

**P O L I T E C H N I K A   Ł Ó D Z K A**  
**I N S T Y T U T   E L E K T R O E N E R G E T Y K I**  
**Z A K Ł A D   E L E K T R O W N I**

**INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA LABORATORYJNEGO**

**REGULACJA WYDAJNOŚCI**  
**WENTYLATORA PROMIENIOWEGO**

**Ł Ó D Ź   2 0 0 8**

## CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie i analiza ekonomiczno-techniczna sposobów regulacji wydajności wentylatorów promieniowych. Metody i przyrządy pomiarowe użyte w ćwiczeniu stanowią też dobrą ilustrację do poznania sposobów pomiaru natężenia przepływu oraz ciśnienia statycznego i dynamicznego.

## WSTĘP

Zastosowanie wentylatorów w elektrowniach cieplnych jest dość szerokie. Obok pomp hydraulicznych stanowią one największą grupę urządzeń pomocniczych zarówno pod względem liczby, jak i sumarycznej mocy. Do największych i najważniejszych wentylatorów stosowanych w elektrowniach należą wentylatory powietrza (podmuchu) oraz wentylatory spalin (ciągu). Ponadto wyróżnić można wentylatory młynowe, wentylatory stosowane w tzw. chłodniach wentylatorowych do chłodzenia skraplaczy turbin, wentylatory w układach odpopielania pneumatycznego oraz szereg wentylatorów stosowanych w różnych układach chłodzenia: (generatorów, transformatorów itp.).

Do najważniejszych układów automatycznej regulacji, w których wentylatory są elementami wykonawczymi, zaliczamy:

- UAR podmuchu,
- UAR ciągu,
- UAR młynów węglowych.

W układach tych wentylatory pracują w rytmie pracy bloku energetycznego (kotła), zatem przy zmianach obciążenia turbozespołu, zachodzi konieczność zmiany ich wydajności.

Wentylatory zalicza się do wirnikowych maszyn roboczych, służących do przetłaczania gazów i par. Mogą one pracować jako urządzenia wyciągowe, podmuchowe lub jako ssąco-tłoczące.

Wielkości charakteryzujące pracę wentylatorów, to:

- **wydajność masowa, strumień masy  $\dot{m}$**  - masa czynnika przepływającego w jednostce czasu przez płaszczyznę wlotu wentylatora ssącego lub ssąco-tłoczącego lub przez płaszczyznę wylotu wentylatora tłoczącego, kg/s;
- **wydajność objętościowa, strumień objętości  $\dot{V}$**  - objętość czynnika przepływającego w jednostce czasu przez wentylator, określona ilorazem wydajności masowej i gęstości czynnika w płaszczyźnie wlotu wentylatora ssącego lub ssąco-tłoczącego lub płaszczyźnie wylotu wentylatora tłoczącego, m<sup>3</sup>/s;
- **przyrost ciśnienia statycznego, spiętrzenie statyczne  $\Delta p$**  - różnica ciśnienia statycznego w płaszczyźnie wlotu i wylotu wentylatora, Pa;
- **przyrost ciśnienia dynamicznego, spiętrzenie dynamiczne  $\Delta p_d$**  - różnica ciśnienia dynamicznego w płaszczyźnie wlotu i wylotu wentylatora, Pa;
- **przyrost ciśnienia całkowitego, spiętrzenie całkowite  $\Delta p_c$**  - suma przyrostu ciśnienia statycznego i dynamicznego wentylatora, Pa;
- **moc pobierana przez maszynę  $P$**  - moc na sprzęgle (wale) wentylatora, W;
- **moc użyteczna  $P_u$**  - przyrost użytecznej postaci energii czynnika przenoszonego w jednostce czasu, W. W przypadku gdy przetłaczany czynnik traktuje się jako gaz nieściśliwy, a więc jego gęstość przyjmuje jako stałą, moc użyteczną można obliczyć ze wzoru:

$$P_u = \dot{V} \cdot \Delta p_c ; \quad (1)$$

- **Prędkość obrotowa wentylatora  $n$**  - liczba obrotów wirnika w jednostce czasu, obr/s;

- **Sprawność całkowita wentylatora  $\eta_c$ :**

$$\eta_c = \frac{P_u}{P} \quad (2)$$

Wyżej wymienione wielkości podaje się na ogół dla znamionowej wydajności wentylatora. W przypadku, gdy wentylator pracuje przy innej wydajności, wielkości charakterystyczne określa się na podstawie tzw. charakterystyk graficznych. Najważniejszą z nich jest tzw. **charakterystyka wentylatora**, czyli zależność przyrostu ciśnienia całkowitego w zależności od wydajności przy stałej prędkości obrotowej:

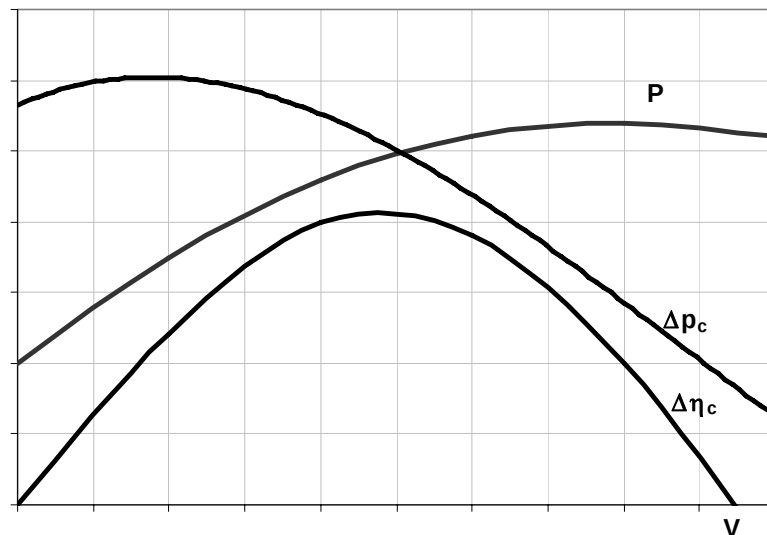
$$\Delta p_c = f(\dot{V}) \quad (3)$$

Na wspólnym wykresie nanosi się zwykle jeszcze dwie zależności: mocy pobieranej przez wentylator w zależności od wydajności oraz sprawności całkowitej w funkcji wydajności:

$$P = f(\dot{V}) \quad (4)$$

$$\eta_c = f(\dot{V}) \quad (5)$$

Na rys. 1 przedstawiono przykładowe charakterystyki wentylatora.



Rysunek 1. Charakterystyki wentylatora

Wentylator przetłaczając czynnik przez rurociąg lub kanał musi pokonać opory przepływu, które zależą od kształtu rurociągu lub kanału oraz od natężenia przepływu czynnika. Na ogół opory te określa się ilościowo na podstawie tzw. charakterystyki oporów, czyli graficznie przedstawionej zależności określającej całkowity spadek ciśnienia na skutek pokonywania oporów rurociągu w zależności od natężenia przepływu czynnika:

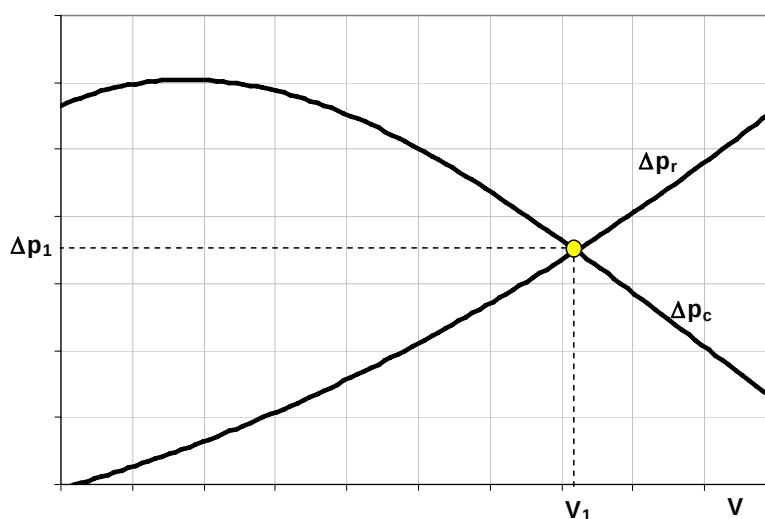
$$\Delta p_r = f(\dot{V}) \quad (6)$$

Przy ustalonej pracy wentylatora (stały przepływ czynnika), występuje równowaga między przyrostem energii czynnika w wirniku, a stratą energii czynnika w rurociągu na skutek tarcia, co wyraża się równością przyrostu ciśnienia w wentylatorze i spadku ciśnienia w rurociągu:

$$\Delta p_c = \Delta p_r. \quad (7)$$

Na rys. 2 pokazano graficznie sytuację opisaną wzorem (7). Punkt przecięcia charakterystyki wentylatora i oporów rurociągu nazywany jest punktem pracy wentylatora.

Określa on aktualną wartość przyrostu ciśnienia i natężenie przepływu czynnika w wentylatorze.

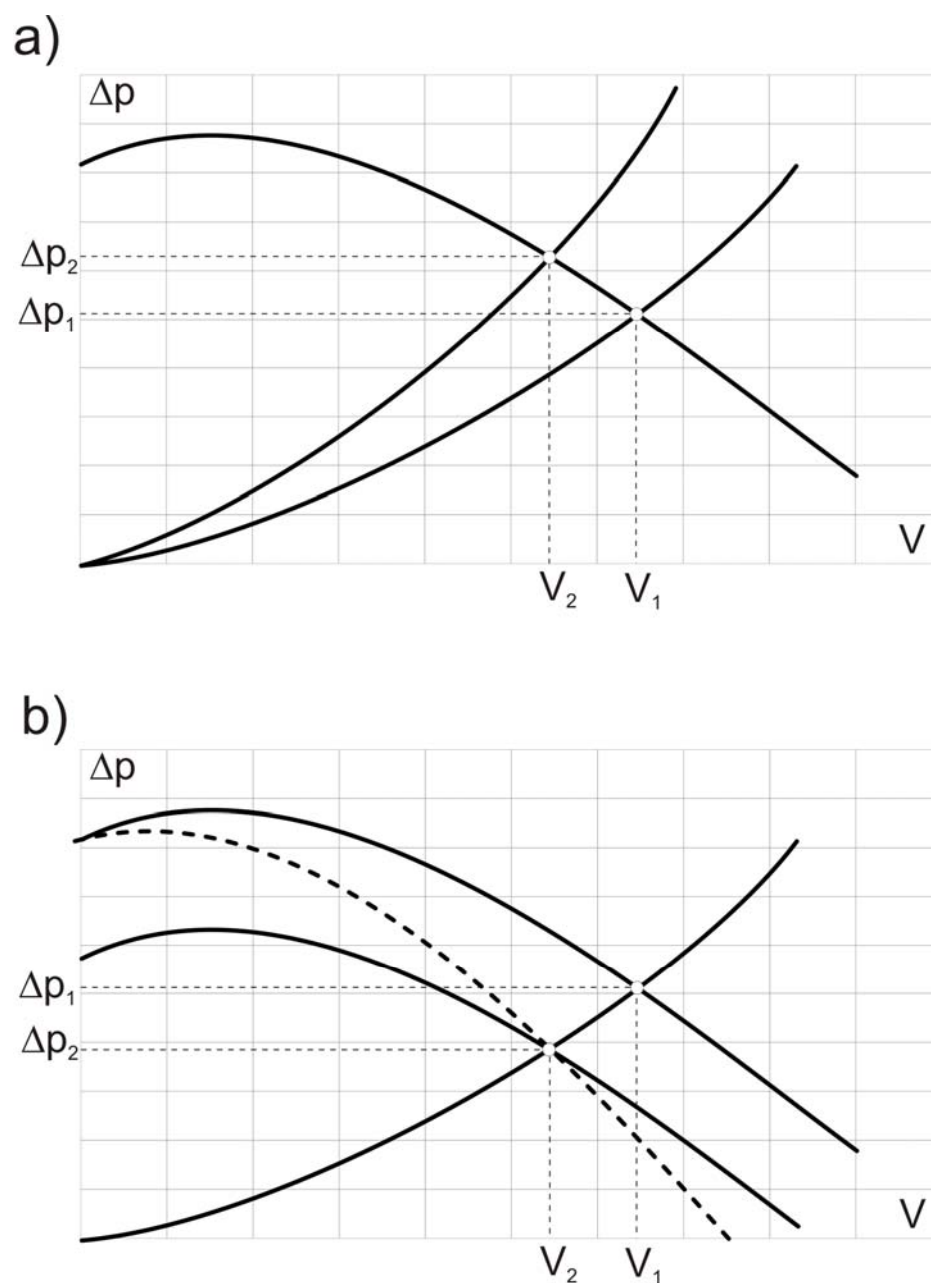


Rysunek 2. Punkt pracy wentylatora.

Charakterystyki wentylatorów i oporów sieci przedstawiane są zawsze dla ustalonej umownej gęstości powietrza  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$  (tzw. warunki umowne: ciśnienie 101,3 kPa, temperatura 293,15 K). Jeżeli zachodzi konieczność przeliczenia charakterystyki na inne warunki, można wykorzystać w pierwszym przybliżeniu równanie Clapeyrona dla gazu doskonałego.

Z rysunku 2 wynika, że zmiana punktu pracy oznacza zmianę wydajności wentylatora. Można to osiągnąć, zarówno poprzez zmianę charakterystyki wentylatora, jak i rurociągu (kanału, sieci). W praktyce stosuje się trzy sposoby zmiany wydajności wentylatora przetaczającego czynnik przez rurociąg.

1. **Zmiana charakterystyki oporów poprzez dławienie przepływu w rurociągu.** Jest to najprostszy sposób regulacji wydajności, ale zarazem nieekonomiczny, ponieważ charakterystyka wentylatora pozostaje stała - wprowadzony zostaje dodatkowy opór do pokonania przez wentylator. Ten sposób regulacji ilustruje rys. 3.a.
2. **Regulacja za pomocą zmianę prędkości obrotowej wirnika.** Związana jest z zastosowaniem napędu o zmiennej prędkości obrotowej (np. sprzęgło hydrokinetyczne, silnik prądu stałego, silnik indukcyjny zasilany poprzez przetwornicę częstotliwości). Jest to najbardziej ekonomiczny sposób regulacji, można go stosować do każdego typu wentylatora bez potrzeby zmiany jego konstrukcji. Podczas tego typu regulacji ulegają zmianie charakterystyki wentylatora (rys. 3.b.).
3. **Regulacja aerodynamiczna.** Polega na zmianie kształtu lub położenia elementów konstrukcyjnych wentylatora. Mogą to być tzw. kierownice wstępne - nieruchome łopatki połączone z obudową wentylatora. Poprzez zmianę ustawienia kąta tych łopatek zmienia się kinematyka przepływu czynnika. Koszt wykonania takiego mechanizmu jest nieduży, jednak zakres regulacji niewielki. Innym sposobem regulacji aerodynamicznej jest nastawianie (podczas ruchu) łopatek wirnika. Zasada działania jest podobna jak w przypadku kierownic wstępnych, ale koszt mechanizmów jest o wiele większy. Regulacja ta jest bardzo czuła i można ją stosować w szerokim zakresie zmian wydajności. W obydwu przypadkach regulacji aerodynamicznej następuje zmiana charakterystyk wentylatora (rys. 3.b.).



Rysunek 3. Sposoby regulacji wydajności wentylatorów: a) dławieniowa, b) przez zmianę prędkości obrotowej i aerodynamiczna (linia przerywana)

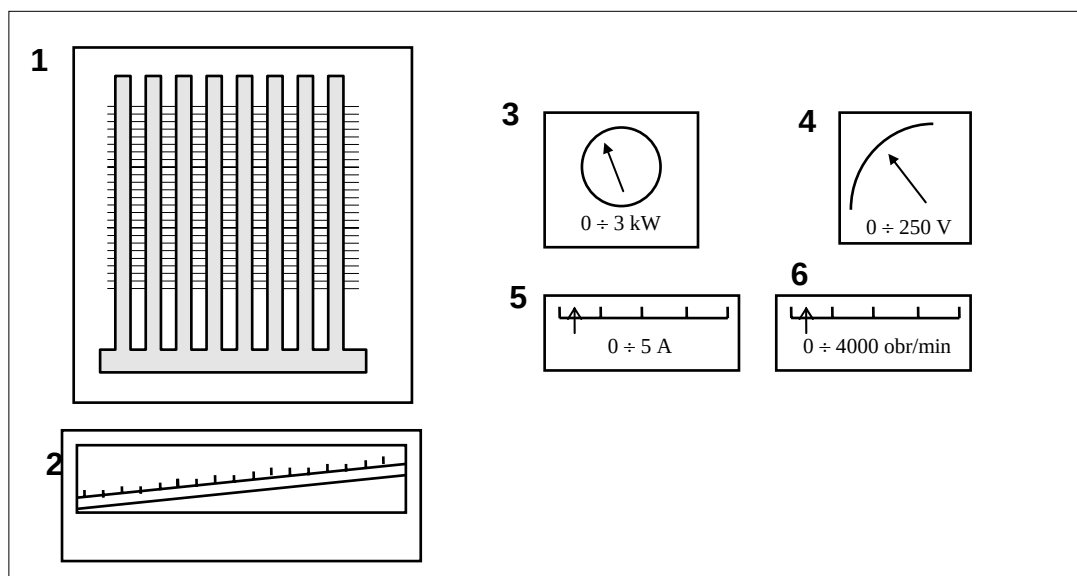
## OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Na stanowisku zamontowany został wentylator promieniowy, napędzany trójfazowym silnikiem indukcyjnym klatkowym. Do wylotu wentylatora dołączony został rurociąg pomiarowy o długości ok. 4,5 m, w którym zamontowano kryzę do pomiaru natężenia przepływu, sondę Prandtla do pomiaru ciśnienia dynamicznego czynnika oraz otwory impulsowe do pomiaru ciśnienia statycznego na początku i na końcu rurociągu. Na końcu rury zamontowano ruchomy stożek do dławienia przepływu. Na króćcu ssawnym wentylatora zamontowano rurociąg ssawny o długości 1 m w którym wykonano otwór impulsowy do pomiaru ciśnienia statycznego na wlocie.

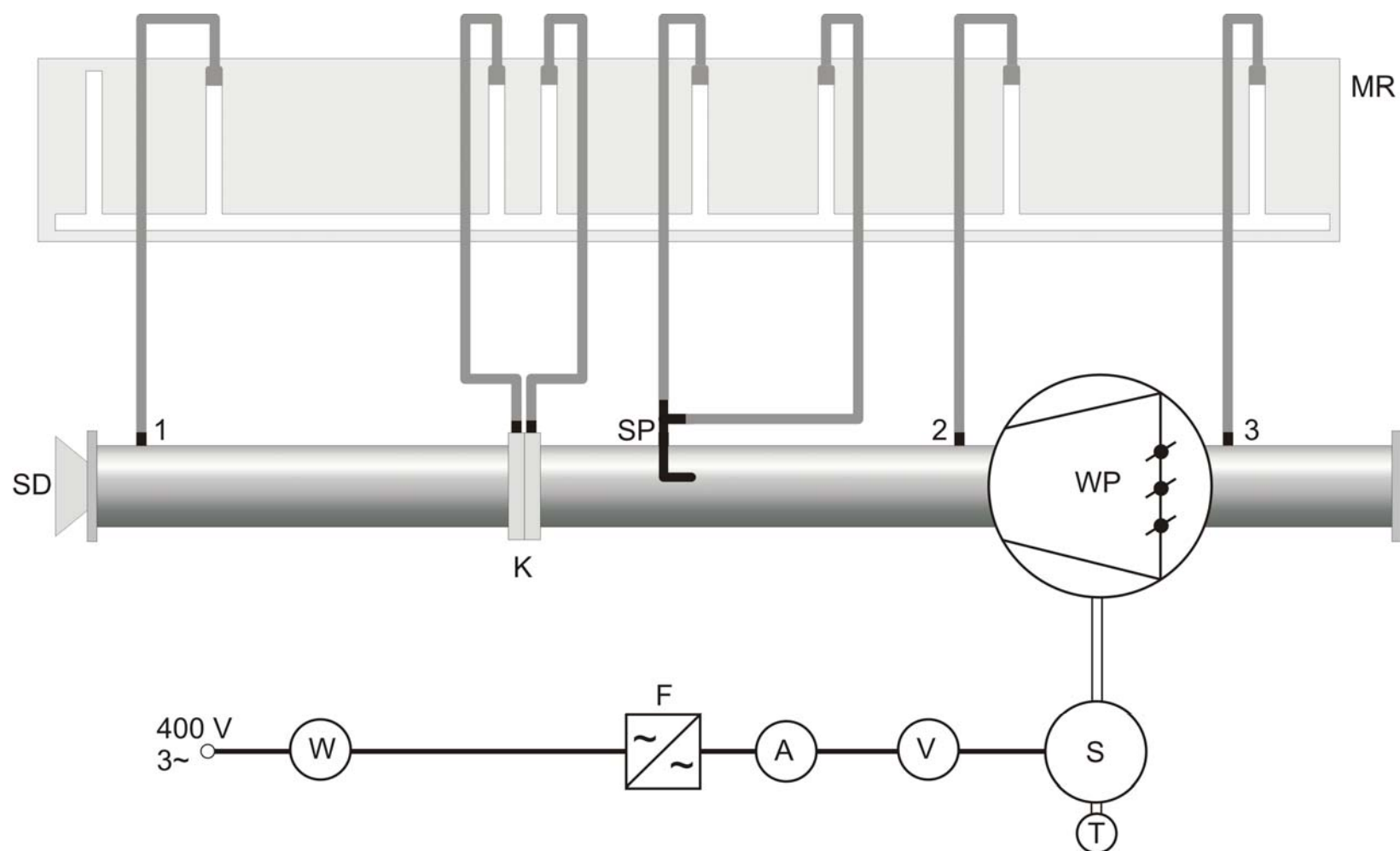
Badany wentylator ma na wlocie układ kierowniczy wstępnych wraz z mechanizmem do ustawiania kąta łopatek w celu regulacji (aerodynamicznej) wydajności. Do pomiaru prędkości obrotowej układu silnik - wentylator służy zamontowana na wale silnika prądniczka tachometryczna. Silnik napędowy wentylatora zasilany jest z sieci trójfazowej za pośrednictwem tyrystorowej przetwornicy częstotliwości, dzięki czemu możliwa jest płynna zmiana prędkości obrotowej wentylatora. Pomiary ciśnień w układzie realizowane są przy pomocy manometrów cieczowych wyskalowanych w mm H<sub>2</sub>O. Oznaczenia manometrów są następujące:

- $h_0$  - ciśnienie odniesienia (atmosferyczne);
- $h_1$  - ciśnienie statyczne na końcu rurociągu (otwór impulsowy 1);
- $h_2$  - ciśnienie statyczne przed kryzą pomiarową;
- $h_3$  - ciśnienie statyczne za kryzą pomiarową;
- $h_4$  - ciśnienie całkowite z sondy Prandtla;
- $h_5$  - ciśnienie statyczne z sondy Prandtla;
- $h_6$  - ciśnienie statyczne na tłoczeniu (otwór impulsowy 2);
- $h_7$  - ciśnienie statyczne na ssaniu (otwór impulsowy 3);
- $p_d$  - ciśnienie dynamiczne z sondy Prandtla (manometr z rurką pochyłą).

Schemat rozmieszczenia przyrządów pomiarowych przedstawiony jest na rys. 4. Na rys. 5 przedstawiono schemat ideowy stanowiska wraz z układem zasilania silnika.



Rysunek 4. Rozmieszczenie przyrządów pomiarowych na tablicy przy stanowisku.  
1 - manometr cieczowy z rurkami pionowymi; 2 - manometr cieczowy z rurką pochyłą; 3 - watomierz do pomiaru mocy pobieranej przez silnik; 4 - woltomierz do pomiaru napięcia fazowego; 5 - amperomierz do pomiaru prądu fazowego silnika; 6 - obrotomierz.



Rysunek 5. Schemat ideowy stanowiska do badania wentylatora.

*MR - manometr cieczowy z rurkami pionowymi; A - amperomierz; V - woltomierz; W - watomierz; S - silnik indukcyjny klatkowy; WP - wentylator promieniowy; F - przetwornica częstotliwości (falownik); 1, 2, 3 - otwory impulsowe do pomiaru ciśnienia statycznego; K - kryza pomiarowa; SP5 - sonda Prandtla; SD - stożek dławiący; T - prędniczka tachometryczna.*

## PROGRAM ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest porównanie różnych sposobów regulacji wentylatora. Po pierwsze, porównanie ma mieć charakter ilościowy, tzn. należy obliczyć różnice w poborze energii elektrycznej przez silnik wentylatora przy różnych (trzech) sposobach zmniejszenia jego wydajności. Po drugie, należy przedstawić efekty dokonywanych regulacji w postaci graficznej, tzn. pokazać na wykresie jak zmieniają się charakterystyki wentylatora i oporów. W tym celu należy wykonać odpowiednie pomiary za pomocą przyrządów zamontowanych na stanowisku i pokazanych na rys. 5.

**Zadaniem wykonujących ćwiczenie jest opracowanie algorytmu wykonywania pomiarów (wraz z tabelami pomiarowymi). Musi on uwzględniać opisane powyżej cele oraz opierać się na opisie stanowiska laboratoryjnego.**

Algorytm ten podlega zatwierdzeniu przez prowadzącego ćwiczenie.

Przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów należy:

- zlokalizować poszczególne przyrządy pomiarowe;
- sprawdzić połączenia przewodów ciśnieniowych doprowadzających impulsy pomiarowe do manometrów;
- sprawdzić czy w manometrach cieczowych znajduje się prawidłowa ilość cieczy - w przypadku wyparowania należy dolać odpowiedniej cieczy;
- otworzyć przesłonę na wylocie rurociągu ssawnego oraz ustawić łopatki kierownic wstępnych na 90° (pełne otwarcie);
- spisać z tabliczek znamionowych wentylatora i silnika oznaczenia typu i podstawowe parametry techniczne.

**Układ należy podłączyć do sieci pod kontrolą prowadzącego ćwiczenie.**

Po załączeniu napięcia należy włączyć przetwornicę i sprawdzić, czy wentylator obraca się w prawidłową stronę. Przy pomocy potencjometru do regulacji częstotliwości napięcia wyjściowego stopniowo zwiększać prędkość obrotową wentylatora, aż do wartości znamionowej.

***Uwaga ! Podczas wykonywania pomiarów nie należy dopuścić do przeciążenia silnika (prąd znamionowy  $I = 4,8 \text{ A}$ ). Przeciążenie takie występuje zarówno przy zbyt wysokich, jak i przy zbyt niskich obrotach silnika.***

Pomiary ciśnień w ćwiczeniu dokonywane są przy użyciu manometru wielorurkowego wypełnionego wodą. Odpowiednie ciśnienie zatem należy obliczać jako różnicę poziomów wody w odpowiedniej rurce i rurce odniesienia:

$$p_i = h_0 - h_i \quad [mmH_2O]$$

Tak obliczone ciśnienie należy przeliczyć następnie na paskale.

Przyrost ciśnienia całkowitego w wentylatorze można określać w przybliżeniu jako różnicę ciśnień statycznych na wlocie i wylocie wentylatora:

$$\Delta p_c = p_{s2} - p_{s1} \quad [Pa]$$

Pomiarów natężenia przepływu dokonać należy przy wykorzystaniu kryzy pomiarowej. Konstrukcja i wymiary kryzy zamontowanej w rurociągu zostały określone zgodnie z normą PN-93/M-53950/01. Zgodnie z tą normą strumień objętości przepływającego czynnika należy obliczać z następującej zależności:

$$\dot{V} = 0,02493 \cdot C \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt{\Delta p_K} \quad [m^3 / s]$$

gdzie:  $\Delta p_K$  – spadek ciśnienia statycznego na kryzie [Pa],



C – współczynnik przepływu:

$$C = 0,602984 + \frac{29,85083}{Re^{0,75}},$$

$\varepsilon_1$  – liczba ekspansji płynu przed kryzą:

$$\varepsilon_1 = 1 - 3,30065 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta p_K,$$

Re – liczba Reynoldsa określająca charakter przepływu:

$$Re = 361636 \cdot \dot{V}.$$

Jak wynika z powyższych wzorów, aby określić strumień przepływu, należy wykonać obliczenia iteracyjne.

## WYKONANIE SPRAWOZDANIA

**W sprawozdaniu należy zamieścić:**

1. Opis wentylatora i silnika napędowego.  
Syntetyczny opis urządzeń przy wykorzystaniu danych z tabliczek znamionowych.
2. Opis zaproponowanego i zrealizowanego algorytmu pomiarów.
3. Tabele pomiarów i obliczeń.  
Obliczenia należy wykonywać po przeliczeniu pomierzonych wartości na jednostki zgodne z układem SI.
4. Analizę uzyskanych wyników pomiarów i obliczeń.  
Konieczne jest wykonanie wykresów przedstawiających zmiany charakterystyk wentylatora i rurociągu podczas zmiany wydajności układu. Należy także zaprezentować w przejrzystej formie analizę ekonomiczną (zużycie energii elektrycznej) różnych rodzajów regulacji.
5. Uwagi i wnioski

## LITERATURA

1. Praca zbiorowa pod redakcją M. Mieszkowskiego: „Pomiary cieplne i energetyczne”. WNT, Warszawa 1985.
2. F. Strzelczyk: „Metody i przyrządy w pomiarach ciepłno-energetycznych”. Skrypt PŁ.
3. Polska Norma: „Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwężek pomiarowych” - PN-93/M-53950/01.