



Politechnika Wroclawska

Katedra Techniki Ciepłej K51W09D08

Badanie Maszyn i Urządzeń – laboratorium

Indykowanie maszyn wolnobieżnych i pomiar sprężarki tłokowej

Instrukcja do ćwiczenia nr

Opracowała: dr inż. Elżbieta Wróblewska

Wrocław, październik 2015 r.

I. WSTĘP TEORETYCZNY

Sprężarki to maszyny robocze, które służą do podwyższania ciśnienia gazów lub par, do ich przetłaczania z przestrzeni o ciśnieniu niższym do przestrzeni o ciśnieniu wyższym, do podwyższania temperatury czy też magazynowania czynnika.

W zależności od stosunku sprężania czynnika roboczego, sprężarki buduje się jako jedno, dwu lub wielostopniowe. Sprężarki wielostopniowe oprócz normalnego chłodzenia cylindrów wyposażone są w chłodnice międzystopniowe, których celem jest obniżenie temperatury czynnika roboczego przy jego przejściu z cylindra pierwszego stopnia sprężania (cylinder niskoprężny, NP) do cylindra drugiego stopnia (cylinder wysokoprężny, WP). Jeżeli sprężarka ma kilka dalszych stopni sprężania, przed każdym następnym cylindrem wysokoprężnym zainstalowane są analogiczne chłodnice.

Agregat sprężarkowy to zespół sprężarki i silnika napędowego. Jako maszyny napędowe stosuje się powszechnie silniki elektryczne sprzężone bezpośrednio lub też napęd przenoszony jest przez przekładnię zębatą lub pasową. Stopień wykorzystania energii doprowadzonej do napędu agregatu jest miarą ekonomiczności pracy urządzenia.

Zasada działania sprężarek wyporowych polega na zasysaniu, sprężaniu i wytłaczaniu gazu wskutek okresowego zwiększania i zmniejszania objętości przestrzeni roboczej, w której znajduje się gaz, przez poruszający się organ roboczy (tłok, łopatki, krzywki). Cechą charakterystyczną sprężarek wyporowych jest ich okresowość działania. Zależnie od rodzaju ruchu organu roboczego sprężarki wyporowe dzielą się na :

- tłokowe, o posuwisto-zwrotnym ruchu tłoka,
- rotacyjne o obrotowym ruchu organu roboczego.

Obiektem naszego zainteresowania na ćwiczeniu laboratoryjnym będzie sprężarka tłokowa.

Sprężarki tłokowe odznaczają się dużą ekonomią ruchu. Można je stosować zarówno do małych jak i bardzo dużych ciśnień. Ich wadą jest nierównomierny przepływ gazu, wymóg fachowej obsługi, duże rozmiary i koszt.

Wielkościami charakteryzującymi pracę sprężarki są:

- strumień objętości, nazywany wydajnością sprężarki, lub strumień masy,
- ciśnienie p_s i temperatura T_s ssania, mierzone w przewodzie ssawnym sprężarki (na wlocie),
- ciśnienie p_t i temperatura T_t mierzone na wylocie sprężarki (na tłoczeniu),
- spręż ϵ , będący stosunkiem ciśnień na wylocie i wlocie sprężarki,
- zapotrzebowanie mocy na wale sprężarki P ,
- prędkość obrotowa n ,

- sprawność η , określona stosunkiem zapotrzebowanej mocy maszyny w warunkach porównawczych (wyidealizowanych) do mocy rzeczywiście pobranej.

Powietrzne sprężarki tłokowe znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu: w hutnictwie (dostarczają sprężone powietrze do wytopu surówki w wielkich piecach, do wytwarzania tlenu technicznego dla procesu konwertorowego), górnictwie (napęd maszyn urabiających), budownictwie (zasilają narzędzia pneumatyczne, urządzenia do tynkowania, malowania), transporcie samochodowym.

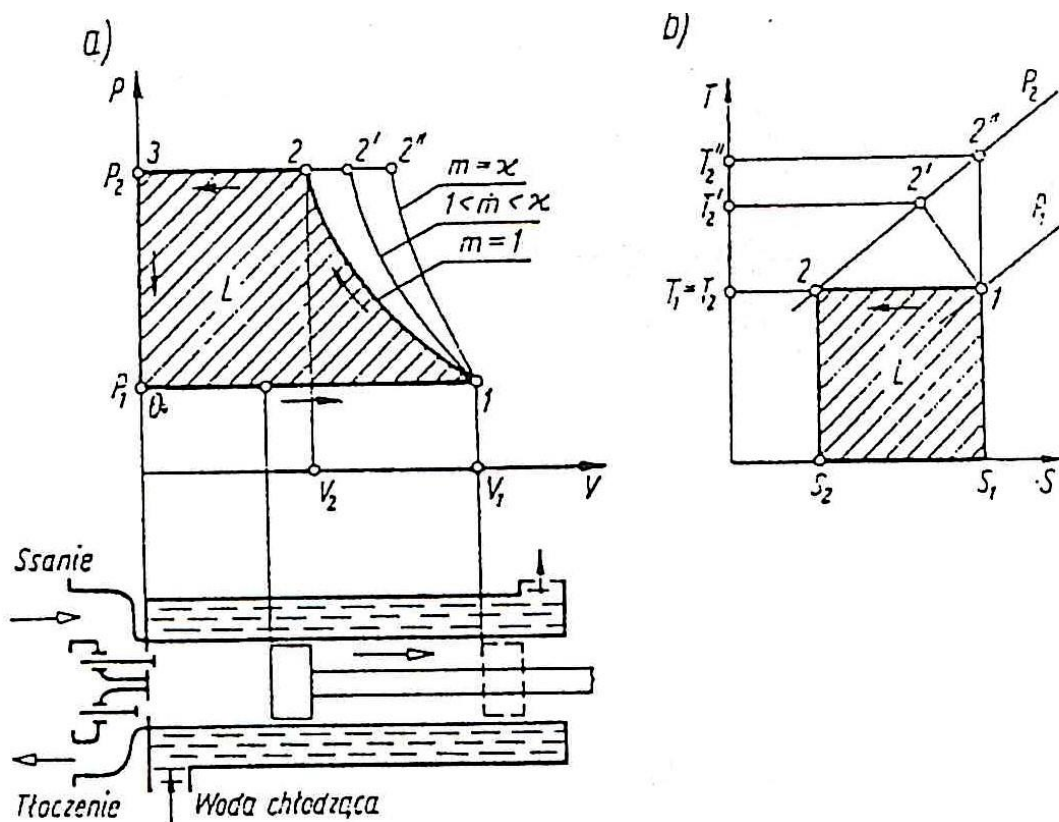
Teoretyczny przebieg procesu sprężania czynnika w sprężarce tłokowej rozważa się przy założeniu:

- nie uwzględnienia objętości przestrzeni szkodliwej cylindra,
- stałego wykładnika politropy sprężania,
- nie występowania strat związanych z oporami przepływu podczas napełniania przestrzeni roboczej oraz wytłaczania,
- brak wymiany ciepła między czynnikiem sprężanym a ściankami cylindra,
- niezmienności temperatury i ciśnienia gazu podczas zasysania,
- stałości temperatury i ciśnienia gazu podczas wytłaczania,
- nie brania pod uwagę strat mechanicznych w mechanizmie korbowym, oporów w zaworach ssawnych i tłocznych oraz nieszczelności w nich jak i nieszczelności między tłokiem a cylindrem itp.,
- nie ulegającym zmianom ciśnieniu w zbiorniku wyrównawczym; zakłada się, że strumień pobieranego gazu jest równy strumieniowi gazu dostarczanego przez sprężarkę, albo że zbiornik ma nieskończenie dużą objętość.

Na poniższym rysunku 1 przedstawiono wykres pracy idealnej sprężarki tłokowej jednostopniowej o posuwisto-zwrotnym ruchu tłoka.

Przy bardzo wolnym ruchu tłoka w prawo (ssanie, linia 0-1), ciśnienie gazu p_1 otwiera zawór w przewodzie ssania i gaz o tym ciśnieniu wypełnia cylinder do objętości V_1 w skrajnym położeniu tłoka. Przy ruchu powrotnym tłoka zawór ssawny zamyka się, a gaz podlega sprężeniu. Ze względu na to, iż cylinder jest intensywnie chłodzony wodą, a ruch tłoka powolny, przyjmuje się, że temperatura gazu jest taka sama ($T_1=T_2$) mimo sprężania. Przemiana 1-2 jest przemianą izotermiczną. Gdy ciśnienie w rurociągu osiągnie wartość p_2 (pkt. 2) przy objętości V_2 , otwiera się zawór tłoczny i podczas dalszego ruchu powrotnego tłoka (odcinek 2-3), gaz przy stałym ciśnieniu jest wytłaczany z cylindra. W następnym cyklu następuje spadek ciśnienia w cylindrze (3-0) w związku z zamknięciem zaworu tłoczego i otwarciem zaworu ssawnego. Jeżeli założymy, że tłok porusza się bardzo szybko, a cylinder nie jest chłodzony, to proces

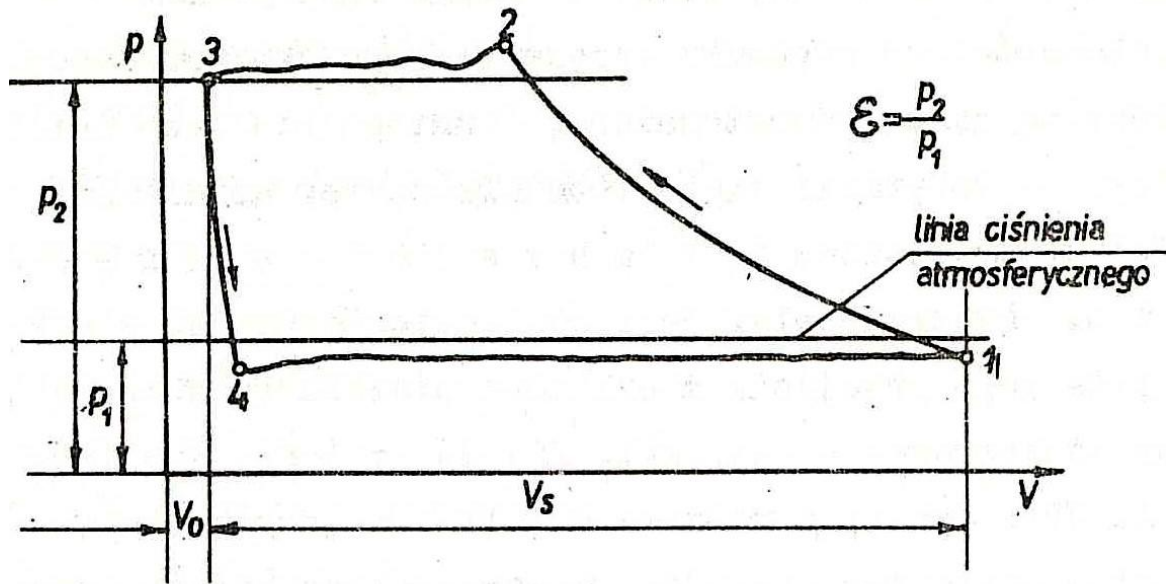
sprężania zachodzi bez wymiany ciepła (adiabaticznie, odcinek 1-2''). Rzeczywistym przybliżeniem pracy sprężarki jest sprężanie politropowe (odcinek 1-2').



Rys. 1. Wykres pracy i schemat idealnej sprężarki tłokowej; teoretyczny wykres indykatorowy: a) we współrzędnych p-V, b) we współrzędnych T-S [2]

Rzeczywisty przebieg pracy w sprężarce tłokowej (na przykładzie sprężarki tłokowej jednostopniowej rys. 2) znacznie odbiega od teoretycznego. Otrzymuje się go za pomocą przyrządu zwanego indykatorem, który mierzy i wykreśla przebieg zmiennego ciśnienia w cylindrze w funkcji drogi tłoka, czyli objętości gazu w cylindrze.

Jedną z przyczyn występowania różnic między wykresem teoretycznym a rzeczywistym jest istnienie przestrzeni szkodliwej między tłokiem a pokrywą cylindra. Wtedy zasysanie gazu nie zaczyna się w martwym położeniu tłoka, ale dopiero po wykonaniu przez tłok pewnej części skoku. Zasysanie gazu odbywa się tym później im większy jest stosunek ciśnień p_2/p_1 , im większa jest przestrzeń szkodliwa V_0 oraz im mniejszy jest wykładnik krzywej rozprężania, czyli im bardziej stroma jest krzywa rozprężania 3-4 (rozprężanie powrotne). Przestrzeni szkodliwej nie można usunąć całkowicie, w praktyce wynosi ona 3-8% objętości skokowej V_s .

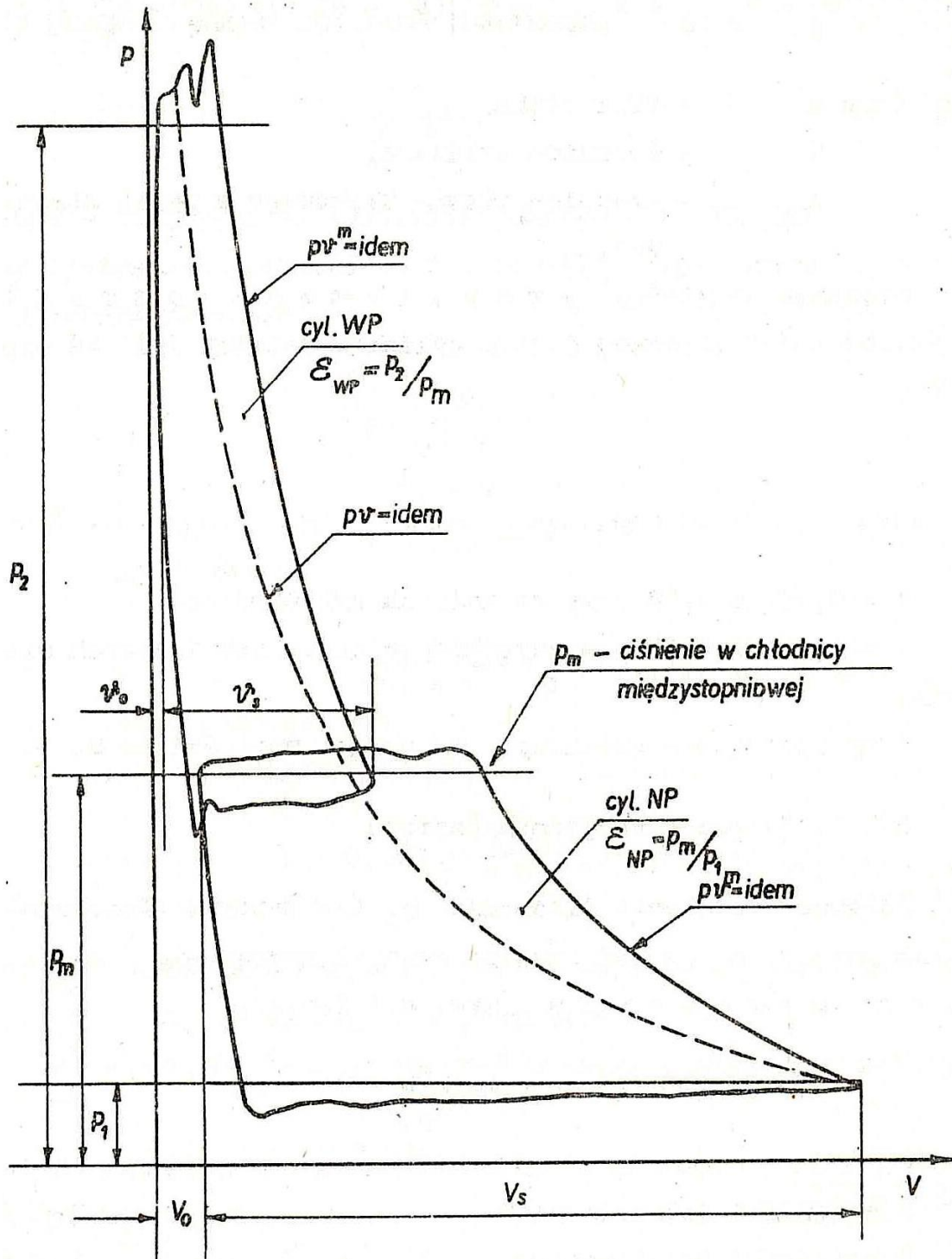


Rys. 2. Wykres indykatorowy sprężarki rzeczywistej [1]

Między punktami 4-1 odbywa się ssanie, a 1-2 sprężanie. Idealnie byłoby, gdyby linią sprężania była izoterma, najgorzej gdyby linią sprężania była adiabata. Z tego powodu stara się sprężyć gaz blisko izotermy stosując chłodzenie cylindra i pokrywy cylindra. Skuteczność tego zabiegu zależy nie tylko od intensywności chłodzenia, ale także od konstrukcji cylindra i ilości obrotów (im dłuższy cylinder tym lepszy rezultat chłodzenia, im mniejsza ilość obrotów tym sprężanie odbywa się po linii położonej bliżej izotermy, ale rosną wówczas wymiary sprężarki i koszt jej wykonania).

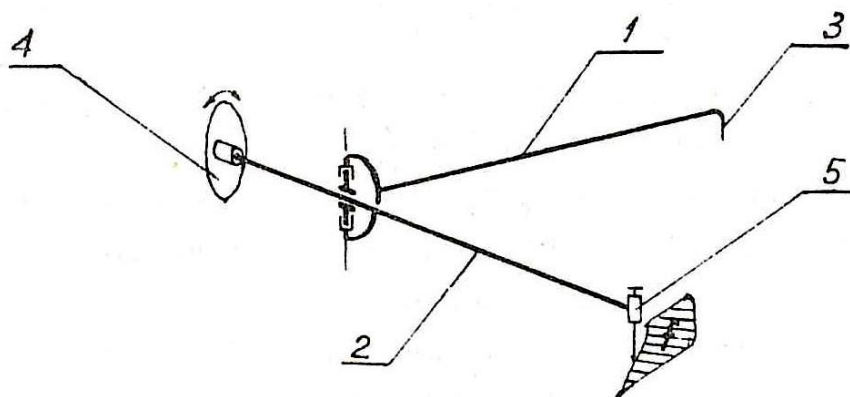
Zmiany wartości ciśnienia w pkt. 4 i 2 spowodowane są bezwładnością zaworów.

Pracę sprężarki wielostopniowej przedstawia wykres indykatorowy scalony (zrankinzowany). Na rys. 3 prezentowany jest wykres scalony sprężarki dwustopniowej. Wykresy scalone można uzyskać przez narysowanie otrzymanych z indykowania w tym samym czasie wykresów indykatorowych danej strony cylindrów w jednej podziałce ciśnienia i objętości. Całkowita moc indykowana sprężarki wielostopniowej jest sumą mocy poszczególnych cylindrów.



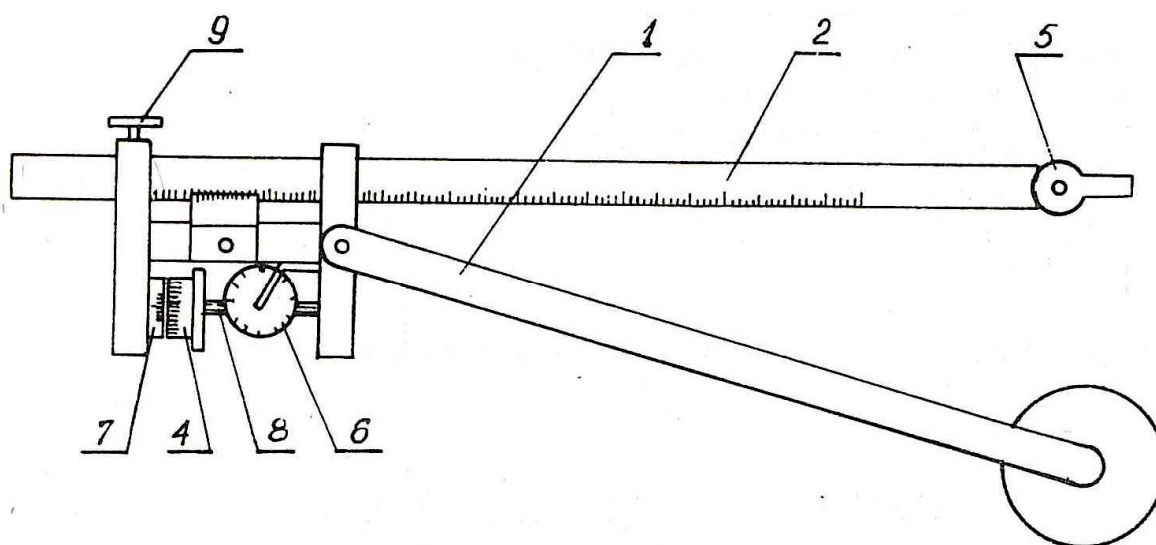
Rys. 3. Wykresy indykatorowe scalone sprężarki dwustopniowej [1]

Do wyznaczania pola wykresów indykatorowych stosuje się planimetry. Umożliwiają one znajdowanie w sposób mechaniczny wielkości pola figur płaskich, ograniczonych liniami dowolnego kształtu. Na rys. 5 przedstawiono zasadę działania planimetru.



Rys. 5. Zasada działania planimetru: 1 – ramię biegunowe, 2 – ramię wodzące, 3 – szpilka, 4 – rolka miernicza (kółko całkujące), 5 – kolec [4]

Zasadniczymi elementami planimetru są połączone ze sobą przegubowo ramię biegunowe 1 i ramię wodzące 2. Jeden koniec ramienia biegunowego stanowi tzw. Biegun planimetru i jest unieruchomiony przez wbicie w powierzchnię, na której przeprowadza się planimetrowanie, szpilki 3. Z ramieniem wodzącym związane są rolka miernicza 4 oraz kolec 5. Za pomocą tego kolca obwodzi się kontur wykresu. Ponadto planimetr wyposażony jest także w tarczkę licznika 6, podziałkę noniusz 7, przekładnię ślimakową 8 oraz kółko podtrzymujące 9 (budowa planimetru biegunowego kompensacyjnego przedstawiona została na rys. 6).



Rys. 6. Planimetr biegunowy kompensacyjny: 1 – ramię biegunowe, 2 – ramię wodzące, 4 – rolka miernicza (kółko całkujące), 5 – kolec, 6 – tarcza licznika, 7 – podziałka noniusza, 8 – przekładnia ślimakowa, 9 – kółko podtrzymujące [4]

Planimetrowanie wykresów przeprowadza się zgodnie z następującymi zasadami:

- planimetr i wykres umieszcza się na równej poziomej powierzchni w ten sposób, aby oba ramiona tworzyły kąt 90° , przy położeniu kolca planimetru w środku wykresu. Największa długość tego wykresu powinna przy tym leżeć na linii łączącej biegun z kolcem.
- punkt, dla którego rozpoczyna się obwodzenie obrysu wykresu należy wybrać tak, aby przy rozpoczęciu przesuwania kolca 5 rolka miernicza nie obracała się.
- przed rozpoczęciem i po zakończeniu planimetrowania należy odczytać wskazanie licznika planimetru. Odczyt składa się z czterech cyfr: pierwszą z nich odczytuje się na tarczce licznika 6, drugą i trzecią na rolce miernicznej 4, a czwartą na podziałce noniusza 7.
- pole wykresu A znajduje się z zależności:

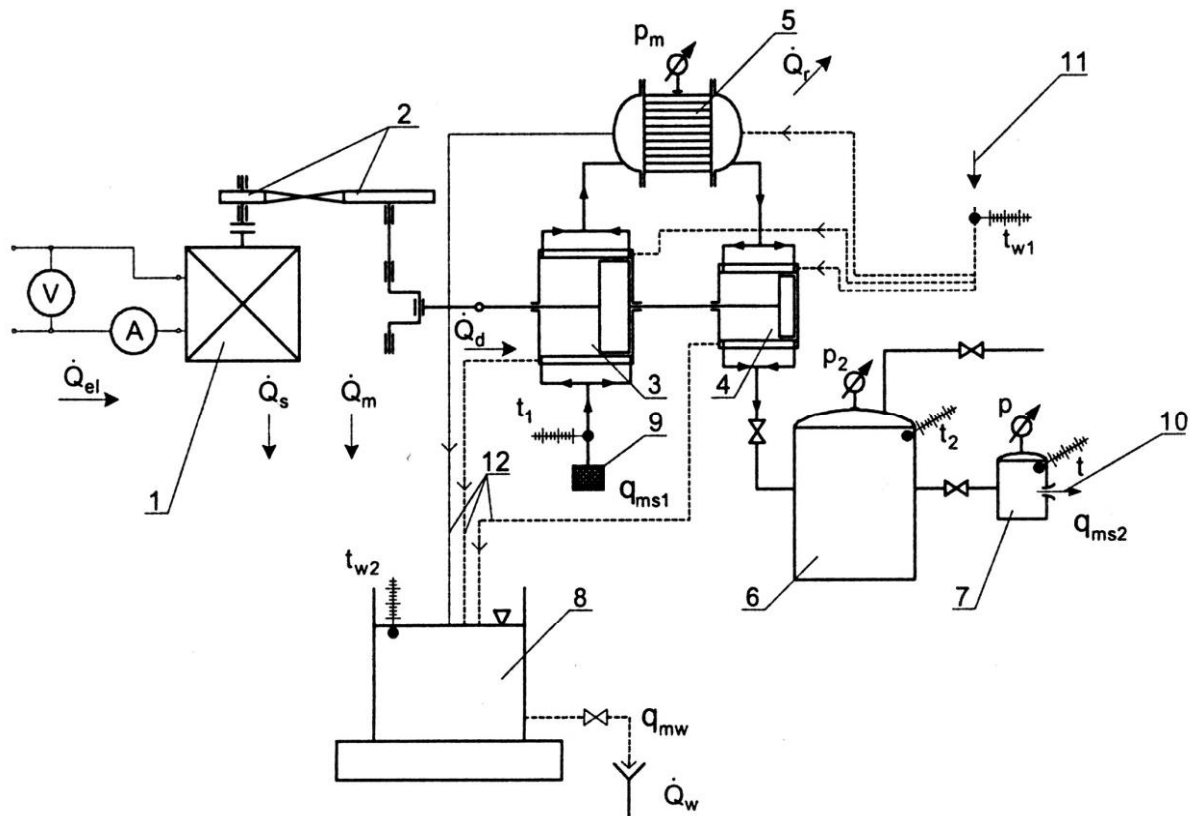
$$A = \Delta n * v, \text{ mm}^2$$

gdzie:

Δn – różnica odczytów licznika planimetru, v

– podziałka planimetru.

II. STANOWISKO POMIAROWE



Rys. 4. Schemat pomiarowo-bilansowy agregatu sprężarkowego: 1 – silnik elektryczny, 2 – przekładnia układu napędowego, 3 – cylinder NP., 4 – cylinder WP, 5 – chłodnica międzystopniowa, 6 – zbiornik (pośredni) sprężonego powietrza, 7 – zbiornik pomiarowy strumienia powietrza, 8 – zbiornik wody chłodzącej umieszczony na wadze, 9 – filtr powietrza w dopływie do sprężarki, 10 – wypływ powietrza ze zbiornika pomiarowego, 11 – kolektor doprowadzający wodę chłodzącą, 12 – odpływ podgrzanej wody chłodzącej do zbiornika pomiarowego [3]

III. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Na stanowisku pomiarowym należy wykonać następujące czynności:

- odczytać wartość napięcia U [V],
- odczytać wartość natężenia prądu I [A],
- wyznaczyć ilość obrotów silnika n w ciągu 1 minuty [obr/min],
- odczytać stałe sprężyn u indykatorów części NP i WP,
- wykonać wykresy indykatorowe stopnia nisko (NP) i wysokoprężnego (WP), strony odkorbowej (OK) i kukorbowej (KK),
- wyznaczyć pole wykresów indykatorowych (planimetrowanie) A oraz długość linii ciśnienia atmosferycznego l .

IV. OBLICZENIA

Dla danych technicznych sprężarki (tabela 1) wykonać obliczenia średniego ciśnienia indykowanego, zgodnie z poniższymi zależnościami.

Tabela 1. Parametry techniczne sprężarki tłokowej

Parametr	NP		WP	
	KK	OK	KK	OK
s, mm	250			
D, mm	250		130	
d, mm	45	40	40	-
V_0 , m ³	0,000594	0,00060	0,00015	0,00016
V_s , m ³	0,01188	0,01197	0,0030	0,00332
V_{sc} , m ³	0,02385		0,00632	

gdzie:

s - skok tłoka, D -
średnica cylindra, d -
średnica trzonu tłoka,
 V_0 - objętość przestrzeni szkodliwej,
 V_s - objętość skokowa,
 V_{sc} - objętość skokowa całkowita,
NP - część niskoprężna,
KK - strona kukorbowa,
WP - część wysokoprężna, OK
- strona odkorbowa.

Doprowadzona moc elektryczna:

$$N_{el} = 0,001 * U * I, \text{ kW}$$

Moc doprowadzona do sprężarki:

$$N_d = N_{el} * \eta_s, \text{ kW}$$

gdzie $\eta_s=0,825$ (sprawność silnika ze sprawnością przekładni pasowej wg producenta w momencie oddania sprężarki do użytku).

Średnie ciśnienie indykowane (przykładowo dla części NP strony KK):

$$P_{iNPKK} = A_{NPKK} / l_{NPKK} * u_{NPKK}$$

Moc indykowana:

$$N_i = V_s * p_{iśr} * n * 10^{-3}, \text{ kW}$$

gdzie: $p_{iśr}$ – średnie ciśnienie indykowane dla wszystkich stopni i stron sprężarki.

Całkowita moc indykowana sprężarki:

$$N_{ic} = \sum N_i, \text{ kW}$$

Sprawność sprężarki:

$$\eta = N_{ic} / N_d$$

V. ZADANIA DO WYKONANIA

- wyznaczyć sprawność sprężarki,
- opisać wykresy indykatorowe dla obu stopni i stron sprężarki.

LITERATURA

- [1] „Miernictwo energetyczne. Pomiary energetyczne maszyn i urządzeń cieplnych”, pod red. M. Sasiadka i K. Szymochy, Politechnika Wroclawska, Wroclaw 1974
- [2] „Energetyka cieplna. Obsługa i eksploatacja urządzeń, instalacji i sieci.”, Wydawnictwo „EUROPEX”, Kraków 2003
- [3] „Badanie maszyn i urządzeń energetycznych”, J. Stańda, J. Górecki, A. Andruszkiewicz, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Wroclaw 2004
- [4] „Miernictwo energetyczne. Pomiary podstawowych wielkości z zakresu techniki cieplnej”, pod red. A. Negrusza i M. Sasiadka, Politechnika Wroclawska, Wroclaw 1973

Ćwiczenie nr 11

Miernictwo Energetyczne

Protokół pomiarowy z dnia

DANE POMIAROWE

$U = \dots\dots\dots V,$ $I = \dots\dots\dots A,$
 $u_{NP} = \dots\dots\dots \text{mm/atm},$ $u_{WP} = \dots\dots\dots \text{mm/atm}$

$l_{NPKK} = \dots\dots\dots \text{mm}$ $l_{NPOK} = \dots\dots\dots \text{mm}$
 $l_{WPKK} = \dots\dots\dots \text{mm}$ $l_{WPOK} = \dots\dots\dots \text{mm}$

$A_{NPKK} = \dots\dots\dots \text{mm}^2$ $A_{NPKK} = \dots\dots\dots \text{mm}^2$
 $A_{NPKK} = \dots\dots\dots \text{mm}^2$ $A_{NPKK} = \dots\dots\dots \text{mm}^2$

WYNIKI OBLICZEŃ