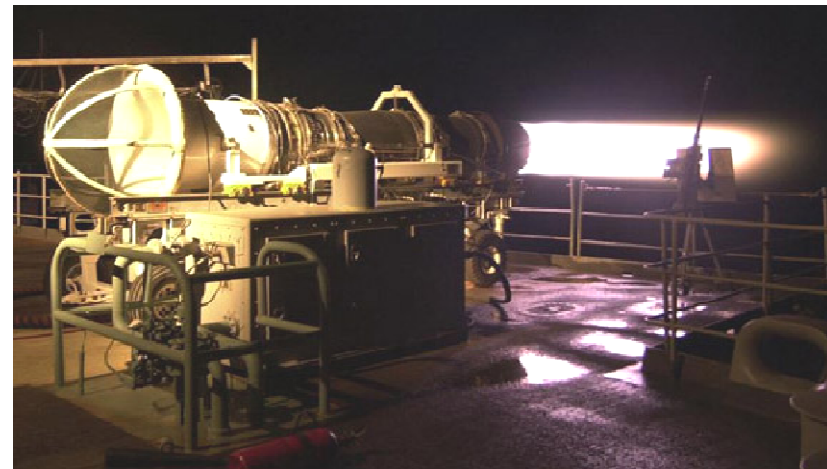


# **BADANIA SILNIKÓW - CHARAKTERYSTYKI EKSPLOATACYJNE SILNIKÓW**

# Metody wyznaczania charakterystyk:

- **Analityczna**
- **Doświadczalna**
  - na hamowni stacjonarnej
  - na latającej hamowni



# Charakterystyki silnika - podział

- **CHARAKTERYSTYKI WEWNĘTRZNE** – służą do oceny wpływu parametrów obiegu silnika na jego cechy użytkowe

$$K; k_j; c_j = f(\mu, \pi_w^*, \pi_s^*, \Delta^*);$$

- **CHARAKTERYSTYKI ZEWNĘTRZNE** – służą do wyznaczania wpływu zakresów pracy silnika i warunków lotu na jego parametry użytkowe

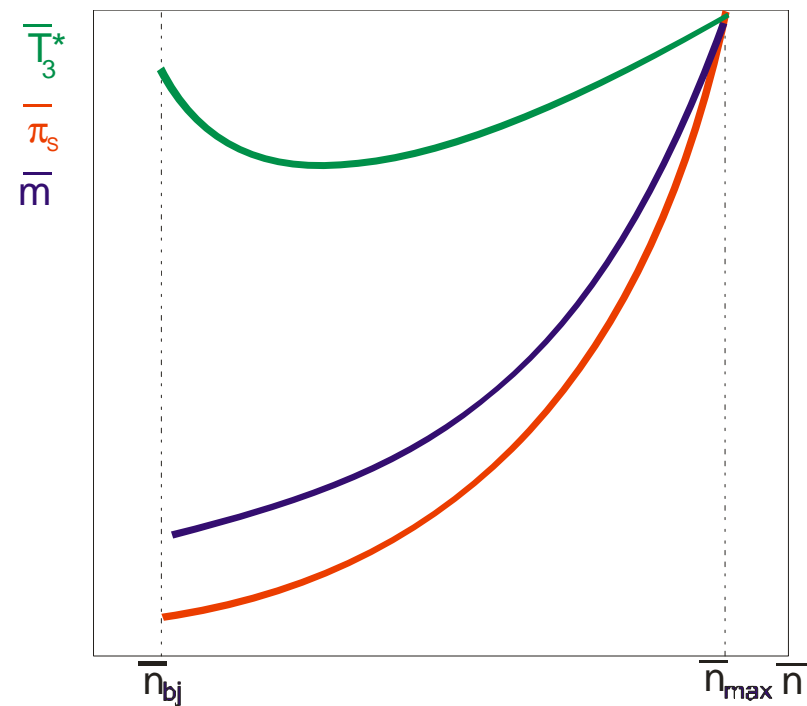
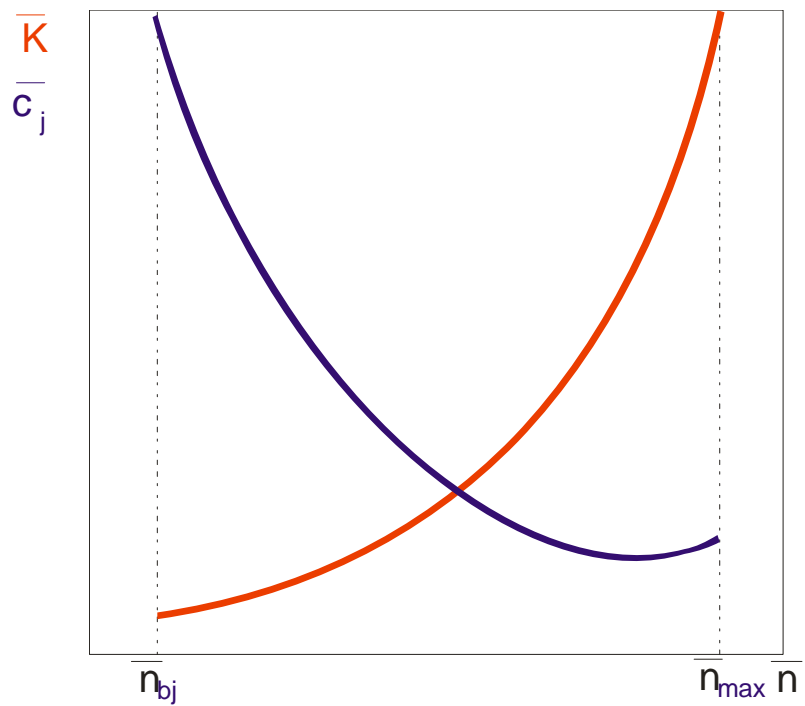
$$K; k_j; c_j = f(n, H, Ma, T_o, p_o, \varphi);$$

# Charakterystyki zewnętrzne

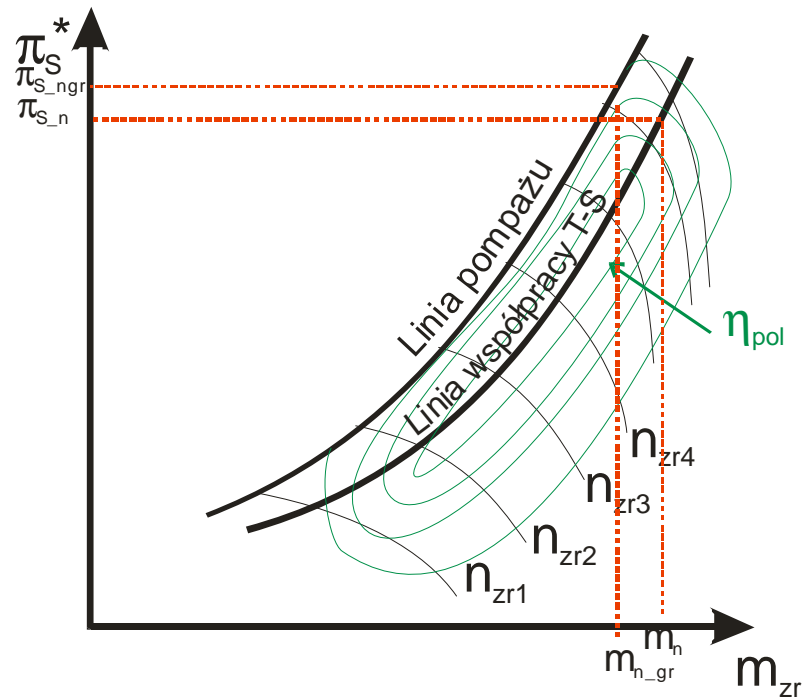
Zależnie od wzajemnego związku między zakresem pracy silnika i warunkami lotu samolotu a parametrami użytkowymi turbinowego silnika odrzutowego charakterystyki zewnętrzne dzieli się na:

- obrotowe  $K; k_j; c_j = f(n); H = Ma = 0$
- prędkościowe  $K; k_j; c_j = f(Ma); H = const; n = const$
- wysokościowe  $K; k_j; c_j = f(H); Ma = const; n = const$
- klimatyczne  $K; k_j; c_j = f(T_o; p_o; \varphi); H = Ma = 0$

# Turbinowy silnik odrzutowy – charakterystyka obrotowa



# Charakterystyka sprężarki



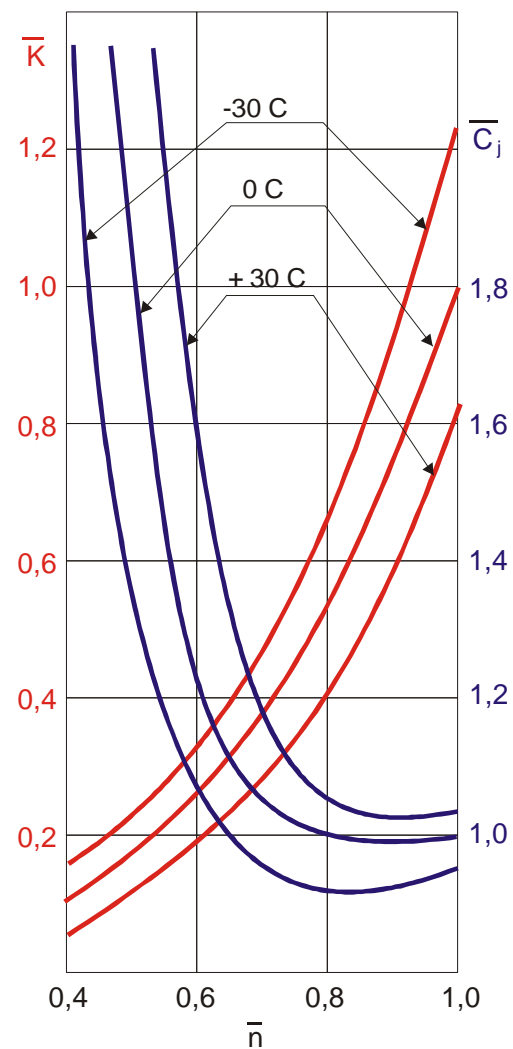
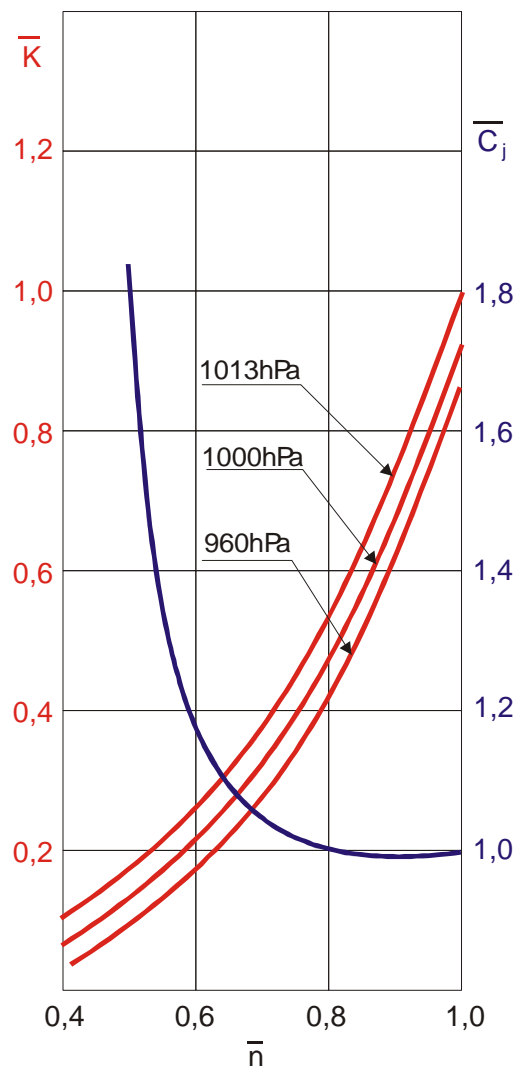
Zapas statecznej pracy sprężarki

$$\Delta Z = \frac{\pi_{s\_n\_gr}^* \cdot \dot{m}_n}{\pi_{s\_n}^* \cdot \dot{m}_{n\_gr}} - 1$$

Położenie linii współpracy turbina sprężarka determinuje bezpieczeństwo pracy silnika ze względu na możliwość wystąpienia pompażu

$$\Delta Z = 0,1 \div 0,3$$

# Wpływ warunków otoczenia na wyniki pomiarów hamownianych



# Redukcja parametrów

Warunki nominalne AW

$p_n=101325 \text{ Pa}$ ,  $T_n=288,15 \text{ K}$

$$K_{ZR} = K \frac{101325}{p_0}$$

$$C_{ZR} = C \frac{101325}{p_0} \sqrt{\frac{288,15}{T_0}}$$

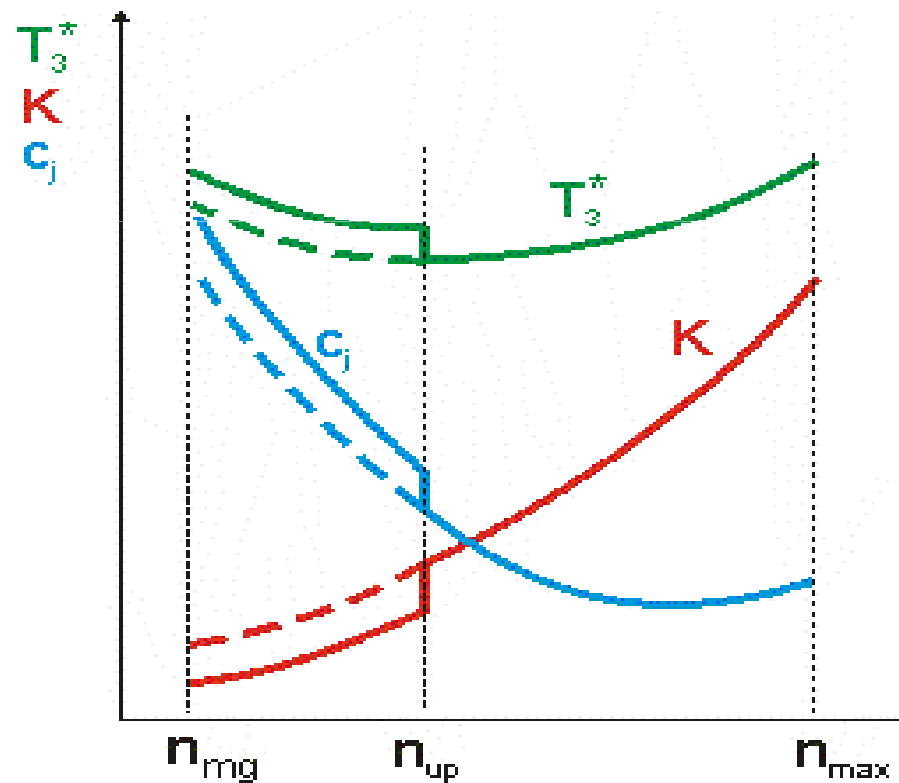
$$c_{j\_ZR} = c_j \sqrt{\frac{288,15}{T_0}}$$

$$n_{ZR} = n \sqrt{\frac{288,15}{T_0}}$$

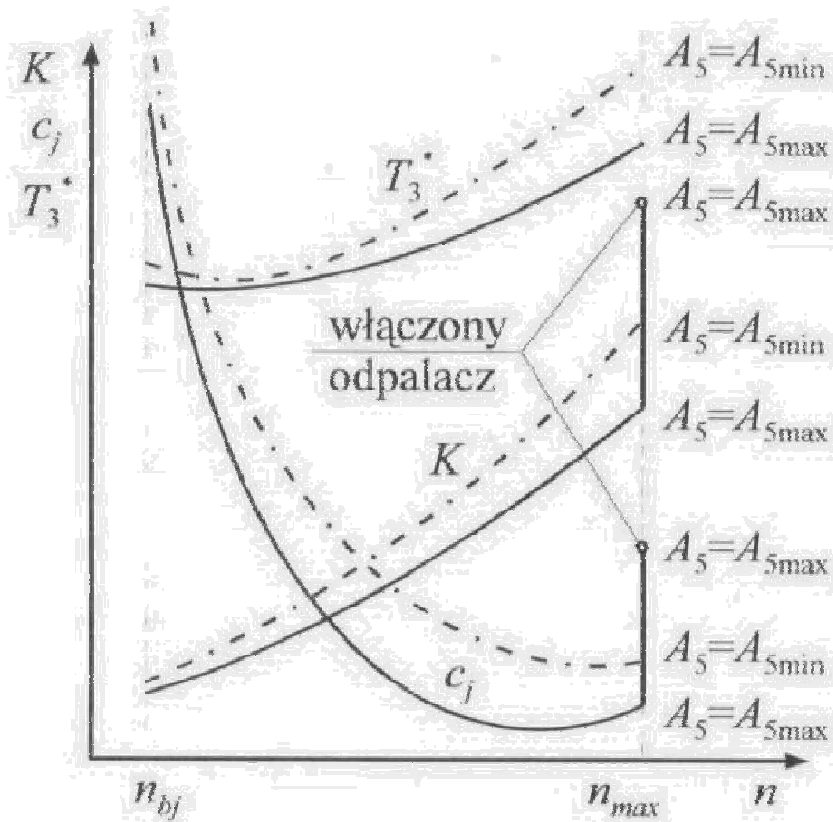
$$\dot{m}_{ZR} = \dot{m} \frac{101325}{p_0} \sqrt{\frac{T_0}{288,15}}$$



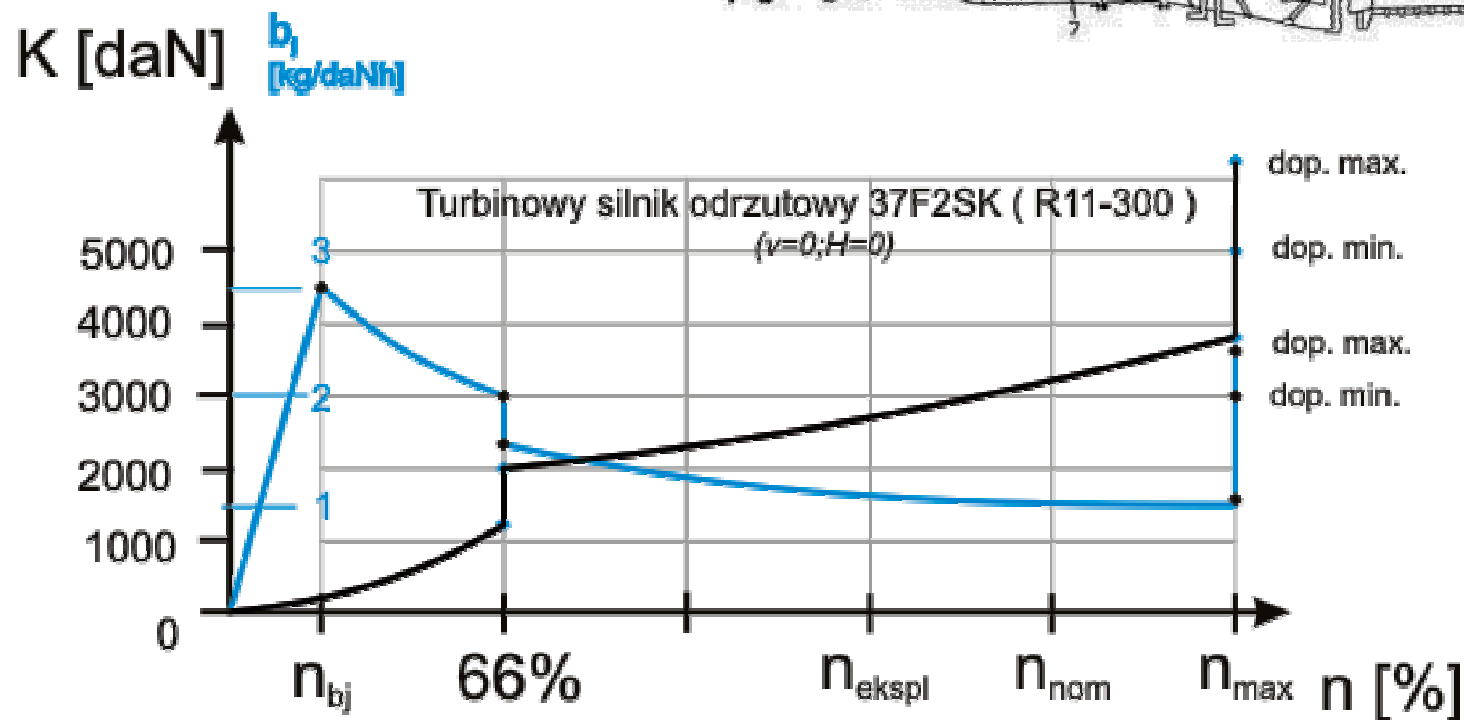
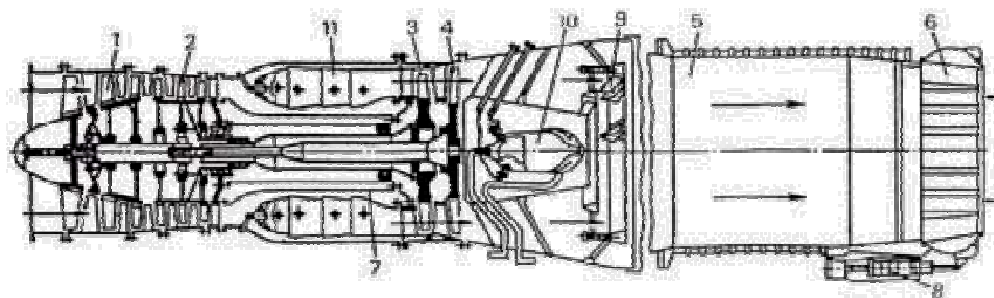
# Charakterystyka obrotowa silnika z upustem przeciwpompazowym



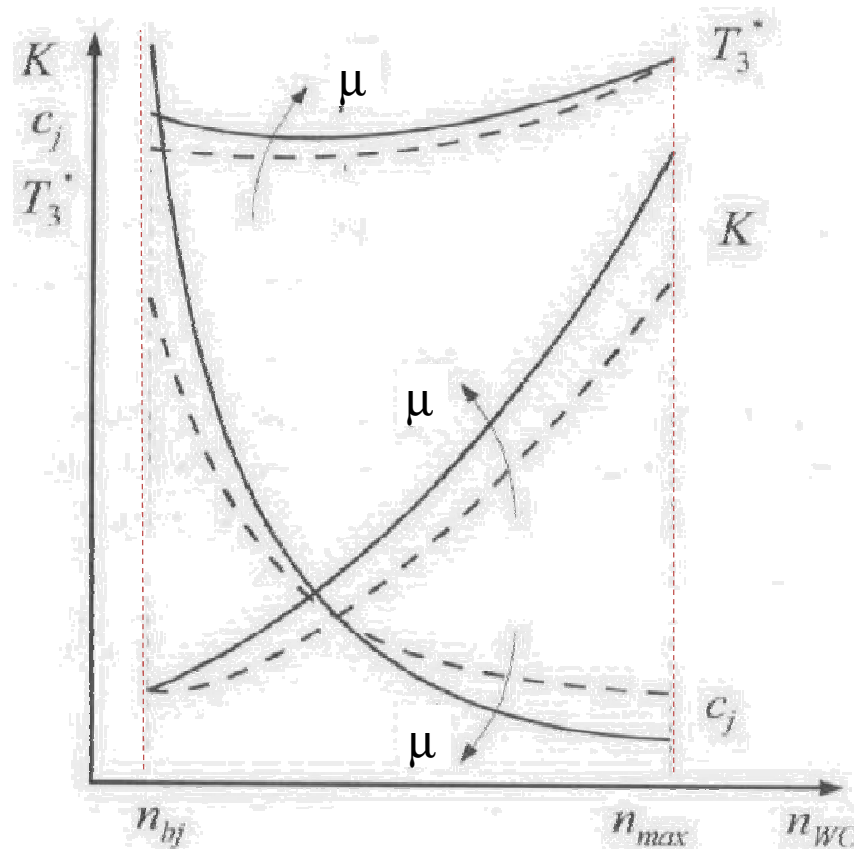
# Charakterystyka obrotowa silnika z dopalaczem



# Przykładowa charakterystyka obrotowa silnika 37F2SK do MIG 21

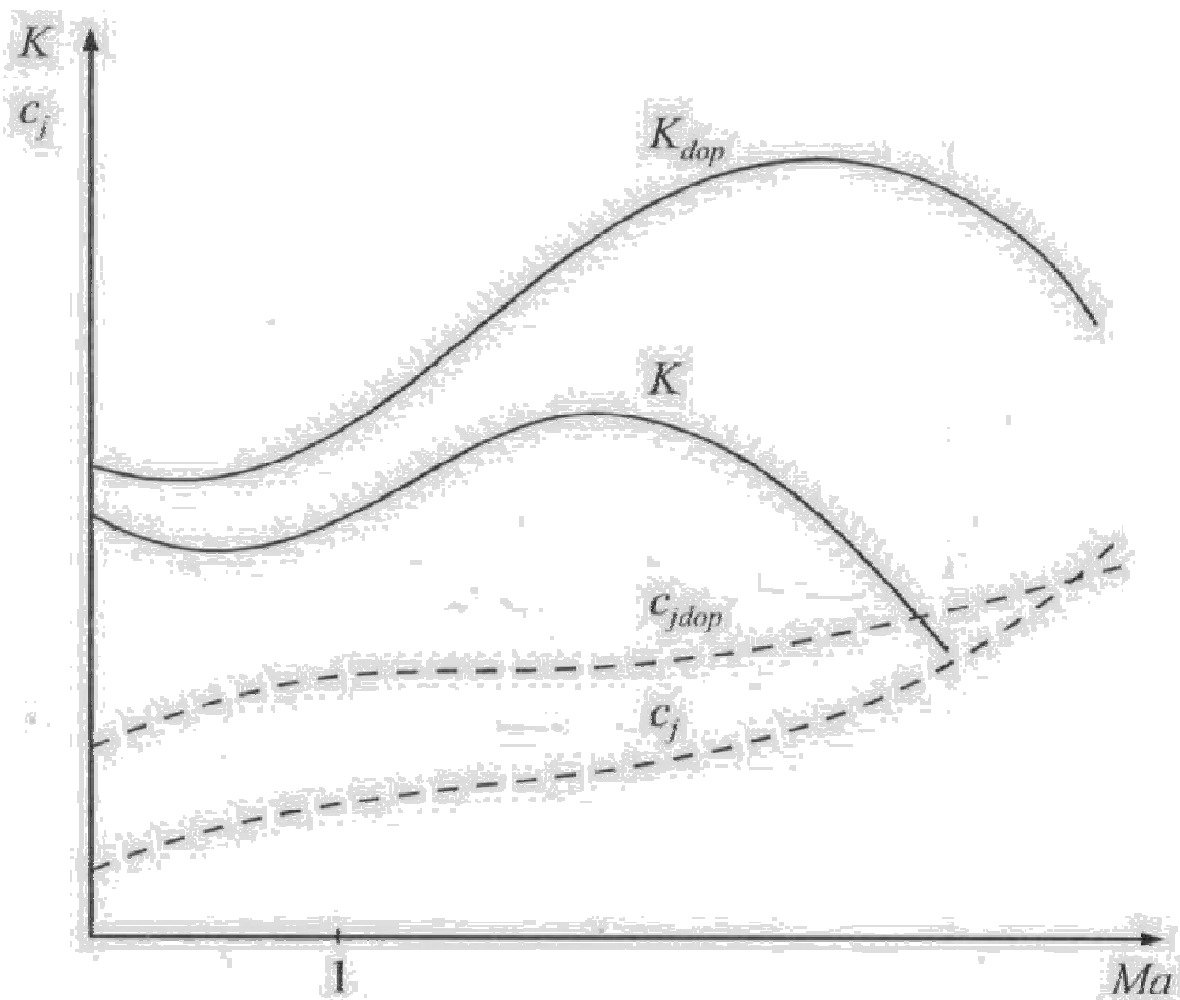


# Charakterystyka obrotowa silnika dwuprzepływowego

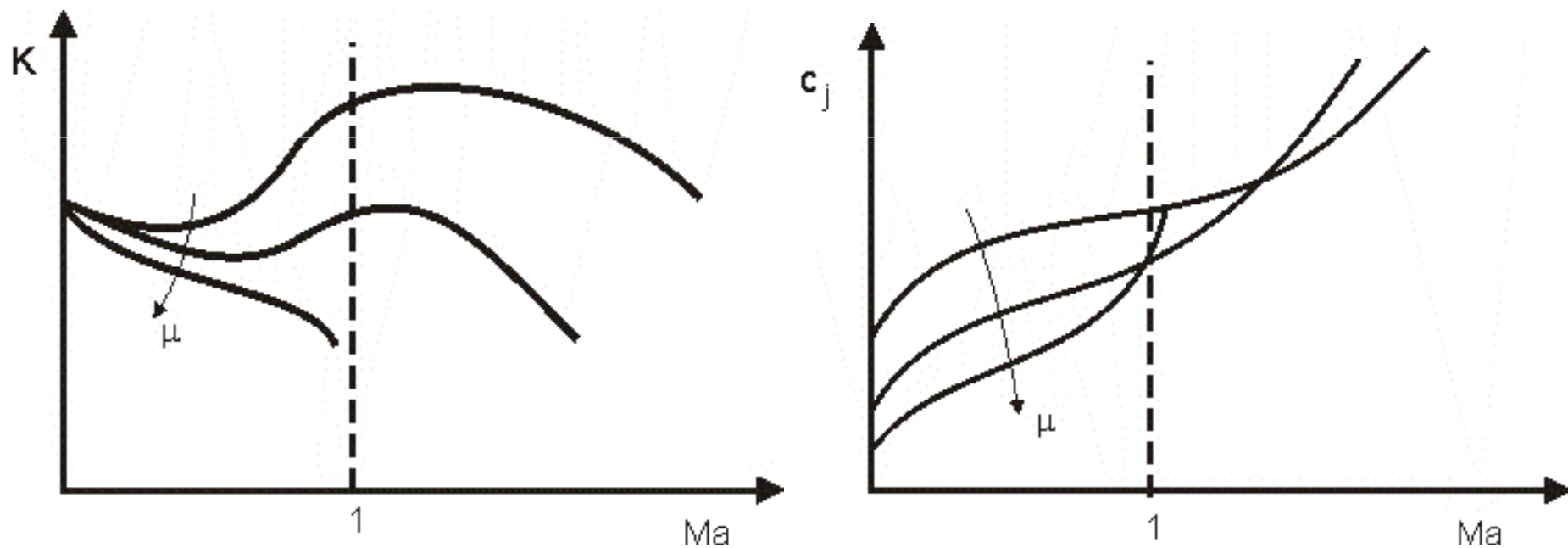


Charakterystyka obrotowa dwuprzepływowego turbinowego silnika odrzutowego ( —  $\mu > 0$  ) i jednoprzepływowego ( - - -  $\mu = 0$  ) dwuwirnikowego silnika odrzutowego

## Charakterystyka prędkościowa silnika z włączonym i wyłącznym dopalaczem

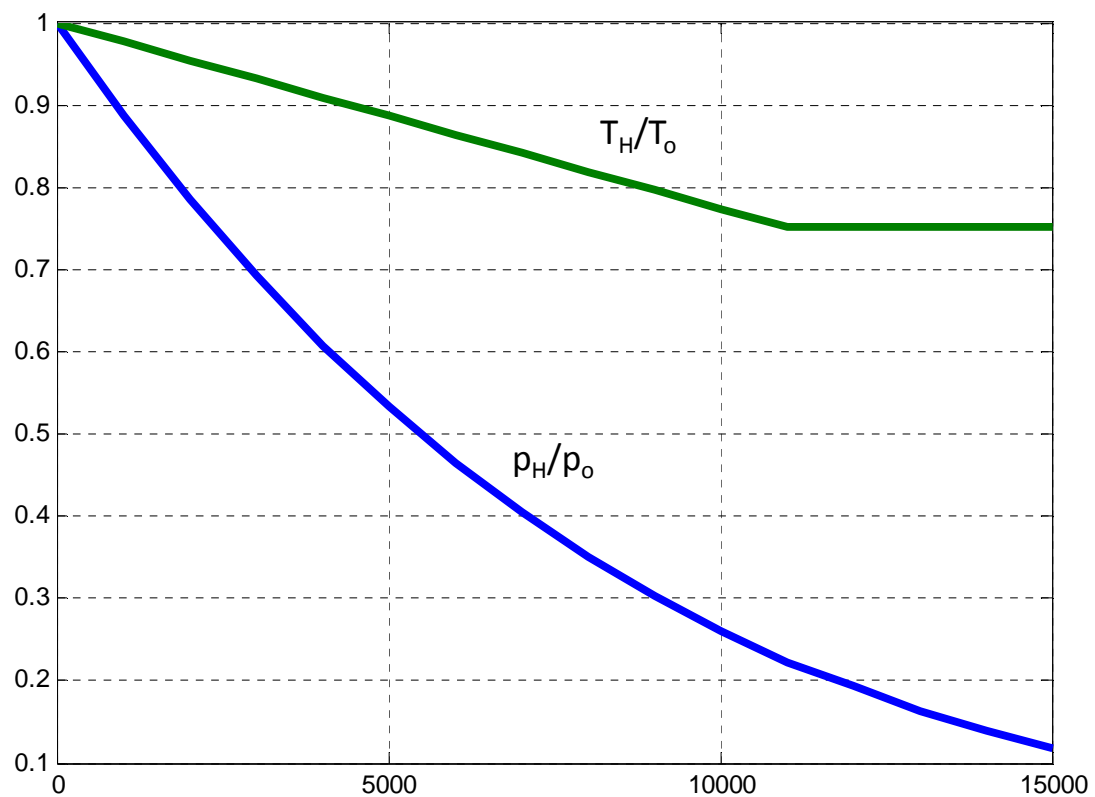


# Charakterystyka prędkościowa silnika dwuprzepływowego

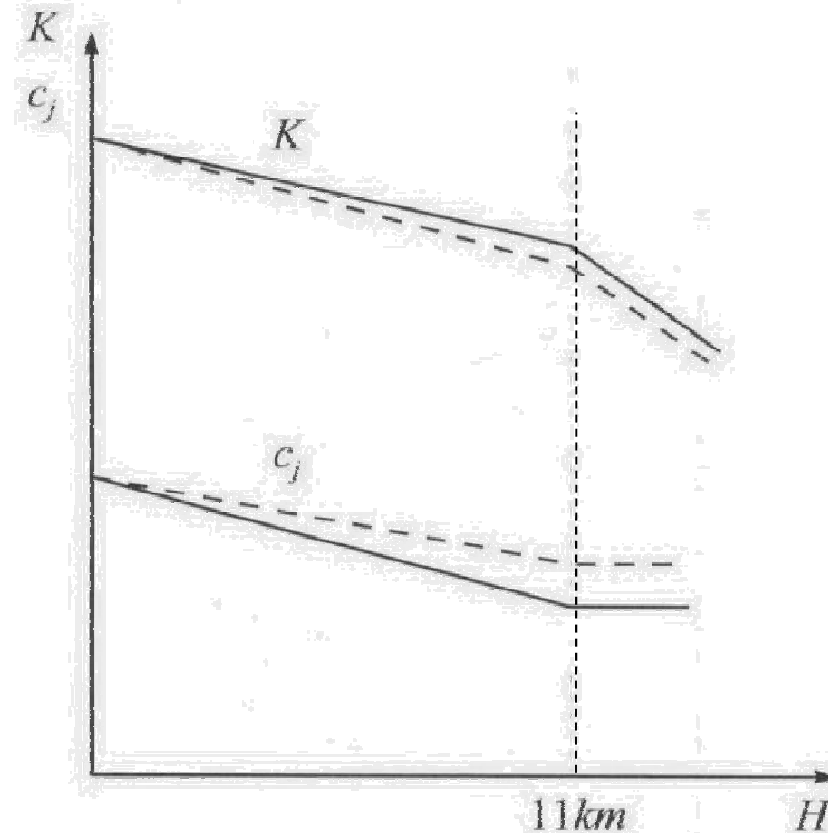


# Charakterystyka wysokościowa

## Atmosfera wzorcowa



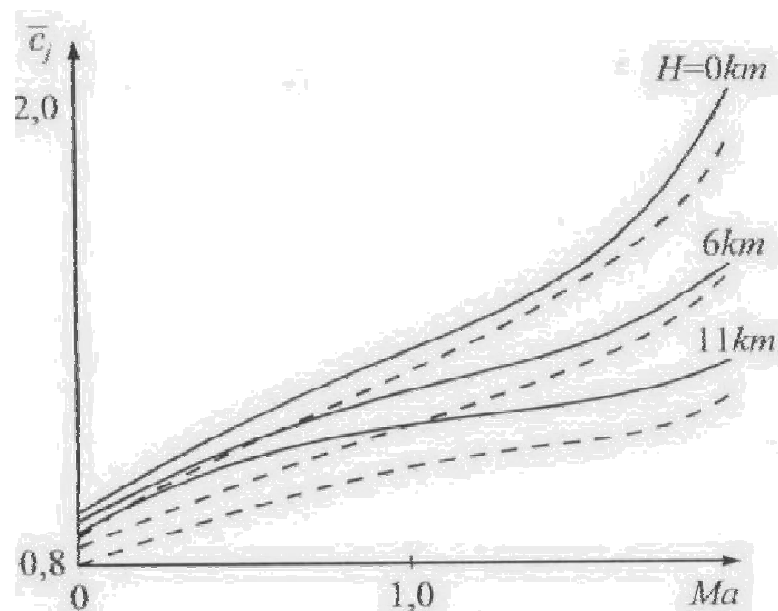
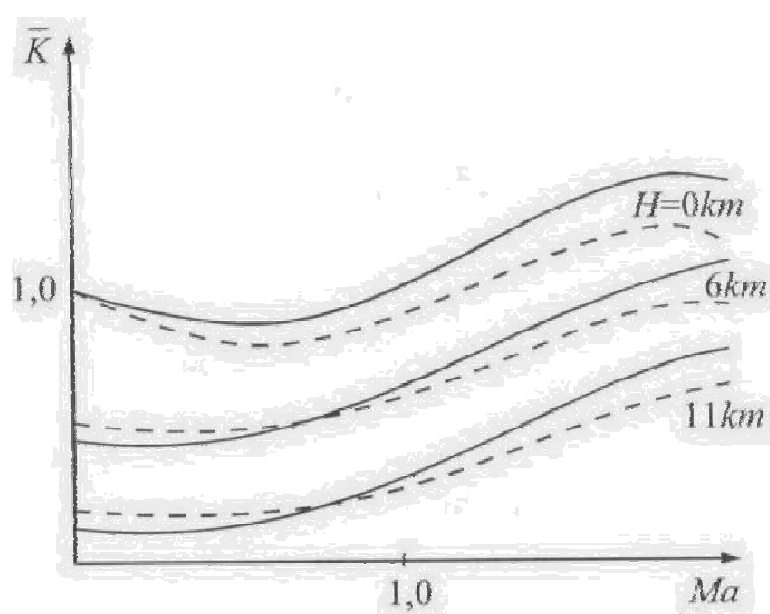
# Charakterystyka wysokościowa silnik jedno i dwuprzepływowy



Charakterystyka wysokościowa turbinowego silnika odrzutowego (—)  
jednoprzepływowego oraz dwuprzepływowego (---)

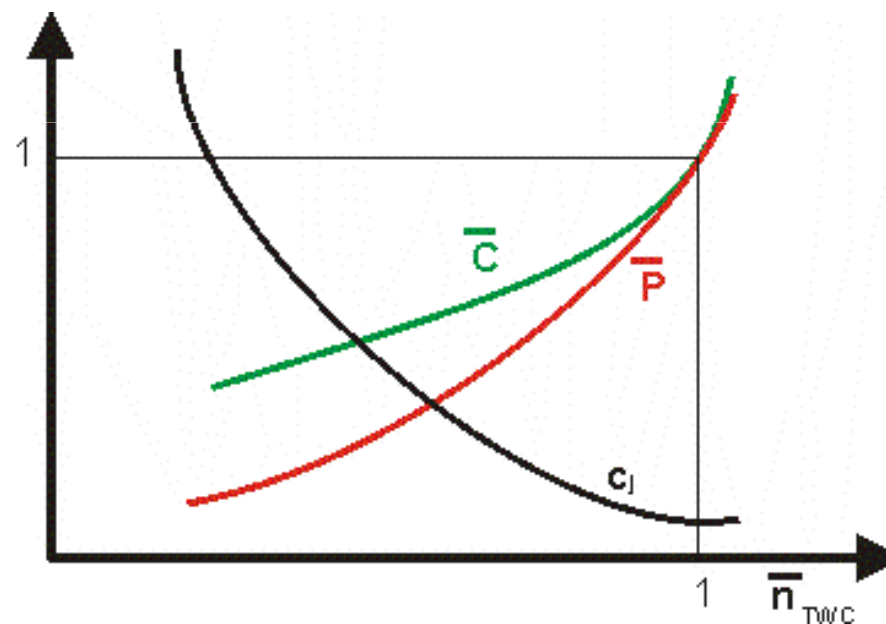
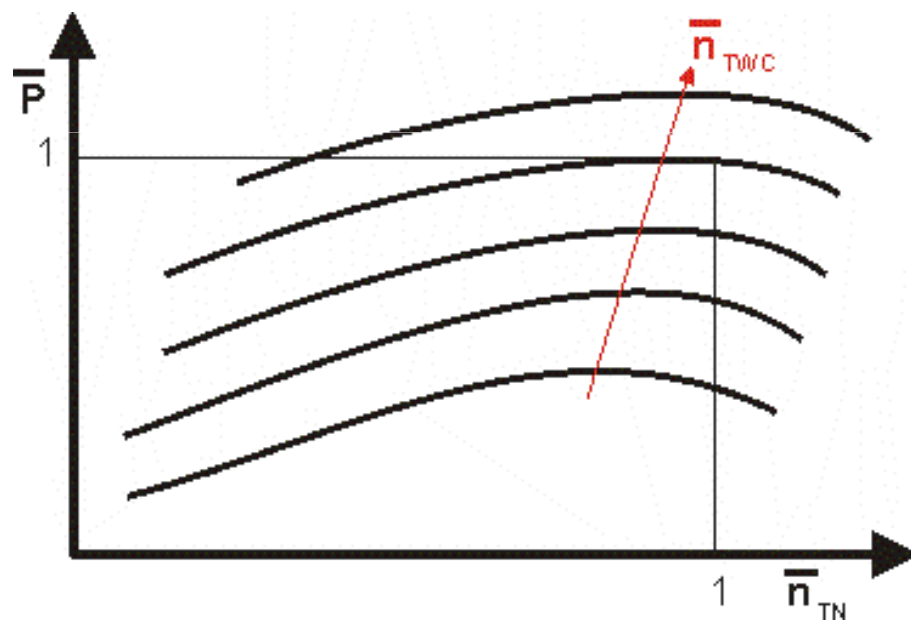


# Charakterystyka prędkościowo-wysokościowa silnika jedno i dwuprzepływowego

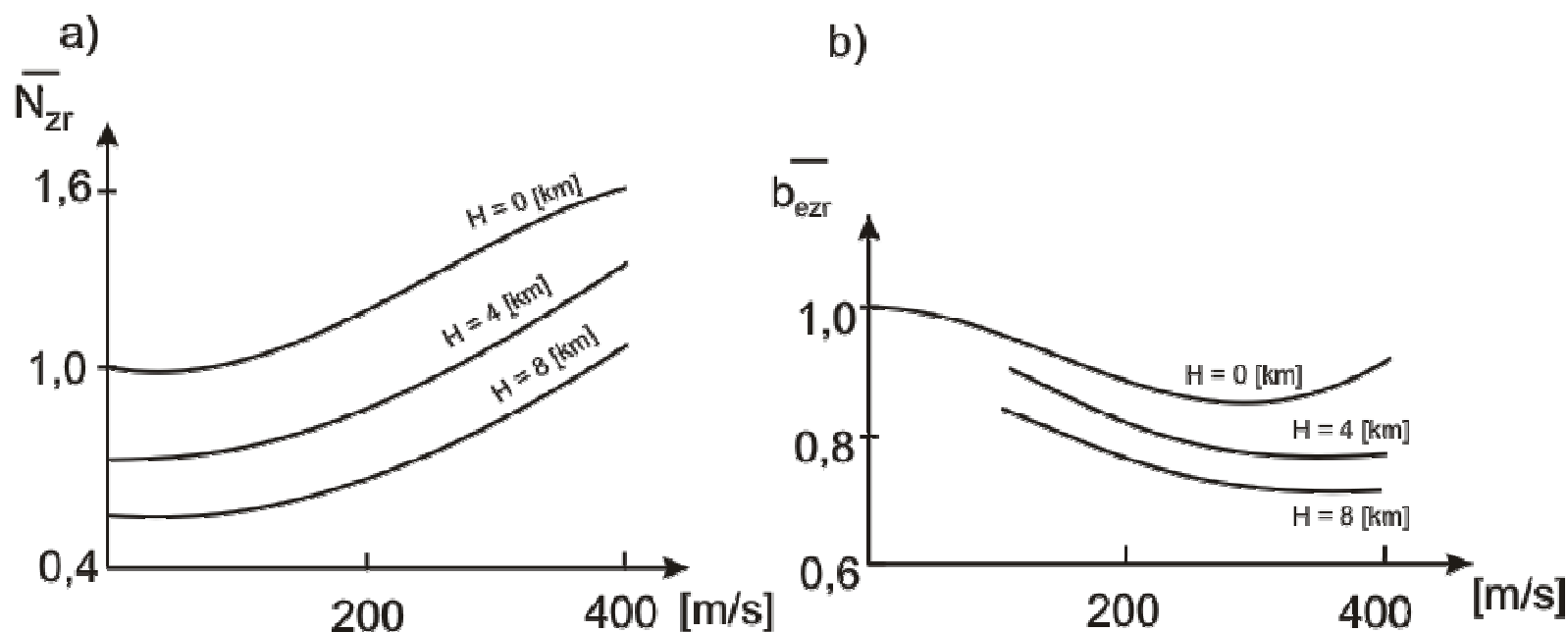


Charakterystyka turbinowego silnika odrzutowego (—) jednoprzepływowego oraz dwuprzepływowego (---)

# Charakterystyka turbinowego silnika śmigłowego z wolną turbiną



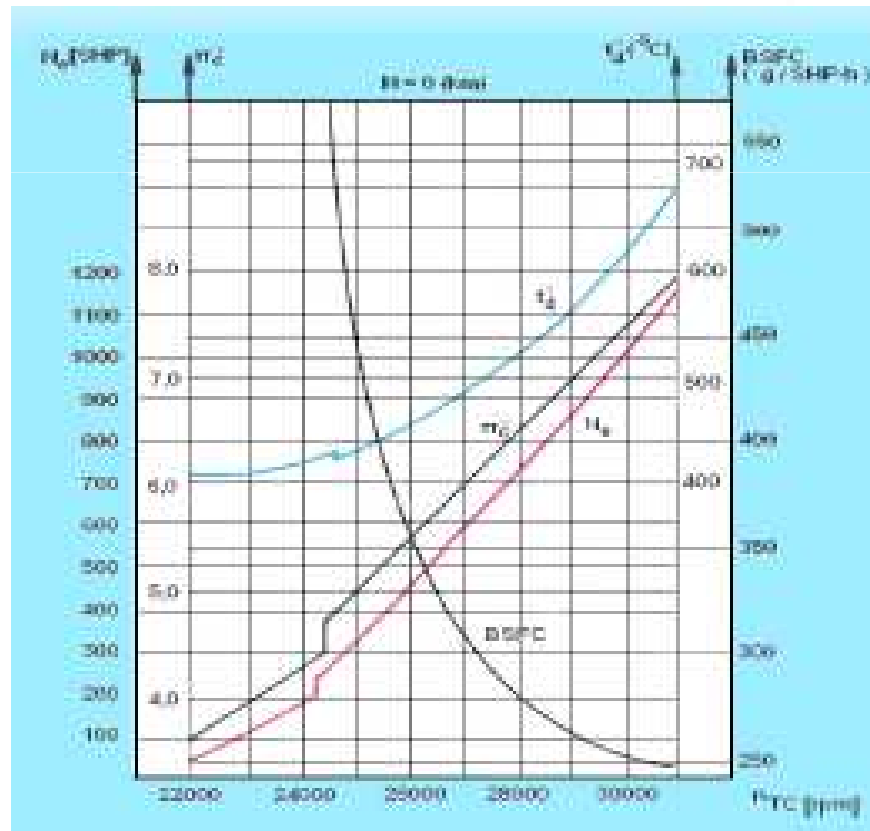
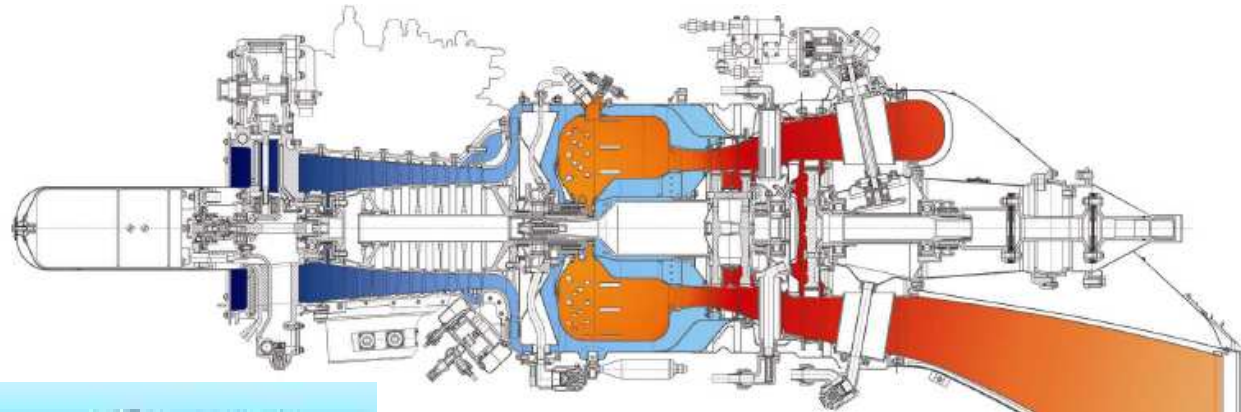
# Charakterystyka prędkościowo-wysokościowa turbinowego silnika śmigłowego



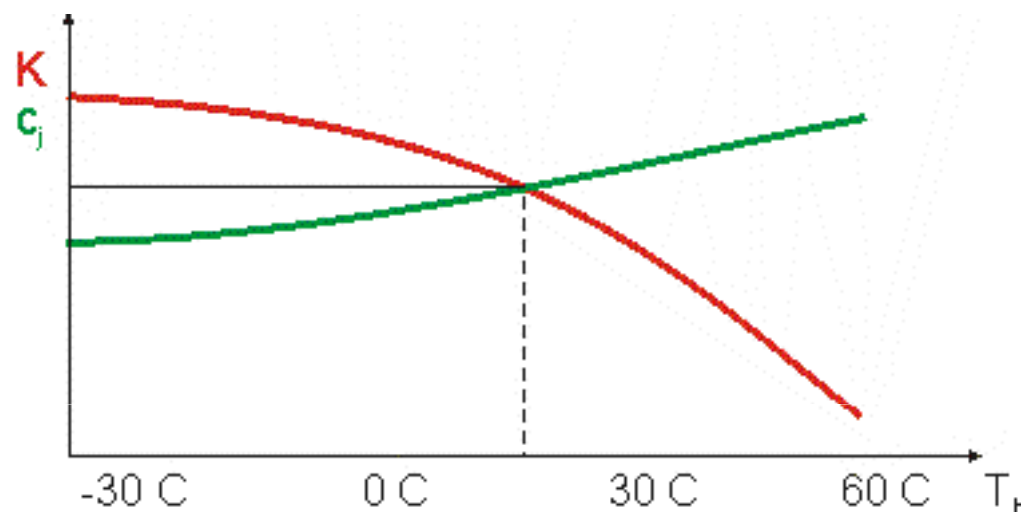
$\bar{N}_{zr}$  - moc zredukowana względna

$\bar{b}_{e\_zr}$  - zredukowane do mocy względne zużycie paliwa

# PZL -10 W



# Charakterystyka klimatyczna



Zależność względnego ciągu i jednostkowego zużycia paliwa turbinowego silnika jednoprzepływowego od temperatury otoczenia.

$$K = K_o \cdot \frac{p_i}{p_o} \cdot \frac{T_o^2}{T_i^2}$$

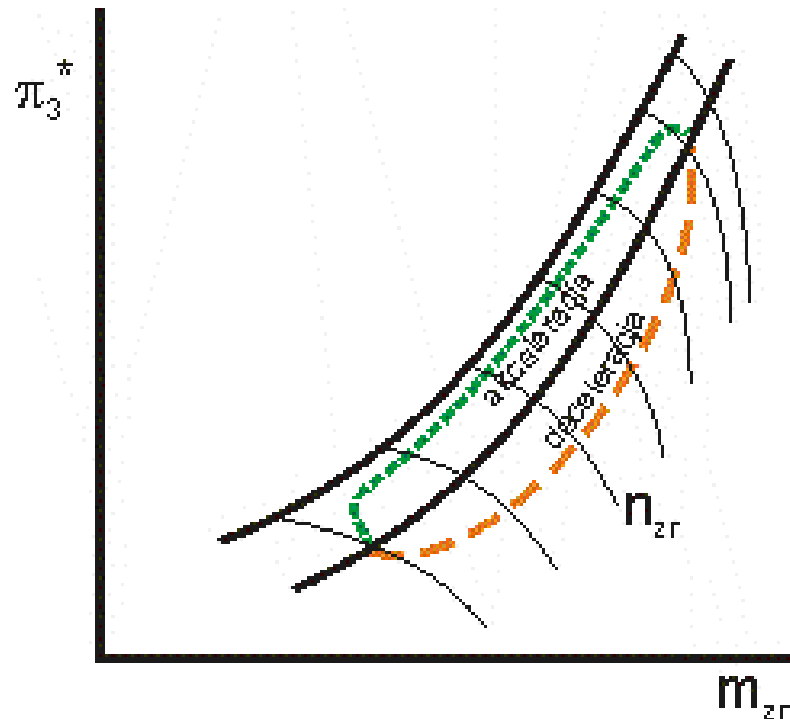
gdzie indeksy oznaczają parametry :

o – odniesienia

i - aktualne

# Praca silnika w stanach nieustalonych

- Akceleracja – przyspieszanie prędkości obrotowej wirników silnika
- Deceleracja – opóźnianie prędkości obrotowej wirnika



# Równanie opisujące pracę silnika w stanach nieustalonych

$$M_T - M_S - \sum M_D = J \cdot \varepsilon$$

- $M_T$  – moment generowany przez turbinę
- $M_S$  – moment odbierany przez sprężarkę
- $M_D$  – moment pobierany przez dodatkowe urządzenia i opory tarcia
- $J$  – moment bezwładności wirnika
- $\varepsilon$  – przyspieszenie kątowe

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$$

# Równanie mocy

$$N = M \cdot \omega$$

Po pomnożeniu równania momentów przez prędkość kątową otrzymuje się

$$N_T - N_S - \sum M_D = J \omega \frac{d\omega}{dt}$$

Przyjmując

$$N_T - N_S - \sum M_D = \eta_m N_T - N_S \quad \text{oraz} \quad \omega = \frac{\pi n}{30}$$

$$\boxed{\eta_m N_T - N_S = J \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 n \frac{dn}{dt}}$$



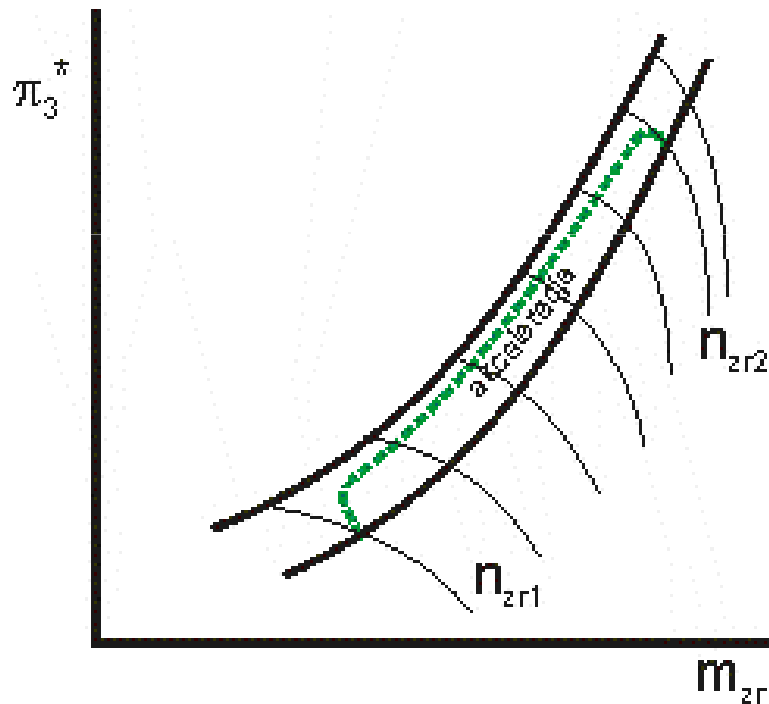
# Czas przejścia w stanie nieustalonym

$$\eta_m N_T - N_S = J \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 n \frac{dn}{dt}$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 = J \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 \int_{n_1}^{n_2} \frac{n}{\eta_m N_T - N_S} dn$$

Czas procesów przejściowych jest funkcją zależną istotnie od prędkości początkowej i końcowej oraz różnicy mocy pomiędzy urządzeniem generującym moc (turbina) i urządzeniami odbierającymi moc (sprężarka, agregaty pomocnicze)

# Proces akceleracji



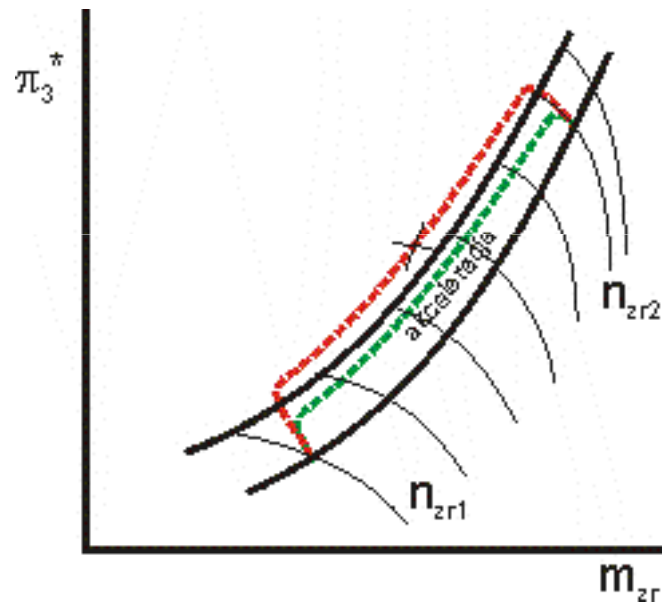
**Zrywność** określająca czas przejścia od prędkości  $n_1$  do prędkości  $n_2$  charakteryzuje proces akceleracji w silniku

## Ograniczenia akceleracji

- Zabezpieczenia przed pompażem sprężarki ( $\Delta Z_{ust}$ ,  $\Delta Z_{prz}$ )
- zabezpieczenia przed zgaśnięciem silnika (zbyt bogata mieszanka)

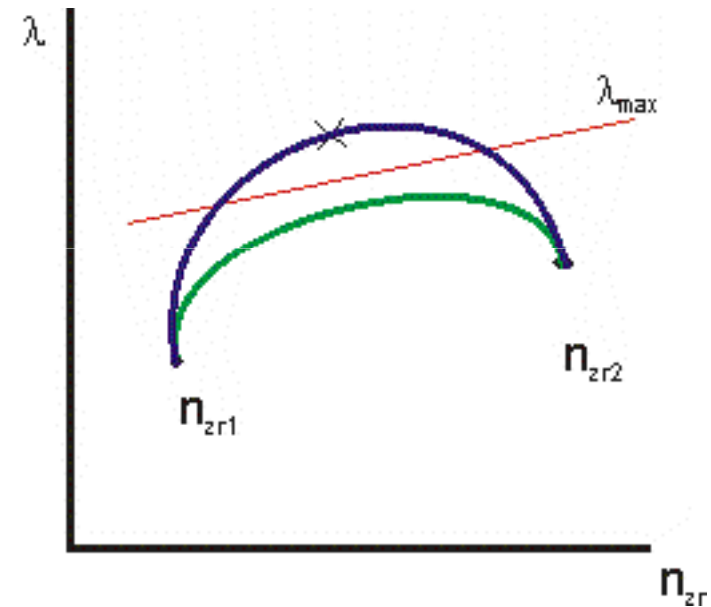
# Ograniczenia procesu akceleracji

pompaż



$$\Delta Z_{prz} = 0,03 \div 0,07$$

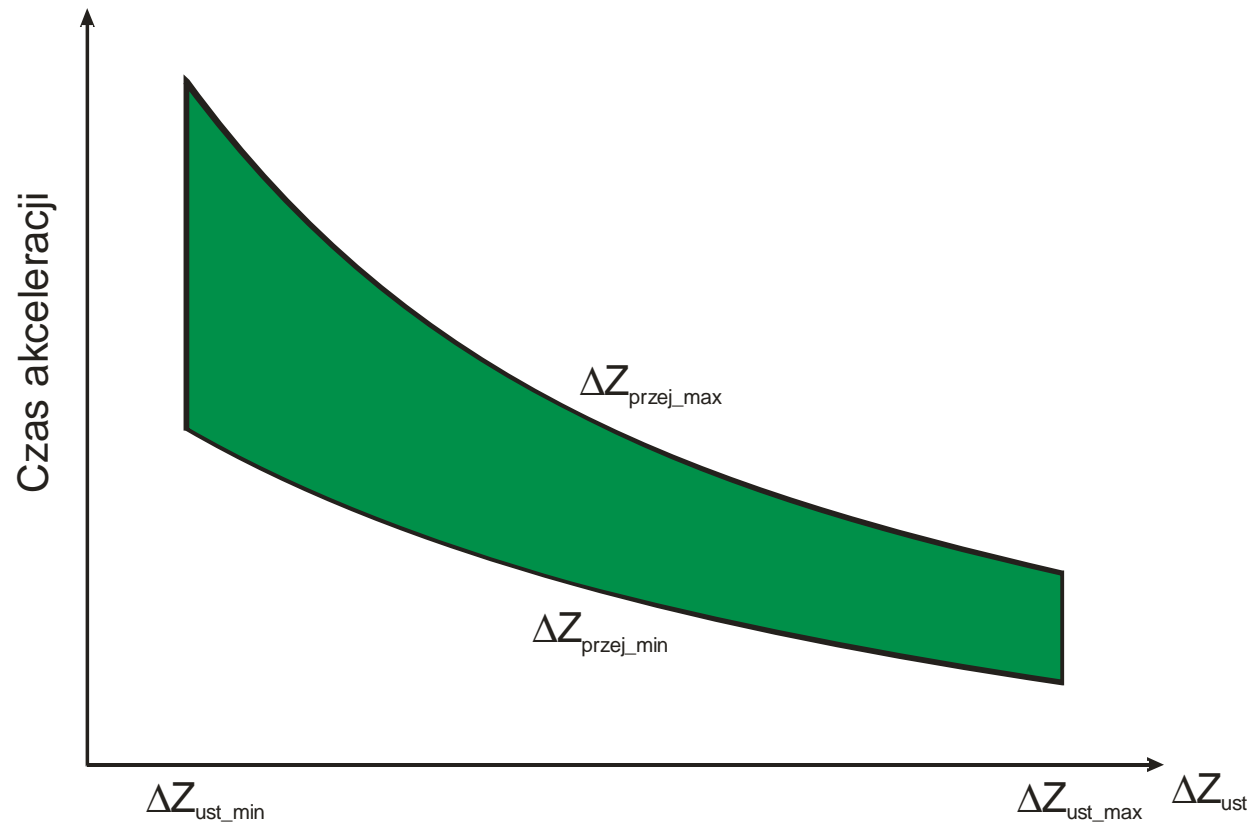
brak zapłonności mieszanki w KS



$$\lambda = \frac{\text{rzeczywista ilość powietrza}}{\text{teoretyczne zapotrzebowani epowietrza}}$$

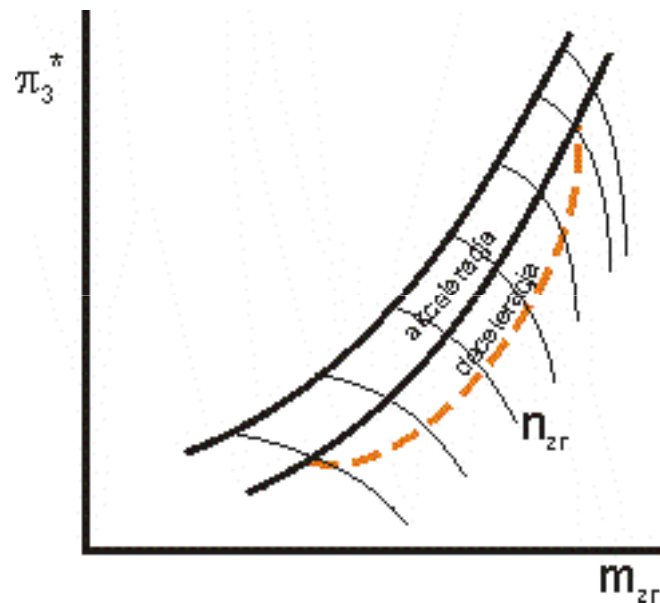
$$\lambda = 0,5 \div 1,5$$

# Zapas statecznej pracy, a zrywność silnika



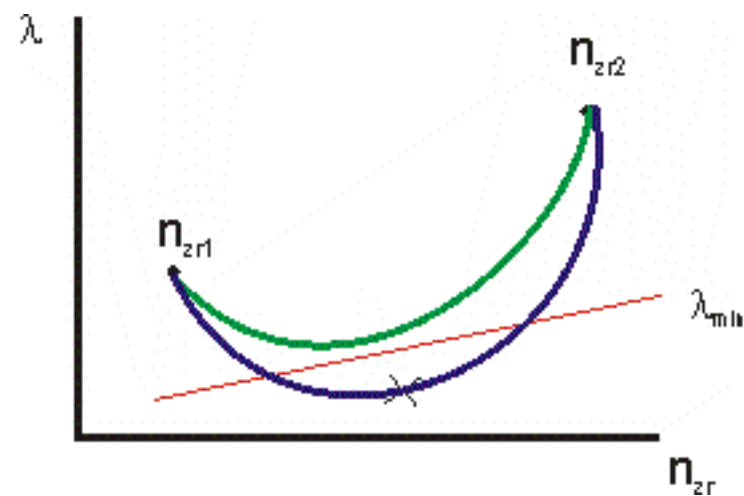
Na zrywność silnika (skrócenie czasu akceleracji korzystnie wpływa zwiększenie zapasu statecznej pracy w stanie ustalonym i zmniejszenie zapasu statecznej pracy w stanach przejściowych)

# Deceleracja silnika



## Ograniczenia deceleracji

-zabezpieczenia przed zgaśnięciem silnika (zbyt uboga mieszanka)



**Dziękuję za uwagę**