

TEST MODELU SILNIKA JEDNOPRZEPŁYWOWEGO ORAZ OPRACOWANIE CHARAKTERYSTYK DLA PUNKTU OBLICZENIOWEGO SILNIKA

opracował dr inż Robert JAKUBOWSKI (KILiK, Politechnika Rzeszowska)

Table of Contents

1) Przygotowanie danych.....	1
2) Obliczenia silnika dla pojedynczego punktu.....	1
2.1) WIZUALIZACJA WYNIKÓW DLA POJEDYNCZEGO PUNKTU.....	2
2.2) Obliczenia silnika dla niższego sprężu i temperatury.....	4
3) OBLICZENIA SZEREGU PUNKTÓW - CHGAKTERYSTYKI DLA PUNKTU OBLICZENIOWEGO.....	6
3.1) OPTYMALIZACJA OBIEGU - POSZUKIWANIE MAKSIMUM CIĄGU JEDNOSTKOWEGO (ST) i MINIMUM JEDNOSTKOWEGO ZUŻYCIA PALIWA (SFC).....	6
3.2) OPTYMALIZACJA OBIEGU - POSZUKIWANIE MAX ST i MINIMUM SFC DLA RÓŻNYCH WARTOŚCI Tt4.....	9
3.2.1) Wizualizacja wyników w klasycznym układzie płaskim.....	9
3.2.2) Wizualizacja wyników w układzie przestrzennym	12
3.3.1) Wizualizacja wyników w układzie płaskim w funkcji ciąg jednostkowy - jednost. zużycie paliwa (ST, SFC).....	14

Test będzie prowadzony na modelu silnika zawartym w funkcji m-file silnik_jednoprzepływowy:

[ST,SFC,T,mf,A9,eth,ep,eo,TT,PP,SE] =

silnik_jednoprz(H,dT,VM,Vid,m0,Pis,T3t,s_in,e_s,s_dyf,s_b,e_b,e_t,e_m,s_n,rd)

Schemat silnika z podziałem na komponenty i przekroje kontrolne przedstawiono na rysunku [link](#)

1) Przygotowanie danych

Przygotowanie i wprowadzenie wszystkich wymaganych danych

```
H=11000; % m
dT=0; % K
VM=0.8; % Prędkość lotu wyrażona l. Macha
Vid='M'; % wskaźnik dotyczący prędkości
m0=1; % Wydatek masowy - jednostkowy
Pis=20; % Spręż sprężarki
Tt4=1450; % Temperatura gazów przed turbiną
s_in=0.97; % współczynnik strat ciśnienia we welocie
e_s=[0.85,1]; % Sprawność sprężarki - ustawiono jako poliyropowa 1 - na drugiej pozycji
s_dyf=0.98; % współczynnik strat ciśnienia w dyfuzorze przed komorą spalania
s_b=0.98; % sprawność komory spalania
e_b=0.97; % współczynnik strat ciśnienia w komorze spalania
e_t=[0.88,0]; % sprawność turbiny - ustawiono jako izentropowa, 0 - na drugiej pozycji
em=0.99; % sprawność mechaniczna
sn=0.97; % współczynnik strat ciśnienia w dyszy wylotowej
rn='zs'; % Przyjęto dyszę zbieżną i pracującą na spalinach 'zs'
```

2) Obliczenia silnika dla pojedynczego punktu

Wykonane zostaną obliczenia silnika jednoprzepływowego dla zadanego sprężu sprężarki $P_{is}=8$ i temperatury gazów przed turbiną $T_{t4}=1200$ K. Wszystkie wyniki są prezentowane w jednostkach układu SI

```
[ST,SFC,T,mf,A9,Awdt,eth,ep,eo,TT,PP,SE] = ...  
silnik_jednoprz(H,dT,VM,Vid,m0,Pis,Tt4,s_in,e_s,s_dyf,s_b,e_b,e_t,em,sn,rn);
```

Ciąg jednostkowy [Ns/kg]

```
disp(['ST = ' num2str(ST)])
```

ST = 733.2163

Jednostkowe zużycie paliwa [kg/N/s]

```
disp(['SFC = ' num2str(SFC)])
```

SFC = 3.0679e-05

Względne zużycie paliwa

```
disp(['f = ' num2str(mf/m0)])
```

f = 0.022494

Pola przekroju

```
disp(['A_wdt = ' num2str(Awdt) ' [m^2]; A9 = ' num2str(A9(1))])
```

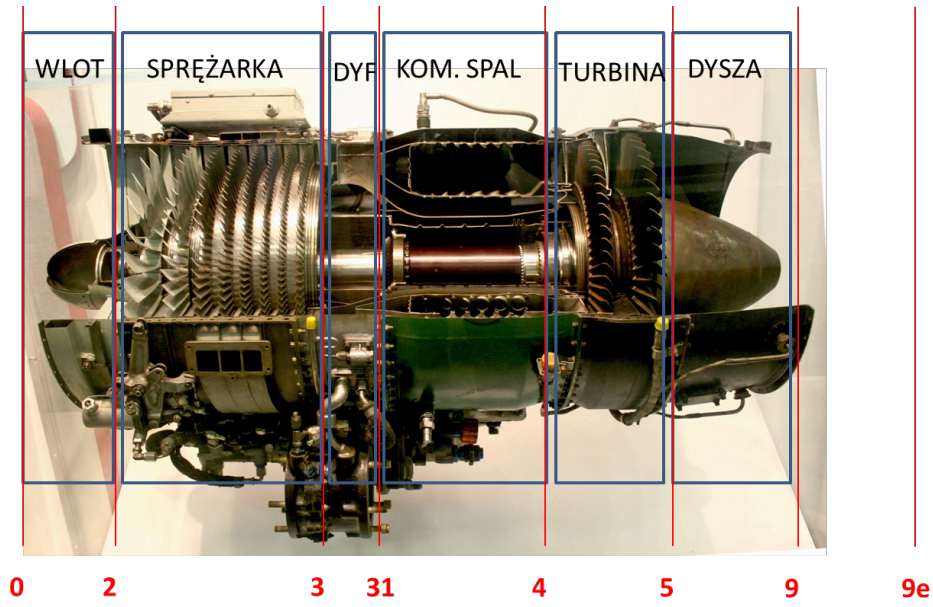
A_wdt = 0.00052838 [m^2]; A9 = 0.0049975

```
tabela1=table(SE',num2str(TT',4),num2str(PP'/1000,4));  
tabela1.Properties.VariableNames = {'section', 'temp. [K]', 'Pressure [kPa]'}  
  
tabela1 = 10x3 table
```

	section	temp. [K]	Pressure [kPa]
1	'0'	216.4	22.57
2	't0'	244.1	34.4
3	't2'	244.1	33.37
4	't3'	668.1	667.4
5	't31'	668.1	654
6	't4'	1450	641
7	't5'	1100	176.3
8	't9'	1100	171
9	'9'	944.5	92.41
10	'9e'	719.7	22.57

2.1) WIZUALIZACJA WYNIKÓW DLA POJEDYNCZEGO PUNKTU

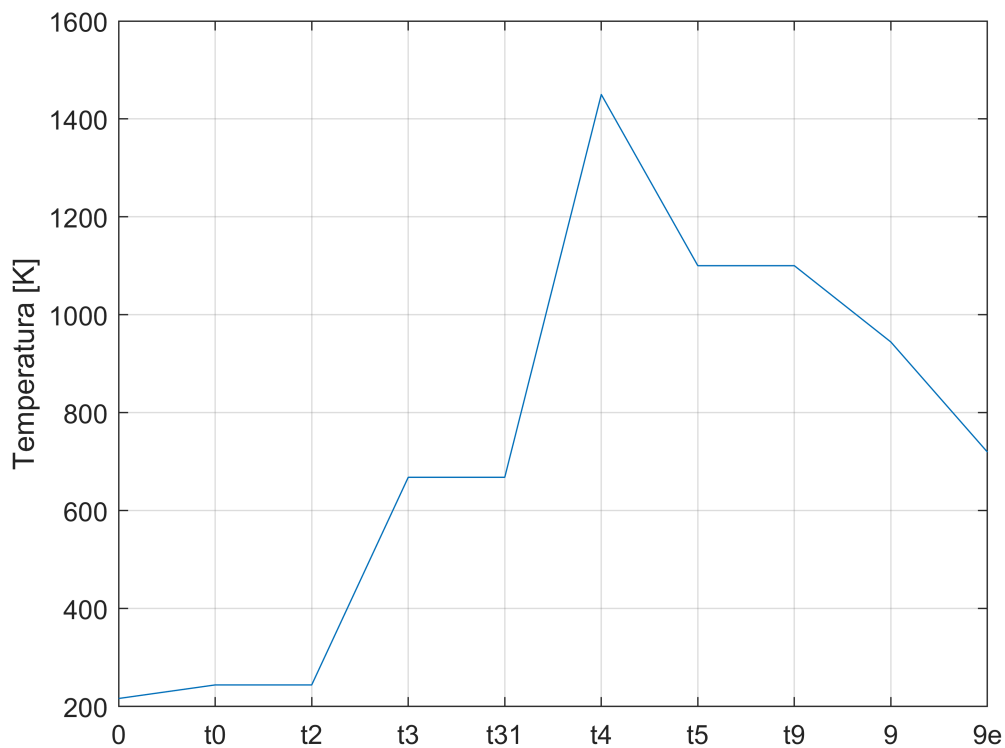
Silnik z zaznaczonymi przekrojami kontrolnymi oraz komponentami uwzględnionymi w obliczeniach przedstawiono poniżej.



Rys. Silnik z zaznaczonymi komponentami

Zależność temperatury w przekrojach kontrolnych silnika - przygotowanie wykresu

```
clf
% Wykres temperatury
plot(TT)
grid on
% Dodanie podpisu osi y
ylabel('Temperatura [K]')
% podmiana opisu na osi x
xticklabels(SE)
```



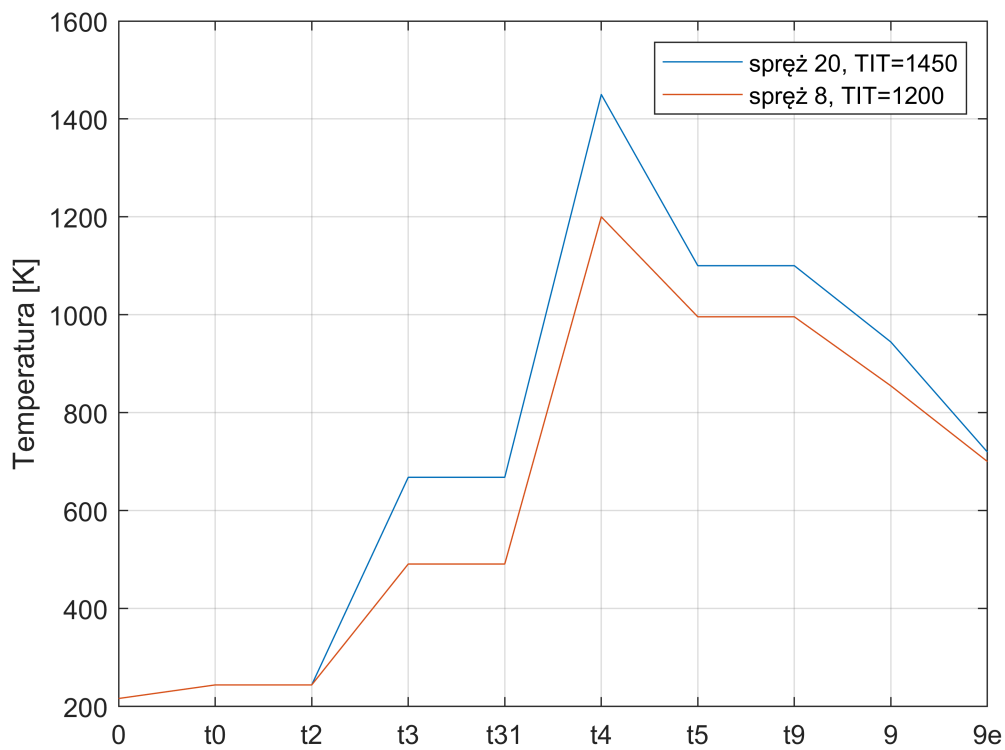
2.2) Obliczenia silnika dla niższego sprężu i temperatury

Wykonane zostaną obliczenia silnika jednaprzepływowego dla zmniejszonego sprężu sprężarki $Pis=8$ i temperatury gazów przed turbiną $Tt4=1200$ K

```
Pis=8;
Tt4=1200;
[ST,SFC,T,mf,A9,Awdt,eth,ep,eo,TT,PP,SE] = ...
    silnik_jednoznacz(H,dT,VM,Vid,m0,Pis,Tt4,s_in,e_s,s_dyf,s_b,e_b,e_t,em,sn,rn);
```

Wizualizacja wyników nowych obliczeń. Wykres temperatury zostanie dodany do poprzedniego wykresu.

```
% włączenie trzymania poprzedniego wykresu
hold on
% Dodanie nowego wykresu
plot(TT)
hold off
% Przygotowanie legendy
legend({'spręż 20, TIT=1450', 'spręż 8, TIT=1200'})
```

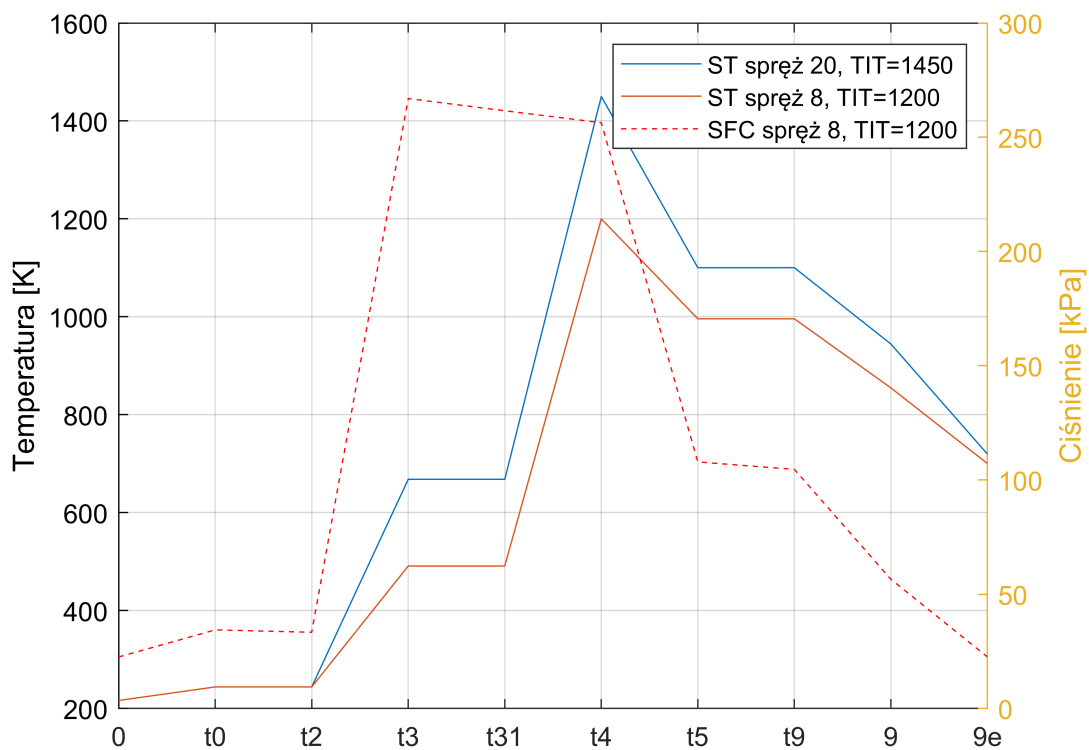


Dorysowanie z prawej strony wykresu zmiany ciśnienia w przekrojach kontrolnych silnika

```

% Przejście na prawą stronę wykresu
yyaxis right
plot(PP/1000, 'r--')
ylabel('Ciśnienie [kPa]')
% Dostosowanie legendy
legend({'ST spręż 20, TIT=1450', 'ST spręż 8, TIT=1200', 'SFC spręż 8, TIT=1200'})
hold off

```



Otrzymane wyniki przedstawiają oczekiwany dla silnika jednoprzepływowego rozkład zmiany ciśnienia i temperatury w kanale przepływowym silnika. Dodatkowo należy stwierdzić, że obniżone wartości T i P w przekroju 9e (po rozprężeniu do ciśnienia otoczenia) względem przekroju 9 (przebieg wylotowy z dyszy) dla przyjętego układu z dyszą zbieżną wskazują na niezupełny tozpręż w dyszy wylotowej, oraz rozprężanie strumienia poza dyszą.

3) OBLICZENIA SZEREGU PUNKTÓW - CHGARAKTERYSTYKI DLA PUNKTU OBLICZENIOWEGO

3.1) OPTIMALIZACJA OBIEGU - POSZUKIWANIE MAKSYMUM CIĄGU JEDNOSTKOWEGO (ST) i MINIMUM JEDNOSTKOWEGO ZUŻYCIA PALIWA (SFC)

Przykład często wykonywanego zadania, czyli poszukiwania maksimum ciągu jednostkowego i minimum jednostkowego zużycia paliwa silnika. W tym wypadku nie są nam potrzebne obliczenia wszystkich parametrów silnika. Ograniczymy się do wyznaczenia ST, SFC i sprawności η_{th} , η_p , η_o . Pozostałe parametry zostaną pominięte, stąd w ich miejsce należy wstawić \sim , a parametry po tych co nas interesują można całkowicie pominąć

Do przygotowania obliczeń szeregu punktów potrzebne jest przygotowanie wektora względem którego prowadzona będzie analiza. W tym celu przygotowany zostanie wektor sprężu sprężarki Pis_s . Następnie w funkcji **for** wyznaczone zostaną wartości poszukiwanych parametrów. Zmienne wyjściowe są kolekcjonowane w wektorach, a w miejsce sprężu podstawia się aktualną wartość sprężu dla i-tego obliczenia $Pis_s(i)$.

```
Pis_s=[2:0.25:50];
for i=1:length(Pis_s)
```

```

[ST(i),SFC(i),~,~,~,~,eth(i),ep(i),eo(i)] = ...
silnik_jednoprz(H,dT,VM,Vid,m0,Pis_s(i),Tt4,s_in,e_s,s_dyf,s_b,e_b,e_t,em,sn,rn);
end

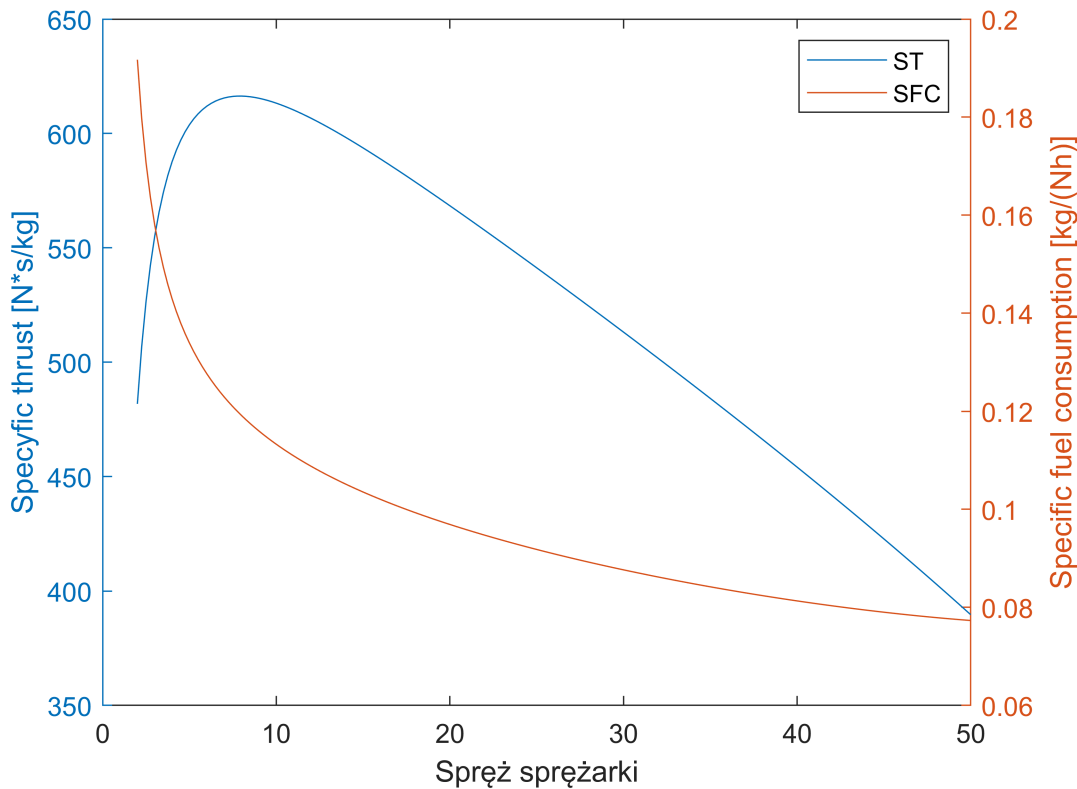
```

Wizualizacja wyników obliczeń. W lewej części wykresu oś Y wykorzystano do przedstawienia ciągu jednostkowego, w prawej jednostkowego zużycia paliwa

```

clf
yyaxis left
plot(Pis_s,ST)
ylabel('Specyfic thrust [N*s/kg]')
hold on
yyaxis right
plot(Pis_s,SFC*3600)
ylabel('Specific fuel consumption [kg/(Nh)]')
legend({'ST' 'SFC'})
xlabel('Spręż sprężarki')
hold off

```



Poszukiwanie maksymalnej wartości ciągu jednostkowego

Przeszukanie wektora ST funkcją **max**, pozwala odnaleźć wartość maksymalną ciągu jednostkowego ST_max oraz pozycję w wierszu ST (in). Dla tego indeksu następnie określony zostanie spręż sprężarki przy którym występuje ciąg maksymalny.

```
[ST_max,in]=max(ST)
```

```
ST_max = 616.3568  
in = 25
```

```
Pis_STmax=Pis_s(in)
```

```
Pis_STmax = 8
```

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że maksymalna wartość ciągu jednostkowego ST_max

```
disp(['ST_max = ', num2str(ST_max,4)])
```

```
ST_max = 616.4
```

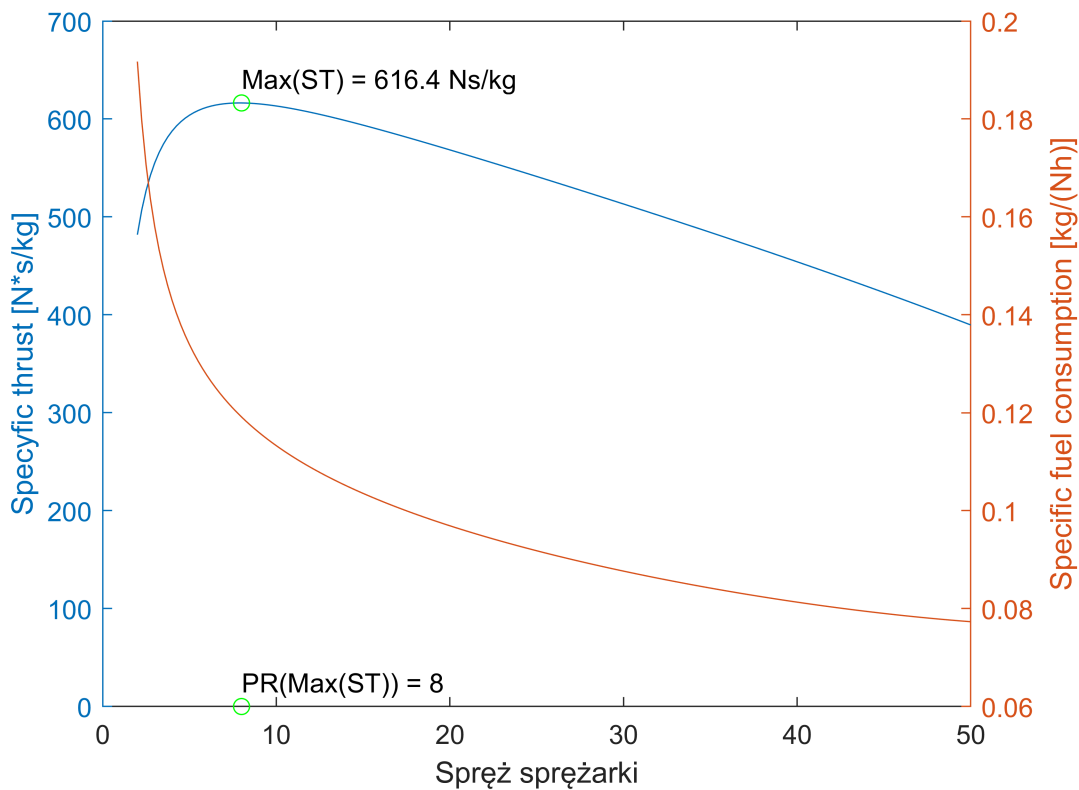
Występuje dla sprężu sprężarki wynoszącego:

```
disp(['Spręż sprężarki, dla maksymalnego ciągu jednostkowego ', num2str(Pis_STmax,4)])
```

```
Spręż sprężarki, dla maksymalnego ciągu jednostkowego 8
```

Dorysowanie do wykresu punktuz maksymalną wartością ciągu jednostkowego

```
yyaxis left  
hold on  
plot(Pis_STmax,ST_max,'go')  
% wykorzystano funkcję text do dodania opisu punktu  
text(Pis_STmax,ST_max+25,['Max(ST) = ', num2str(ST_max,4), ' Ns/kg'])  
plot(Pis_STmax,0,'go')  
text(Pis_STmax,25,['PR(Max(ST)) = ', num2str(Pis_STmax,4)])  
legend off  
hold off
```

3.2) OPTIMALIZACJA OBIEGU - POSZUKIWANIE MAX ST I MINIMUM SFC DLA RÓŻNYCH WARTOŚCI Tt4

Zadanie polega na poszukiwaniu wyników dla dwóch różnych wektorów zmiennych. Pierwszym wektorem będzie Tt4_s - wektor wartości temperatury gazów przed turbiną, drugim Pis_s - wektor wartości sprężu sprężarki. W celu wykonania obliczeń skorzystamy z podwójnej pętli **for**. W zewnętrznej pętli będzie iterowane po zmiennej j (dla kolejnych elementów parametru Tt4_s) i w wewnętrznej pętli z iteratorem i dla elementów parametru Pis_s. Wyniki obliczeń będą zwracane w postaci macierzy o elementach (i,j)

Przykład przygotowania kodu do obliczeń charakterystyk dla dwóch wektorów zmiennych.

```
Tt4_s=1100:100:1400;
Pis_s=3:0.25:60;
% usuwanie zmiennych w celu tworzenia ich od nowa
clear ST SFC eth ep eo
for j=1:length(Tt4_s)
    for i=1:length(Pis_s)
        [ST(i,j),SFC(i,j),~,~,~,~,eth(i,j),ep(i,j),eo(i,j)] = ...
        silnik_jednoprz(H,dT,VM,Vid,m0,Pis_s(i),Tt4_s(j),s_in,e_s,s_dyf,s_b,e_b,e_t,em,sn,rn);
    end
end
```

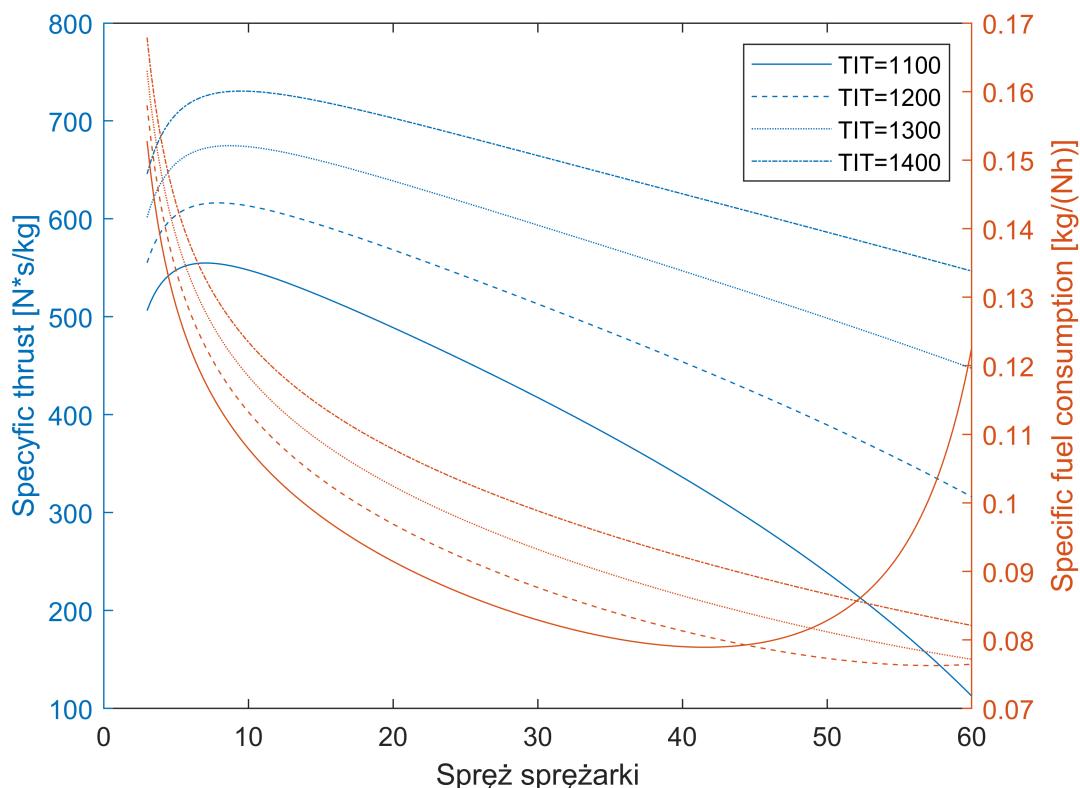
3.2.1) Wizualizacja wyników w klasycznym układzie płaskim

```
clf
yyaxis left
plot(Pis_s,ST)
```

```

ylabel('Specyfic thrust [N*s/kg]')
hold on
yyaxis right
plot(Pis_s,SFC*3600)
ylabel('Specific fuel consumption [kg/(Nh)]')
legend({'TIT=1100' 'TIT=1200' 'TIT=1300' 'TIT=1400'})
xlabel('Spręż sprężarki')
hold off

```



Otrzymane wyniki zależności ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa od sprężu sprężarki dla różnych wartości temperatury gazów przed turbiną pokrywają się z danymi literaturowymi. Zwiększenie temperatury gazu przed turbiną prowadzi do zwiększenia wartości ST, ale także zwiększa wartość SFC. Powoduje także zwiększenie wartości sprężu przy którym osiąga się wartości maksymalne ciągu jednostkowego i minimalne jednostkowego zużycia paliwa. Dla najniższej wartości Tt4 osiągnięto minimum SFC, po czym obserwuje się istotne zwiększenie jednostkowego zużycia paliwa

Porównanie relacji pomiędzy ciągiem jednostkowym i sprawnością napędową dla analizowanych obliczeń

Na wspólnym wykresie zestawiono zależność ciągu jednostkowego i sprawności napędowej.

```

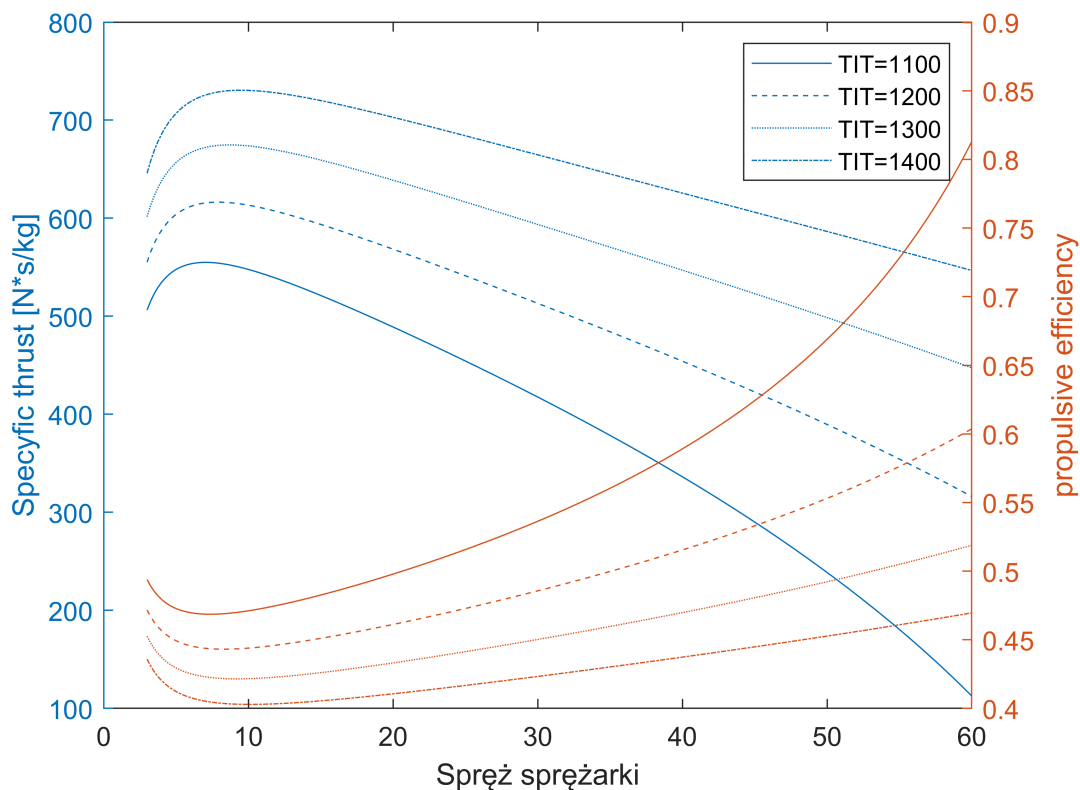
clf
yyaxis left
plot(Pis_s,ST)
ylabel('Specyfic thrust [N*s/kg]')
hold on
yyaxis right
plot(Pis_s,ep)

```

```

ylabel('propulsive efficiency')
legend({'TIT=1100' 'TIT=1200' 'TIT=1300' 'TIT=1400'})
xlabel('Spręż sprężarki')
hold off

```



Otrzymany wykres potwierdza, że sprawność napędowa zachowuje się przeciwnie do ciągu jednostkowego osiągając minimum tam gdzie ciąg jednostkowy ma maksimum. Aby to sprawdzić, należy wyznaczyć wartości maksymalne ciągu jednostkowego i minimalne jednostkowego zużycia paliwa

```

[ST_max,in1]=max(ST);
Pis_STmax=Pis_s(in1);
[ep_min,in2]=min(ep);
Pis_epmin=Pis_s(in2);

```

Zestawienie wyników porównania maksymalnych spręży i maksymalnych wartości ciągu jednostkowego i minimalnej wartości sprawności napędowej przedstawiono w tabeli. Wynika stąd, że maksimum ciągu jednostkowego jest praktycznie w tym samym sprężu jak minimum sprawności napędowej

```

tabela2=table(Tt4_s', Pis_STmax', ST_max', Pis_epmin',ep_min');
tabela2.Properties.VariableNames= {'TIT [k]' 'PR(ST_max)' 'ST_max [Ns/kg]' 'PR(e_o)' 'e_o' }

```

tabela2 = 4x5 table

	TIT [k]	PR(ST_max)	ST_max [Ns/kg]	PR(e_o)	e_o
1	1100	7.0000	554.9497	7.2500	0.4686
2	1200	8.0000	616.3568	8.2500	0.4431
3	1300	8.7500	674.7529	9.2500	0.4215

	TIT [k]	PR(ST_max)	ST_max [Ns/kg]	PR(e_o)	e_o
4	1400	9.5000	730.5080	10.0000	0.4029

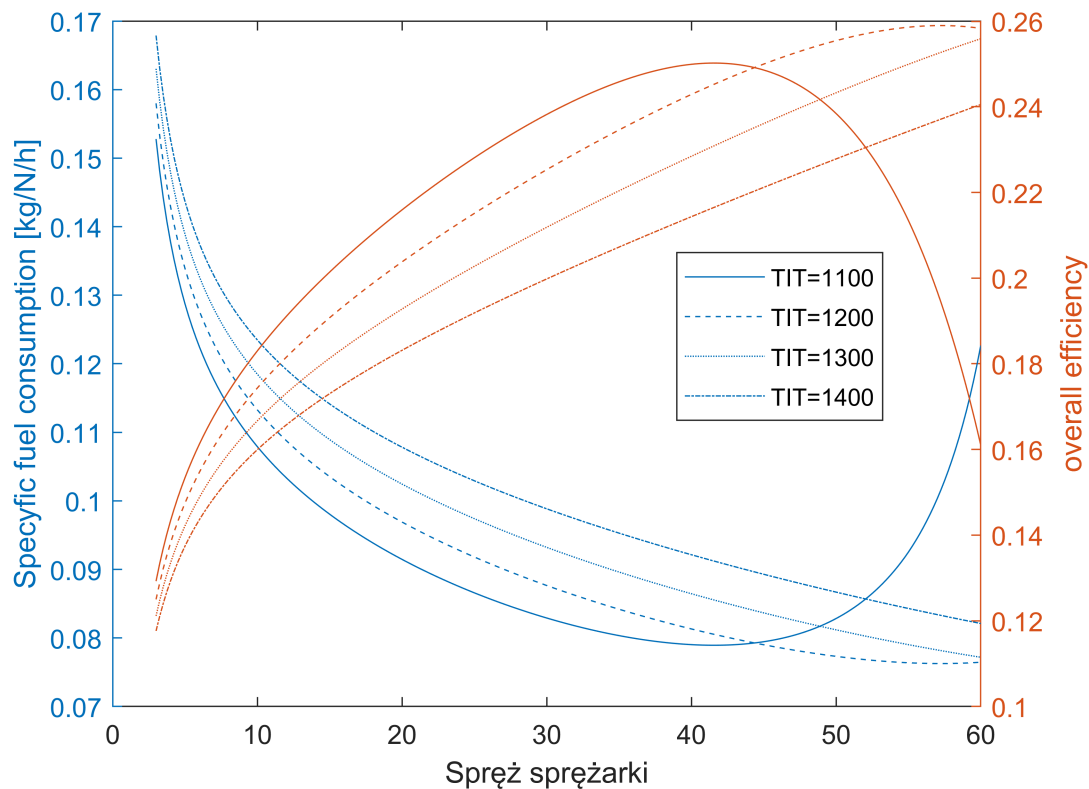
Porównanie relacji pomiędzy jednostkowym zużyciem paliwa i sprawnością ogólną dla analizowanych obliczeń

Na wspólnym wykresie zestawiono zależność jednostkowego zużycia paliwa i sprawności ogólnej.

```

clf
yyaxis left
plot(Pis_s,SFC*3600)
ylabel('Specyfifc fuel consumption [kg/N/h]')
hold on
yyaxis right
plot(Pis_s,eo)
ylabel('overall efficiency')
legend({'TIT=1100' 'TIT=1200' 'TIT=1300' 'TIT=1400'},"Position",[0.65,0.45,0.15,0.2])
xlabel('Spręż sprężarki')
hold off

```



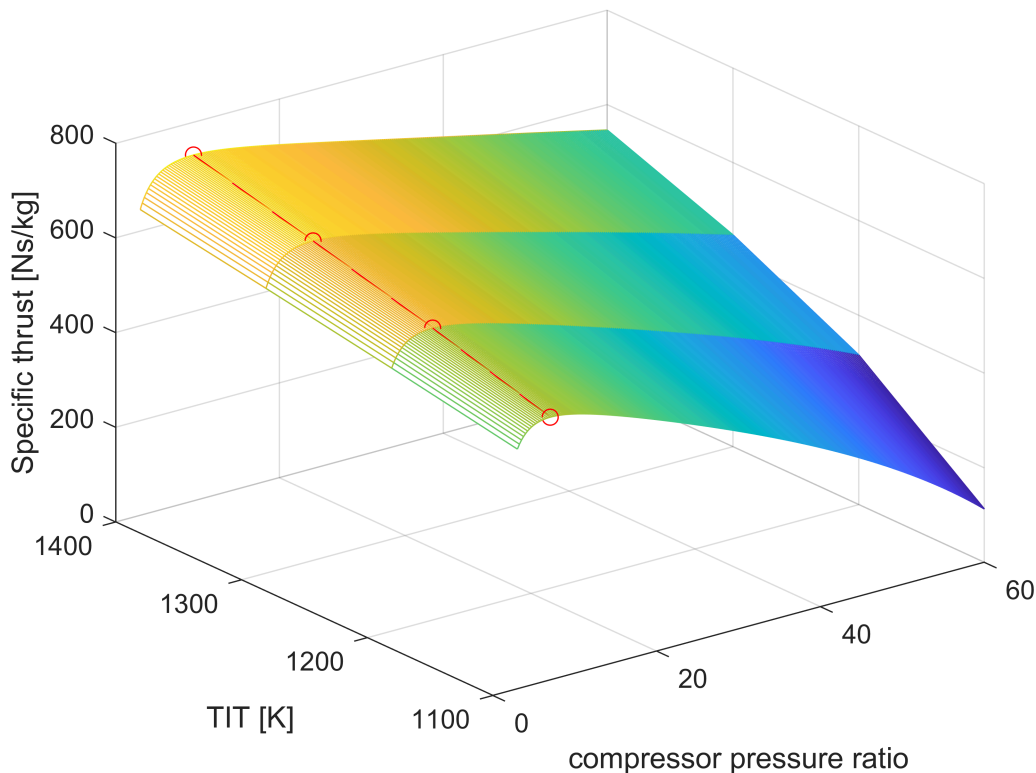
Otrzymana charakterystyka potwierdza wyniki z literatury, że jednostkowe zużycie paliwa i sprawność ogólna mają odwrotny przebieg charakterystyk. Tam gdzie sprawność rośnie, tam jednostkowe zużycie paliwa maleje.

3.2.2) Wizualizacja wyników w układzie przestrzennym

Do zobrazowania wyników w układzie przestrzennym wykorzystać można funkcję mesh lub surf albo plot3. Wymaga to przygotowanie dwóch wektorów - w tym przypadku są to Pis_s i Tt4_s oraz odpowiadającej im macierzy wyników obliczeń ciągu, ciągu jednostkowego itp. Wyniki wyliczone w punkcie 3.2 jak najbardziej nadają się do przedstawiania wyników w układzie trójwymiarowym.

Na początku narysowany zostanie wykres zależności ciągu jednostkowego od sprężu i temperatury gazów przed turbiną. Na charakterystykę naniesiono linię maksymalnych wartości ciągu jednostkowego ST_max, wyznaczone wcześniej

```
clf
mesh(Pis_s,Tt4_s,ST')
xlabel('compressor pressure ratio')
ylabel('TIT [K]')
zlabel('Specific thrust [Ns/kg]')
hold on
plot3(Pis_STmax,Tt4_s,ST_max,'r-o')
```



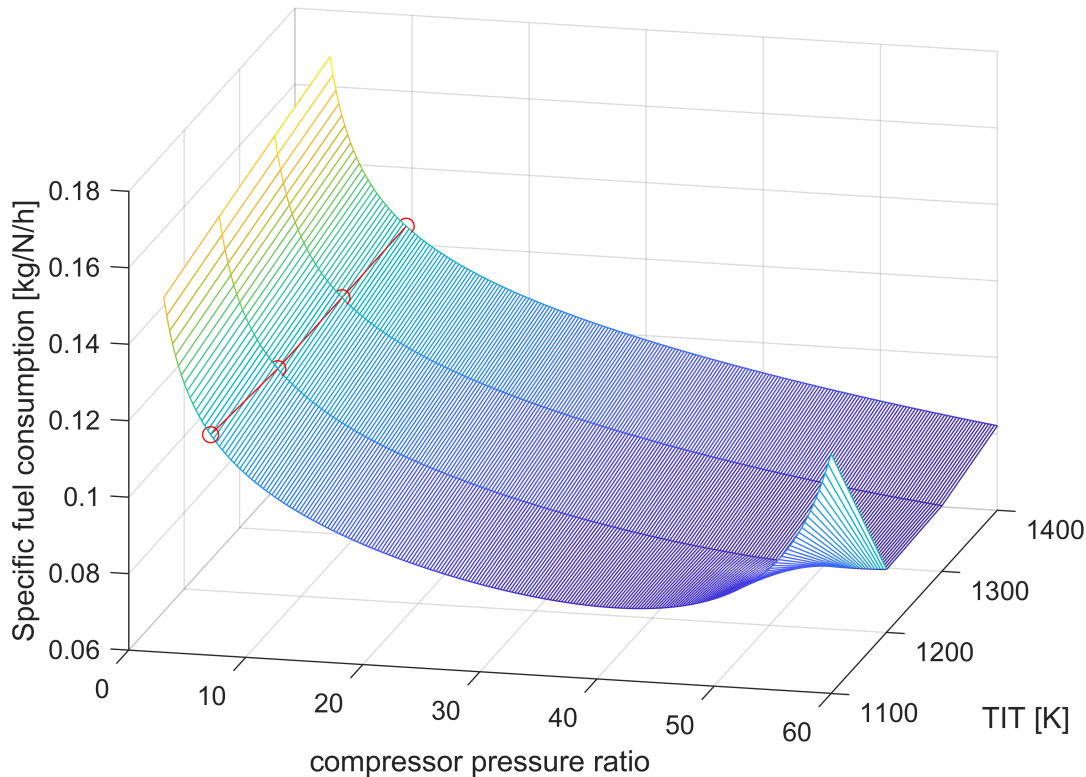
Podobnie jak poprzednio przedstawiony zostanie wykres jednostkowego zużycia paliwa od sprężu sprężarki i tempartury gazów przed turbiną. Na charakterystykę będzie naniesiona zależność jednostkowego zużycia paliwa odpowiadająca maksymalnym wartością ciągu jednostkowego

```
clf
mesh(Pis_s,Tt4_s,SFC'*3600)
% WARTOŚCI SFC dla ST_max
SFC_ST_max=SFC(in1(1),1);
for i=2:length(Tt4_s)
    SFC_ST_max(i)=SFC(in1(i),i);
```

```

end
hold on
plot3(Pis_STmax,Tt4_s,SFC_ST_max*3600,'r-o')
view([13.3234776 22.3151464])
xlabel('compressor pressure ratio')
ylabel('TIT [K]')
zlabel('Specific fuel consumption [kg/N/h]')
hold off

```



3.3.1) Wizualizacja wyników w układzie płaskim w funkcji ciąg jednostkowy - jednost. zużycie paliwa (ST, SFC)

Często rozwiązania problemów optymalizacji obiegu silnika przedstawia się w układzie ciąg jednostkowy - jednostkowe zużycie paliwa. Rozwiązanie takiego zadania jest bardzo podobne do poprzedniego, tyle, że definiuje się tutaj ograniczoną ilość spręży sprężarki i temperatury gazów przed turbiną. Obliczenia prowadzi się w podwójnej pętli iteracyjnej **for**.

```

Tt4_s=1100:100:1500;
Pis_s=[6 8 12 16 20 25];
% usuwanie zmiennych w celu tworzenia ich od nowa
clear ST SFC eth ep eo
for j=1:length(Tt4_s)
    for i=1:length(Pis_s)
        [ST(i,j),SFC(i,j)] = ...
            silnik_jednoprz(H,dT,VM,Vid,m0,Pis_s(i),Tt4_s(j),s_in,e_s,s_dyf,s_b,e_b,e_t,em,sn,rn);
    end
end
end

```

Zobrazowanie wyników zostanie przedstawione na wykresie, gdzie liniami ciągłymi zostaną połączone wartości stałego sprężu, a liniami przerywanymi stałej temperatury

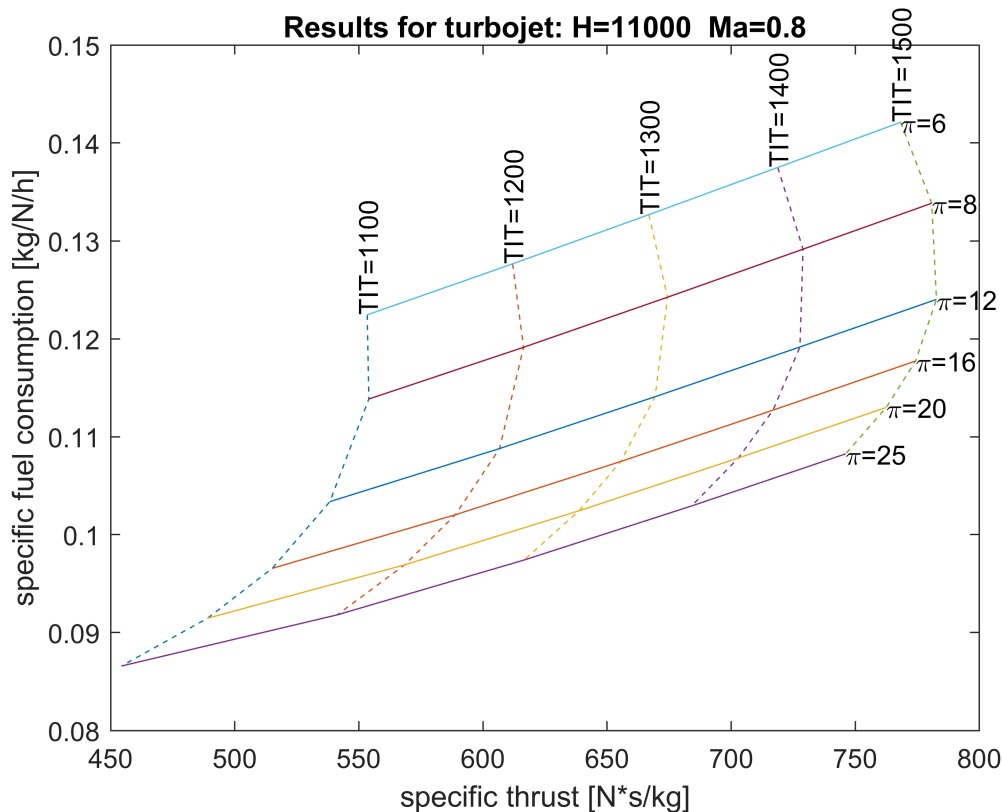
```

clf
plot(ST,SFC*3600,'--')
hold on
plot(ST', SFC'*3600)

TK=length(Tt4_s);

for i=1:length(Tt4_s)
    text(ST(1,i),SFC(1,i)*3600,append("TIT=",num2str(Tt4_s(i))),'Rotation',90)
end
for i=1:length(Pis_s)
    text(ST(i,TK),SFC(i,TK)*3600,append("\pi=",num2str(Pis_s(i))))
end
title(['Results for turbojet: H=',num2str(H),' Ma=',num2str(VM)])
xlabel('specific thrust [N*s/kg]')
ylabel('specific fuel consumption [kg/N/h]')

```



Charakterystyka jest zgodna z literaturą. Pokazuje, że zwiększenie temperatury powoduje zwiększenie ciągu jednostkowego, ale gdy nie zwiększy się sprężu sprężarki to jednostkowe zużycie paliwa także wzrośnie. Aby poprawić efektywność pracy silnika zwiększając temperaturę gazów przed turbiną, należy zwiększyć także spręż sprężarki wtedy można uzyskać poprawę obdwu istotnych z eksploatacyjnego punktu widzenia parametrów ST i SFC