



**Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych**

MASZYNY i URZĄDZENIA ENERGETYCZNE

**Temat ćwiczenia:
Współpraca maszyn przepływowych**

**Pomocnicze materiały dydaktyczne
Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego**

Opracował:

Dr hab. inż. Tadeusz Pająk, prof. AGH
Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Kraków, marzec 2023

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest doświadczalne wyznaczenie podstawowych charakterystyk współpracujących maszyn przepływowych, co zostanie dokonane na podstawie badań układu dwóch konstrukcyjnie bliźniaczych wentylatorów promieniowych współpracujących szeregowo i równoległe wraz z porównaniem otrzymanych charakterystyk z krzywymi wyznaczonymi na drodze teoretycznej.

PODSTAWOWE WZORY OBLICZENIOWE

1. Pomiar wydajności wentylatora

Pomiar strumienia objętości powietrza przepływającego przez badany wentylator lub współpracujące wentylatory zostanie dokonany w oparciu o kryzę ISA o średnicy wewnętrznej $d_t = 75 \text{ mm}$, zamontowanej w rurociągu tłocznym o średnicy $D_t = 100 \text{ mm}$. Pomiar strumienia objętości przeprowadzono w oparciu o normę PN – 93/M – 53950/01.

Warunki otoczenia: $p_b = \dots\dots\dots \text{ Pa}$ $t_o = \dots\dots\dots \text{ }^\circ\text{C}$ $\phi = \dots\dots\dots [-]$

$$\Delta p_{\text{śr}} = \rho_m g \Delta h_{\text{śr}}$$

$$\Delta h_{\text{śr}} = 1/n (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_n)$$

$$p_{1\text{śr}} = p_b + \rho_m g h_{1\text{śr}}$$

$$h_{1\text{śr}} = 1/n (h_1 + h_2 + h_n)$$

uwaga:

- wartości; $\Delta p_{\text{śr}}$ oraz $h_{1\text{śr}}$ należy obliczyć tylko dla celów wyznaczenia ε_1 oraz $\rho_{1\text{śr}}$ gdzie:

$\Delta p_{\text{śr}}$ – średni spadek ciśnienia na zwężce

$p_{1\text{śr}}$ – średnie ciśnienie w rurociągu tłocznym

n - ilość punktów pomiarowych w trakcie wyznaczania charakterystyki wentylatora

2. Gęstość powietrza

Dla uproszczenia pomiaru, zakładając bardzo niewielki błąd przybliżenia, wyznaczona zostanie średnia wartość gęstości powietrza w przedziale parametrów badanego wentylatora. Ogólny wzór na obliczenie $\rho_{1\text{śr}}$ wygląda następująco, (*nie będzie on jednak zastosowany gdyż bez obliczeń zostanie przyjęta wartość $\rho_{1\text{śr}}$*)

$$\rho_{1\text{śr}} = \rho_n \cdot \frac{(p_{1\text{śr}} - \phi p_p) \cdot T_n}{p_n \cdot T_{1\text{śr}}} + \phi \rho_p \quad [\text{kg/m}^3]$$

gdzie:

p_n – 10⁵ Pa

T_n – 273 K

ρ_n – 1,276 kg/m³

ρ_m – 1000 kg/m³

g – 9,81 m/s²

$p_{1ś}$	–	średnia wartość ciśnienia w miejscu pomiaru
$T_{1śr}$	–	średnia temperatura powietrza w rurociągu
ρ''	–	gęstość nasyconej pary wodnej (z tablic dla $t_{1śr}$)
p''	–	ciśnienie nasyconej pary wodnej (z tablic dla $t_{1śr}$)
φ	–	wilgotność względna powietrza, odczytana z przyrządu pomiarowego

$$p_{1śr} = p_b + \rho_m g h_{1śr}$$

$$h_{1śr} = 1/n [h_1 + h_2 + \dots + h_n]$$

$$T_{1śr} = 273,15 + t_{1śr}$$

$$t_{1śr} = 1/n [t_{11} + t_{12} + \dots + t_{1n}]$$

3. Spadek ciśnienia na zwężce

$$\Delta p = \rho_m g \Delta h$$

4. Spiętrzenie całkowite

$$\Delta p_c = p_{ct} - p_{cs}$$

$$\Delta p_c = (p_{st} + p_{dt}) - (p_{ss} + p_{ds})$$

$$\Delta p_c = (p_{st} - p_{ss}) + (p_{dt} - p_{ds})$$

$$\Delta p_c = \Delta p_{st} + \Delta p_{dyn}$$

$$\Delta p_{st} = (p_b + p_{nt}) - (p_b - p_{ps}) = p_{nt} + p_{ps}$$

$$\Delta p_{dyn} = \rho/2 (c_t^2 + c_s^2) = 0 \quad \text{gdyż } c_s = c_t \text{ ponieważ } D_s = D_t$$

indeksy:

c – ciśnienie całkowite

s – ssanie

t – tłoczenie

st – ciśnienie statyczne

dyn – ciśnienie dynamiczne

ostatecznie spiętrzenie wentylatora lub współpracujących wentylatorów wynosi:

$$\Delta p_c = p_{nt} + p_{ps} = \rho_m g (h_t + h_s)$$

5. Moc użyteczna (efektywna)

$$N_u = \Delta p_c V \quad [W] \text{ jeżeli } \Delta p_c [Pa] \text{ i } V [m^3/s]$$

6. Zestawienie wyników pomiarów wentylatora pracującego pojedynczo

Należy przedstawić tabelarycznie wyniki wentylatora pracującego pojedynczo, które otrzymano podczas badań w ramach ćwiczenia wstępnego. W przypadku braku tych wyników należy raz jeszcze przeprowadzić badania pojedynczo pracującego wentylatora.

7. Zestawienie wyników obliczeń wentylatora pracującego pojedynczo

Należy przedstawić w poniższej tabeli wyniki obliczeń podstawowych wielkości dla wentylatora pracującego pojedynczo, które otrzymano podczas badań w ramach wcześniejszych ćwiczeń laboratoryjnych. W przypadku braku tych wyników należy raz jeszcze je obliczyć na podstawie wcześniej wykonanych badań.

Lp.	Wyznaczony parametr	Ozn.	Jedn.	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Gęstość powietrza (średnia)	ρ_{1sr}	kg/m ³	1,2							
2.	Wydajność wentylatora	V	m ³ /s								
3.	Spiętrzenie całkowite	Δp_c	Pa								
4.	Moc efektywna	N _e	W								

8. Schemat stanowiska pomiarowego wentylatora pracującego pojedynczo

według ćwiczenia wstępnego

Poniższy skrypt uzupełniają:

- ⇒ ćwiczenie wstępne;
- ⇒ wzór sprawozdania dla ćwiczenia: Współpraca maszyn przepływowych;
- ⇒ graficzna ilustracja efektu przyrostu wydajności w funkcji przyrostu ciśnienia dla równoległego połączenia wirnikowych maszyn przepływowych na przykładzie pomp o jednakowych i zróżnicowanych charakterystykach;
- ⇒ wykaz zagadnień do zaliczenia przed ćwiczeniem - współpraca maszyn przepływowych.

⇒ ćwiczenie wstępne;

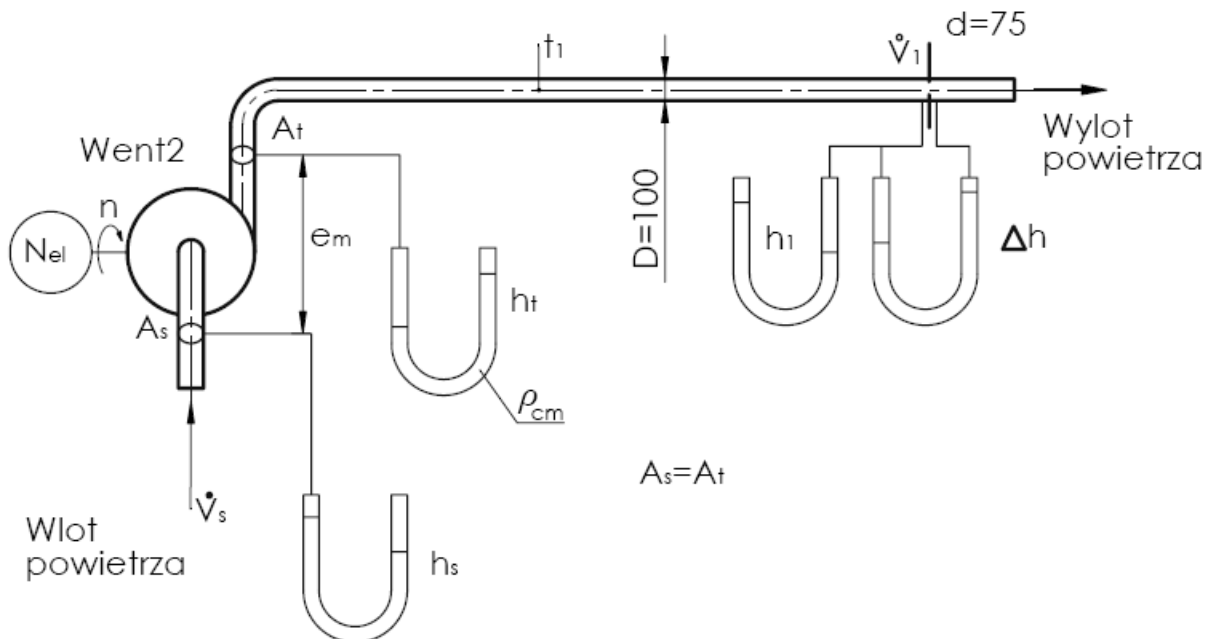
BADANIE STOPNIA PROMIENIOWEGO

(jako wstęp do ćwiczenia: „Współpraca maszyn przepływowych”)

Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest doświadczalne wyznaczenie podstawowej charakterystyki stopnia wentylatora promieniowego o bliźniaczej konstrukcji w stosunku do drugiego, aby w efekcie wniosków wynikających z ćwiczenia „Współpraca maszyn przepływowych” dokonać właściwej oceny otrzymanych wyników badań.

1. Schemat stanowiska pomiarowego



Narysować wg schematu dostępnego pod adresem:

https://kseiuos.imir.agh.edu.pl/home/wimir/kseiuos/Dla_studentow/Maszyny_Przeplywowe/Maszyny_przeplywowe_charakterystyka_went_prom.pdf

(należy otworzyć plik pn. *Wyznaczanie charakterystyki wentylatora promieniowego*, gdzie na str. 2 jest podany schemat stanowiska pomiarowego)

2. Wielkości wyjściowe

Pomiar wydajności wentylatora:

- ⇒ przepływowa kryza ISA z pomiarem przytarczowym
- ⇒ średnica kryzy: $d = 75$ mm
- ⇒ średnica rurociągu ssawnego i tłocznego: $D = 100$ mm
- ⇒ przewężenie: $\beta = d/D = 0,75$
- ⇒ liczba przepływu: $C = 0,6061$ (odczytane z PN 93/M - 53950/01)
- ⇒ liczba ekspansji $\epsilon = 0,998$ (odczytane z PN 93/M - 53950/01)
- ⇒ stała kryzy: $K = \dots\dots\dots K = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times \sqrt{2}$

$$\epsilon \sqrt{9,81} \sqrt{\frac{1}{\rho_1}} \times 3600 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Parametry otoczenia:

- ciśnienie barometryczne $p_b =$
- temperatura otoczenia $t_o =$
- wilgotność względna powietrza $\varphi =$

Dla powyższych parametrów powietrza przyjęto dla uproszczenia typową wartość gęstości powietrza wilgotnego równą $\rho_1 = 1,2 \text{ kg/m}^3$. Będzie ona stała dla wszystkich punktów pomiarowych.

3. Tabela wielkości zmierzonych

Lp.	Wielkość zmierzona	Ozn.	Jedn.	Pomiar									
				1	2	3	4	5	6	7	8		
1.	Podciśnienie ssania	h_s	mmH ₂ O										
2.	Nadciśnienie tłoczenia	h_t	mmH ₂ O										
3.	Spadek ciśnienia na kryzie	Δh	mmH ₂ O										
4.	Wskazania watomierza (x 3 x 5)	N_s	W ilość działek										

4. Wzory obliczeniowe

- wydajność wentylatora:

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \times \frac{\pi d^2}{4} \times \varepsilon \sqrt{2} \times \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1}} = K \sqrt{\Delta h_{mm}} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

- gęstość powietrza wilgotnego

$$\rho_1 = \rho_n \cdot \frac{(p_1 - \varphi p_p) \cdot T_n}{p_n \cdot T_1} + \varphi \rho_p \quad [\text{kg/m}^3]$$

Gęstość została przyjęta, jako stała dla wszystkich punktów pomiarowych.

- przyrost ciśnienia całkowitego wytwarzanego przez wentylator:

$$\Delta p_c = \Delta p_{st} = (h_s + h_t) \rho_w g$$

$$\Delta p_c = \Delta p_s + \Delta p_d$$

$$\Delta p_d = \frac{c_t^2 - c_s^2}{2} \cdot \rho_1$$

$$c_t = c_s \Rightarrow \Delta p_d = 0$$

$$\Delta p_{st} = \Delta p_c$$

$$p_t = p_b + h_t \cdot \rho_w \cdot g$$

$$p_s = p_b - h_s \cdot \rho_w \cdot g$$

$$\Delta p_c = \Delta p_{st} = h_m \cdot \rho_c \cdot g + h_{sp} \cdot \rho_c \cdot g$$

c_t – prędkość powietrza w rurociągu tłocznym $[\frac{m}{s}]$

c_s – prędkość powietrza w rurociągu ssawnym $[\frac{m}{s}]$

- moc użyteczna:

$$N_u = \Delta p_c V_l \quad [W]$$

- moc na wale:

$$N_w = \eta_s N_s = \eta_s N_s \cdot 3 \cdot 5 \text{ [W] gdzie } \eta_s = 0,75$$

- sprawność całkowita:

$$\eta_c = N_u / N_w$$

5. Przebieg obliczeń

Podać przykładowe obliczenia dla jednego wybranego punktu pomiarowego

6. Tabela wielkości obliczonych

L.p.	Wielkości obliczone	Ozn.	Jedn.	Pomiar							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Gęstość powietrza	ρ_1	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1,2							
2.	Wydajność wentylatora	V_1	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$								
			$\left[\frac{m^3}{h}\right]$								
3.	Wydajność wentylatora dla warunków ssania	V_s	$\left[\frac{m^3}{h}\right]$								
4.	Ciśnienie całkowite wytwarzane przez wentylator	Δp_c	$[N/m^2]$								
5.	Moc użyteczna	N_u	[W]								
6.	Moc na wale	N_w	[W]								
7.	Sprawność	η_c	%								

7. Opracowanie graficzne – charakterystyki wentylatora

Przedstawić graficznie:

- ⇒ przebieg ciśnienia całkowitego w funkcji wydajności wentylatora,
- ⇒ przebieg sprawności całkowitej w funkcji wydajności wentylatora,
- ⇒ przebieg mocy użytecznej w funkcji wydajności wentylatora,

8. Podać wnioski końcowe

⇒ wzór sprawozdania dla ćwiczenia: Współpraca maszyn przepływowych;

ĆWICZENIE

WSPÓLPRACA MASZYN PRZEPIYWOWYCH

na przykładzie

SZEREGOWEJ I RÓWNOLEGŁEJ

WSPÓLPRACY WENTYLATORÓW PROMIENIOWYCH

Cel ćwiczenia;

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie charakterystyk szeregowego i równoległego współpracujących maszyn przepływowych na przykładzie badania układu pracy dwóch jednakowych wentylatorów promieniowych oraz porównanie otrzymanych charakterystyk z krzywymi otrzymanymi na drodze teoretycznej jak także poznanie idei i celowości szeregowego oraz równoległego łączenia promieniowych maszyn przepływowych.

1. Schemat stanowiska pomiarowego

- a.) schemat szeregowego układu pracy dwóch jednakowych wentylatorów
- b.) schemat równoległego układu pracy dwóch jednakowych wentylatorów

schematy zostaną podane na ćwiczeniu

2. Wielkości wyjściowe

Pomiar wydajności wentylatora:

- przepływowa kryza ISA z pomiarem przy tarczowym
- średnica kryzy: $d = 75$ [mm]
- średnica rurociągu ssawnego i tłocznego: $D = 100$ [mm]
- przewężenie: $\beta = 0,75$
- liczba przepływu: $C = 0,603$ (odczytane z PN 93/M - 53950/01)
- liczba ekspansji $\varepsilon = 0,996$ (odczytane z PN 93/M - 53950/01)
- stała kryzy: K

$$K = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{2} \cdot \varepsilon$$

Parametry otoczenia i gęstość powietrza:

- ciśnienie barometryczne $p_b =$
- temperatura otoczenia $t_o =$
- wilgotność względna powietrza $\varphi =$
- gęstość powietrza $\rho_{1 \text{ sr.}} =$

4. Wzory obliczeniowe

- wydajność wentylatorów:

$$V = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \times \frac{\pi d^2}{4} \times \sqrt{2} \times \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1}} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Uwaga: liczyć w oparciu o stałą K wyznaczoną na ćwicz. wstępnego

- gęstość powietrza wilgotnego (przyjąć wartość średnią z ćwiczenia wstępnego)

$$\rho_1 = \rho_n \cdot \frac{(p_1 - \varphi p_p) \cdot T_n}{p_n \cdot T_1} + \varphi \rho_p \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

- ciśnienie całkowite wytwarzane przez dany układ pracy wentylatorów

$$\Delta p_c = \Delta p_s + \Delta p_d$$

$$\Delta p_d = \frac{c_t^2 - c_s^2}{2} \cdot \rho_1$$

$$c_t = c_s \Rightarrow \Delta p_d = 0$$

$$\Delta p_{st} = \Delta p_c$$

[N/m²]

$$p_t = p_b + h_m \cdot \rho_c \cdot g$$

$$p_s = p_b - h_{sp} \cdot \rho_c \cdot g$$

$$\Delta p_c = \Delta p_{st} = h_m \cdot \rho_c \cdot g + h_{sp} \cdot \rho_c \cdot g$$

c_t - prędkość powietrza w rurociągu tłocznym $\left[\frac{m}{s} \right]$

c_s - prędkość powietrza w rurociągu ssawnym $\left[\frac{m}{s} \right]$

- moc użyteczna danego układu pracy wentylatorów:

$$N_u = \Delta p_c \cdot V \quad [W]$$

- moc na wale: $N_w = \eta_s \times N_{s1+s2}$ [W] gdzie $\eta_s = 0,75$

- sprawność całkowita danego układu pracy wentylatorów:

$$\eta = \frac{N_u}{N_e} \cdot 100\%$$

6. Opracowanie graficzne wyników badań

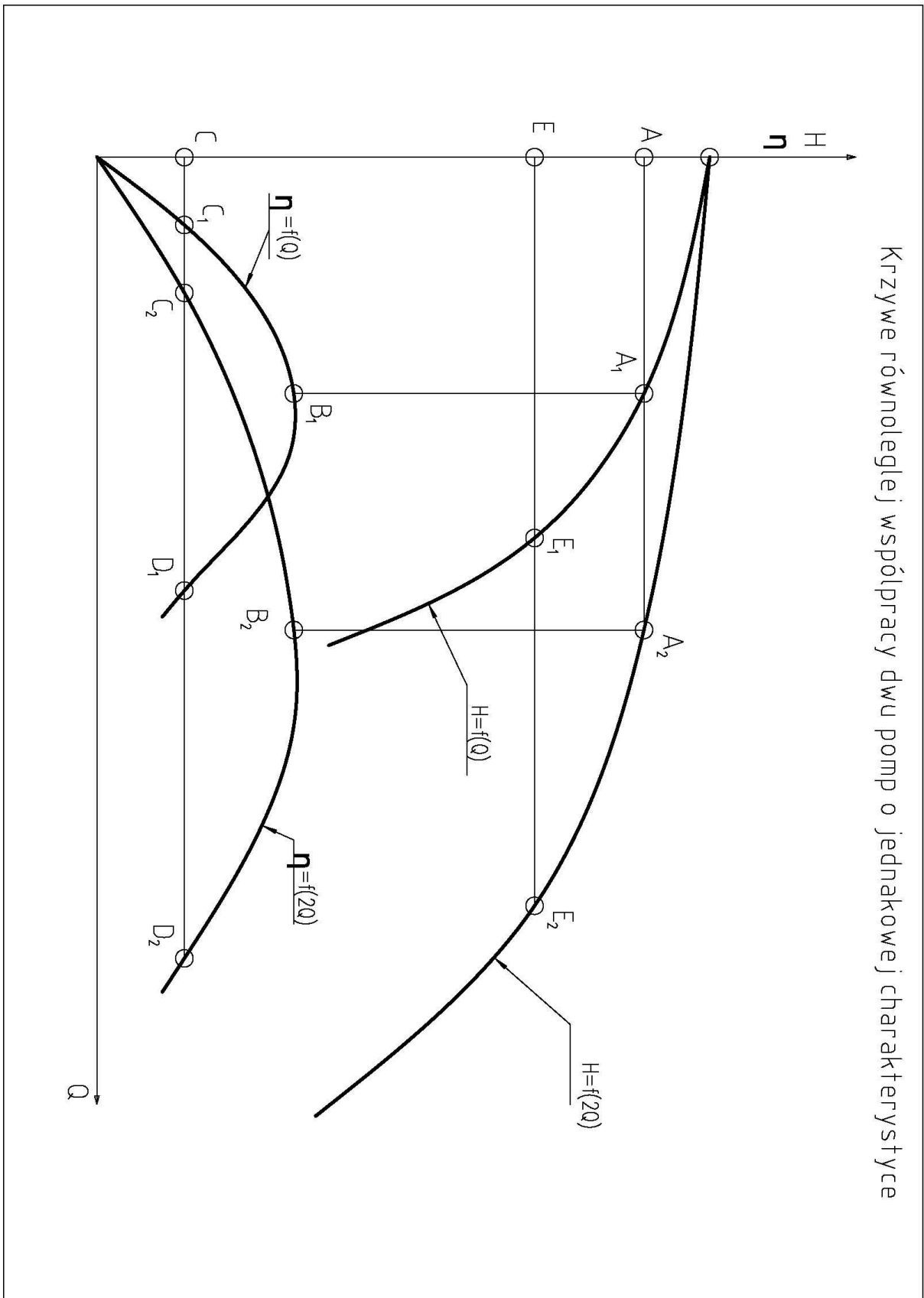
– podać na jednym wykresie następujące zależności:

- ⇒ zależność $\Delta p_c = f(V_s)$ dla pojedynczego wentylatora (wykres ten należy skopiować z ćwiczenia wstępnego) (oznaczyć jako krzywa nr 1)
- ⇒ zależność doświadczalna $\Delta p_c = f(V_{sz})$ dla szeregowej współpracy wentylatorów (oznaczyć jako krzywa nr 2)
- ⇒ do krzywej nr 2 skonstruować krzywą teoretyczną na bazie charakterystyk z ćwiczenia wstępnego (oznaczyć, jako 2a)
- ⇒ zaznaczyć na krzywej nr 2 optymalny punkt pracy i podać, jakie stąd wynikają wartości Δp_c oraz V_{sz}
- ⇒ zależność doświadczalna $\Delta p_c = f(V_{równ})$ dla równoległej współpracy wentylatorów (oznaczyć jako krzywa nr 3)
- ⇒ do krzywej nr 3 skonstruować krzywą teoretyczną na bazie charakterystyk z ćwiczenia wstępnego (oznaczyć, jako 3a)
- ⇒ zaznaczyć na krzywej nr 3 optymalny punkt pracy i podać, jakie stąd wynikają wartości Δp_c oraz $V_{równ}$.

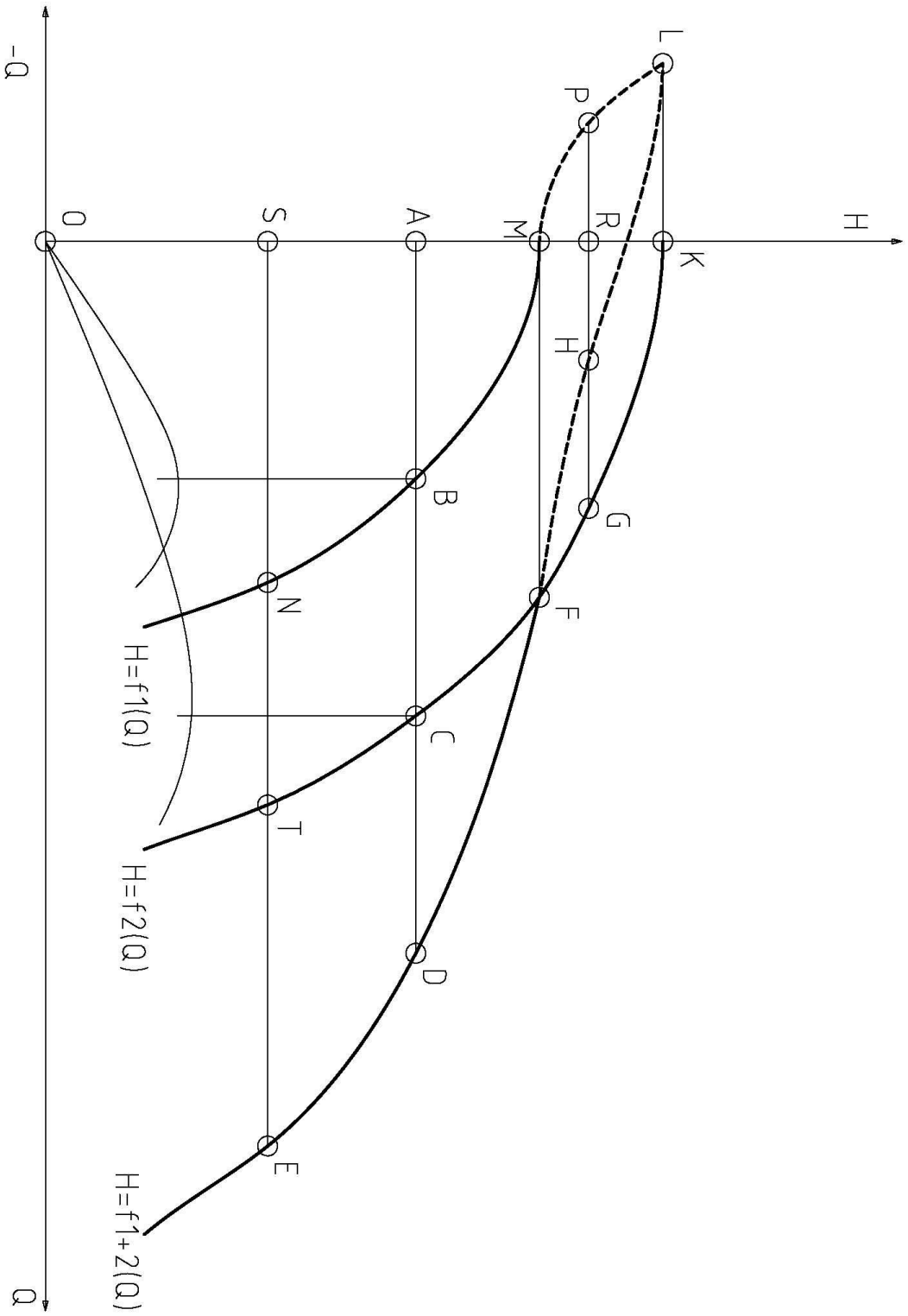
- podać na oddzielnym wykresie zależność $\eta_c = f(V)$ dla pojedynczego wentylatora (skopiować z ćwiczenia wstępnego) oraz dla szeregowego układu pracy $\eta_c = f(V_{sz})$ (oznaczyć, jako krzywą nr 2) i równoległego $\eta_c = f(V_{równ})$ (krzywa nr 3),

7. Wnioski i podsumowanie

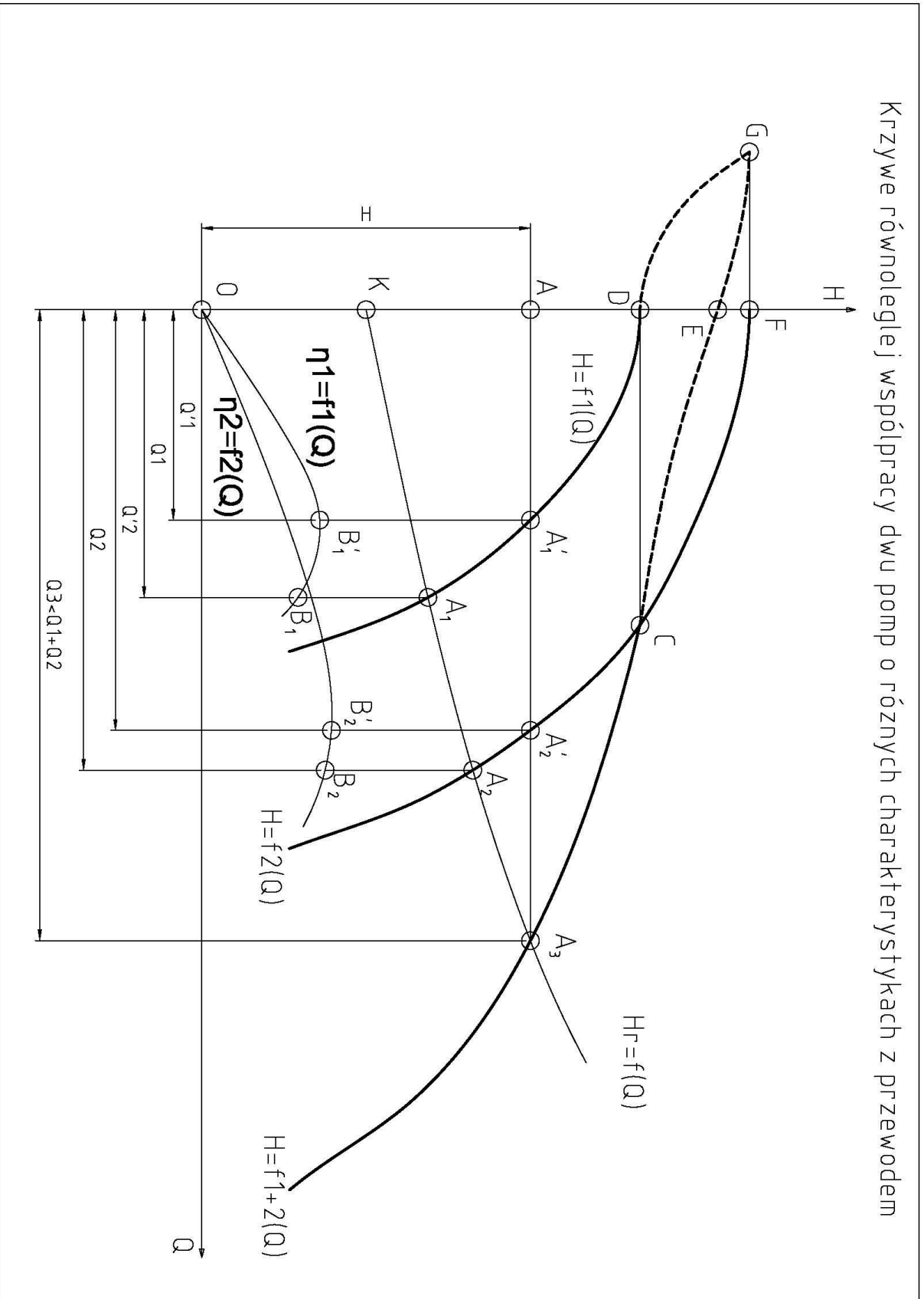
- ⇒ graficzna ilustracja efektu przyrostu wydajności w funkcji przyrostu ciśnienia dla równoległego połączenia wirnikowych maszyn przepływowych na przykładzie pomp o jednakowych i zróżnicowanych charakterystykach.



Krzywe równoległej współpracy dwu pomp o różnych charakterystykach



Krzywe równoległej współpracy dwu pomp o różnych charakterystykach z przewodem



⇒ wykaz zagadnień do zaliczenia przed ćwiczeniem - współpraca maszyn przepływowych.

WYKAZ ZAGADNIEŃ DO ZALICZENIA PRZED ĆWICZENIEM

Ćwiczenie „WSPÓLPRACA MASZYN PRZEPLYWOWYCH”

DO PRZEDMIOTU: Maszyny i Urządzenia Energetyczne Kierunek: MiBM, IMiM

1. Podać podstawowe założenia i postać podstawowego równania wirnika dla stopnia promieniowego.
2. Rodzaje podstawowych charakterystyk maszyn przepływowych – przedstawić graficznie.
3. Zdefiniować punkt pracy wentylatora/pompy, optymalny punkt pracy – przedstawić graficznie.
4. Wymienić wzory na wielkości charakteryzujące pracę maszyn przepływowych; wydajność, przyrost ciśnienia całkowitego, moc użyteczna i moc na wale, sprawność, a także zdefiniować gęstość powietrza wilgotnego.
5. Przedstawić graficznie efekt przyrostu ciśnienia w funkcji wydajności dla szeregowego połączenia wirnikowych maszyn przepływowych o jednakowych charakterystykach.
6. Przedstawić graficznie efekt przyrostu wydajności w funkcji przyrostu ciśnienia dla równoległego połączenia wirnikowych maszyn przepływowych o jednakowych charakterystykach.

Literatura:

Fortuna S.: BADANIA WENTYLATORÓW I SPREŻAREK. AGH, KRAKÓW 1999

Fortuna S.: WENTYLATORY

Skowroński M.: UKŁADY POMPOWE

Stępniewski M.: POMPY

Instrukcja do ćwiczenia nt. Wyznaczanie charakterystyki wentylatora promieniowego;

http://www.kseiuos.agh.edu.pl/index.php?n0=dla_studentow&n1=maszyny_przepliwowe