

KOMPUTEROWO WSPOMAGANE STANOWISKO LABORATORYJNE DO BADANIA WPŁYWU NIESPRAWNOŚCI NA WYBRANE PARAMETRY PRACY SPRĘŻARKI TŁOKOWEJ

Streszczenie

W artykule przedstawiono stanowisko laboratoryjne do badania wpływu niesprawności na wybrane parametry pracy sprężarki tłokowej. Następnie opisano zastosowane na stanowisku czujniki ciśnienia i temperatury sprężanego gazu oraz czujnik pozycji kątowej wału sprężarki. W dalszej części artykułu przedstawiono oprogramowanie diagnostyczne wspomagające badanie wpływu symulowanych niesprawności. Program ten umożliwi rejestrację zarejestrowanego przebiegu ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego i objętości skokowej sprężarki tłokowej. Możliwe jest również porównywanie przebiegów dla różnych przypadków oraz obliczenie przy pomocy metody całkowania numerycznego pola powierzchni zajmowanego wykresu. W ostatniej części opracowania przedstawiono przykładowe wykresy indykatorowe sprężarki w stanie sprawnym, z którym porównywane były dla symulowanych uszkodzeń zaworu ssącego sprężarki oraz zaworu tłocznego wraz ze zwiększeniem oporów przepływu na ssaniu. Wykonano również zwiększanie przestrzeni szkodliwej w sprężarce i jej wpływ na wydajność sprężarki.

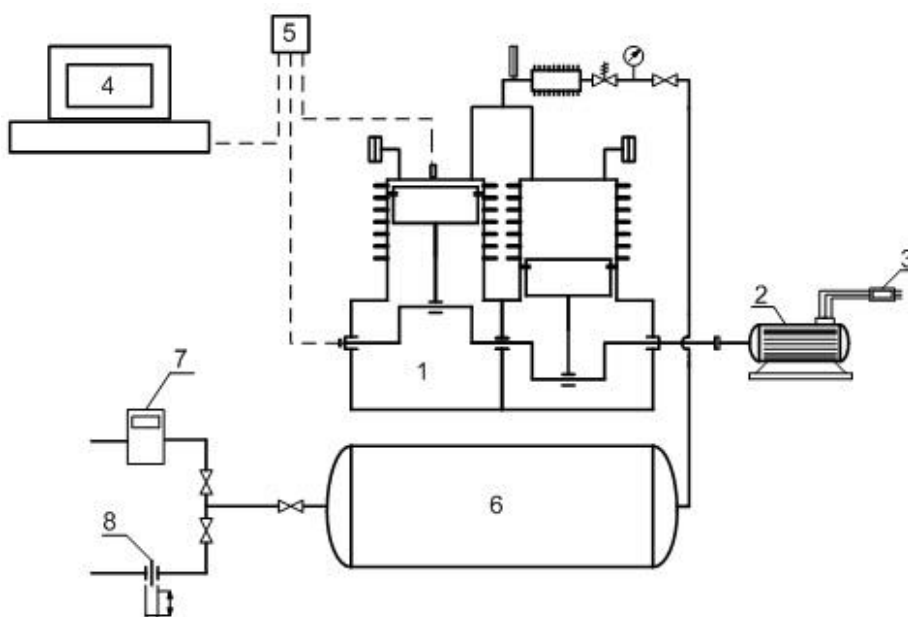
WSTĘP

W laboratorium Maszyn i Urządzeń Okrętowych opracowane zostało stanowisko do badania wpływu niesprawności na parametry pracy sprężarki tłokowej. Sprężarka ta należy do najstarszych i najczęściej spotykanych konstrukcji. Odpowiednie oprzyrządowanie sprężarki umożliwia symulację najczęściej spotykanych w praktyce eksploatacyjnej niesprawności i regulację wydajności sprężarki tłokowej. Stanowisko badawcze wyposażone jest także w komputerowy system diagnostyczny umożliwiający akwizycję, przetwarzanie oraz wizualizację sygnałów. Za pomocą tego oprogramowania można wykonać wykresy indykatorowe przedstawiające zmiany ciśnienia w cylindrze sprężarki dla różnych niesprawności i porównanie ich z wykresami indykatorowymi wykonanymi dla sprężarki w stanie sprawnym [1, 4].

1. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie laboratoryjne stanowisko badawcze. Głównym elementem stanowiska jest jedno-stopniowa (dwucylindrowa) sprężarka tłokowa powietrza o rzędom układzie cylindrów, smarowanej rozbryzgowo i chłodzonej powietrzem.

Zaliczana jest do grupy sprężarek wyporowych, czyli takich w których zwiększenie ciśnienia odbywa się poprzez zmniejszenie jego objętości. Sprężarka stosowana jest między innymi do celów gospodarczych zarówno w zastosowaniach lądowych, jak i morskich. Układ napędowy sprężarki stanowi silnik elektryczny prądu przemiennego, który przekazuje napęd na układ tłokowo-korbowy za pomocą przekładni pasowej. Powietrze po sprężeniu przechodzi przez odolejacz do zbiornika. Ze zbiornika może być ono kierowane



Rys. 1. Schemat laboratoryjnego stanowiska badawczego: 1 - dwucylindrowa sprężarka tłokowa, 2 - silnik elektryczny, 3 - licznik energii elektrycznej, 4 - komputer, 5 - układ pomiarowy, 6 - zbiornik powietrza, 7 - gazomierz, 8 - kryza pomiarowa

albo do gazomierza, albo do kryzy dławiącej w celu wyznaczenia chwilowej rzeczywistej wydajności sprężarki. Takie parametry jak maksymalne ciśnienie sprężania, objętość cylindra, temperatura sprężanego gazu oraz prędkość obrotową sprężarki poprzez układ pomiarowy przesyła się do komputera z odpowiednim oprogramowaniem diagnostycznym.

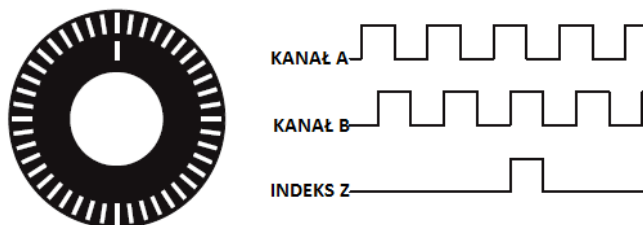
1.1. Czujniki do pomiaru ciśnienia i temperatury sprężanego gazu

W celu dokonania pomiaru chwilowej wartości temperatury w cylindrze sprężarki wykorzystany został uniwersalny czujnik temperatury PTC-G z gwintem, którego budowa oraz jego umiejscowienie w sprężarce pokazane są na rysunku 2.

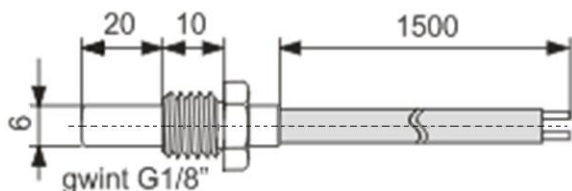
Do pomiaru szybkozmiennych wartości ciśnień w głowicy zastosowany został czujnik ciśnienia Kistler ze wzmacniaczem piezorezystywnym pokazany na rysunku 3. W czujniku tym dwie płytki kwarcu o przekroju kołowym są umieszczone między stalowymi przekładkami i znajdują się w cienkościennej sprężystej tulei. Na zewnątrz tej tulei przepływa strumień wody przechodzący przez wlot i wylot; strumień ten ma chłodzić otoczenie płytek kwarcowych. Siła nacisku F jest przekazywana na tuleję za pomocą membrany, która jednocześnie nie przepuszcza gazu do środka przetwornika. Sygnał z czujnika jest odprowadzany przez przewód umieszczony w izolatorze.

1.2. Czujnik pozycji kątovej wału sprężarki

Układ pomiarowy został skonfigurowano tak, aby dokonywać pomiarów w kolejnych precyzyjnie wyznaczonych chwilach jednego cyklu pracy układu sprężarkowego. Podstawą wyznaczenia chwil pomiarowych jest magnetyczny przetwornik obrotowo-impulsowy (tzw. inkrementalny enkoder magnetyczny). Sygnały otrzymywane z przetwornika przedstawione są na rysunku 4.



Rys. 4. Sygnały z przetwornika obrotowo-impulsowego [3]



Rys. 2. Schemat budowy czujnika temperatury oraz jego umiejscowienie na stanowisku laboratoryjnym [6]

W przetworniku występuje 3600 impulsów na obrót zarówno na kanale A jak i B. Dodatkowo wyposażony jest w kanał Z, który informuje o wykonaniu pełnego obrotu. Kanał ten został wykorzystany jako źródło wyzwalające dla inicjacji cyklu pomiarowego. Następnie program zapamiętuje 3600 kolejnych próbek pomiarowych, przy czym źródłem zegarowym jest kanał A. W ten sposób dokonywana jest rejestracja danych pomiarowych co każdy impuls. Oznacza to, że co każdą zmianę o 0,1 stopnia obrotu wału sprężarki rejestrowane są kolejne dane. Rozdzielczość tę można jeszcze zwiększyć w sposób programowy. Inkrementalny enkoder magnetyczny pozwala rejestrować aktualne położenie wału sprężarki, a dzięki wykorzystaniu układu licznikowego, możliwy jest również pomiar prędkości obrotowej sprężarki [3, 5].

2. OPROGRAMOWANIE DIAGNOSTYCZNE

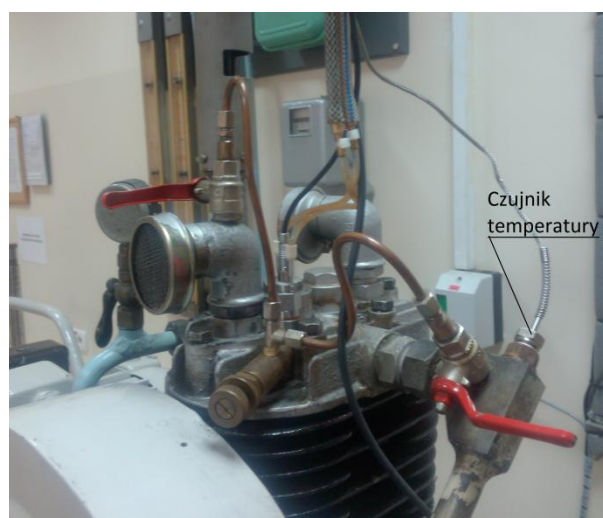
Opisywane oprogramowanie jest oprogramowaniem diagnostycznym wspomagającym badanie wpływu symulowanych niesprawności na parametry pracy sprężarki tłokowej i składa się z pięciu zakładek o tytułach:

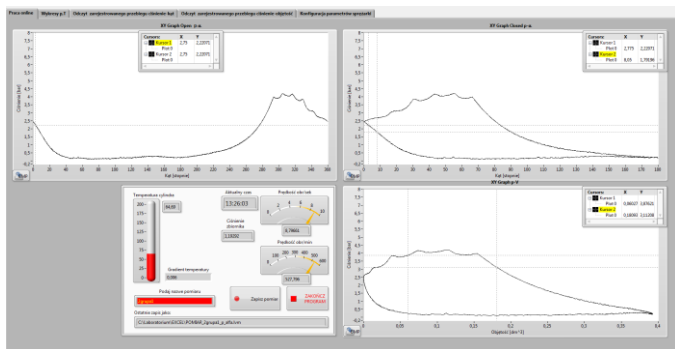
1. Praca online.
2. Wykresy ciśnień p i temperatur T .
3. Odczyt zarejestrowanego przebiegu ciśnienie-kąt.
4. Odczyt zarejestrowanego przebiegu ciśnienie-objętość.
5. Konfiguracja parametrów sprężarki.

Na rysunku 5 przedstawione jest okno główne oprogramowania diagnostycznego, w którym widoczne są trzy wykresy:

1. Wykres zależności ciśnienia w cylindrze od kąta – wykres otwarty.
2. Wykres zależności ciśnienia w cylindrze od kąta – wykres zamknięty.
3. Wykres zależności ciśnienia w cylindrze od objętości – wykres otwarty.

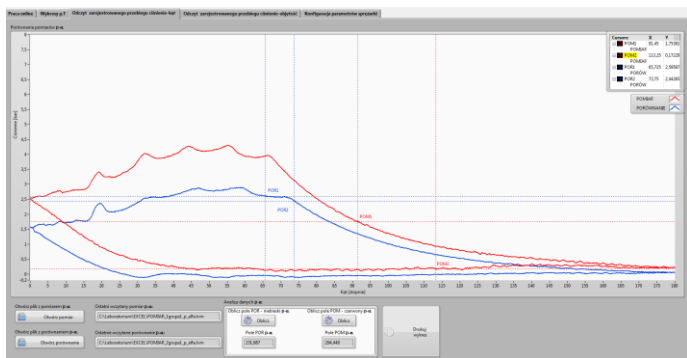
Każdy z wykresów zsynchronizowany jest z układem pomiarowym sprężarki. W przypadku braku pracy układu sprężarkowego nie będą one odświeżane. Każdy wykres posiada przycisk BMP (Bitmap) pozwalający na wykonanie zrzutu obrazu wykresu oraz kursoru umożliwiające odczyt danego położenia. W tej zakładce widoczna jest praca „oscylloskopowa” badanego układu. W prawym dolnym rogu znajdują się także informacje o temperaturze chwilowej, gradientie temperatury aktualnym czasie, czy chwilowej prędkości obrotowej.





Rys. 5. Wygląd okna głównego oprogramowania diagnostycznego w trybie pracy online

Na rysunku 6 przedstawiony został odczyt zarejestrowanego przebiegu ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego sprężarki tłokowej, przy czym przebieg dla wyższego ciśnienia maksymalnego odnosi się do sprężarki pracującej w stanie sprawnym, natomiast dla niższego ciśnienia maksymalnego do sprężarki z symulowaną niesprawnością. W opisywanym oprogramowaniu można porównywać przebiegi dla różnych przypadków oraz obliczyć przy pomocy metody całkowania numerycznego pola powierzchni zajmowanego wykresu [3].



Rys. 6. Przebieg ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego

3. PRZYKŁADWOWE WYNIKI BADAŃ

Omawiane stanowisko laboratoryjne umożliwia symulację najczęściej spotykanych w praktyce eksploatacyjnej niesprawności w pracy sprężarek tłokowych. W wyniku badań przeprowadzonych na tym stanowisku można otrzymać wykresy indykatorowe przedsta-

$$Q = 0,0039986 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\Delta p \cdot v_1} \quad [m^3/h] \quad (1)$$

wiające zmiany ciśnienia w cylindrze sprężarki w funkcji objętości skokowej (kąta obrotu wału obrotowego) pracującej w stanie sprawnym oraz z wybranymi niesprawnościami, a następnie dokonać porównania uzyskanych wykresów indykatorowych.

Stan sprawności odpowiada sytuacji, w której wszystkie elementy wchodzące w skład sprężarki pracują poprawnie, a zmianom ulega tylko maksymalne ciśnienie tłoczenia. Stan niesprawności odpowiada sytuacji, w której nieprawidłowo pracują następujące elementy: zawór ssawny (nieszczelność zaworu ssącego), zawór tłoczny (nieszczelność zaworu tłocznego) i filtr powietrza (brudny filtr powietrza). Dodatkowo bada się również zmianę wykresu sprężarki przy zwiększonej przestrzeni szkodliwej z możliwością jej regulacji [2].

Wymienione uszkodzenia można wykonać jako występujące samodzielnie lub w połączeniu, np. jednoczesne uszkodzenie zawo-

ru ssącego i tłocznego, czy też wszystkie uszkodzenia występujące równocześnie.

Wykresy indykatorowe, ciśnienia sprężania, temperaturę sprężanego powietrza oraz prędkości obrotowe sprężarki odczytuje się bezpośrednio z monitora komputera, natomiast chwilową rzeczywistą wydajność sprężarki należy wyznaczyć, używając gazomierza i stopera lub obliczyć korzystając ze wzoru (1):

gdzie:

Q - objętościowe natężenie przepływu [m³/h],

α - liczba przepływu [-],

ε - liczba ekspansji [-],

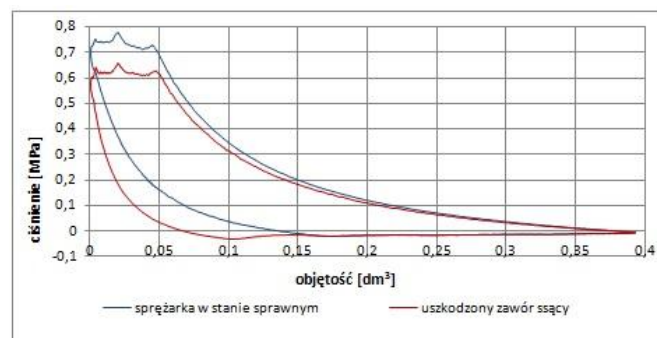
d - średnica przekroju zwężki [mm],

Δp - różnica ciśnień na zwężce [Pa],

v₁ - objętość właściwa płynu przed zwężką [m³/kg].

3.1. Symulacja uszkodzenia zaworu ssącego

Na podstawie otrzymanego przebiegu ciśnienia w pełnym cyklu pracy sprężarki z symulowaną nieszczelnością na ssaniu zauważyć, który przedstawiony jest na rysunku 7, można spadek wartości maksymalnego ciśnienia tłoczenia w stosunku do wartości, gdy sprężarka pracuje w stanie sprawnym. Sprawna sprężarka osiągała wartość ciśnienia na poziomie 0,78 MPa, natomiast z symulowanym uszkodzeniem ciśnienie maksymalne zmniejszyło się do wartości 0,65 MPa. W związku z tym, że rozprężanie gazu pozostałego w przestrzeni szkodliwej kończy się przy mniejszej objętości, wcześniej rozpoczyna się również suw ssania. Ssanie przebiega przy takim samym ciśnieniu jak w sprawnej sprężarce. Proces sprężania postępuje wolniej, ponieważ część zassanego powietrza nie jest sprężana, lecz wypychana do rurociągu ssawnego. Krzywa rozprężania jest bardziej stroma, co oznacza iż do wnętrza cylindra dostaje się powietrze z zewnątrz. Najczęściej jest to powodem uszkodzonych zaworów ssących, które tracą szczelność lub zbyt słabych sprężyn zaworowych.

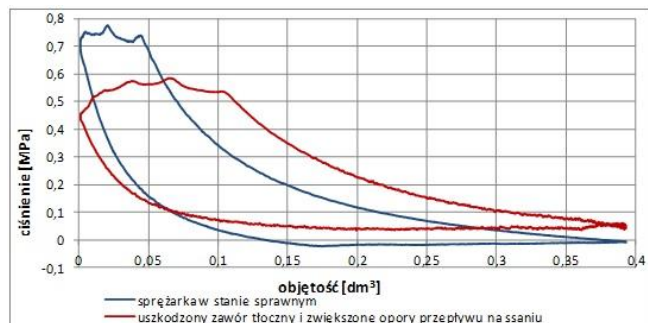


Rys. 7. Wykresy indykatorowe sprężarki w stanie sprawnym i z symulowanym uszkodzeniem zaworu ssącego sprężarki

3.2. Symulacja uszkodzenia zaworu tłocznego oraz zwiększonych oporów ssania

Przy połączeniu dwóch niesprawności, czyli nieszczelności na tłoczeniu oraz zwiększeniu oporów przepływu na ssaniu, przedstawionym na rysunku 8, nastąpił spadek maksymalnego ciśnienia tłoczenia z wartości 0,77 MPa do wartości 0,58 MPa. Z tego można wywnioskować, że połączone niesprawności powodują jeszcze większy spadek ciśnienia niż przy usterekach występujących osobno. Na wykresie przy niskim ciśnieniu widoczne są charakterystyczne dla nieszczelności na tłoczeniu, nierówności. Ciśnienie ssania jest wyższe niż w przypadku sprężarki sprawnej, lecz nieco niższe niż dla sprężarki z samą nieszczelnością na tłoczeniu. Sprężanie rozpoczyna się przy wysokim ciśnieniu 0,5 MPa i odbywa się w taki sam sposób jak przy samej nieszczelności na tłoczeniu. Tłoczenie rozpoczyna się przy niższym ciśnieniu niż w sprężarce sprawnej i

przy większej objętości gazu w cylindrze, ale pozostaje niezmiennie w porównaniu do działania sprężarki z uszkodzeniem zaworu tłocznego. Różnicę w wytłaczaniu gazu między sprężarką z nieszczelnością na tłoczeniu, a z dodatkowym oporem na ssaniu stanowi jedynie mniejsze wahanie ciśnień podczas tego cyklu. Podczas rozprężania, względem nieszczelności na tłoczeniu, dodanie oporów przepływu nie zmieniło przebiegu charakterystyki.

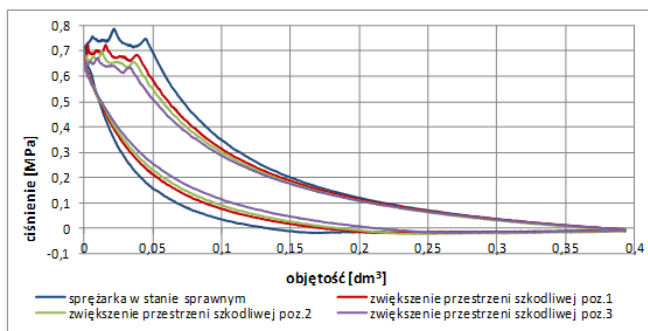


Rys. 8. Wykresy indykatorkowe sprężarki w stanie sprawnym oraz z symulowanym uszkodzeniem zaworu tłocznego i zwiększeniem oporów przepływu na ssaniu występujących jednocześnie

3.3. Symulacja zwiększania przestrzeni szkodliwej w sprężarce

Wpływ zwiększenia przestrzeni szkodliwej przedstawiają wykresy indykatorkowe na rysunku 9. Wykonano je dla sprężarki z konstrukcyjnie założoną objętością szkodliwą oraz z symulowanymi coraz większymi objętościami szkodliwymi, odpowiednio: najmniejsza objętość szkodliwa – pozycja 1, średnia objętość szkodliwa – pozycja 2 i największa objętość szkodliwa – pozycja 3.

Zwiększanie przestrzeni szkodliwej pociąga za sobą zmniejszenie wydajności rzeczywistej sprężarki, im większa ona będzie, tym większy spadek nastąpi. Sprężarka dla przestrzeni szkodliwej w poz. 1 miała wydajność 12,8 m³/h, dla poz.2 - 12,6 m³/h, dla poz.3 - 12,0 m³/h, w porównaniu z wydajnością sprężarki wynoszącej 13,2 m³/h dla normalnie występującej przestrzeni szkodliwej. Wraz ze zwiększaniem przestrzeni szkodliwej rozprężanie gazu w niej zawartego trwa coraz dłużej, ograniczając tym samym ilość powietrza zasasanego do cylindra. Ponieważ w cylindrze znajduje się mniej powietrza proces sprężania zachodzi wolniej, a ciśnienie tłoczenia zmniejsza się.



Rys. 9. Wykresy indykatorkowe sprężarki w stanie sprawnym oraz z symulowanym coraz większym zwiększeniem przestrzeni szkodliwej (poz.1, poz.2, poz.3)

W przypadku maksymalnego ciśnienia tłoczenia, sprężarka z największą przestrzenią szkodliwą osiągnęła jedynie ciśnienie 0,67 MPa, średnia 0,69 MPa, z najmniejszą przestrzenią szkodliwą ciśnienie wyniosło 0,72 MPa. Długość procesu wytłaczania również zależy od wielkości przestrzeni szkodliwej. Ponieważ przy większej jej objętości do cylindra dostało się mniej powietrza, dlatego też

mniejsza jego ilość zostanie wytłoczona, skracając tym samym czas wytłaczania.

PODSUMOWANIE

Stanowisko laboratoryjne sprężarki tłokowej zostało zbudowane w celu badania wpływu wybranych niesprawności na wybrane parametry pracy. Zostało ono odpowiednio oprzyrządowane w wymagane czujniki i zmodernizowane, aby możliwe było badanie diagnostyczne stanu technicznego sprężarki. Wprowadzone zmiany pozwalają na symulację najczęściej występujących w praktyce eksploatacyjnej uszkodzeń sprężarki, do których między innymi należą uszkodzony zawór ssący i tłoczny, czy też zanieczyszczony filtr powietrza. Sprężarka współpracuje z oprogramowaniem diagnostycznym, które pozwala w czasie rzeczywistym na obserwację nieprawidłowości w jej pracy na ekranie monitora i poznanie objawów poszczególnych niesprawności na wykresach indykatorkowych. Aby prawidłowo wykryć uszkodzenia to otrzymane dane do analizy uzupełnione są o dodatkowe parametry, takie jak temperatura sprężanego gazu, czy prędkość obrotowa wału sprężarki. Oprogramowanie diagnostyczne poprzez możliwość nałożenia na siebie wykresów indykatorkowych zdecydowanie ułatwia analizę diagnostyczną sprężarki i umożliwia na podstawie ich rozpoznawanie objawów wskazujących na wystąpienie niesprawności.

BIBLIOGRAFIA

1. Gawędzki W., Dziekan A., Hajto P., *Stanowisko laboratoryjne do wyznaczania parametrów termodynamicznych sprężarki tłokowej*, Pomiar, Automatyka, Kontrola 2008, R. 54, nr 12.
2. Młynarczak A., *Mechanizmy i urządzenia okrętowe. Ćwiczenia laboratoryjne*. Akademia Morska, Gdynia 2010.
3. Koliński T., Przystalski Ł., *Instrukcja obsługi stanowiska i oprogramowania do badania sprężarki tłokowej*. Enamor, Gdynia 2013.
4. Pudlik W., *Termodynamika, Laboratorium II, Badania Maszyn i Urządzeń*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1991.
5. <http://enamor.pl>
6. <http://termoplus.pl/produkt/czujniki-i-przetworniki/ptc-g>

COMPUTER AIDED LABORATORY STAND TO RESEARCH THE EFFECT OF INEFFICIENT ON SELECTED PARAMETERS OF A RECIPROCATING AIR COMPRESSOR

Abstract

In the article the laboratory stand to research the effect of inefficient on selected parameters of a reciprocating air compressor was presented. Then, pressure and temperature sensors of the compressed gas and the angular position sensor of the shaft compressors used on the test are described. In the next section diagnostic software supporting the study of the effects of simulated malfunction was presented. This program allows the registration of the pressure course vs. crank angle and stroke volume of reciprocating air compressor. It is

also possible to compare courses for different cases and calculation using the method of numerical integration of the surface area of the resulting graph. In the last part of the study sample compressor indicator diagrams for an efficient state are shown. Diagrams were compared to the simulated damage to the compressor suction valve and the discharge valve with increased flow resistance on the suction side. Increasing the clearance pocket of a compressor and its impact on the performance of the compressor have also been made.

Autor:

Dr inż. **Rafał Krakowski** – Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny, Katedra Siłowni Okrętowych, e-mail: r.krakowski@am.gdynia.pl