

Grzegorz WÓLKOWYCKI, Adam DUDAR

e-mail: g.wolkowycki@doktoranci.pb.edu.pl

Zakład Techniki Ciepłej i Chłodnictwa, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, Białystok

Wyznaczanie mocy indykowanej tłokowej sprężarki chłodniczej

Wstęp

Przemiany rzeczywiste zachodzące w tłokowych maszynach ciepłych (silnikach i sprężarkach) odbiegają od teoretycznych obiegów termodynamicznych. Przyczyny tkwią w stratach, jakie towarzyszą realizacji obiegów teoretycznych. Natomiast straty są wynikiem rzeczywistych warunków pracy, różniących się od założonych teoretycznie [Butrymowicz i Dudar, 2006].

Odtworzenie rzeczywistych zmian ciśnienia, jakie zachodzą wewnątrz cylindrów maszyn tłokowych jest możliwe za pomocą przyrządów zwanych indykatorami. Rejestrują one zmiany ciśnienia zachodzące w maszynach tłokowych w funkcji przyrostów objętości i dają obraz pracy w postaci tzw. wykresu indykatorowego [Szolc, 1979]. Na jego podstawie można analizować proces sprężania (otwieranie zaworu ssącego, napełnianie cylindra, otwieranie zaworu tłocznego i tłoczenie czynnika) i takie jego charakterystyczne wielkości, jak: wykładnik przemiany, udział przestrzeni szkodliwej w napełnianiu cylindra sprężarki i straty na zaworach. Pozwala to na dokonywanie stosownej regulacji danej sprężarki.

Pomiar ciśnienia powinien być wykonywany bardzo dokładnie, ponieważ w oparciu o zarejestrowane jego zmiany dokonuje się szczegółowej analizy pracy sprężarki [Warczak, 1987].

Najbardziej uniwersalny jest wykres ciśnienia w funkcji położenia wału korbowego $p = f(\alpha)$ gdzie α – kąt obrotu wału. Wykres umożliwia wszechstronną analizę zjawisk zachodzących w cylindrze sprężarki. Należy zaznaczyć, że wykresy indykatorowe są szczególnie przydatne w analizie otwarcia zaworu tłocznego. Głównym celem ich sporządzenia jest wyznaczenie średniego ciśnienia indykowanego, określenie największego ciśnienia w procesie tłoczenia oraz identyfikacja nieprawidłowości procesu sprężania na podstawie kształtu i wzajemnego położenia poszczególnych linii przemianowych. Prawidłowa praca sprężarki ma bezpośredni wpływ na wydajność chłodniczą urządzenia, a przeprowadzenie badań samej sprężarki poprzez uzyskanie wykresu indykatorowego [Gagan i in., 2008], pozwala na wykrycie nieprawidłowości w jej pracy i zawczasu pozwala na zaplanowanie zbliżającego się remontu lub wymiany.

Podstawowym celem pracy było zbudowanie stanowiska badawczego w Laboratorium Chłodnictwa w Zakładzie Techniki Ciepłej i Chłodnictwa na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej oraz demonstracja jednej z metod pozyskiwania wykresu indykatorowego, czego efektem było określenie stopnia wyeksploatowania sprężarki na podstawie otrzymanego wykresu indykatorowego.

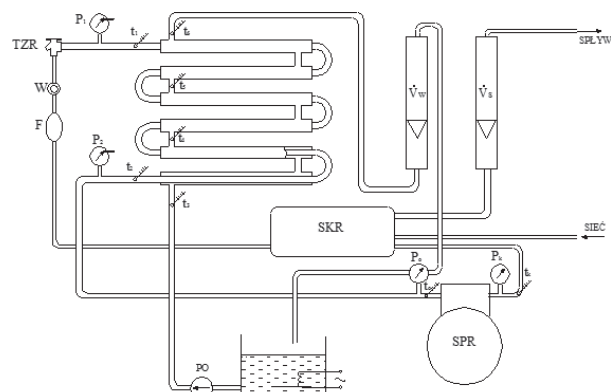
Badania doświadczalne

Stanowisko badawcze

Do budowy stanowiska badawczego wykorzystano agregat skraplający typu WF 180 pochodzący z lat 80 XX wieku. Do badań celowo wybrano sprężarkę w dużej mierze wyeksploatowaną przystosowaną do pracy z czynnikiem R12 oraz R22 (obecnie obowiązuje całkowity zakaz stosowania tych czynników w nowych urządzeniach chłodniczych). Do napędu sprężarki posłużył silnik elektryczny o mocy 1,1 kW i prędkości obrotowej 1410 obr/min.

Badana sprężarka tłokowa jest konstrukcją pionową, dwucylindrową napędzaną poprzez przekładnię pasową. W skład agregatu skraplającego wchodzi również skraplacz płaszczowo-rurowy chłodzony wodą. Tak jak sprężarka jest on przystosowany do czynników chłodniczych R12 i R22.

Maksymalna temperatura kondensacji w skraplaczu wynosi 40°C a jego maksymalna objętość 3,4 dm³. Objętość części wodnej skraplacza to 1,11 dm³, natomiast powierzchnia wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem a wodą – 1,05 m². Na rys. 1 przedstawiono schemat stanowiska doświadczalnego.



Rys. 1. Schemat blokowy agregatu skraplającego WF 180: SPR – sprężarka, SKR – skraplacz, TZR - termostatyczny zawór rozprężny, W – wziernik, F – filtr odwadniacz, Po – pompa obiegowa

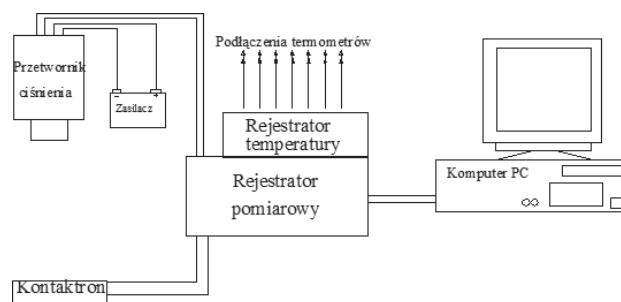
Pomiary ciśnienia

W celu dokonania pomiaru ciśnienia w cylindrze sprężarki, wykonano kanał pomiarowy w płycie zaworowej sprężarki sięgający bezpośrednio do jej cylindra i zakończony króćcem umożliwiającym przyłączenie przetwornika ciśnienia. Kanał o średnicy 4 mm powiększa przestrzeń szkodliwą sprężarki o dopuszczalną objętość 1% całej objętości cylindra. Pomiar ciśnienia został przeprowadzony za pomocą przetwornika ciśnienia szybkozmiennych. Pomiaru ciśnienia chwilowego panującego w cylindrze sprężarki dokonywano w odstępach czasowych równych 1 ms, co przy prędkości obrotowej wału korbowego sprężarki $n = 652$ obr/min daje 92 punkty pomiarowe na jeden obrót.

Wyznaczenie położenia tłoka sprężarki

W celu otrzymania prawidłowego wykresu indykatorowego należy dokładnie oznaczyć położenie tłoka. Urządzenie rejestrujące kąt obrotu wału korbowego jest jednak kosztowne.

W badaniach przyjęto uproszczenie, polegające na tym że identyfikuje się położenie wału w chwili, gdy tłok osiąga ZZP (zewewnętrzne zwrotne położenie). Do wyznaczenia tego punktu wykorzystano urządzenie zwane kontaktronem. W hermetycznie zamkniętej obudowie znajdują się dwie elektrody, które pod wpływem pola magnetycznego wytworzonego przez wirujący magnes zwierają styki i powodują zamknięcie obwodu elektrycznego, odnotowywane przez rejestrator pomiarowy. Na kole pasowym sprężarki zamocowano magnes, przy czym w takim specyficznym położeniu, w którym określa on górne położenie tłoka. Kontaktron znajdował się na statywie w odległości 4 mm od wirującego magnesu. W momencie, w którym magnes przemieszczał się przed kontaktronem, następowała sygnalizacja zetknięcia się styków i otrzymywano się pik elektryczny odczytany przez rejestrator pomiarowy. Na rys. 2. pokazano schemat ogólny systemu pomiarowego.



Rys. 2. Schemat układu akwizycji danych pomiarowych

Synchronizacja pomiaru ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego

Pomiaru ciśnienia chwilowego oraz piku wytworzonego przez kontaktron dokonywał rejestrator elektroniczny, który zapisywał w swojej pamięci, a później przekazywał do pamięci komputera wyniki w postaci minimalnych zmian napięcia. Dane te były zapisywane na dwóch osobnych kanałach pomiarowych. Znajomość miejsca położenia tłoka po rejestracji piku umożliwiła identyfikację odpowiadającego mu ciśnienia chwilowego. W ten sposób pozyskiwano się wartości ciśnienia we wspomnianych wcześniej 92 punktach pomiarowych.

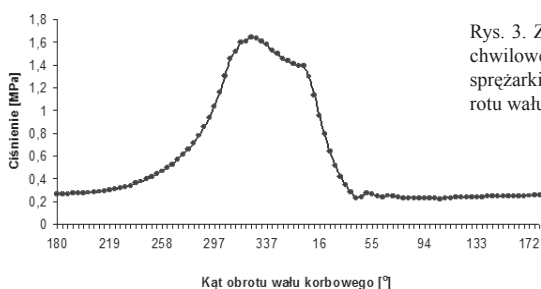
Wyniki pomiarów i ich analiza

Pomiary wykonano w ustalonym stanie cieplnym układu chłodniczego. Zależność ciśnienia wewnątrz cylindra w funkcji kąta obrotu wału korbowego rejestrowano komputerowo dla każdej serii pomiarów. Obróbka otrzymanych wyników pomiarów przy wykorzystaniu stworzonego oprogramowania pozwoliła na określenie poszczególnych parametrów charakterystycznych układu jak i samej sprężarki oraz uzyskanie wykresu indykatorowego dla danych parametrów pracy. Wykonano ponad 20 serii pomiarowych dla zmiennych parametrów pracy układu. Przykładowe wyniki jednej z serii pomiarowych zestawiono w tab. 1.

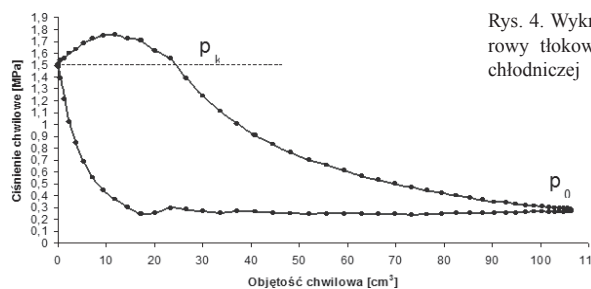
Tab. 1. Zestawienie przykładowych wyników pomiarów

Wielkość mierzona	Ozn.	Jedn.	Numer pomiaru					Wart. śr.
			1	2	3	4	5	
Temp. tłocz.	t_k	°C	72,0	72,1	72,0	72,0	72,0	72
Temp. ssania	t_o	°C	5,0	5,0	5,0	5,1	5,0	5,0
Temp. czyn. na wlocie do parownika	t_1	°C	2,31	2,33	2,31	2,30	2,31	2,31
Temp. czyn. na wylocie z parownika	t_2	°C	8,60	8,60	8,61	8,60	8,61	8,61
Temp. cieczy chłodz. na wylocie z parownika	t_3	°C	12,23	12,23	12,23	12,24	12,23	12,23
Temp. cieczy chłodzącej w parowniku	t_4	°C	13,22	13,22	13,22	13,21	13,22	13,22
	t_5	°C	16,73	16,75	16,71	16,72	16,73	16,73
Temp. cieczy chłodz. na wlocie do parownika	t_6	°C	18,53	18,53	18,51	18,52	18,51	18,52
Ciśn. tłocz.	p_k	MPa	1,6	1,6	1,59	1,6	1,61	1,6
Ciśn. ssania	p_o	MPa	0,314	0,315	0,315	0,315	0,316	0,315
Ciśn. czynnika na wlocie do parownika	p_1	MPa	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Ciśn. par czyn. na wylocie z parownika	p_2	MPa	0,48	0,47	0,48	0,48	0,49	0,48
Wydatek obj. wody chłodz. parownik	\dot{V}_w	m ³ /h	0,38	0,39	0,38	0,39	0,40	0,39
Wydatek obj. wody chłodz. skraplacz	\dot{V}_s	m ³ /h	0,245	0,250	0,250	0,250	0,250	0,25

Na podstawie pomiarów zmian ciśnienia w cylindrze sprężarki otrzymano się wykres ciśnienia w funkcji kąta obrotu (Rys. 3).



Rys. 3. Zależność ciśnienia chwilowego w cylindrze sprężarki w funkcji kąta obrotu wału korbowego



Rys. 4. Wykres indykatorowy tłokowej sprężarki chłodniczej

Zestawiając dwa ciągi wartości: ciśnienia chwilowego panującego w cylindrze i odpowiadającej mu objętości chwilowej czynnika pozyskano wykres indykatorowy przedstawiony na rys. 4.

Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych wyznaczono szereg dodatkowych parametrów pracy sprężarki i całego obiegu chłodniczego. Pozwoliły one ocenić wpływ jaki wyeksploatowana sprężarka wywiera na pracę układu chłodniczego [Wesołowski, 1980]. Wyniki badań (Tab. 2) świadczą o nienajlepszym stanie technicznym badanej wyeksploatowanej sprężarki.

Tab. 2. Zestawienie wyników obliczeń

Wielkość obliczona	Ozn.	Wartość	Jedn.
Jedn. wydajność chłodnicza	q_o	158	kJ/kg
Wydajność masowa sprężarki	\dot{m}	0,01807	kg/s
Rzecz. wydajność obj. sprężarki	\dot{V}	5,2	m ³ /h
Moc indykowana (wewnętrzna)	N_i	1305	W
Średnie ciśnienie indykowane	p_i	0,565	MPa
Teor. sprawność wewn. (indykowana)	$\eta_{i(i)}$	67,8	%
Dośw. sprawność wewn. (indykowana)	$\eta_{i(d)}$	49,9	%
Sprawność mechaniczna	η_e	90,7	%
Teor. sprawność efektywna	$\eta_{e(t)}$	61,5	%
Dośw. sprawność efektywna	$\eta_{e(d)}$	45,2	%
Teoretyczna sprawność ogólna	$\eta_{o(t)}$	50,7	%
Dośw. sprawność ogólna	$\eta_{o(d)}$	37,7	%
Teor. wsp. wydajności chłodniczej	ϵ_t	4,39	-
Indykowany wsp. wyd. chłodniczej	ϵ_i	2,19	-
Efektywny wsp. wyd. chłodniczej	ϵ_e	1,98	-
Ogólny wsp. wyd. chłodniczej	ϵ_o	1,64	-

Wnioski

Stanowisko badawcze umożliwiło wykonanie wykresu indykatorowego oraz szeregu dodatkowych pomiarów wielkości charakterystycznych dla chłodniczej sprężarki tłokowej. Przedstawiona metodologia badań, choć znana, nie była dotychczas stosowana w odniesieniu do sprężarek chłodniczych, a jedynie sprężarek powietrza.

Badania doświadczalne dały możliwość określenia procentowego zużycia sprężarki w stosunku do wyrobu nowego dzięki znajomości aktualnego stanu technicznego i osiąganych parametrów pracy.

Badania stanu ruchowego sprężarki, poprzez uzyskanie wykresu indykatorowego, dają możliwość wykrycia potencjalnego źródła zmniejszenia COP układu. Pozwalają też na określenie terminarza przeglądów technicznych sprężarki i umożliwiają przygotowanie zbliżającego się remontu lub wymiany sprężarki.

LITERATURA

Butrymowicz D., Dudar A., 2006. Ocena strat dławienia w urządzeniach chłodniczych sprężarkowych dla naturalnych czynników chłodniczych. Konferencja naukowo-techniczna – XXXVIII Dni Chłodnictwa, Poznań-Rosnówko (12.2013) <http://www.klimatyzacja.pl/chlodnictwo/ocena-strat-dlawienia-w-urazdzeniach-chlodniczych-sprezarkowych-dla-naturalnych-czynnikow-chlodniczych.pdf>

Gagan J., Butrymowicz D., Dudar A., 2008. LPA – metoda poprawy efektywności energetycznej urządzeń chłodniczych. *Chłodnictwo i Klimatyzacja*, nr 5, 24-26

Szolec T., 1979. *Pracownia ciepłno-chemiczna*. WSiP, Warszawa

Warczak W., 1987. *Sprężarki ziemnicze*. WNT, Warszawa

Wesołowski A., 1980. *Urządzenia chłodnicze i kriogeniczne oraz ich pomiaru cieplne*. WNT, Warszawa