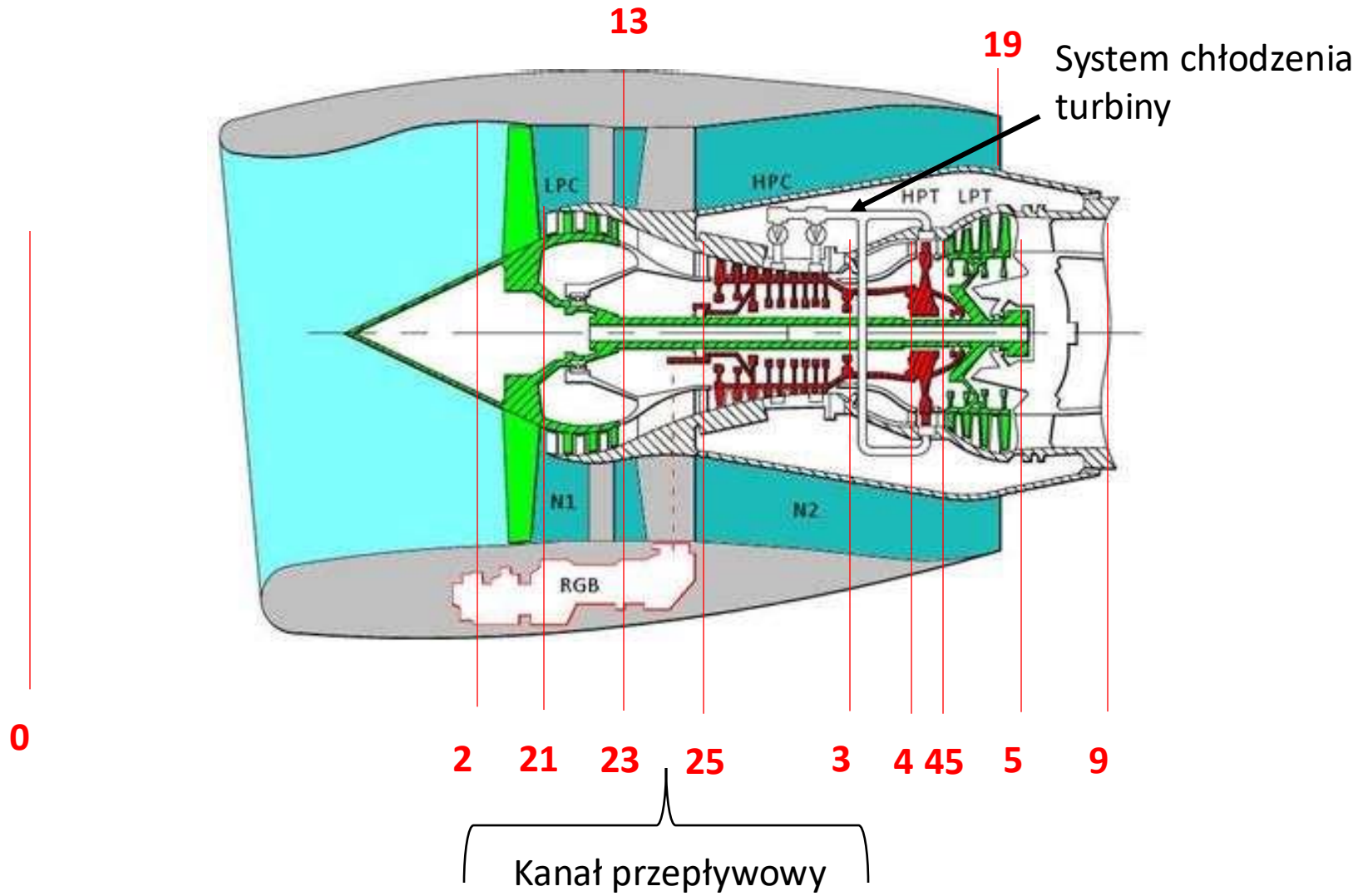


Model silnika jednoprzepływowego

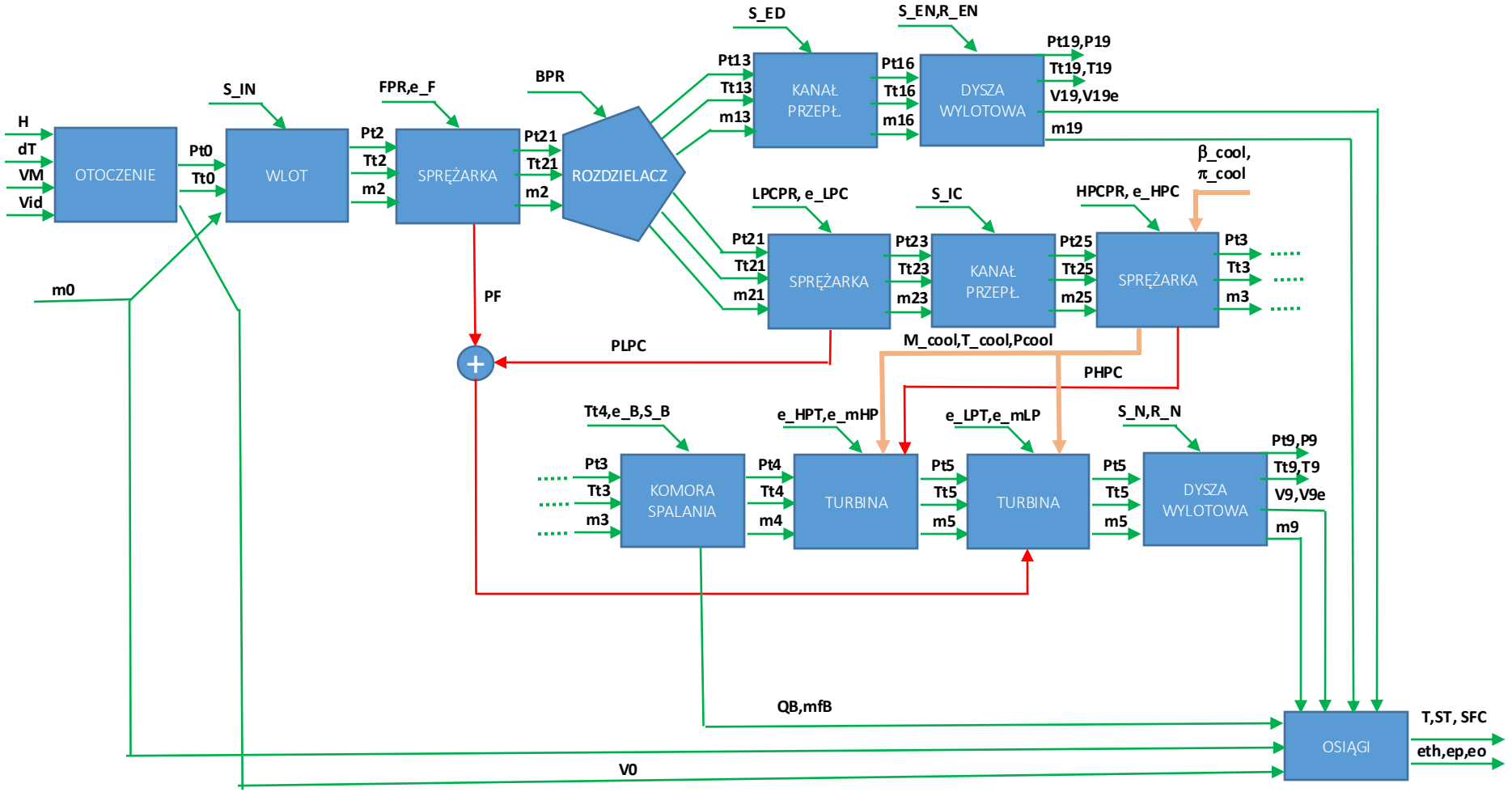



```
function [ST,SFC,T,mfB,A9,A_Tmin,eth,ep,eo] =
silnik_jednoprz(H,dT,VM,Vid,m0,CPR,Tt4,S_IN,e_C,S_D,S_B,e_B,e_T,e_m,S_N,r_N)
M_TN=1 % USTAWIONO PRĘDKOŚĆ w WDT RÓWNĄ M=1
[Pt0,Tt0,P0,T0,V0] = otoczenie (H,dT,VM,Vid);
[Pt2,Tt2,m2] = kanal_przep(Pt0,Tt0,m0,S_IN);
[Pt3,Tt3,m3,PC] = sprezarka(Pt2,Tt2,m2,CPR,e_C);
[Pt31,Tt31,m31] = kanal_przep(Pt3,Tt3,m2,S_D);
[Pt4,Tt4,m4,mfB,QB] = komora_spalania(Pt31,Tt31,m31,Tt4,S_B,e_B,'b');
[Pt5,Tt5,m5,TPR,A_Tmin] =turbina(Pt4,Tt4,m4,PC/e_m,e_T,M_TN);
[Pt9,Tt9,m9,V9,V9e,T9,T9e,A9] = dysza(Pt5,Tt5,m5,S_N,P0,r_N);
[T,ST,SFC,eth,ep,eo] = osiagi (m9,m0,V9e,V0,QB,mfB);
```

Silnik dwuprzepływowy dwuwirnikowy



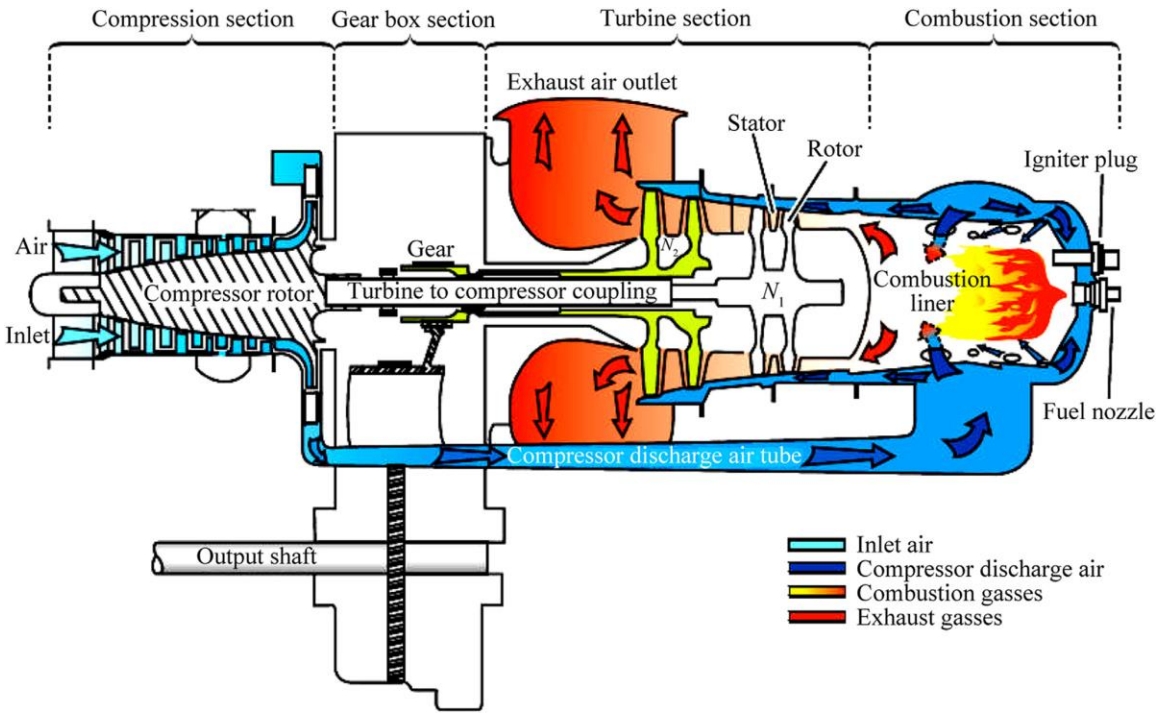
Model silnika dwuprzepływowego



Zalety proponowanego podejścia

- Praca z modułami umożliwia łatwe sprawdzenie i zweryfikowanie poprawności działania danego modułu
- Przygotowane, sprawdzone moduły można wielokrotnie wykorzystywać, zamiast za każdym razem wpisywać model danego modułu w modelu silnika
- Praca z modułami przyspiesza tworzenie złożonych konstrukcji silników – dwu i trójwirnikowych oraz nowych koncepcjyjnych rozwiązań silnika.

Turbinowy Silnik Śmigłowy – Ptzykład Modelowania i Obliczeń



Zasada działania silnika

<u>Współpraca sprężarki z turbiną wysokiego ciśnienia</u>

Moc sprężarki=Moc turbiny wysokiego ciśnienia

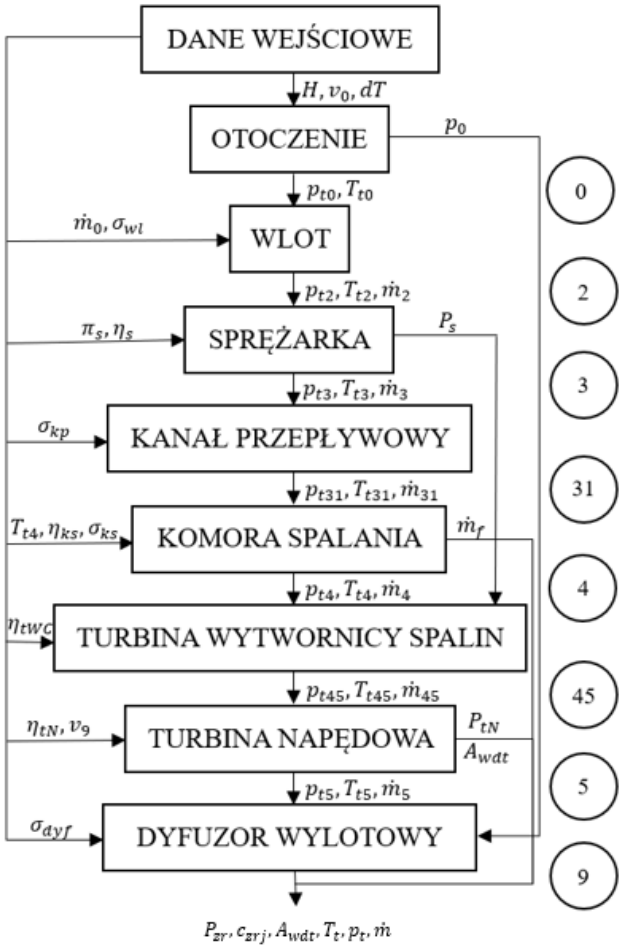
Prędkość obrotowa sprężarki=Prędkość obrotowa turbiny

<u>Turbina Napędowa (Wolna)</u>

Moc turbiny zależy od parametrów gazu za turbiną sprężarki oraz od parametrów otoczenia

Prędkość obrotowa jest zależna od zewnętrznego odbiornika mocy.

Model silnika turbinowego dla DP



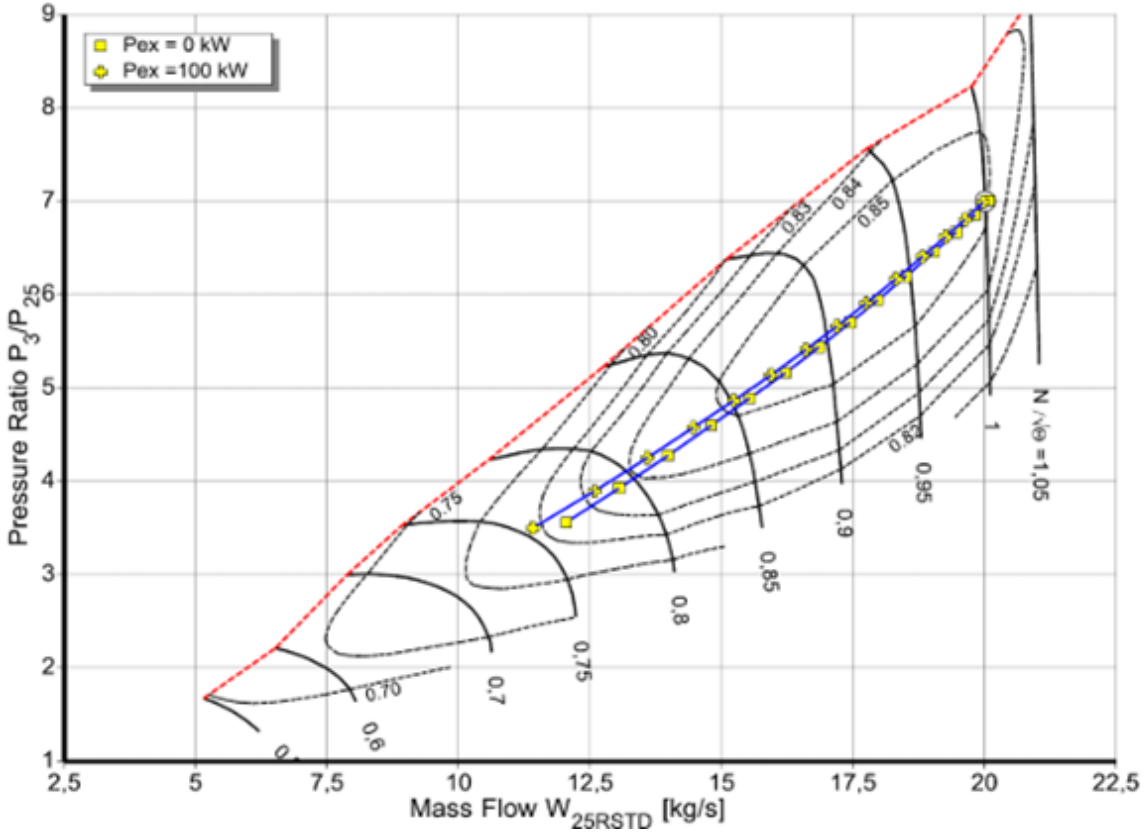

```
function [param_wyjściowe] = silnik_turbosmiglowy...
(param_wejściowe)


[param_wyjściowe_0] = otoczenie (param_wejściowe);
[param_wyjściowe_2] = kanal_przep(param_wyjściowe_0,param_wejściowe);
[param_wyjściowe_3] = sprezarka(param_wyjściowe_2,param_wejściowe);
[param_wyjściowe_31] = kanal_przep(param_wyjściowe_31,param_wejściowe);
[param_wyjściowe_4] = komora_spalania(param_wyjściowe_31,param_wejściowe);
[param_wyjściowe_45] = turbina(param_wyjściowe_4,param_wejściowe);
% Obliczenia iteracyjne turbiny wolnej i dyfuzora wylotowego
parametry_poszukiwane = przybliżenie
while parametry_poszukiwane
        [param_wyjściowe_5] = turbina(parametry_wyjściowe45);
        [param_wyjściowe_9] = dyfuzor_wyl(parametry_wyjściowe5,parametry_wejściowe);
end
[parametry_wyjściowe] = osiągi (parametry_wyliczone 0_9)

end
```

Modelowanie osiągów silnika „OFF DESIGN”

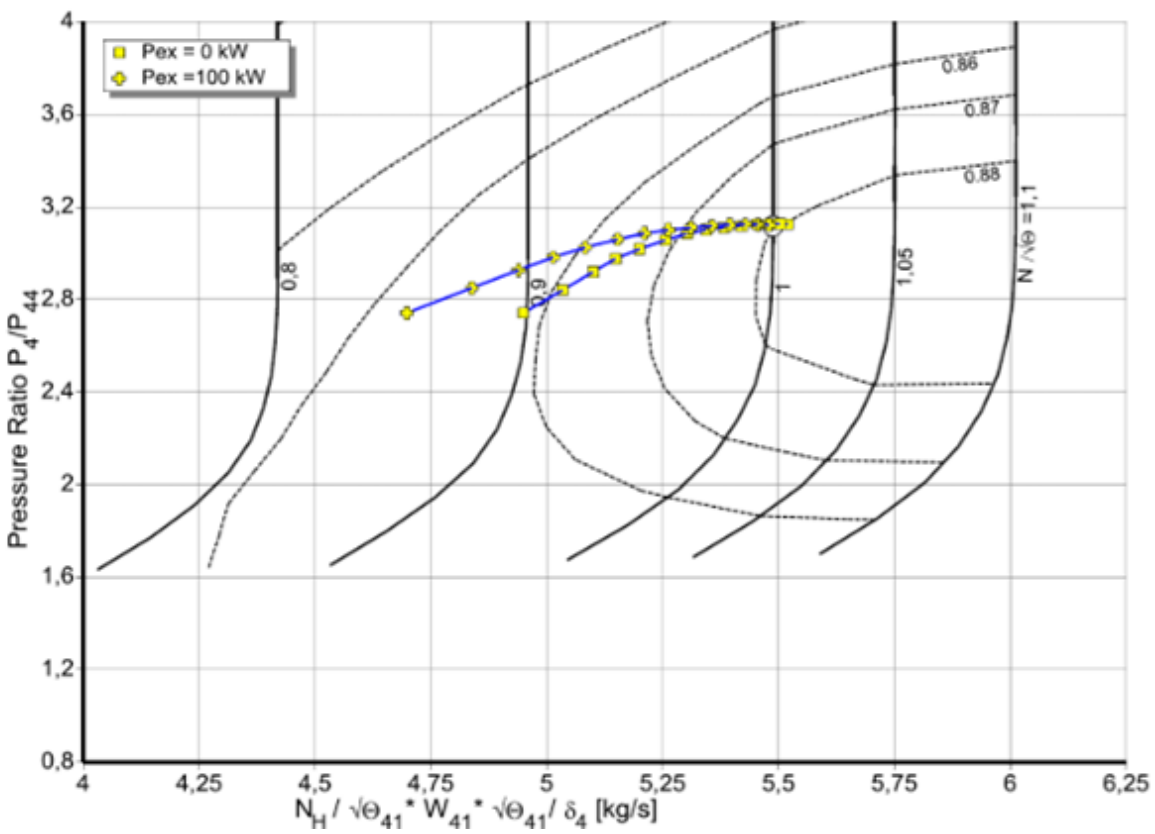
- Podstawowe dane z obliczeń DP
  - Parametry silnika
  - Wymiary geometryczne determinujące wydatek (minimalne pole przekroju WDT, przekrój wylotowy)
- Założenia modelu oraz wymagane dane
  - Mapy charakterystyk zespołów w szczególności sprężarki i turbin
  - Założenie przepływu krytycznego w turbinie sprężarki (stały rozpręż na turbinie, a wydatek w turbinie jest równy krytycznemu)
  - Turbina napędowa nie jest związana mechanicznie z zespołem wysokiego ciśnienia, a jedynie gazodynamicznie.

Mapy charakterystyk sprężarek i turbin

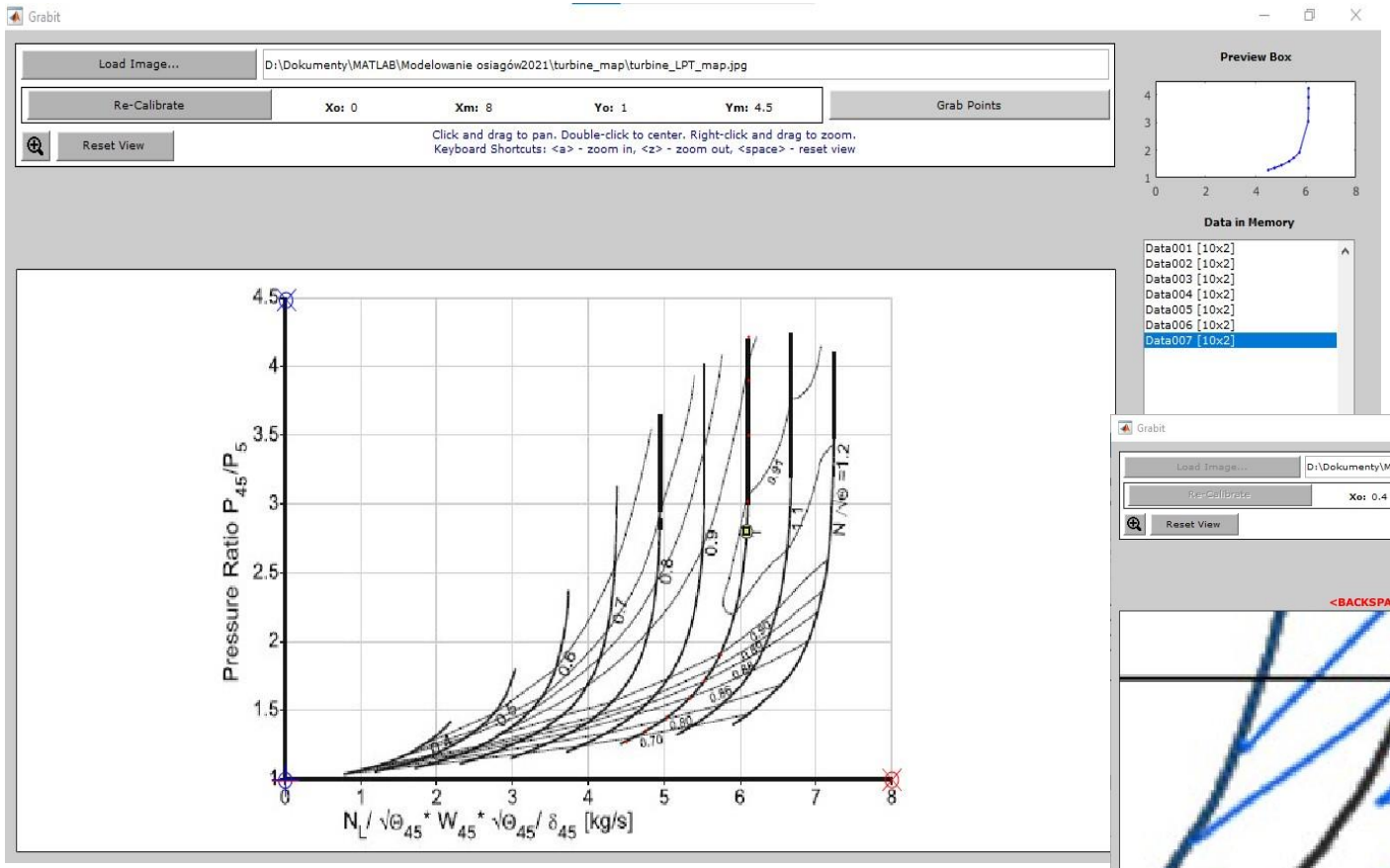
Charakterystyka sprężarki



Charakterystyka turbiny

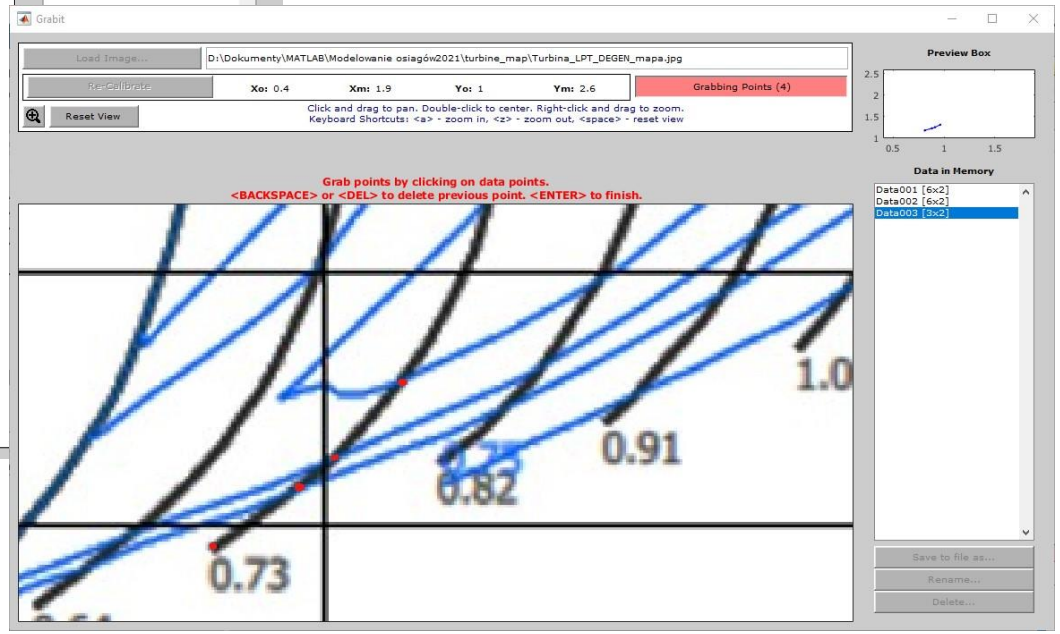


Wykorzystanie GRABIT do wczytywani punktów z pliku graficznego



Wczytanie pliku graficznego
Zdefiniowanie współrzędnych wykresu
Wskazanie wybranych punktów przez klikniecie myszką
Dane można zapisać, ale są też dostępne Workspace

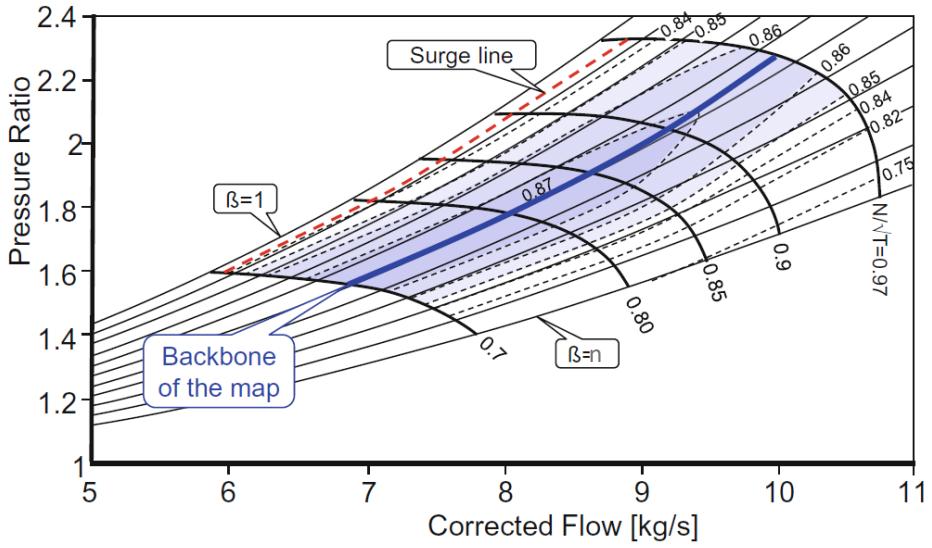
Dane sprawności zostały przypisane ręcznie



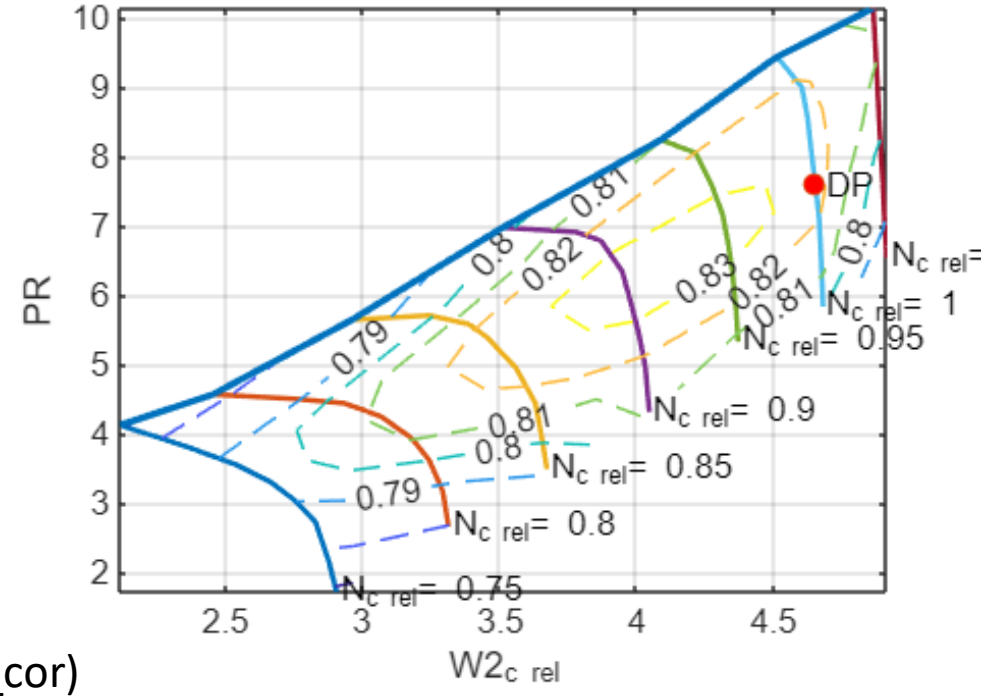
https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7173-grabit

Tworzenie danych z mapami charakterystyk i ich wizualizacja

- Tworzenie macierzy danych w układzie Beta_line, prędkość_zredukowan, dla zredukowanego_wydatku_masowego, sprężu i sprawności



- Wizualizacja danych z wykorzystaniem funkcji *plot* i *contour*



W_cor=f(beta,N_cor) PR=f(beta,N_cor) Eff=f(beta,N_cor)

Pozyskiwanie danych z map charakterystyk – interpolacja 2D funkcja: *interp2*

Wyznacznie lini współpracy turbiny ze sprężarką

- Przygotowano funkcję w której określono funkcję celu

```
function
[y]=hpc_spool(x,Pt2,Tt2,s_dyf,s_b,e_b,e_t,em,Awdt_DP,HPTPR_DP,n1_rd_map,beta,W2_rd_map,CPR_map,eta_c,n1)
% funkcja do obliczeń zespołu HPC, Jako zmienne niewiadome są są x(1) CPR,
% x(1) = Beta wejściowe
% x(2)= Tt4
% x(3)
% zmienne wyjściowe y, y(1)=A_WDT,y(2)=Pit_WC,y(3)=
n1_rd=n1*sqrt(288/Tt2);
[W2_rd,CPR,e_s]=compressor_map_int(n1_rd_map,beta,W2_rd_map,CPR_map,eta_c,n1_rd,x(1));
m2=W2_rd*Pt2/101325*sqrt(288/Tt2);
[Pt3,Tt3,m3,Ps]=sprezarka(Pt2,Tt2,m2,CPR,e_s);
[Pt31,Tt31,m31]=kanal_przep(Pt3,Tt3,m3,s_dyf);
[Pt4,Tt4,m4,~,~]= komora_spalania(Pt31,Tt31,m31,x(2),s_b,e_b,'b');
[~,~,~,Pit_WC,AWDT_]=turbina(Pt4,Tt4,m4,Ps/em,e_t,1);
y(1)=AWDT_-Awdt_DP;
y(2)=Pit_WC-HPTPR_DP;
end
```

Zmienne poszukiwane - Beta line

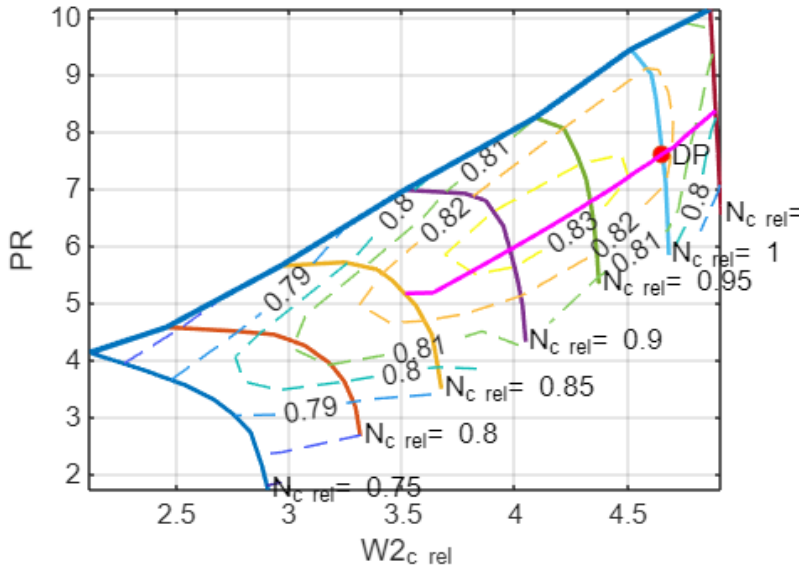
Temperatura Tt4

Funkcja celu - wyrównanie pól przkroju wyznaczanego w obliczeniach z zadanym
- Utrzymanie stałego rozprężu na turbinie

Przykład wyznaczenia lini współpracy TS rozwiązywanie układów równań nieliniowych

- Zadana jest wartość prędkości obrotowej wirnika turbosprężarki (prędkość względna)

```
[y]=@(x) hpc_spool(x,parametry_wejściowe_funkcji,n_(i));
rozw1=fsolve(y,[beta_pom,(1-N_comp_rel(i))/2+N_comp_rel(i)*Tt4_DP],optimoptions('fsolve','Display','off','Algorithm','trust-region-dogleg'));
beta_(i)=rozw1(1);
Tt4_(i)=rozw1(2); % Parametr do obliczeń silnika
%beta_pom=beta_(i); % beta dla kolejnego kroku przeszukiwania wyniku
[W2_(i),CPR_(i),e_s_(i)]=compressor_map_int(n_comp_map,beta,W2_comp_map,CPR_comp_map,eta_comp_map,n_(i)*sqrt(288/Tt2),beta_(i));
%Przeliczenie W2_ na wydatek masowy fizyczny na wlocie silnika
m0_(i)=W2_(i)*sqrt(288/Tt2)*(Pt2/101325);
```



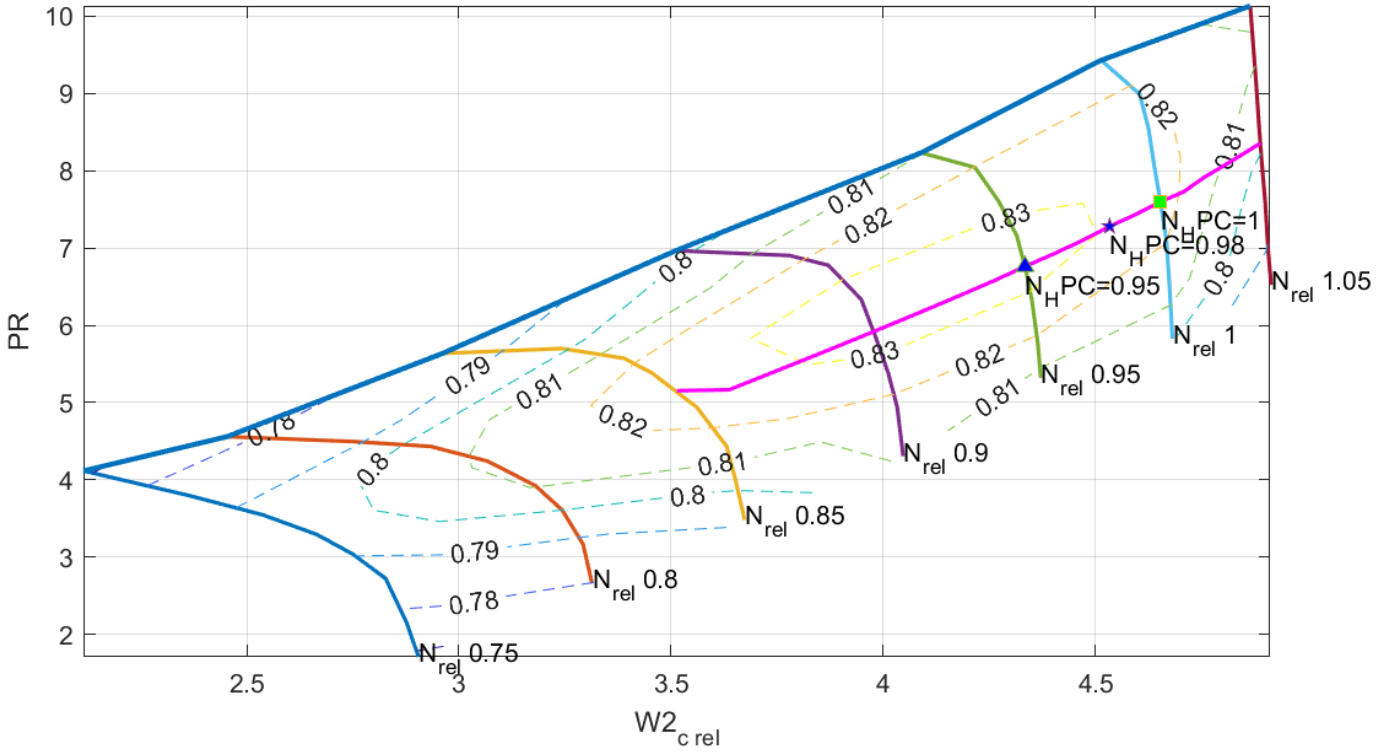
Wykorzystanie Livescript do tworzenia arkusza obliczeniowego

- Pozwala w łatwy sposób połączyć opis rozwiązywanego problemu z kodem i realizować obliczenia w sposób uporzadkowany zawierając krork po kroku metodyke realizowanych obliczeń
- Można przygotować wstępnie wszystkie niezbędne dane wejściowe, które w trakcie obliczeń mogą też być modyfikowane. Wielokrotnie można wracać do tych samych danych, bez konieczności ponownego ich ręcznego wprowadzania (wystarczy ponownie otwarzyć plik Livescriopt)
- Można dzielić program na sekcje i wykonywać program partiami testując poszczególne fragmeny kodu, co ułatwia testowanie nowego kodu i jego modyfikację
- Można przygotować raport z wykonanych badań w wybranym formacie (zostanie przedstawiony na końcu)

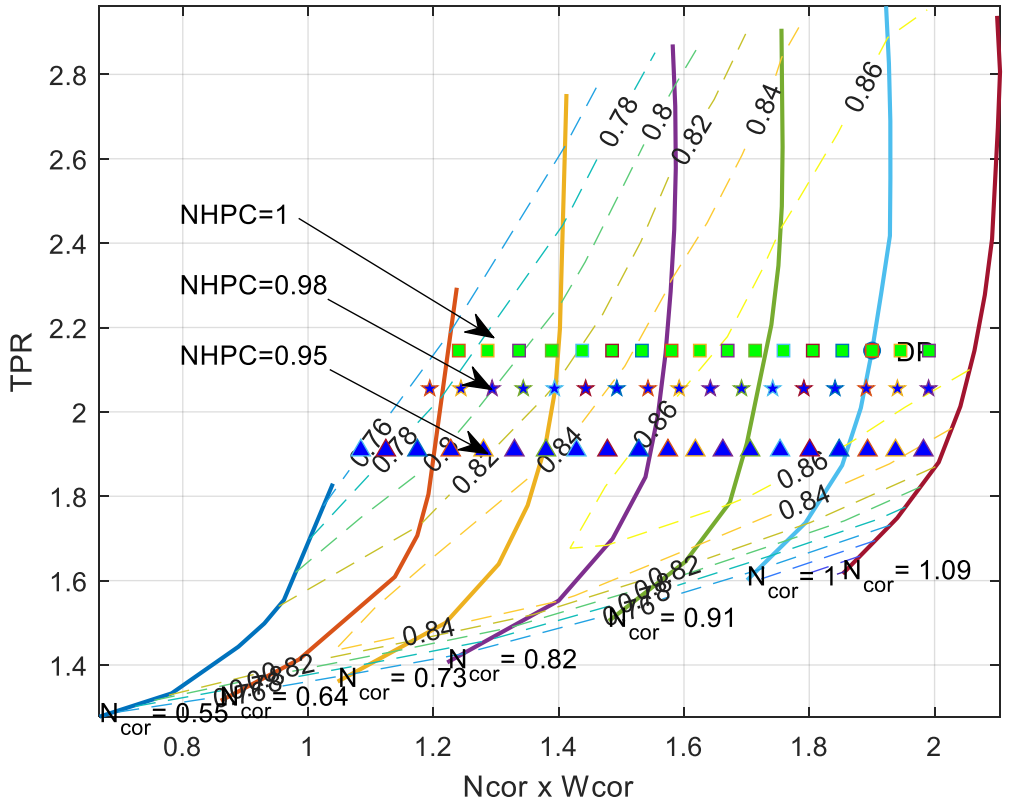
Przykładowe wyniki obliczeń

Wyniki analizy osiągów silnika turbinowego śmigłowego dla trzech punktów pracy wirnika HPC:

HPC map

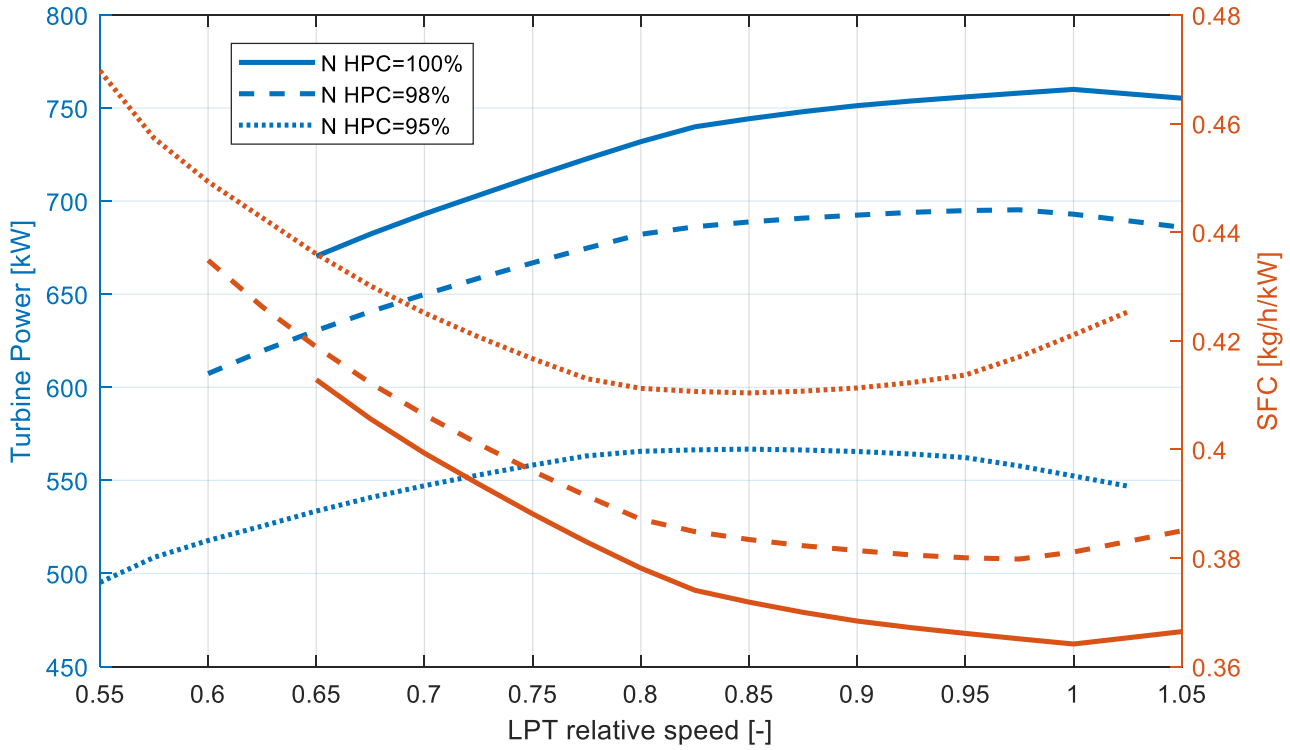


LPT map



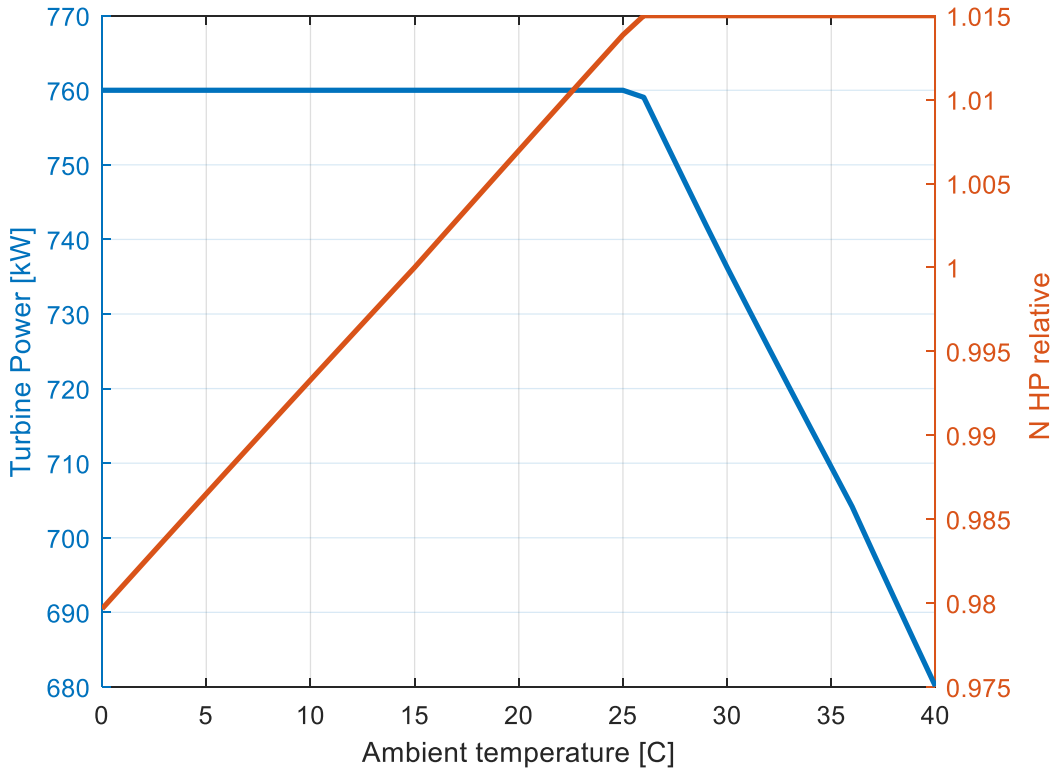
Przykładowe wyniki obliczeń

Moc i jednostkowe zuzycie paliwa silnika w zależności od prędkości obrotowej HPC i LPT

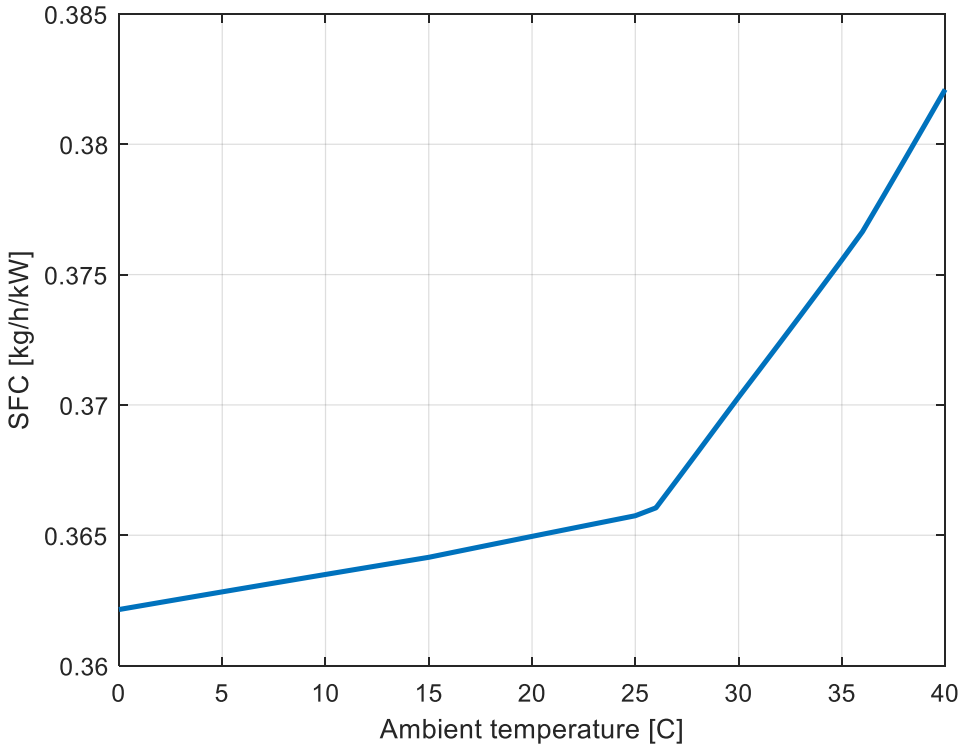


SYMULACJA OGRANICZENIA MOCY W SILNIKU

Zależność mocy maksymalnej silnika i prędkości obrotowej HPC od tempartury otoczenia



Zależność jednostkowego zużycia od tempartury otoczenia



Dziękuję za uwagę

POLITECHNIKA
RZESZOWSKA
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA