

Sprężanie

- Sprężarka idealna
- Sprężanie politropowe
- Sprężanie wielostopniowe
- Przestrzeń szkodliwa
- Wykres indykatorowy
- Sprężarka przepływowa
- Przepływ przez wirnik
- Zmiana entalpii

Sprężanie

Sprężarka jest maszyną zmieniającą ciśnienie gazu. Sprężarka nie realizuje obiegu termodynamicznego, ponieważ działanie sprężarki polega na przeniesieniu gazy między obszarami o różnych ciśnieniach. Można wyróżnić następujące etapy pracy sprężarki:

- pobranie gazu
- zmiana ciśnienia gazu
- oddanie gazu.

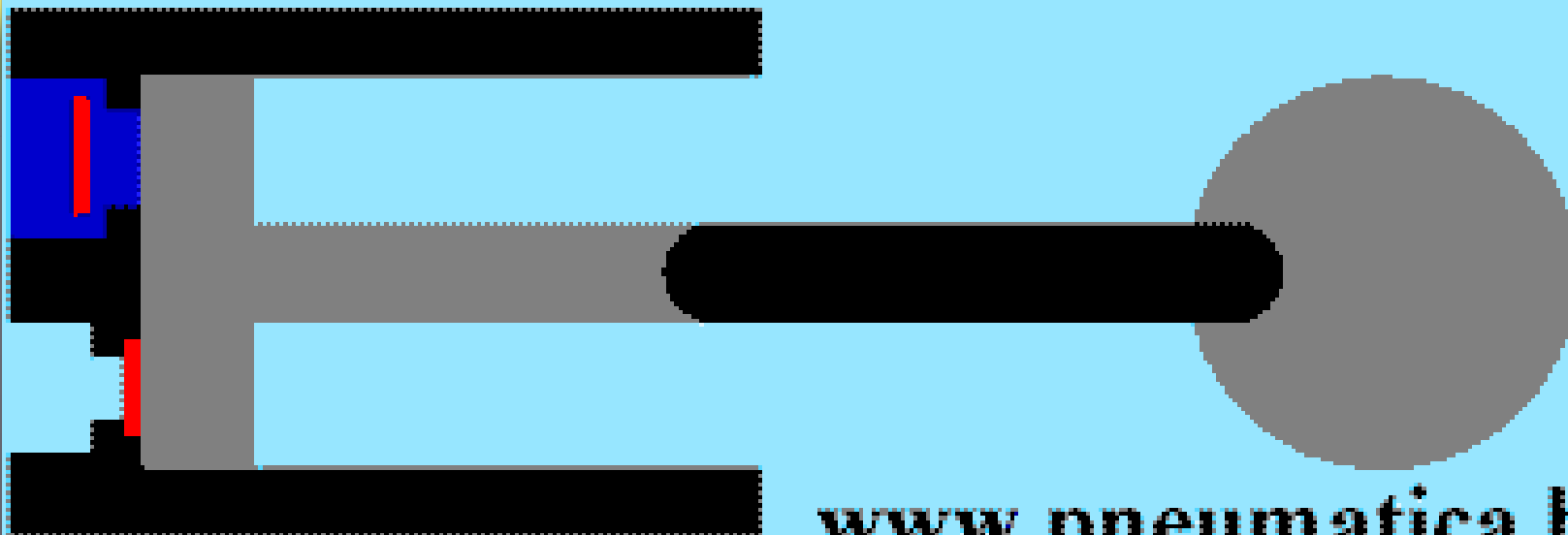
Sprężanie

- W sprężarce wyporowej zmiana ciśnienia gazu odbywa się w zamkniętej przestrzeni roboczej.
- Kształt przestrzeni roboczej i rodzaj ruchu wywołującego zmianę ciśnienia gazu nie mają znaczenia z punktu widzenia przemian termodynamicznych.
- Pracę sprężarki wyporowej i przemiany w niej zachodzące analizuje się na przykładzie sprężarki tłokowej.

w13

Sprężanie

Termodynamika techniczna

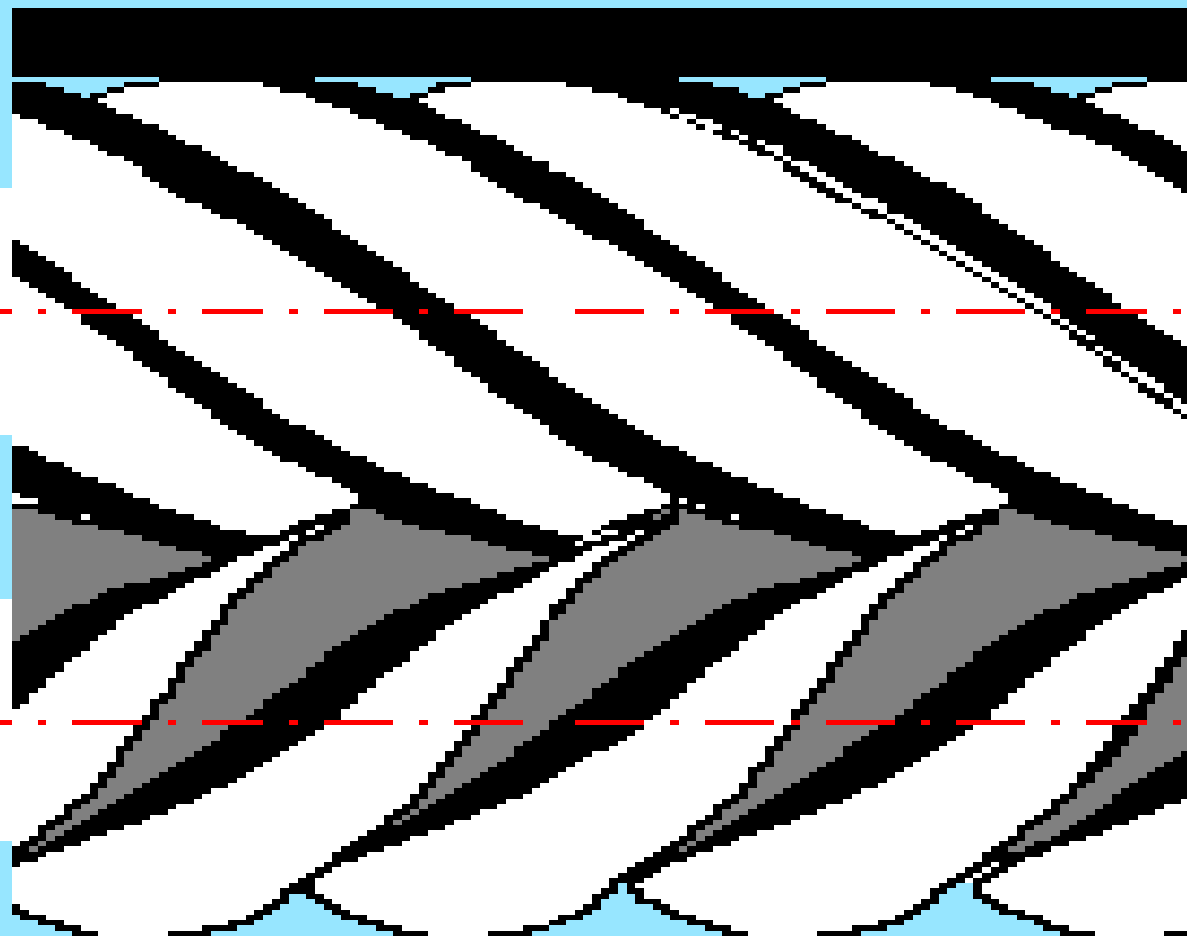


www.pneumatica.be

w13

Sprężanie

Termodynamika techniczna

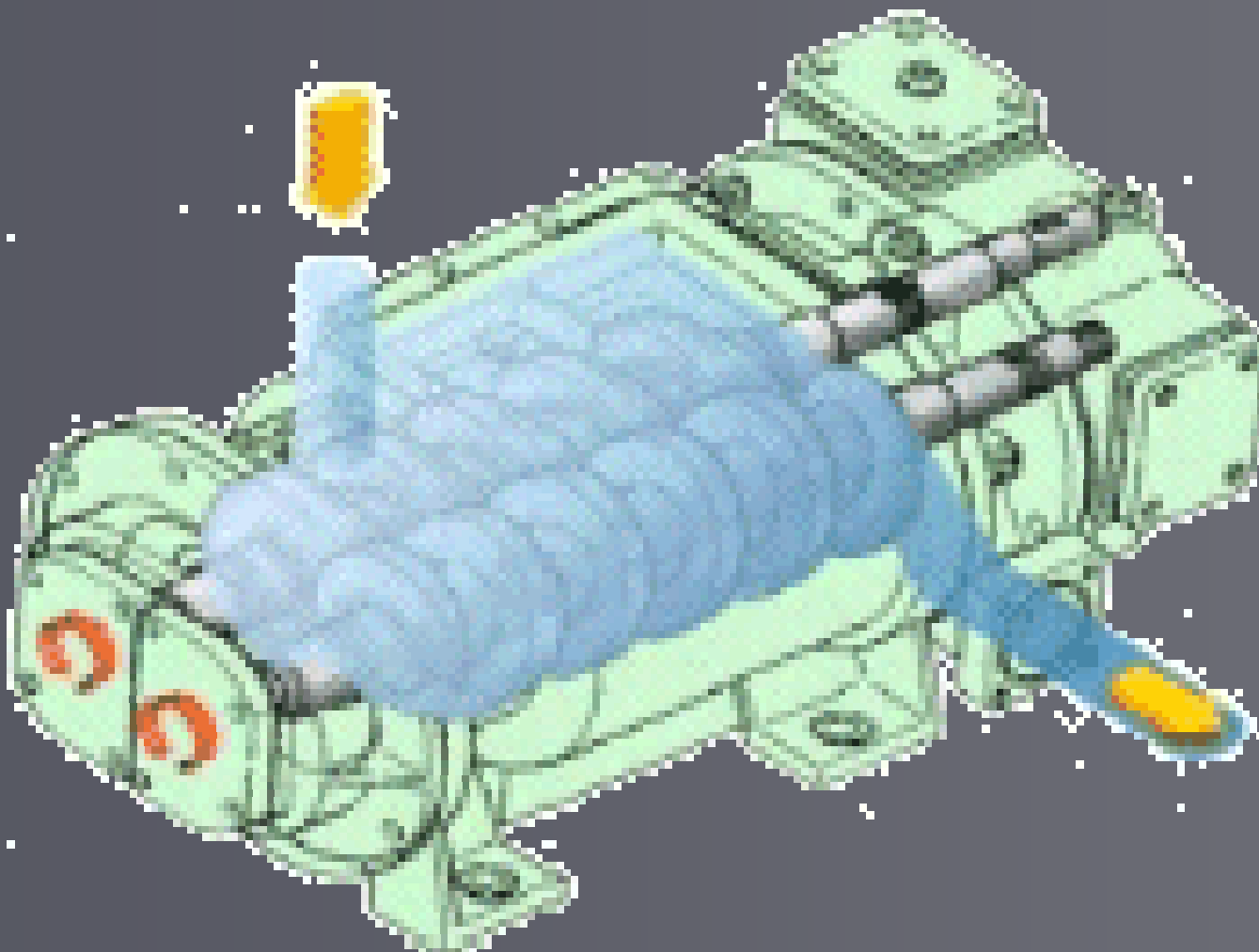


www.pneumatica.be

w13

Sprężanie

Termodynamika techniczna



w13

Sprężanie

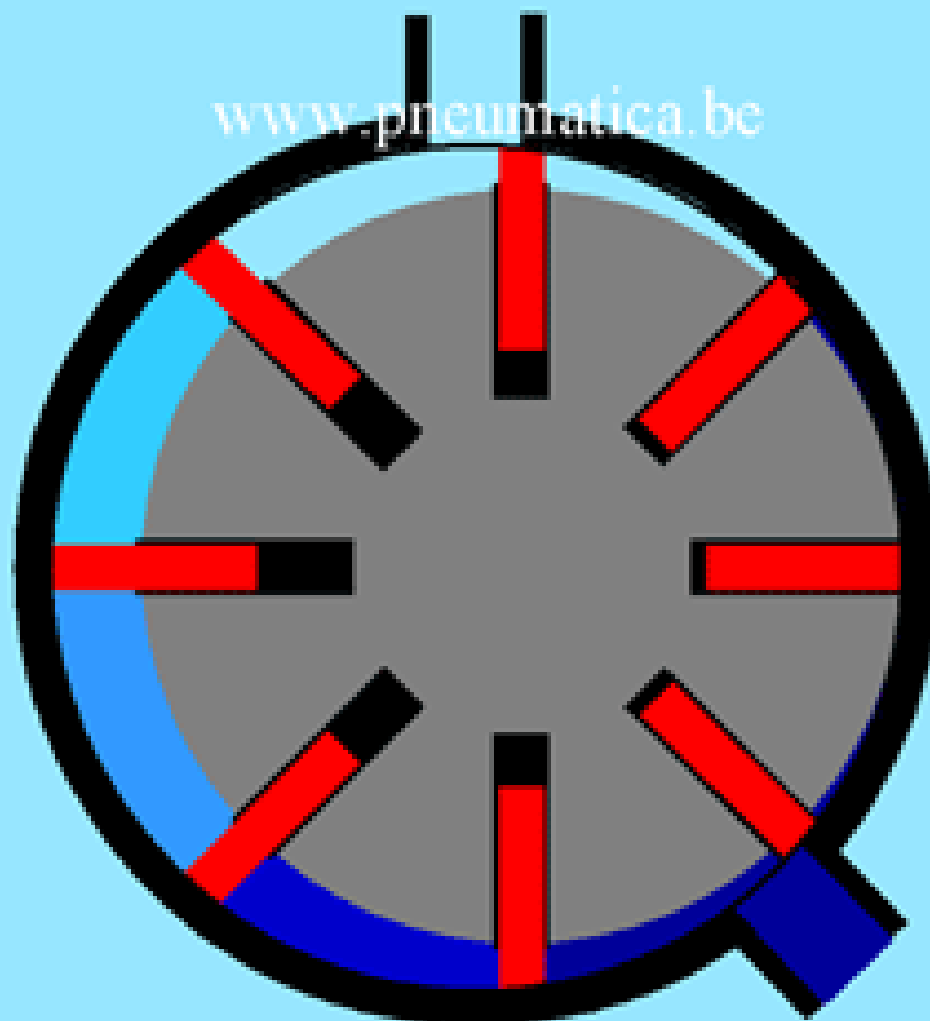
Termodynamika techniczna



w13

Sprężanie

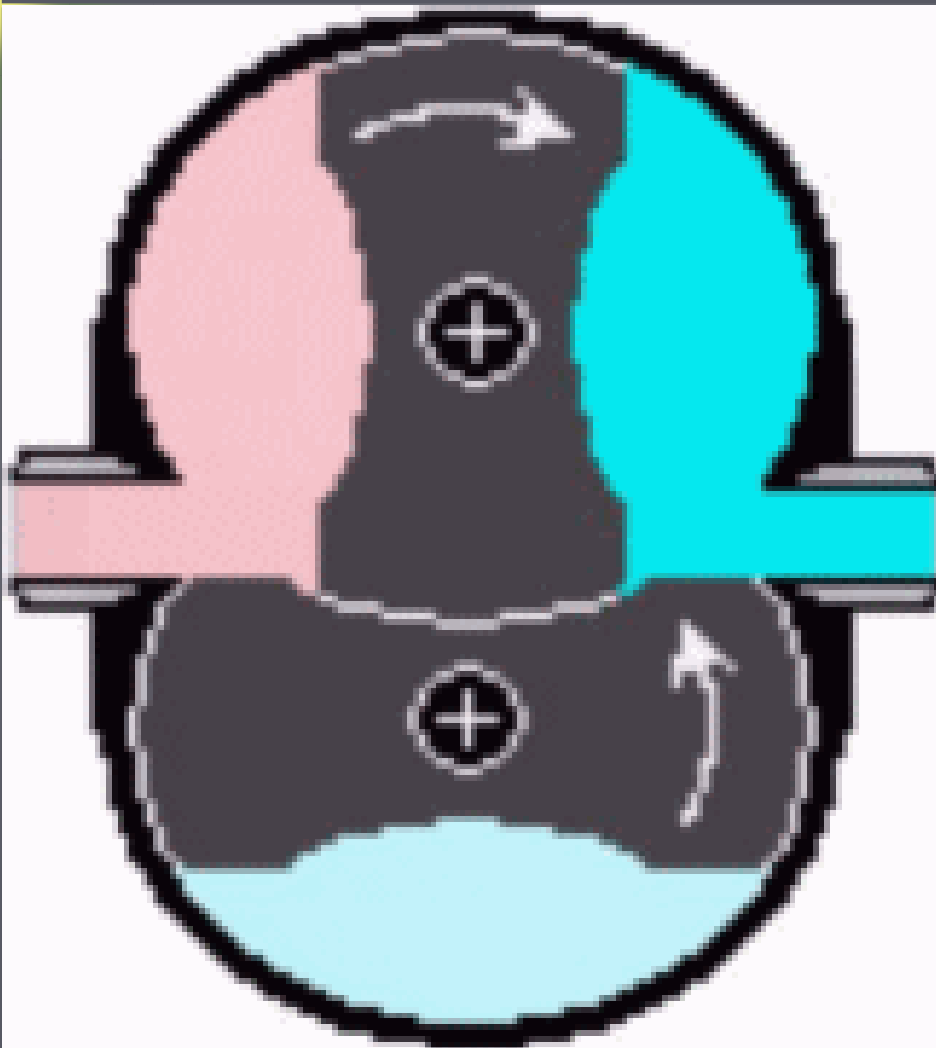
Termodynamika techniczna



w13

Sprężanie

Termodynamika techniczna



w13

Sprężanie

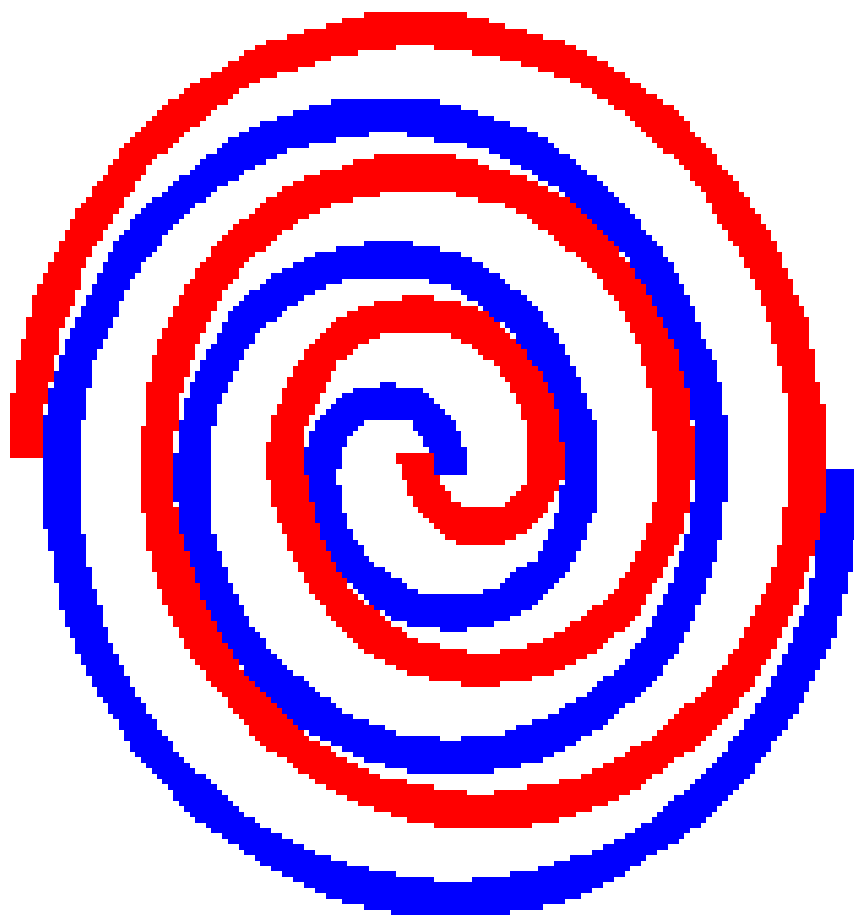
Termodynamika techniczna



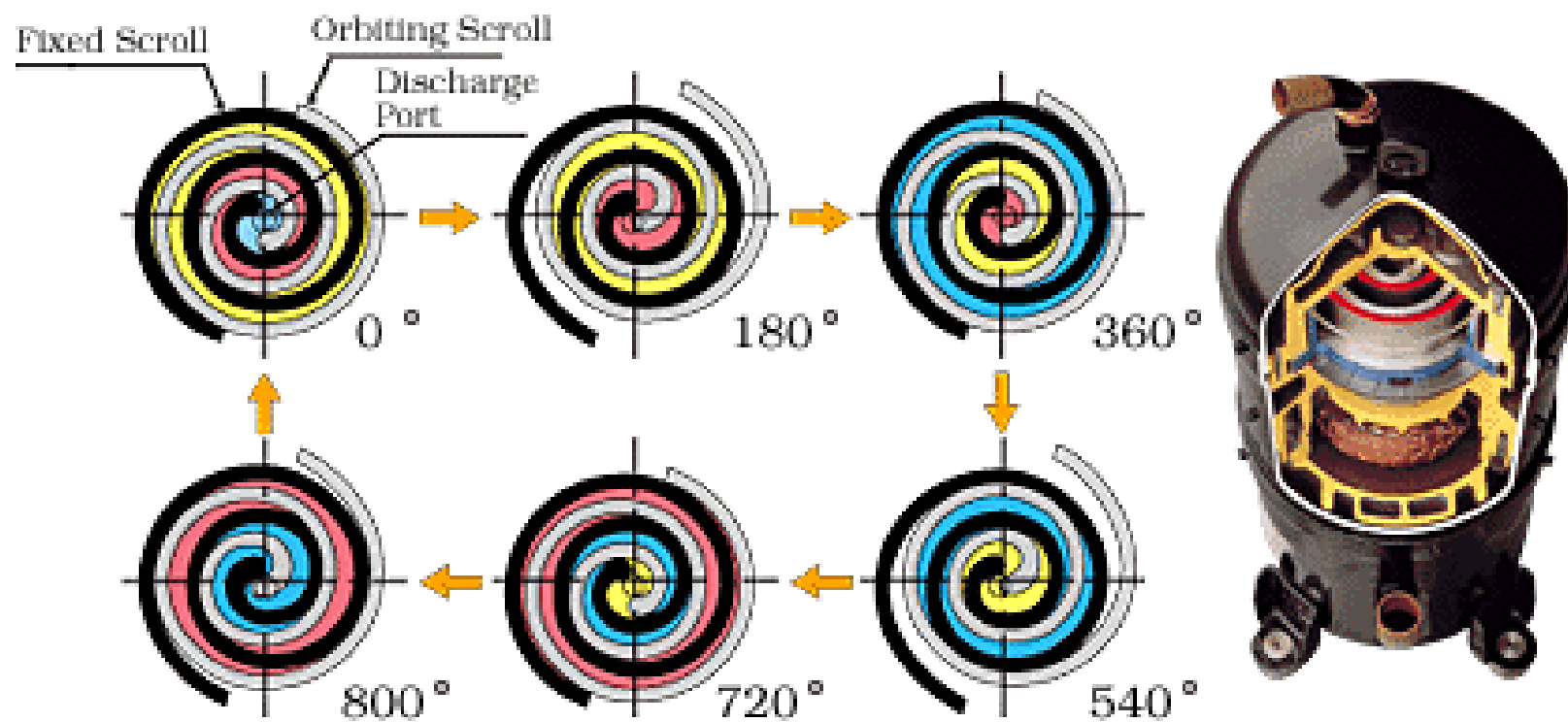
w13

Sprężanie

Termodynamika techniczna



Sprężanie

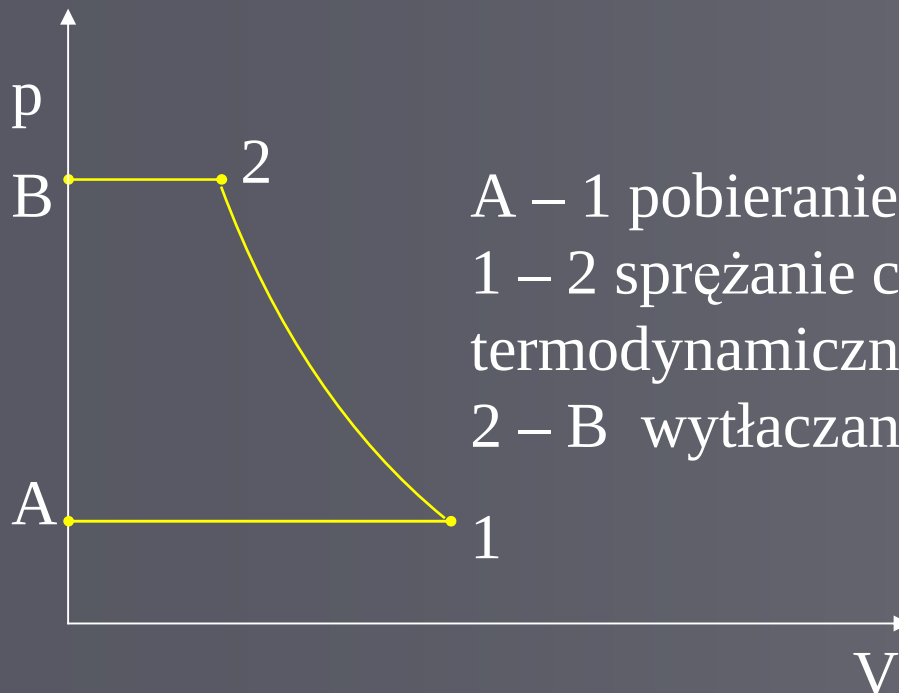


Sprężanie

- W sprężarce przepływowej zmiana ciśnienia gazu następuje podczas przepływu przez ruchomy organ roboczy sprężarki.
- Przestrzeń robocza sprężarki przepływowej jest przestrzenią otwartą.
- Różnica ciśnień na wlocie i wylocie sprężarki przepływowej przy braku ruchu organu roboczego sprężarki wywołuje przepływ wsteczny gazu.

Sprężanie

Termodynamika techniczna



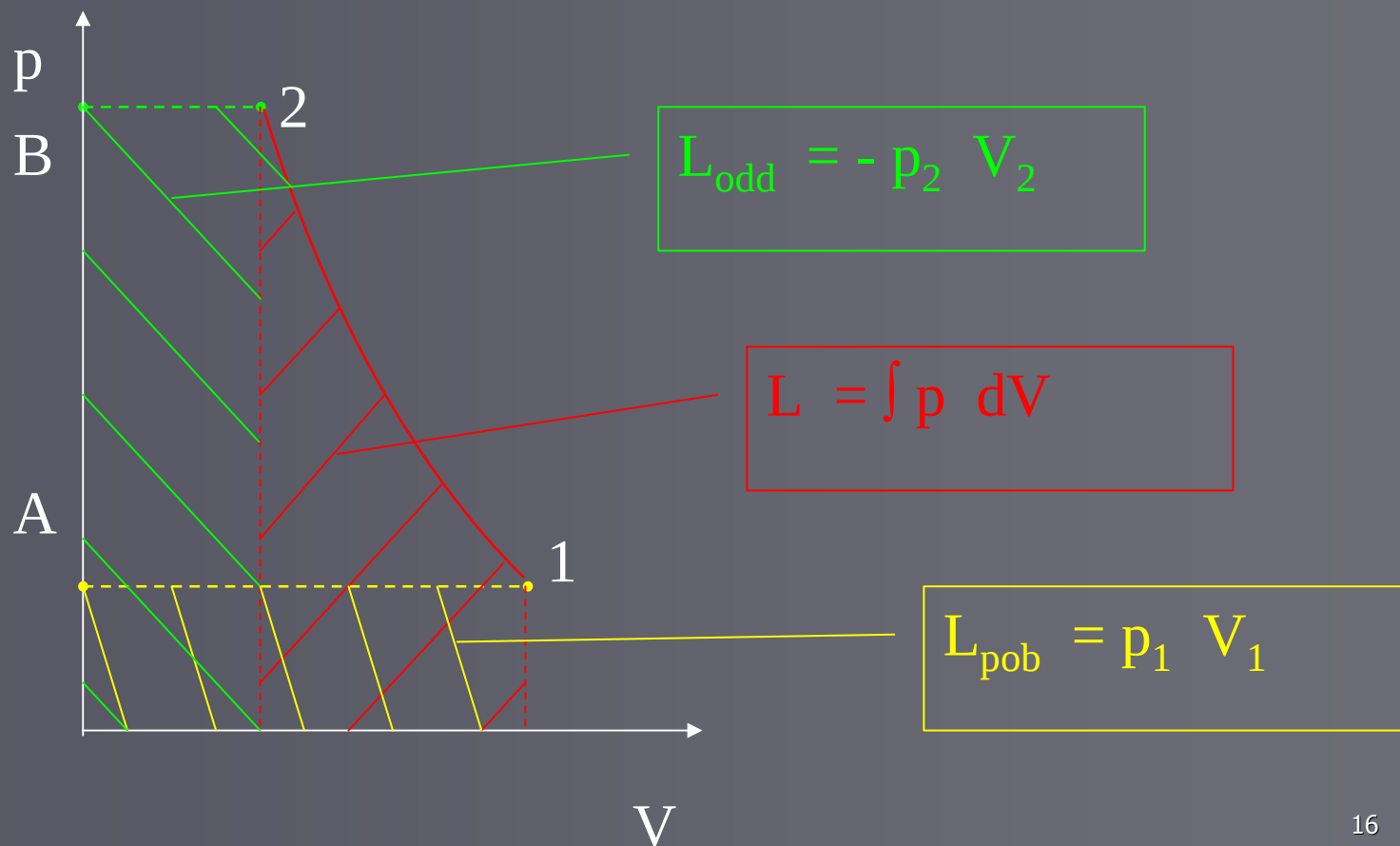
A – 1 pobieranie czynnika
1 – 2 sprężanie czynnika (przemiana
termodynamiczna)
2 – B wyłaczanie czynnika

Sprężanie

Praca sprężania jest pracą techniczną.
Praca techniczna jest sumą:

- pracy pobrania gazu przy ciśnieniu p_1 (praca dodatnia)
- pracy sprężania gazu od ciśnienia p_1 do ciśnienia p_2 (praca ujemna)
- pracy wytłoczenia gazu przy ciśnieniu p_2 (praca ujemna).

Sprężanie



Sprężanie

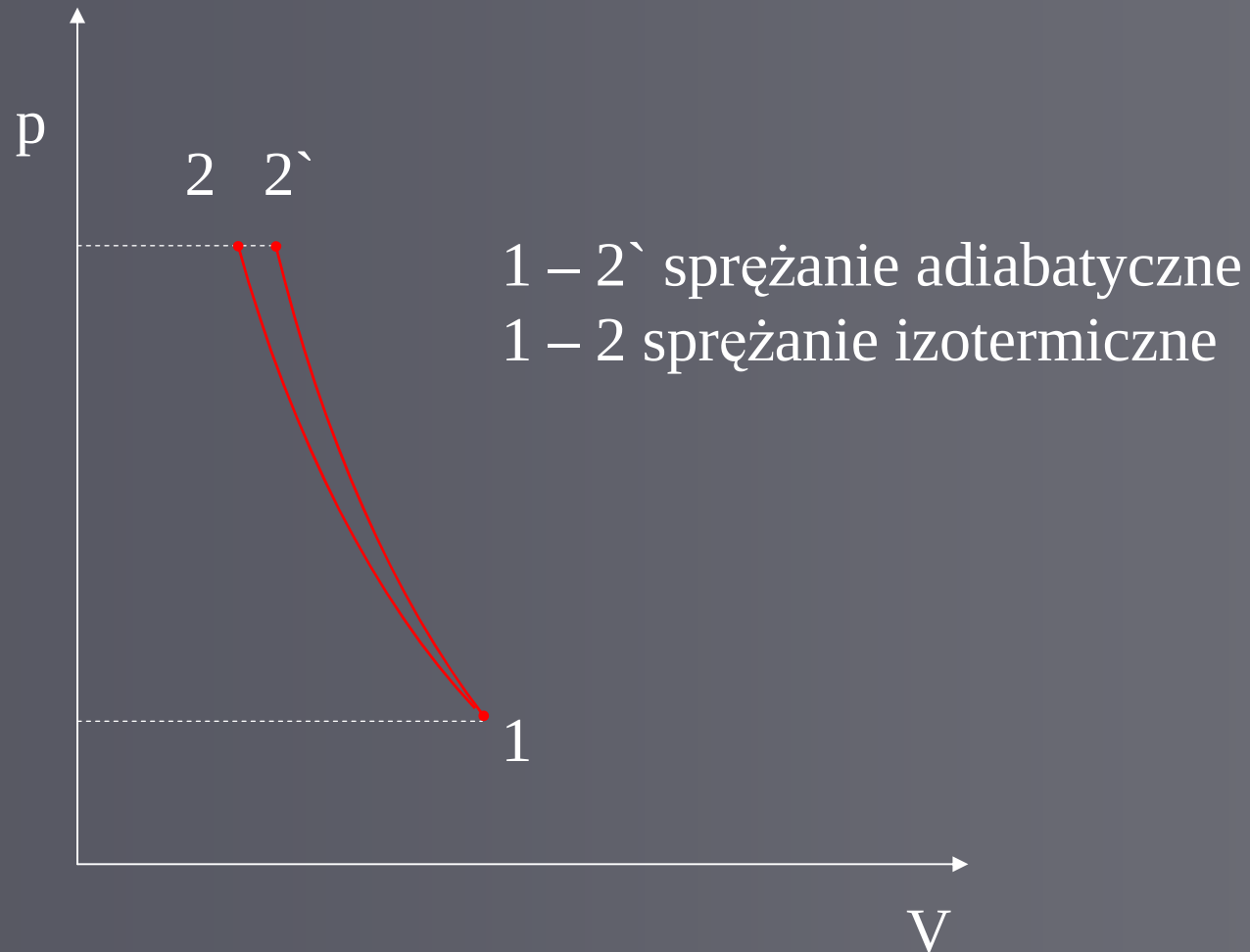
Odcinek B – A nie stanowi zamknięcia cyklu pracy sprężarki

Sprężanie

Skrajnymi przypadkami przemiany 1 – 2, w której sprężamy gaz

- przemiana izotermiczna
(idealne chłodzenie podczas sprężania)
- przemiana adiabatyczna
(idealne izolowanie podczas sprężania)

Sprężanie



Sprężanie

- Praca techniczna sprężania adiabatycznego ma większą wartość bezwzględną od pracy technicznej sprężania izotermicznego.
- Chłodzenie gazu podczas sprężania zmniejsza pracę pobieraną przez sprężarkę.

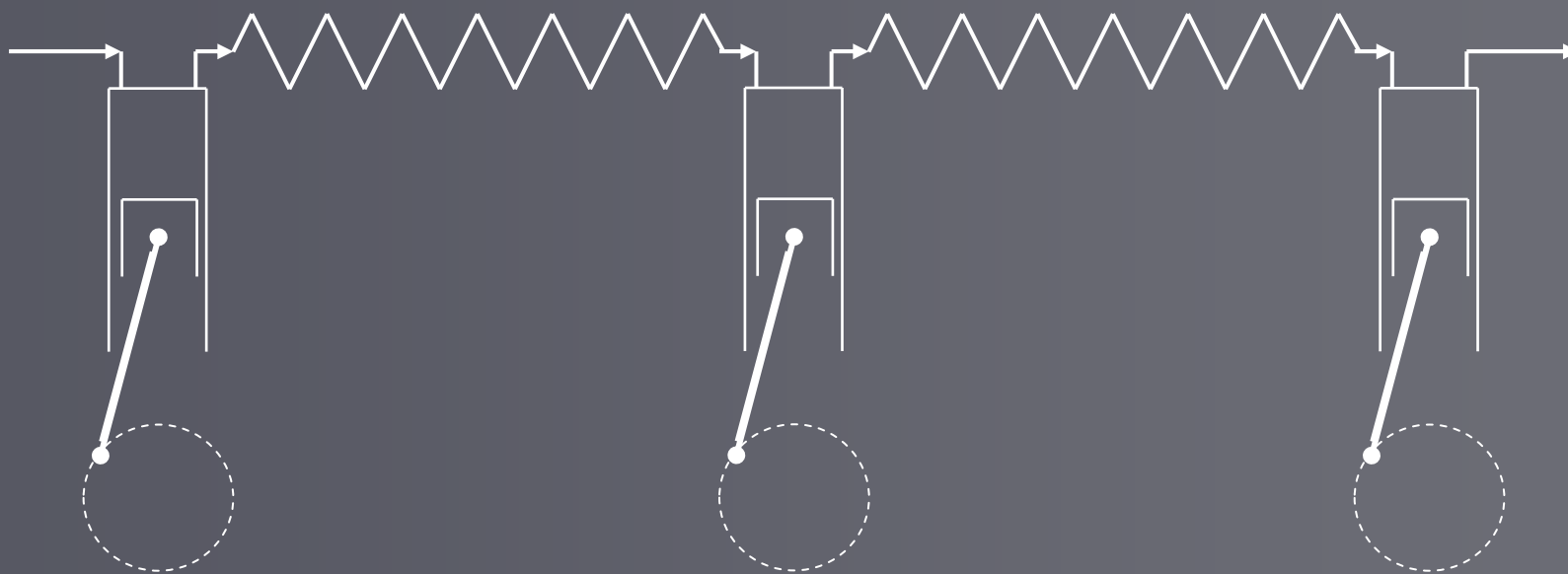
Sprężanie

- Sprężanie realizowane w sprężarce ma wykładnik politropy większy od przemiany izotermicznej ($m = 1$) i mniejszy od przemiany adiabatycznej ($m = \kappa$).
- Przemiana politropowa o wykładniku $1 < m < \kappa$ jest politropą techniczną.

Sprężanie

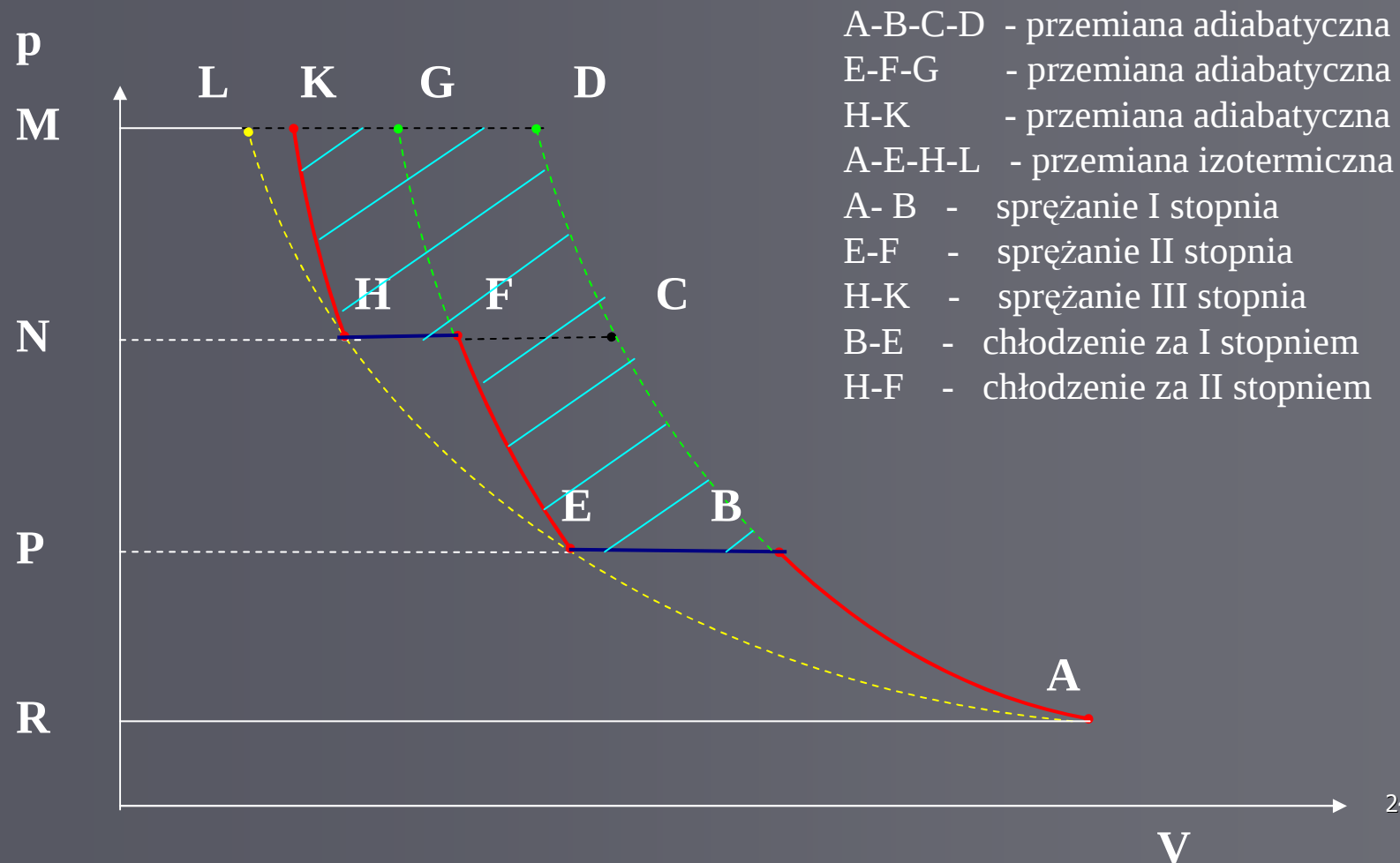
- Wewnętrzne chłodzenie gazu podczas sprężania jest trudne do zrealizowania.
- Sprężanie z zewnętrznym chłodzeniem nazywamy sprężaniem wielostopniowym.
- Przy sprężaniu wielostopniowym chłodzenie zewnętrzne jest chłodzeniem międzystopniowym.

Sprężanie



Sprężanie

Termodynamika techniczna



Sprężanie

- Gaz sprężony w cylindrze I stopnia (A-B) jest wytłaczany (B-P) do chłodnicy międzystopniowej I stopnia.
- Następnie jest pobierany do cylindra II stopnia (P-E).
- Chłodzenie międzystopniowe (B-E) może być traktowane jako izobaryczne chłodzenie wewnętrzne ($|B-E| = |B-P| - |P-E|$).

Sprężanie

- Gaz sprężony w cylindrze II stopnia (E-F) jest wytłaczany (F-N) do chłodnicy międzystopniowej II stopnia.
- Następnie jest pobierany do cylindra III stopnia (N-H).
- Chłodzenie międzystopniowe (H-F) może być traktowane jako izobaryczne chłodzenie wewnętrzne ($|H-F| = |F-N| - |N-H|$).

Sprężanie

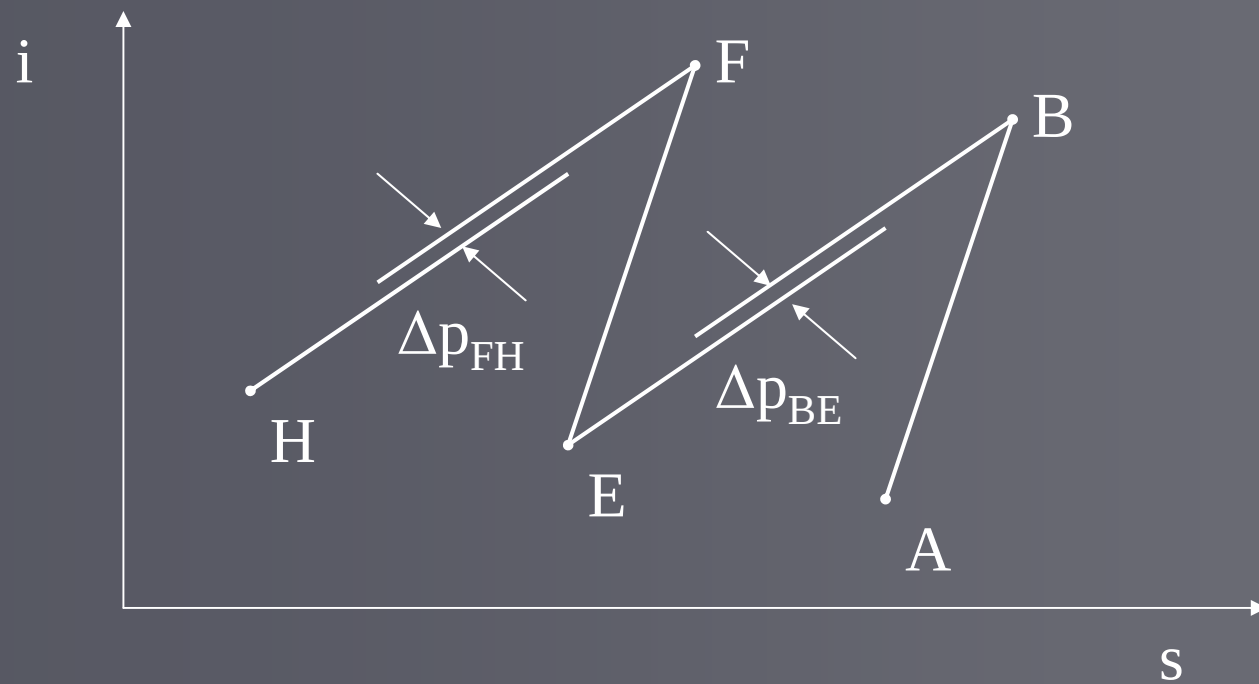
Z porównania zmniejszenia pracy pobieranej przez sprężarkę przy jednokrotnym i dwukrotnym chłodzeniu międzystopniowym wynika, że kolejne chłodzenia międzystopniowe dają coraz mniejsze oszczędności pracy pobieranej przez sprężarkę.

Sprężanie

Zastosowanie kolejnych stopni i chłodzenia międzystopniowego daje następujące oszczędności po uwzględnieniu strat przepływu w chłodnicy międzystopniowej:

- sprężarka dwustopniowa (pojedyncze chłodzenie międzystopniowe) 13,5 [%]
- sprężarka trzystopniowa (dwukrotne chłodzenie międzystopniowe) 13,5 [%] + 4,4 [%]
- sprężarka czterostopniowa (trzykrotne chłodzenie międzystopniowe 13,5 [%] + 4,4 [%] + 1,1 [%]

Sprężanie



Sprężanie

Jakość pracy sprężarki i chłodzenia międzystopniowego wyraża sprawność izotermiczna sprężarki η_{iz}

$$\eta_{iz} = \frac{l_{iz}}{l_t}$$

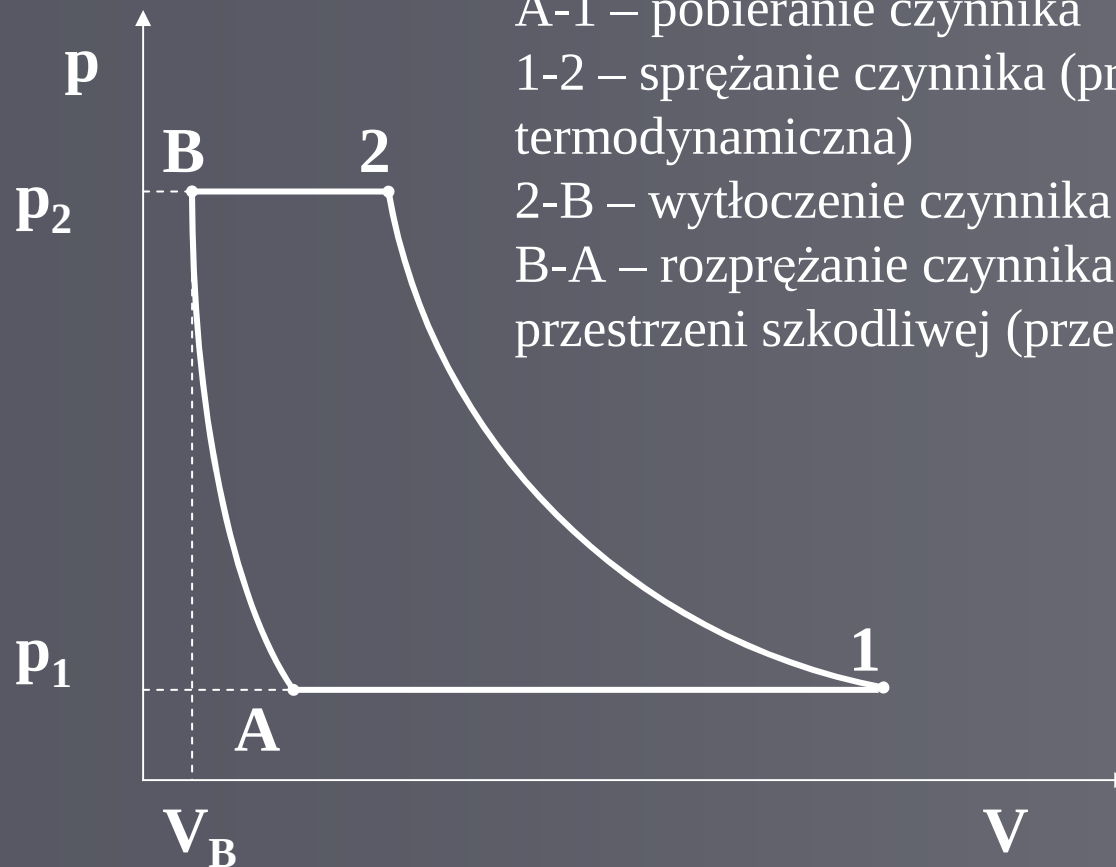
Sprężanie

- Praca sprężarki rzeczywistej różni się od pracy sprężarki idealnej.
- Najważniejszą różnicą jest niepełne wykorzystanie objętości cylindra. Między denkiem tłoka, a głowicą ze względów konstrukcyjnych występuje szczelina w GZP.
- Objętość cylindra W GZP nazywana jest przestrzenią szkodliwą

Sprężanie

- Gaz sprężony w przestrzeni szkodliwej nie może być wytłoczony do części tłocznej.
- Strata związana z przestrzenią szkodliwa nazywana jest stratą objętościową

Sprężanie



A-1 – pobieranie czynnika

1-2 – sprężanie czynnika (przemiana termodynamiczna)

2-B – wytłoczenie czynnika

B-A – rozprężanie czynnika znajdującego się w przestrzeni szkodliwej (przemiana termodynamiczna)

Sprężanie

Objętość skokowa V_c jest to różnica objętości w DZP (V_1) i GZP (V_B)

$$V_c = V_1 - V_B$$

Sprężanie

Wpływ przestrzeni szkodliwej na pracę sprężarki określa współczynnik zasysania λ .

Współczynnik zasysania jest stosunkiem objętości gazu zassanego do cylindra do objętości skokowej sprężarki

$$\lambda = \frac{V_1 - V_A}{V_c}$$

Sprężanie

Stosunek objętości skokowej cylindra do objętości przestrzeni szkodliwej nazywamy względną objętością szkodliwą (stopniem sprężania) ε

$$\varepsilon = \frac{V_B}{V_C}$$

Sprężanie

Stosunek ciśnienia tłoczenia do ciśnienia ssania nazywamy sprężem Π

$$\Pi = \frac{p_2}{p_1}$$

Sprężanie

- Dla sprężarek stopień sprężania i spręż są wielkościami ze sobą nie związanymi.
- Stopień sprężania jest parametrem konstrukcyjnym sprężarki, a spręż jest parametrem eksploatacyjnym sprężarki.

Sprężanie

Rozprężanie gazu znajdujące go się w przestrzeni szkodliwej jest rozprężaniem politropowym

$$p_2 \cdot V_B^m = p_1 \cdot V_A^m$$

$$\frac{V_A}{V_B} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{m}} = \pi^{\frac{1}{m}}$$

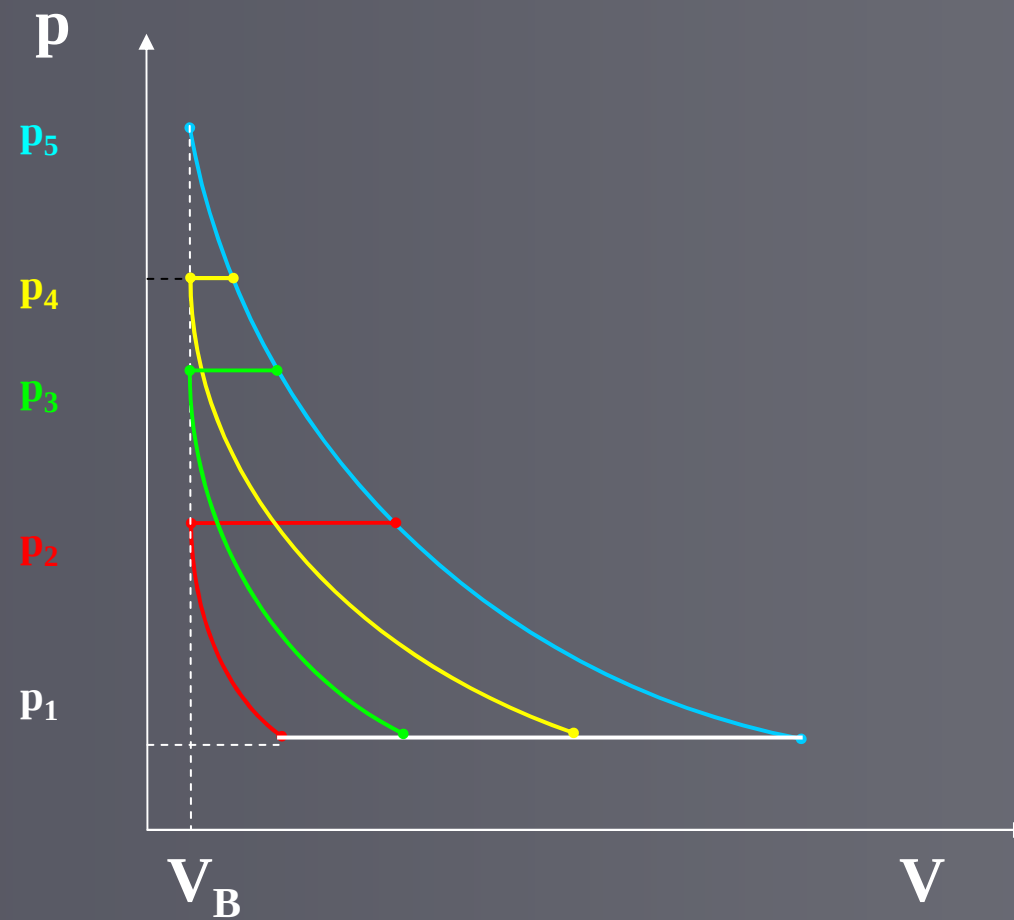
Sprężanie

$$\lambda = \frac{V_1 - V_A}{V_c} = \frac{V_B + V_c - V_A}{V_c} = 1 + \frac{V_B}{V_c} - \frac{V_A}{V_c}$$

$$\lambda = 1 + \varepsilon_0 - \frac{V_A}{V_B} \cdot \frac{V_B}{V_c} = 1 + \varepsilon_0 - \pi^{\frac{1}{m}} \cdot \varepsilon_0$$

$$\lambda = 1 - \varepsilon_0 \cdot \left(\pi^{\frac{1}{m}} - 1 \right)$$

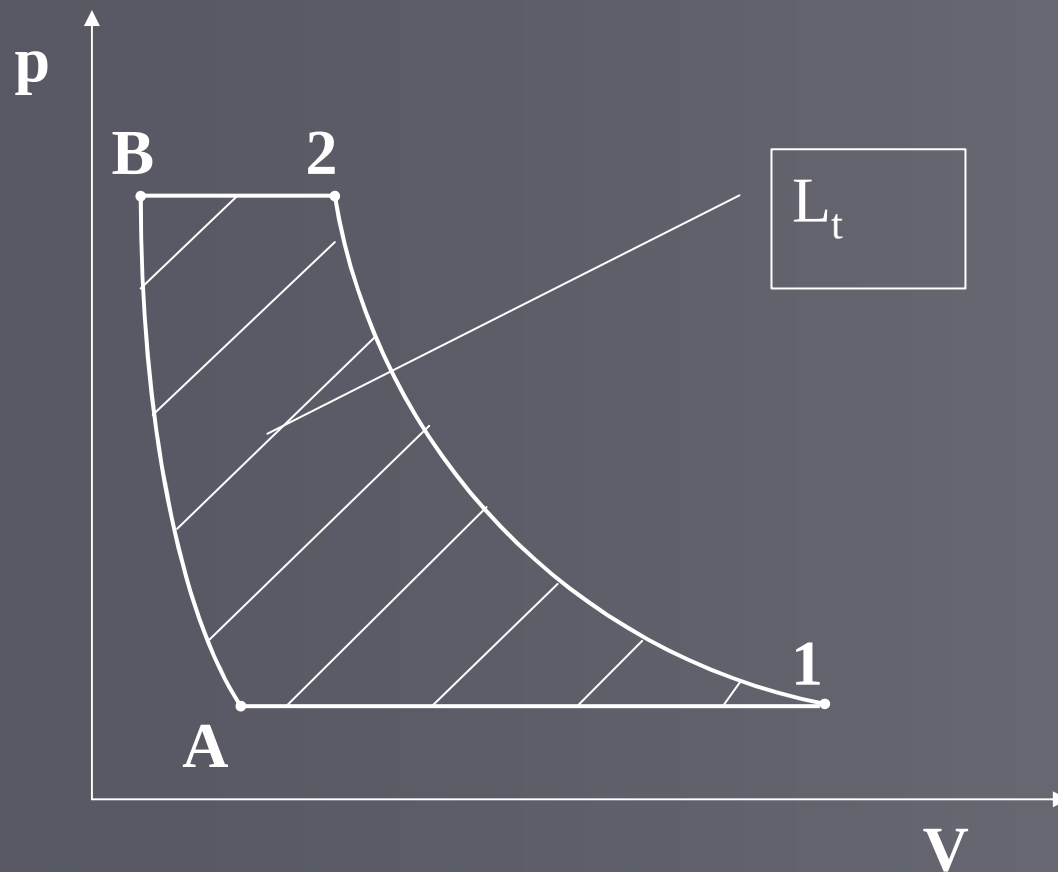
Sprężanie



Sprężanie

Ze względu na małą wartość współczynnika zasysania dla dużych stosunków ciśnień, przy którym pracuje sprężarka wartość sprężu na jeden stopień jest ograniczona do $\Pi < 10$

Sprężanie



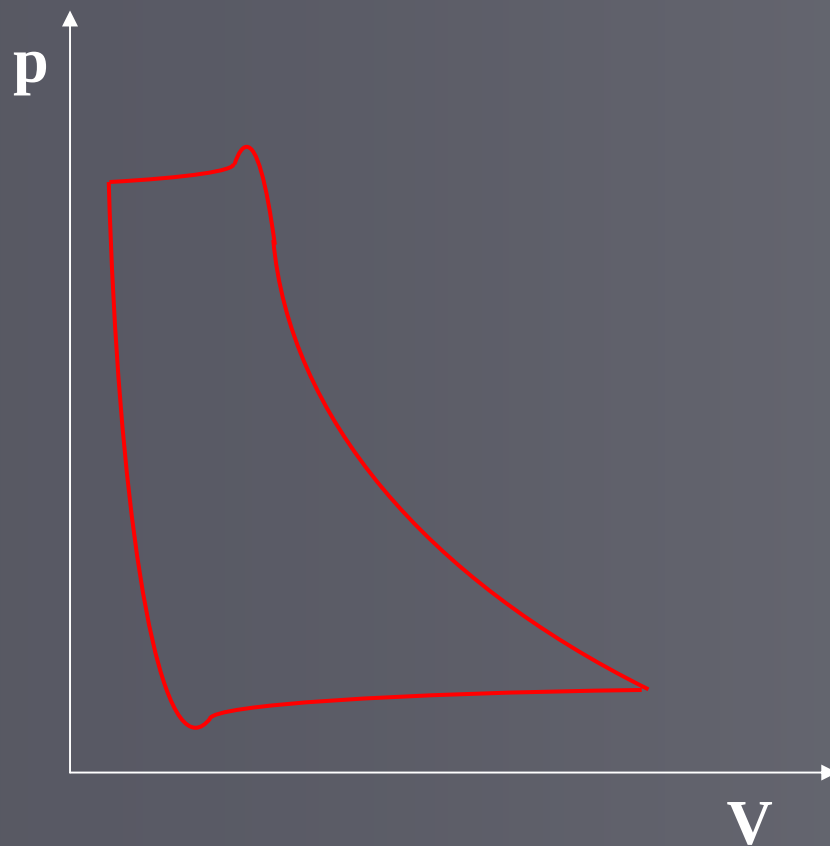
Sprężanie

- Straty objętościowe nie zmieniają sprawności energetycznej.
- Pogarszają jedynie wykorzystanie objętości cylindra

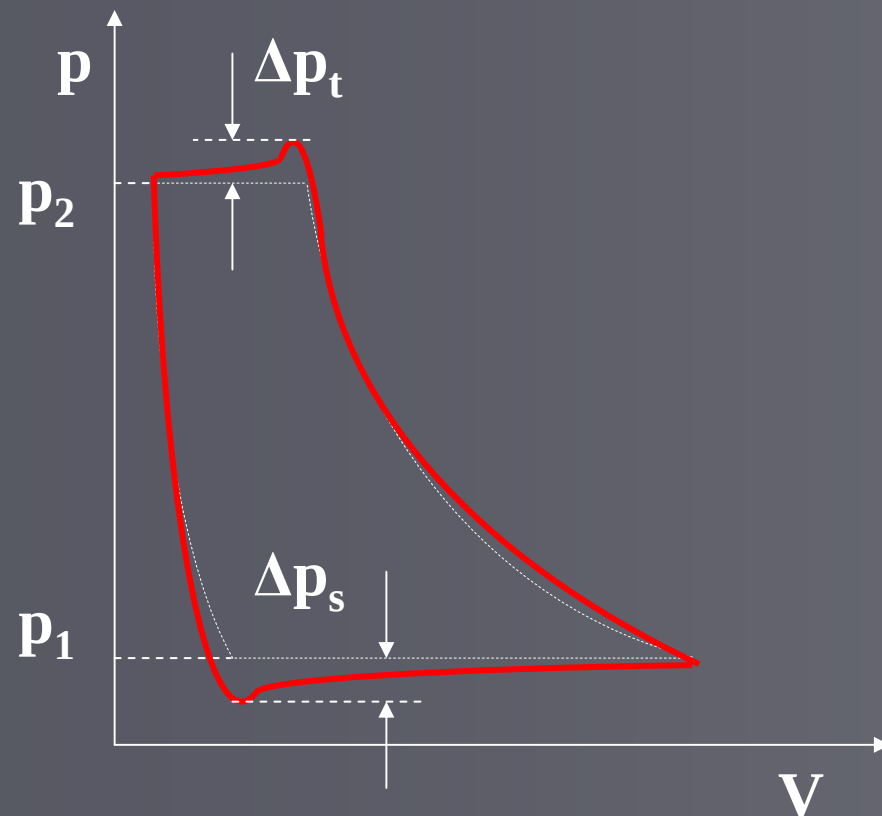
Sprężanie

- Indykator jest to urządzenie mierzące zmianę ciśnienia w przestrzeni roboczej maszyny wyporowej w funkcji położenia organu roboczego maszyny.
- Przebieg zmian ciśnienia w funkcji ruchu tłoka sprężarki tłokowej otrzymany przy pomocy indykatora przedstawiany jest w postaci wykresu indykatorowego.

Sprężanie



Sprężanie



Sprężanie

Wykres indykatorowy służy do diagnozowania sprężarki bez konieczności jej demontażu.

Sprężanie

- Pole wykresu indykatorowego reprezentuje pracę nazywaną pracą indykowaną L_i .
- Średnie ciśnienie indykowane p_i jest to stałe ciśnienie, jakie działałoby na tłok dla pełnego suwu tłoka przy wykonywaniu pracy indykowanej.

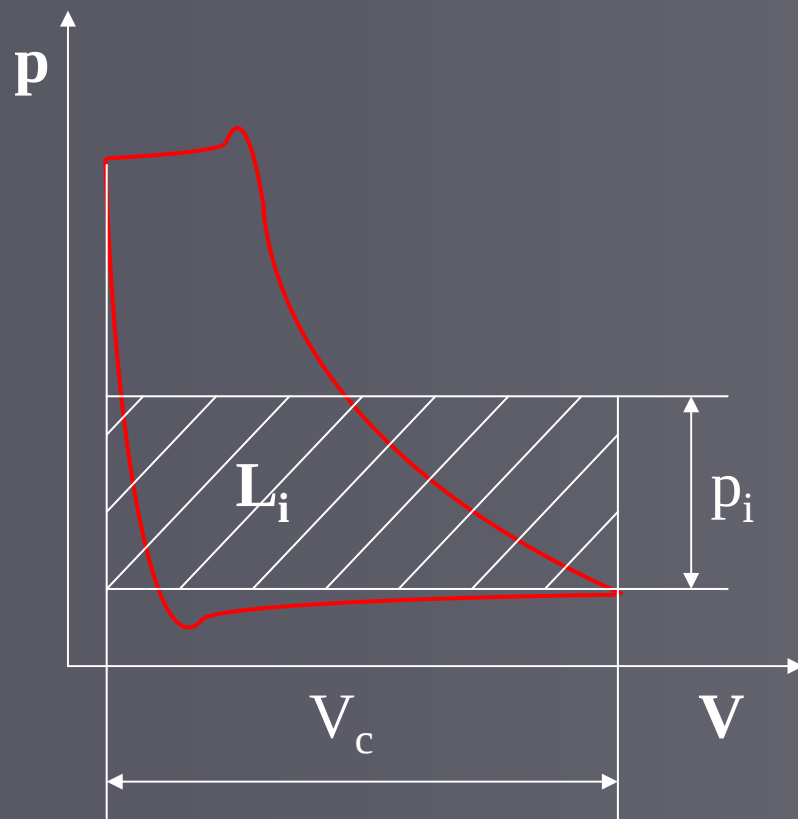
$$p_i = \frac{L_i}{V_c}$$

Sprężanie

Sprawność indykowaną η_i jest to stosunek pracy teoretycznej do pracy indykowanej

$$\eta_i = \frac{L_t}{L_i}$$

Sprężanie



Sprężanie

- Praca indykowana jest to praca wprowadzona do gazu przy zmianie ciśnienia gazu.
- Sprawność indykowana uwzględnia straty ciepłno-przepływowe związane ze sprężaniem gazu.
- Sprawność indykowana nie strat mechanicznych powstających w sprężarce.

Sprężanie

Sprawność mechaniczna sprężarki η_m określa stosunek pracy (mocy) indykowanej na wale sprężarki do prac (mocy) mechanicznej

$$\eta_m = \frac{L_i}{L_m} = \frac{N_i}{N_m}$$

Sprężanie

Sprawność użyteczna η_u jest iloczynem sprawności mechanicznej i indykowanej

$$\eta_u = \eta_m \cdot \eta_i$$

Sprężanie

Pracę teoretyczną sprężarki określamy jako pracę sprężania politropowego dla znanego wykładnika politropy m

$$L_t = \frac{m}{m-1} \cdot p_1 \cdot V_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

Sprężanie

- Znając parametry początkowe i końcowe sprężania (p, V) można wyznaczyć wykładnik politropy sprężania

$$m = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg V_1 - \lg V_2}$$

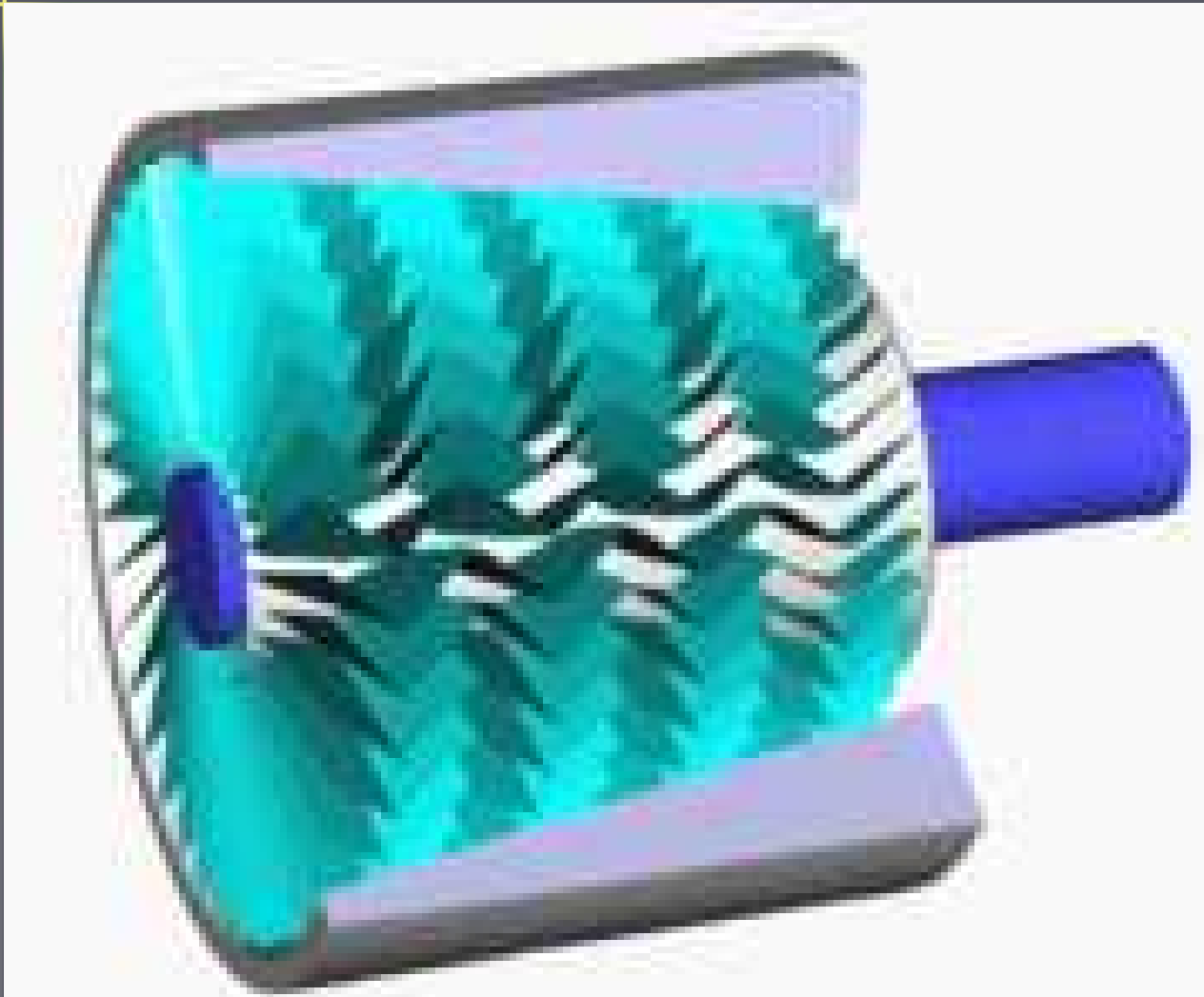
Sprężanie

- W sprężarkach przepływowych proces sprężania związany jest z ruchem wirowym czynnika przepływającego przez obracający się wirnik.
- Przepływ czynnika przez wirnik określają trzy wektory prędkości tworzących trójkąt prędkości:
 - prędkość względna w
 - prędkość bezwzględna c
 - prędkość unoszenia u

w13

Sprężanie

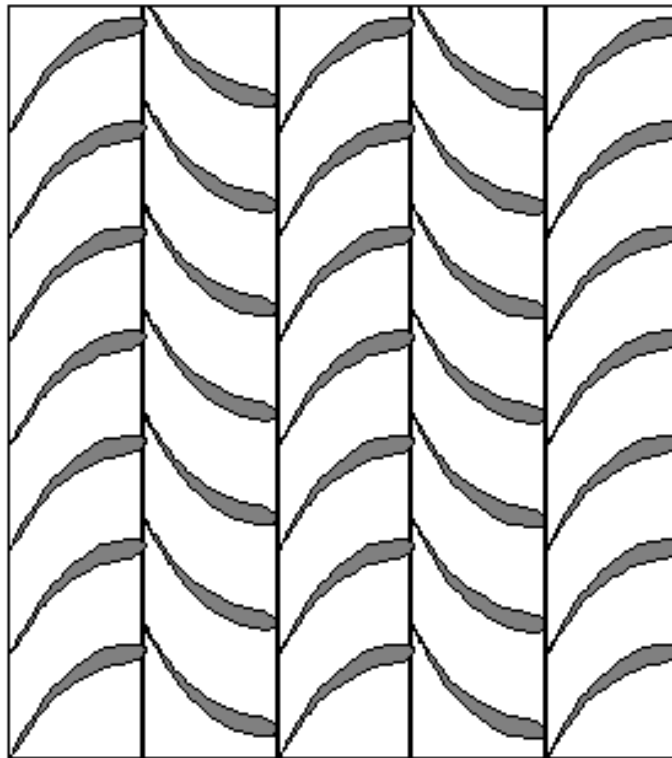
Termodynamika techniczna



Sprężanie

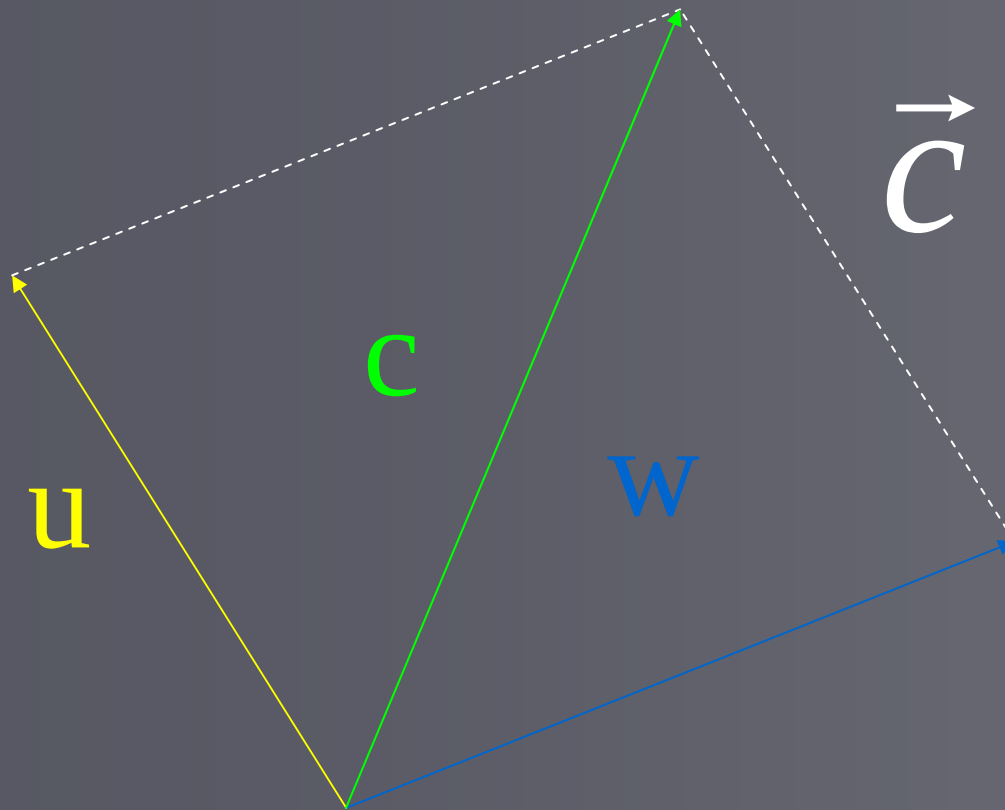
SW Halpern

Reaction Turbine Operation



Steam Flow

Sprężanie



$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w}$$

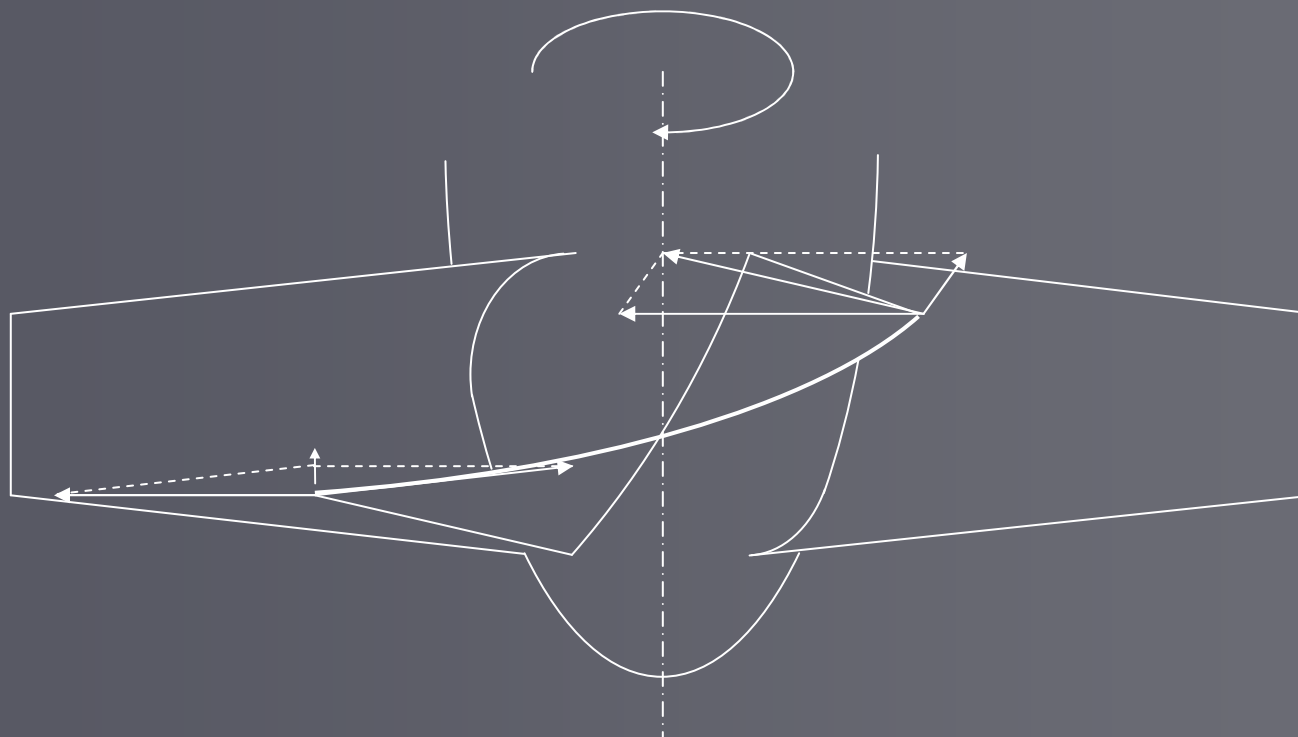
Sprężanie

- Prędkość względna jest prędkością czynnika określaną względem łopatki wirnika i jest styczna do powierzchni łopatki.
- Prędkość unoszenia jest prędkością liniową wirnika i jest prostopadła do promienia w danym miejscu wirnika.
- Prędkość bezwzględna jest prędkością czynnika określaną względem „nieruchomego” otoczenia (korpusu)

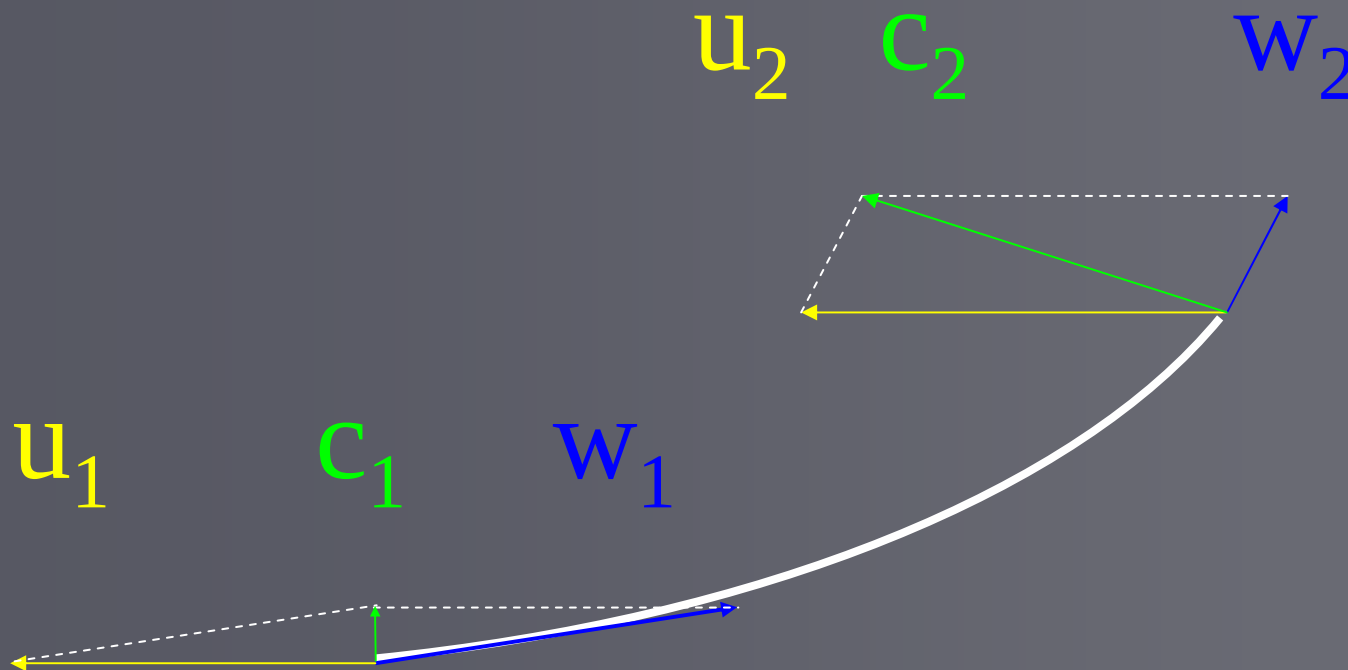
w13

Sprężanie

Termodynamika techniczna



Sprężanie



Sprężanie

- Podczas przepływu przez obracający się wirnik prędkość czynnika zmienia się:
 - prędkość bezwzględna c czynnika rośnie ($c_2 > c_1$)
 - prędkość względna czynnika maleje ($w_1 > w_2$).
- Wzrost prędkości bezwzględnej oznacza przyrost energii kinetycznej czynnika.
- Spadek prędkości względnej jako prędkości lokalnej zmienia lokalnie ciśnienie czynnika, czyli oznacza wzrost ciśnienia czynnika

Sprężanie

Równanie Eulera opisuje zmianę energii jednostkowej czynnika przepływającego go przez obracający się wirnik

$$e = c_{u1} \bullet u_1 - c_{u2} \bullet u_2$$

Sprężanie

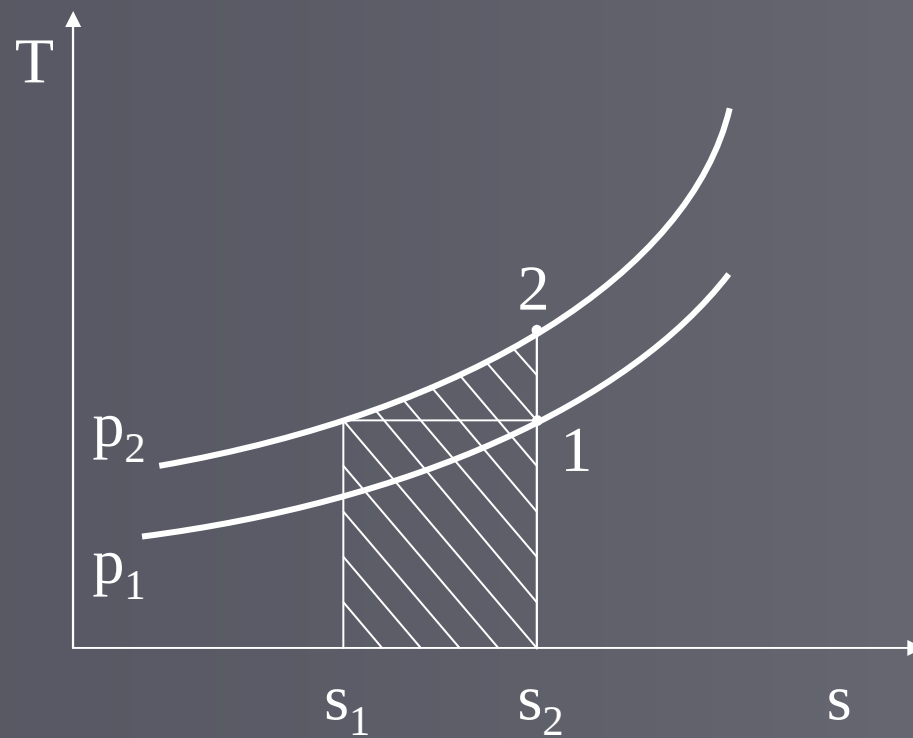
- Za obracającym się wirnikiem znajdują się nieruchome łopatki nazywane kierownicą.
- Dla nieruchomej kierownicy
$$u_k = 0 \quad w_k = c_k.$$
- Na kierownicy spadek lokalnej prędkości (prędkość względna jest równa prędkości bezwzględnej) oznacza wzrost ciśnienia czynnika

Sprężanie

- W wyniku przepływu czynnika przez układ ruchomy wirnik – nieruchoma kierownica następuje wzrost energii ciśnienia czynnika.
- Praca sprężania czynnika w sprężarce przepływowej od ciśnienia p_1 do ciśnienia p_2 równa jest pracy technicznej przemiany izentropowej

$$l_t = i_2 - i_1$$

Sprężanie



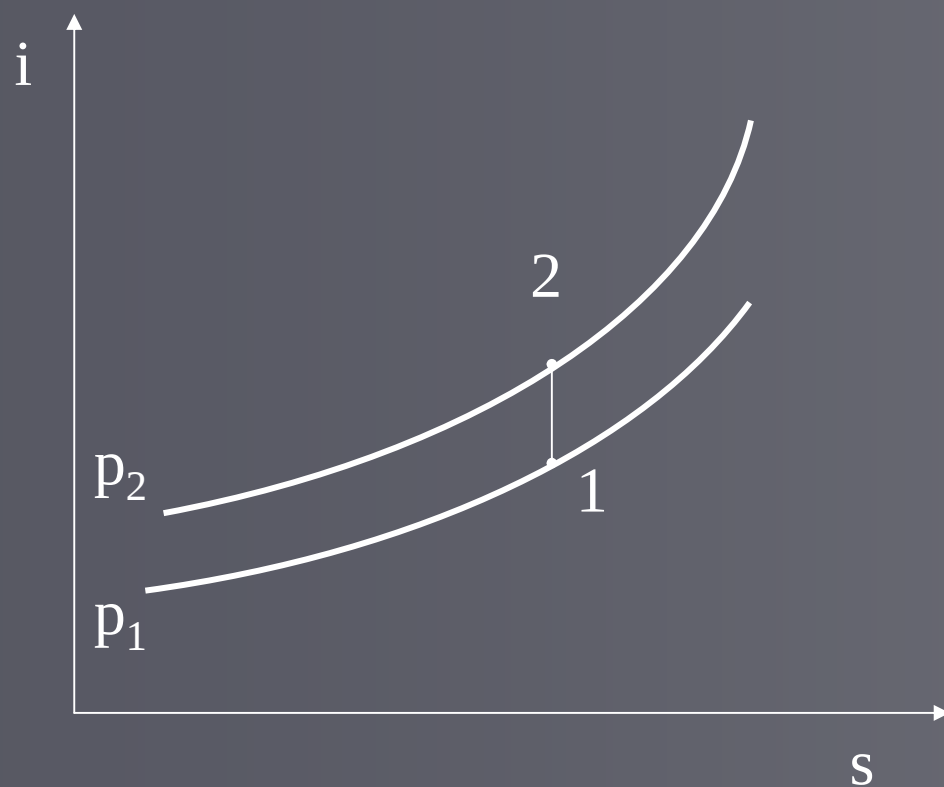
Sprężanie

$$q_{1,2} = T \bullet \Delta s_{1,2} = \text{pole}(\text{wykres } T - s)$$

$$q_{1,2} = c_p \bullet \Delta i_{1,2} = c_p \bullet (i_2 - i_1)$$

$$i_2 - i_1 = \frac{1}{c_p} \bullet \text{pole}(\text{wykres } T - s)$$

Sprężanie



Sprężanie

Termodynamika techniczna

$$l_t = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]$$

$$l_t = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left(\Pi^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right)$$

Sprężanie

- W rzeczywistej sprężarce przepływowej zachodzą straty.
- Praca sprężania czynnika w sprężarce rzeczywistej od ciśnienia p_1 do ciśnienia p_2 równa jest zmianie entalpii gazu od wartości i_1 do wartości i_{2r}

$$l_i = i_{2r} - i_1$$

$$i_{2r} > i_2 \Rightarrow l_i > l_t$$

Sprężanie

Sprężanie rzeczywiste jest nieodwracalna adiabatą i może być opisywane jako nieodwracalna politropa o wykładniku $m > \kappa$

$$p_1 \cdot v_1^m = p_2 \cdot v_{2r}^m \quad \frac{T_{2r}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \quad \frac{T_{2r}}{T_1} = \Pi^{\frac{m-1}{m}}$$

Sprężanie

$$\begin{aligned} i_{2r} - i_1 &= c_p \cdot (T_{2r} - T_1) = c_p \cdot T_1 \cdot \left(\frac{T_{2r}}{T_1} - 1 \right) = \\ &= \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(\frac{T_{2r}}{T_1} - 1 \right) \\ i_{2r} - i_1 &= \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left(\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \end{aligned}$$

Sprężanie

Stosunek pracy teoretycznej l_t do pracy sprężania rzeczywistego l_i nazywamy sprawnością adiabatyczną η_{ad}

$$\eta_{ad} = \frac{l_t}{l_i} = \frac{i_2 - i_1}{i_{2r} - i_1}$$

Sprężanie

Termodynamika techniczna

$$\eta_{ad} = \frac{\frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]}{\frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[\Pi^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]}$$

$$\eta_{ad} = \frac{\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\Pi^{\frac{m-1}{m}} - 1}$$

Sprężanie

Jeżeli sprężanie teoretyczne potraktujemy jako przemianę politropową, a nie izentropową, to praca teoretyczna wyniesie

$$l_{tp} = \frac{m}{m-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left(\Pi^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right)$$

Sprężanie

Sprawność politropowa η_{pol} jest stosunkiem teoretycznej pracy sprężania politropowego do pracy sprężania rzeczywistego

$$\eta_{pol} = \frac{l_{tp}}{l_i}$$

Sprężanie

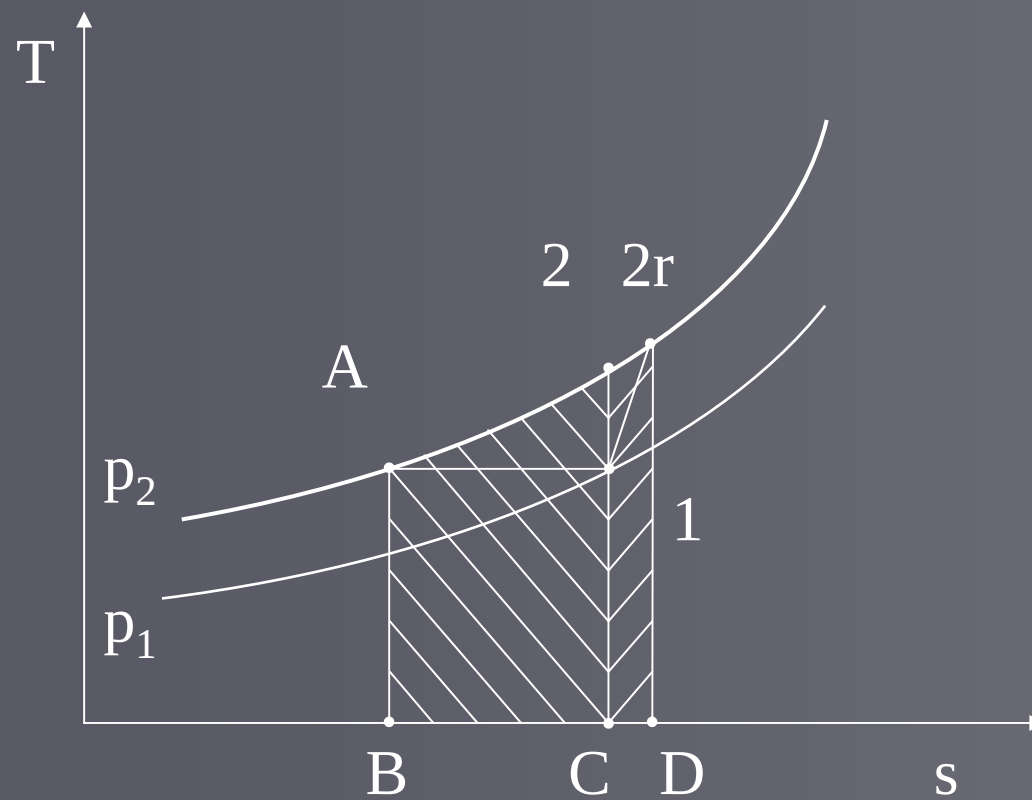
$$\eta_{pol} = \frac{\frac{m}{m-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left(\Pi^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right)}{\frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left(\Pi^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right)}$$

$$\eta_{pol} = \frac{m}{m-1} \cdot \frac{\kappa-1}{\kappa}$$

Sprężanie

- Sprawność adiabatyczna zależy od wartości sprężu Π i wykładnika politropy m .
- Sprawność politropowa zależy tylko od wartości wykładnika politropy m .

Sprężanie



Sprężanie

Praca rzeczywistego sprężania równa jest sumie:

- pracy sprężania teoretycznego izentropowego przedstawionej polem B-A-2-C-B
- nieodwracalnym stratom przedstawionym polem C-2-2r-D-C.

Sprężanie

Praca teoretycznego sprężania politropowego równa jest różnicy:

- pracy sprężania rzeczywistego przedstawionej polem C-2-2r-D-C
- ciepła odprowadzonego w odwracalnej przemianie politropowej przedstawionego polem C-1-2r-D-C.

$$l_{tp} = i_{2r} - i_1 - q_{1,2r}$$

Sprężanie

Termodynamika techniczna

$$\eta_{ad} = \frac{poleB - A - 2 - C - B}{poleB - A - 2r - D - B}$$

$$\eta_{pol} = \frac{poleB - A - 2r - 1 - C - B}{poleB - A - 2r - D - B}$$

Sprężanie

$$\eta_{pol} > \eta_{ad}$$

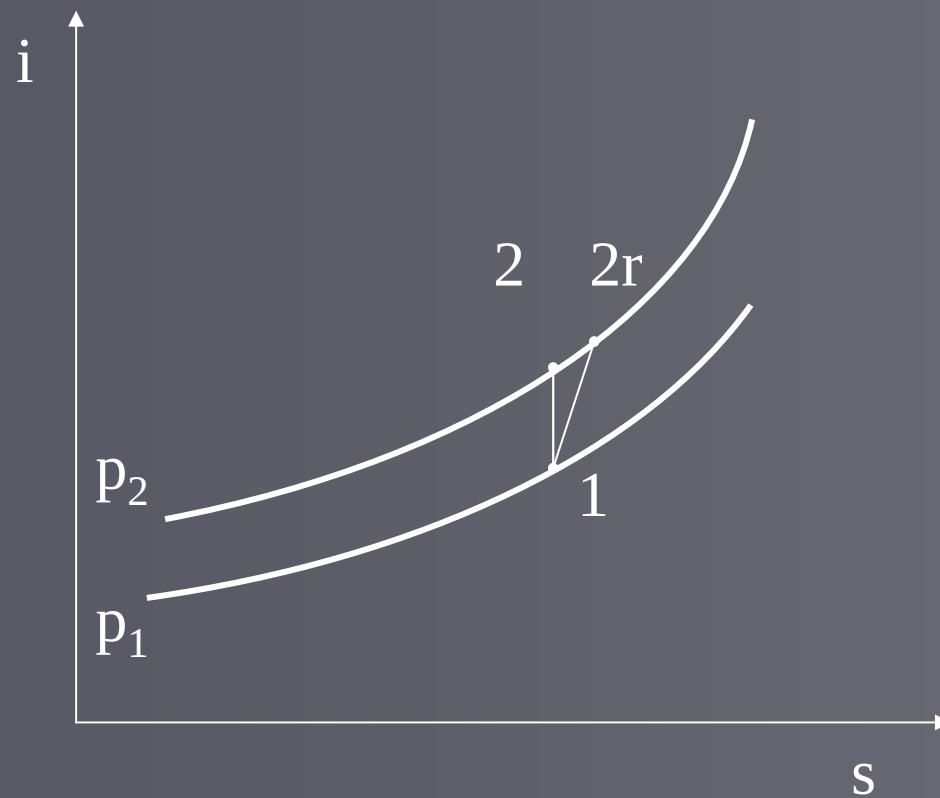
Różnica między sprawnością politropową, a sprawnością adiabatyczną maleje wraz ze spadkiem sprężu

$$\lim_{\Pi \rightarrow 1} \eta_{ad} = \eta_{pol}$$

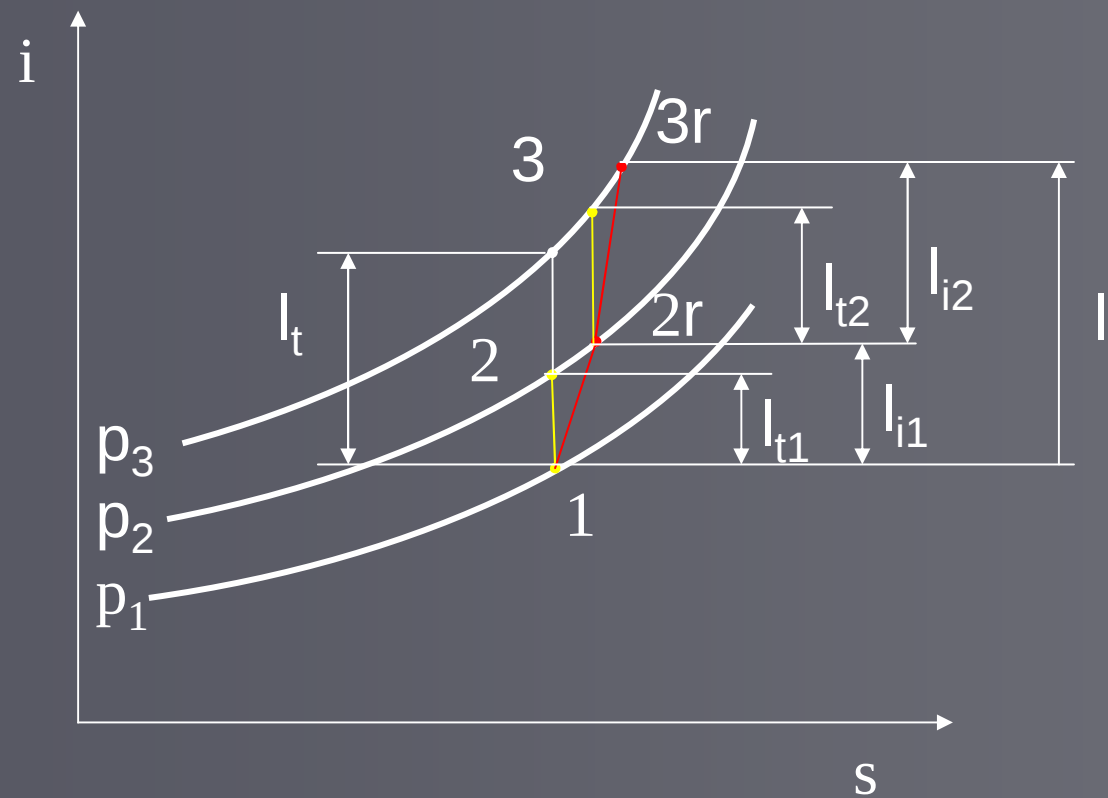
Sprężanie

- Sprawność politropowa może być uważana za równą sprawności adiabatycznej przy małym sprężu.
- Sprawność politropowa jest sprawnością pojedynczego stopnia sprężarki przepływowej.

Spreężanie



Sprężanie



Sprężanie

$$\eta_{ad} = \frac{l_t}{l_i}$$

$$\eta_{ad1} \approx \eta_{pol} = \frac{l_{t1}}{l_{i1}} = \frac{l_{t2}}{l_{i2}}$$

$$l_i = l_{i1} + l_{i2} + \dots \quad l_i = n \bullet l_{i1}$$

$$l_t < l_{t1} + l_{t2} + \dots \quad l_t = n \bullet l_{t1}$$

Sprężanie

- Dla maszyn przepływowych niemożliwe jest określenie pracy indykowanej i sprawności indykowanej.
- Sprawność wewnętrzną η_i sprężarki przepływowej jest stosunkiem pracy (mocy) teoretycznej do pracy (mocy) rzeczywistej doprowadzonej do wirnika sprężarki
- Sprawność adiabatyczną równa jest sprawności wewnętrznej.
- Analogicznie, jak dla sprężarek wyporowych wprowadza się pojęcie sprawności mechanicznej i użytecznej