

Inż. SEBASTIAN DZIDA  
Prof. dr hab. inż. ZYGFRYD DOMACHOWSKI  
Dr hab. inż. MAREK DZIDA  
Politechnika Gdańska  
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa



## STOISKO DYDAKTYCZNE SPRĘŻARKI WIRNIKOWEJ DO BADAŃ CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH I DYNAMICZNYCH

### STRESZCZENIE

Przedstawiono stoisko badawczo-dydaktyczne sprężarki wirnikowej do badań charakterystyk statycznych i dynamicznych. Podano założenia projektowe oraz opis stanowiska. Dołączono przykłady pomiarów charakterystyk statycznych i dynamicznych sprężarki wirnikowej.

### 1. Wstęp

Stoisko sprężarki wirnikowej służy do celów dydaktycznych i badawczych w Katedrze Automatyki Okrętowej i Napędów Turbinowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Zostało ono zaprojektowane i wykonane w ramach badań statutowych jako praca dyplomowa inżynierska.

Wykonuje się na nim pomiary charakterystyk statycznych i dynamicznych sprężarki.

### 2. Projekt stanowiska dydaktyczno-badawczego

Podstawowym celem przy projektowaniu stanowiska była możliwość wyznaczenia charakterystyki statycznej sprężarki wirnikowej. Przyjęto, że stanowisko powinno zajmować względnie mało przestrzeni, być bezpieczne w użyciu, a także umożliwić podłączenie dodatkowo innej niż zastosowana na stoisku aparatura pomiarowa.

Założono, że stanowisko sprężarki będzie oprzyrządowane w system pomiarowo-rejestrujący pozwalający automatycznie dokonywać pomiarów, zarówno charakterystyki statycznej dla stałych szybkości obrotowych przy zmiennej charakterystyce rurociągu jak i charakterystyki statycznej sprężarki dla stałego otwarcia rurociągu tłoczącego, a zmiennej prędkości kątowej wału sprężarki. Dodatkowo na stoisku powinna istnieć możliwość pomiaru charakterystyk dynamicznych przy wymuszeniu: szybkością obrotową sprężarki lub otwarciem zaworu na tłoczeniu sprężarki.

Podstawowymi wielkościami charakteryzującymi pracę sprężarki są, [1], rys.1:

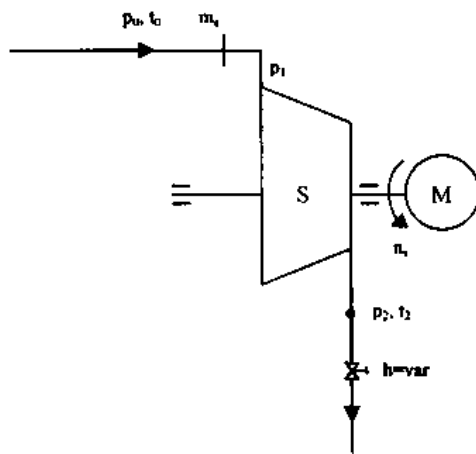
- ciśnienie  $p_1$  – mierzone na ssaniu sprężarki;
- temperatura  $t_1$  – mierzona na ssaniu sprężarki;
- ciśnienie  $p_2$  – mierzone na tłoczeniu sprężarki;
- temperatura  $t_2$  – mierzona na tłoczeniu sprężarki;
- strumień masy  $m_s$  lub objętości  $V_s$  na wejściu do sprężarki;
- szybkość obrotowa wału sprężarki  $n_s$ ;

Wymienione wielkości są wzajemnie powiązane, a związki te tworzą charakterystyki statyczne sprężarki.

Pomiarowi podlega jeszcze położenie zaworu dławiącego  $h$  na rurociągu tłoczącym sprężarki.

### 2.1. Projekt stanowiska badawczego

Badana sprężarka odznacza się małymi wymiarami, jest jednostopniowa, promieniowa, napędzana silnikiem elektrycznym o małej mocy, nie wymaga typowego „stacjonarnego” podłoża.



Rys. 1. Stoisko badawcze sprężarki wirnikowej (schemat ideowy)

Zastosowano sprężarkę promieniową jednostopniową (wentylator) Malborskiej Fabryki Wentylatorów Mawent S.A., typu WPW-6,3. Sprężarka jest dostarczona z silnikiem elektrycznym prądu zmiennego, rys. 2.

Do sprężarki dobudowano dwa rurociągi (rys. 1):

- ssący, na którym umieszczono miernik strumienia zasysanego powietrza,  $m_s$ , oraz miernik ciśnienia powietrza przed sprężarką.
- tłoczący na którym umieszczono zawór dławiący oraz punkty pomiarowe temperatury  $t_2$  i ciśnienia  $p_2$  powietrza za sprężarką.

Do rejestracji wyników pomiarów przystosowano kartę pomiarową, współpracującą z komputerem osobistym, umożliwiającą zapis mierzonych wielkości na dysk twardy komputera.

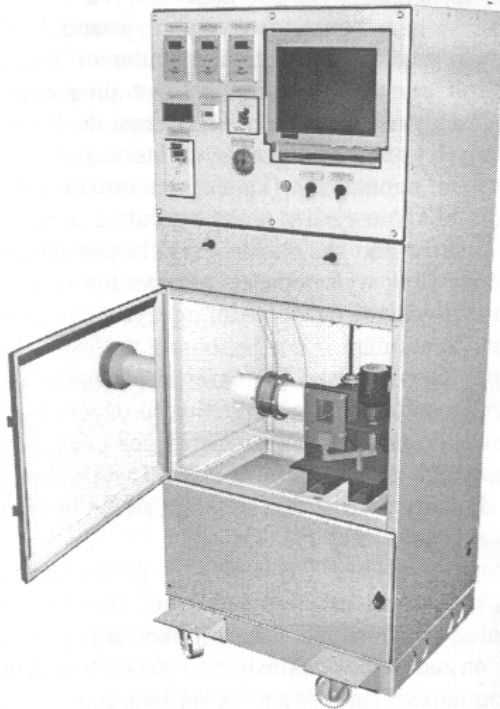
Sterowanie zaworem dławiącym następuje z klawiatury komputera poprzez kartę pomiarową.

Otwarcie zaworu odbywa się płynnie w całym zakresie, od całkowicie otwartego do zamkniętego. Sterowanie szybkością kątową sprężarki odbywa się z użyciem przemiennika częstotliwości, płynnie od 0 do szybkości maksymalnej.

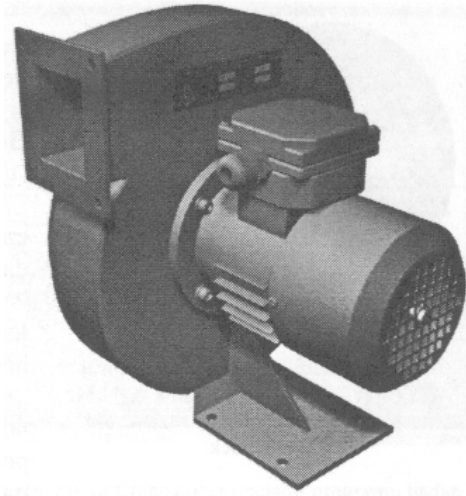
Małe wymiary sprężarki umożliwiły zastosowanie do budowy stanowiska badawczego szafy rozdzielczej firmy Cubic (rys 3).

### 2.2. Dobór aparatury pomiarowej i rejestrującej, rys. 4.1-4.4

Regulację szybkości obrotowej oraz zasilanie silnika elektrycznego uzyskano przez zastosowanie przemiennika częstotliwości (rys. 4.3), zaś dławienie czynnika po stronie tłoczącej odbywa się przez specjalnie zaprojektowany zawór (rys. 4.4). Do napędu zaworu zastosowano silownik elektryczny sterowany przez komputer, a położenie trzpienia zaworu wskazuje przeskalowany woltomierz. Czujniki ciśnienia (rys. 4.1) wykorzystano w celu pomiaru ciśnienia na ssaniu  $p_1$  i tłoczeniu  $p_2$  sprężarki. Ten sam czujnik użyto także do pomiaru różnicy ciśnienia  $\Delta p$  na zwężce pomiarowej strumienia powietrza, zaprojektowanej zgodnie z normą [2]. Ciśnienie atmosferyczne mierzy barometr wskazówkowy. Pomiar temperatury otoczenia  $t_1$  mierzono za pomocą czujnika fabrycznie wmontowanego w terminal zaciskowy karty pomiarowej. Do pomiaru temperatury czynnika na rurociągu tłoczącym  $t_2$ , użyto czujnika temperatury, który został wyposażony w oddzielny wyświetlacz. Pomiar szybkości obrotowej wału sprężarki,  $n_s$ , wykonywano miernikiem obrotowo-impulsowym, rys. 4.2. Ze względu na prostokątny sygnał wyjściowy z czujnika szybkości, zaprojektowano układ mikroprocesorów, konwertujący go na sygnał napięciowy, który przesłany na wyświetlacz szybkości obrotowej, wskazuje aktualną wartość.



Rys.3. Stanowisko pomiarowe sprężarki



Rys.2. Sprężarka promieniowa jednostopniowa WPW-6,3, moc 90 W,  $n = 2820$  obr/min, przyrost ciśnienia  $\Delta p_{\max} = 780$  Pa

W celu uniknięcia stosowania różnych napięć zasilających większość urządzeń zasilana jest (poprzez transformator) prądem przemiennym o napięciu 24V.

Sygnały wyjściowe z czujników i urządzeń pomiarowych są podłączone do terminalu zaciskowego, który jest integralną częścią

karty pomiarowej. Połączenie terminalu z kartą odbywa się za pomocą dołączonego 40 pinowego kabla DB-37. Dalsza obróbka danych odbywa się w komputerze.

### 3. Opracowanie programu badań sprężarki

Na stoisku badawczym sprężarki wirnikowej można wykonywać następujące pomiary:

A) charakterystyk statycznych:

– sprężarki, dla stałej szybkości obrotowej wału sprężarki i różnych otwarć zaworu dławiącego na wylocie sprężarki,

– rurociągu, dla stałego otwarcia zaworu dławiącego i zmiennej szybkości obrotowej wału sprężarki,

B) charakterystyk dynamicznych sprężarki wirnikowej.

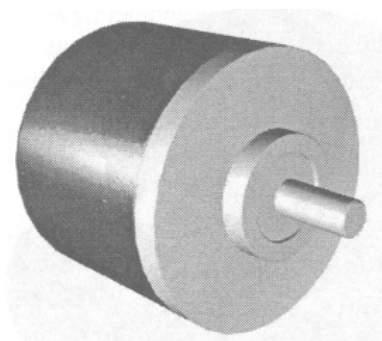
Na stoisku badawczym możemy w sposób płynny zadawać zmiany:

– szybkości obrotowej wału sprężarki, na przetworniku częstotliwości,

– powierzchni przepływu przez zawór dławiący (jednoznacznie określonej położeniem zaworu  $h$ , sterowanym napięciem podawanym z komputera).



Rys.4.1. Czujnik ciśnienia DMD, zakres pomiarowy 0 ... 100, 0 ... 500, 0 ... 1000 Pa



Rys. 4.2. Miernik szybkości obrotowej MOS 100/826/B/K, maksymalna szybkość obrotowa 5000 obr/min, rozdzielczość 100 działek



Rys. 4.3. Przeмиennik częstotliwości AMDS-0002/RN223, zasilanie 220 VAC, napięcie wyjściowe 3x220V, moc 400 W, regulacja płynna częstotliwości

Do rejestracji wyników pomiarowych i sterowania na stoisku badawczym wykorzystano kartę pomiarową współpracującą z komputerem osobistym. Karta pomiarowa sterowana jest programem **Genie**, służącym również do przetwarzania i rejestracji danych pomiarowych na komputerze [3].

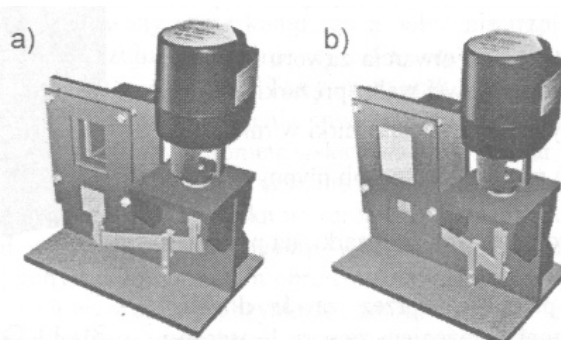
System pomiarowy (kartę pomiarową) połączono torami kablowymi z poszczególnymi przyrządami pomiarowymi. Wszystkie czujniki pomiarowe wyposażone są w wyświetlacze cyfrowe lub wychyłowe, umożliwiające bezpośredni odczyt z czujnika, bez użycia komputera.

Dodatkowo stoisko pomiarowe zaprojektowano w ten sposób, że istnieje możliwość użycia karty pomiarowej do podłączenia zewnętrznych czujników nie związanych ze stoiskiem. Wejścia i wyjścia analogowe do karty zewnętrzne znajdują się na bocznej ścianie szafy sterującej, rys. 3.

Program **Genie** (rejestracji i przetwarzania danych) umożliwia pomiary wielkości chwilowych jak również uśrednionych. Czas próbkowania pomiarów można zadawać w zakresie od 1 ms do 9 godzin. Dane pomiarowe zapisywane są na twardym dysku w postaci pliku tekstowego i mogą być przetwarzane w dowolnym programie. Do przestawienia graficznego badanych charakterystyk wykorzystano program **Microsoft Excel**.

Badania na stoisku wykonuje się według następujących procedur:

- połączenia zasilania stoiska z siecią elektryczną ~220V AC,
- włączenie włącznika głównego zasilania na płycie czołowej pulpitu sterowniczego,
- podanie zasilania na czujniki pomiarowe i sterowanie szybkością obrotową sprężarki (przeмиennik częstotliwości) poprzez włączenie włącznika zasilania czujników pomiarowych i sprężarki.



Rys. 4.4. Zawór dławiący wraz z silownikiem w pozycji: a) otwartej, b) zamkniętej

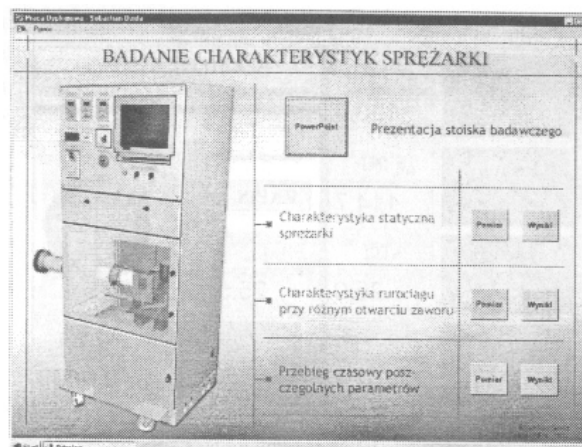
Po wykonaniu tych czynności na ekranie monitora pojawia się plansza umożliwiająca wybranie odpowiedniego programu badań sprężarki, rys. 5. W menu tej planszy dodatkowo zaprogramowano możliwość wizualnej prezentacji stoiska badawczego w **Microsoft PowerPoint**, przedstawiającą budowę i opis stoiska.

### 3.1. Pomiar charakterystyki statycznej sprężarki

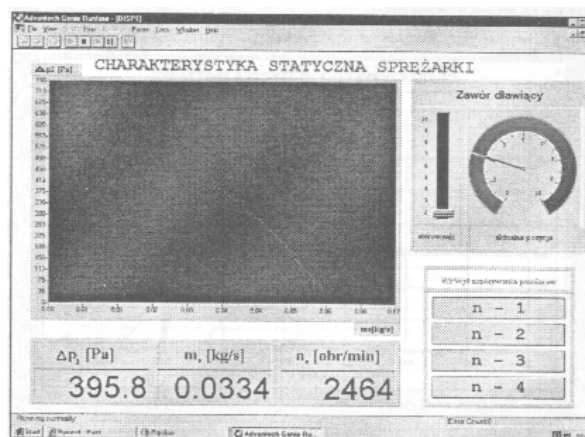
W tym programie istnieje możliwość wyznaczania charakterystyki sprężarki dla stałej szybkości obrotowej wału, przy zmiennym przekroju przepływu zaworu dławiącego na wylocie sprężarki.

Po wyborze tego programu badań pojawiają się dwie opcje: dokonanie pomiarów charakterystyk statycznych sprężarki (przycisk „Pomiar”) lub przedstawienie wykresów zmierzonych charakterystyk z użyciem arkusza Excel (przycisk „Wyniki”), rys 5.

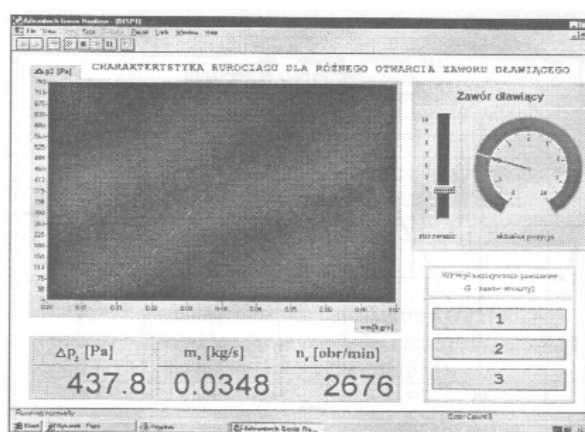
W przypadku włączenia przycisku „Pomiar” ukazuje się na ekranie plansza programu **Genie** przedstawiona na rys. 6. Charakterystyki sprężarki wykonuje się, zadając na przemienniku częstotliwości stałą szybkość wału sprężarki, przy czym na przemienniku częstotliwości wartość szybkości obrotowej podana jest w hercach, natomiast na monitorze wartość ta wyświetlana jest w obr/min. Po ustaleniu szybkości obrotowej należy włączyć przycisk zapisu wyników np. **n-1** oraz przesterować suwakiem położenie zaworu dławiącego w pozycję „całkowicie otwarty” – **9 V** lub „całkowicie zamknięty” – **2 V**. Po przesterowaniu zaworu (na ekranie monitora należy śledzić położenie trzpienia zaworu) należy wyłączyć zapis.



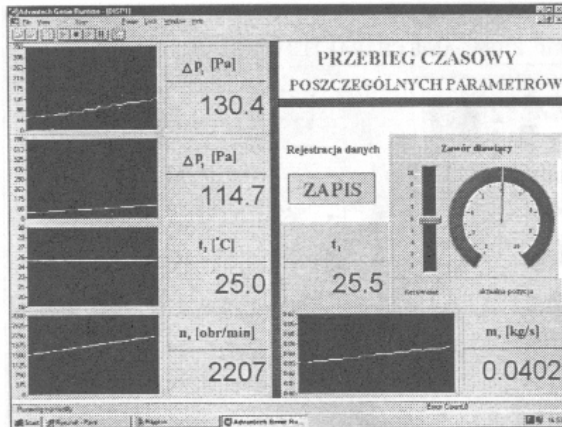
Rys. 5. Ekran monitora z menu oraz opcjami programu badań na stoisku sprężarki



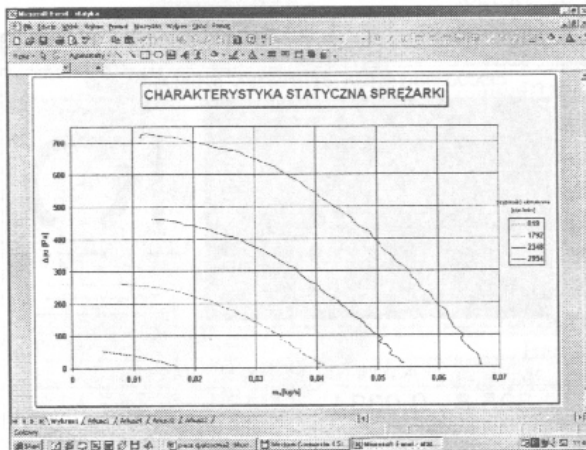
Rys. 6. Ekran monitora po uruchomieniu programu do badań charakterystyk statycznych sprężarki



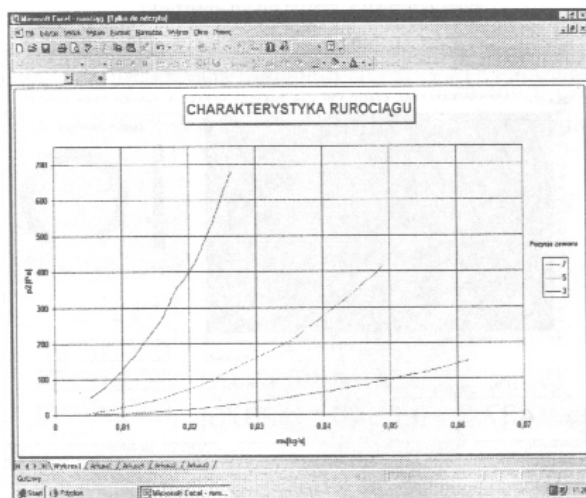
Rys. 7. Ekran programu rejestracji wyników pomiarowych charakterystyki rurociągu



Rys. 8. Ekran programu dla rejestracji wyników pomiarowych czasowych



Rys. 9. Pomierzona charakterystyka statyczna sprężarki



Rys. 10. Pomierzona charakterystyka rurociągu

Wyniki w tym czasie zapisane są w zbiorze tekstowym na twardym dysku komputera. Ruch zaworu jest bardzo powolny, stąd wykonywane charakterystyki możemy uważać za quasistatyczne. Po wykonaniu pierwszej charakterystyki należy ustalić nową szybkość obrotową sprężarki i powtórzyć pomiar charakterystyki. W czasie pomiarów na ekranie monitora jest przedstawiana wykreślenie charakterystyka sprężarki we współrzędnych  $\Delta p_2$ ,  $m_s$ . Zaprogramowano wykonanie charakterystyk statycznych sprężarki dla czterech szybkości obrotowych sprężarki (przyciski zapisu  $n-1$ ,  $n-2$ , ...  $n-4$ ).

### 3.2. Charakterystyka rurociągu przy różnych otwarciach zaworu dławiącego

Program badań umożliwi wyznaczenie charakterystyk rurociągu dla stałego otwarcia zaworu dławiącego na rurociągu tłocznym, w funkcji szybkości obrotowej wału sprężarki, rys. 7. W tym programie badań możemy wybrać również dwie opcje: pomiar charakterystyk rurociągu, przycisk „Pomiar”, lub graficzne przedstawienie badanej charakterystyki w arkuszu programu Excel, przycisk „Wyniki”, rys. 4.

### 3.3. Wyznaczenie charakterystyk czasowych

Na stoisku badawczym można rejestrować przebiegi czasowe mierzonych wielkości, rys.8. Jest to dodatkowa funkcja, która umożliwia, oprócz pomiaru charakterystyk statycznych, pomiar przebiegów czasowych mierzonych parametrów jak i umożliwia wprowadzanie wymuszeń np. szybkością obrotową sprężarki (skokowe wymuszenie), czy zmianą położenia zaworu dławiącego (wymuszenia skokowe jak i harmoniczne) lub

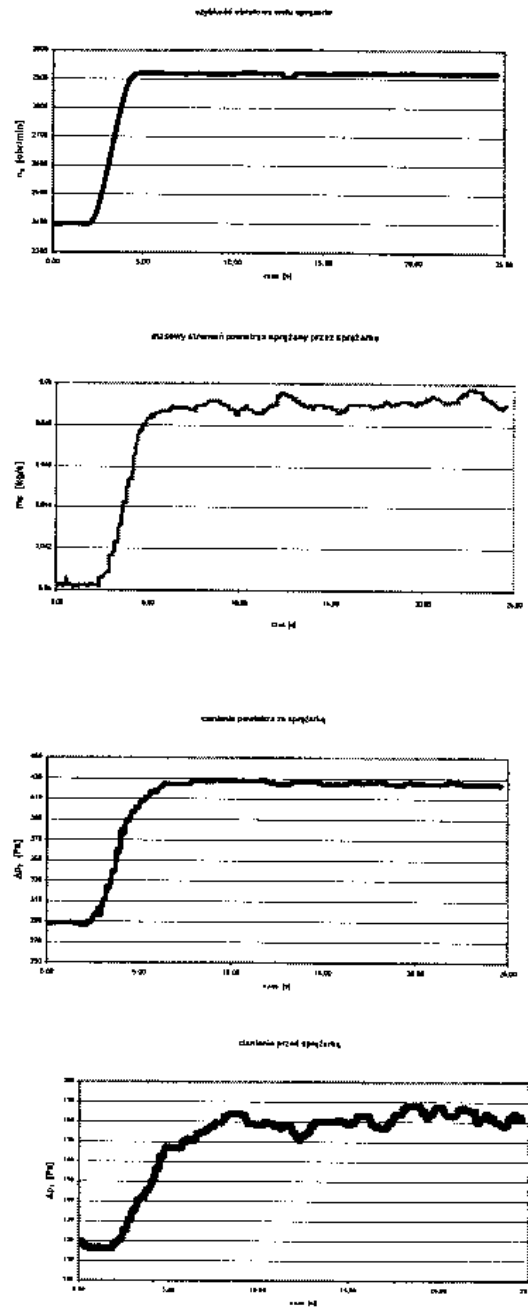
skokowe zmiany przekroju rurociągu dolotowego do sprężarki. Zarejestrowane wielkości są przenoszone do arkusza programu Excel, gdzie mogą być dowolnie przedstawione.

#### 4. Wykonanie pomiarów i wyznaczenie charakterystyk statycznych i dynamicznych sprężarki

Na podstawie przedstawionego wyżej programu badań charakterystyk sprężarki wykonano pomiary charakterystyk statycznych i dynamicznych sprężarki.

Wykonano pomiary i wyznaczono charakterystyki statyczne sprężarki dla stałej szybkości obrotowej. Po wybraniu z menu głównego opcji: Charakterystyka statyczna sprężarki, dla czterech różnych szybkości obrotowych wirnika, dokonano pomiaru charakterystyk. Po ustaleniu się zadanej szybkości obrotowej sprężarki, zarejestrowano wyniki pomiarowe, płynnie sterując zaworem odcinającym od całkowicie otwartego do całkowicie zamkniętego. Wyniki zapisane są na dysku komputera w pliku tekstowym. Po wykonaniu pomiarów charakterystyki sprężarki są obliczane w arkuszu Excel, na podstawie wcześniej zarejestrowanych pomiarów. Na rys. 9 przedstawiono wykreślnie pomierzone charakterystyki sprężarki.

Wykorzystując program pomiaru charakterystyk rurociągu wykonano jego charakterystykę statyczną. Po ustalonym otwarciu zaworu odcinającego na rurociągu tłoczącym i ustaleniu się parametrów, dokonujemy zapisu pomiarów charakterystyki, wolno zwiększając szybkość obrotową sprężarki przemiennikiem częstotliwości od szybkości minimalnej do maksymalnej. Wyniki zapisywane są do pliku tekstowego w pamięci komputera. Wykonano charakterystyki dla trzech różnych otwarć zaworu odcinającego. Graficznie przedstawione charakterystyki podano na rys. 10, wykorzystując arkusz programu Excel.



Rys. 11. Przebiegi czasowe parametrów sprężarki przy skokowej zmianie zadanej szybkości obrotowej sprężarki na przemienniku częstotliwości

Na opisanym stoisku badawczym można również badać przebiegi zmian parametrów sprężarki w czasie. Można zarejestrować przebiegi czasowe określając następujące warunki:

- a) stan pracy sprężarki przy stałym otwarciu zaworu,
- b) stan po skokowej zmianie zadanej szybkości obrotowej sprężarki na przemienniku częstotliwości (przykładowy przebieg na rys. 11),
- c) stan po harmonicznym otwarciu zaworu odcinającego.

## 5. Wnioski końcowe

Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów oraz wyznaczonych charakterystyk można stwierdzić:

- testy przeprowadzone na przedstawionym stanowisku badawczym wykazały poprawną pracę wszystkich urządzeń,

zarejestrowane charakterystyki statyczne sprężarki są zgodne z charakterystykami podawanymi przez producenta,

- zbudowane stanowisko badawcze sprężarki wirnikowej spełnia założenia projektowe, dodatkowo umożliwia pomiary dynamiczne parametrów sprężarki. W założeniu, stanowisko badawcze ma służyć pomiarom charakterystyk statycznych sprężarki wirnikowej.

## Literatura

1. Eckert B.: „Sprężarki osiowe i promieniowe”. PWT, Warszawa, 1959
2. Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych. PN-EN ISO 5167-1
3. Podręcznik programu Advantech Genie 3.03

## LABORATORY STAND OF ROTOR COMPRESSOR

### SUMMARY

The paper presents an educational laboratory stand of rotor compressor. The stand enables investigations of steady-state as well as dynamic characteristics of radial rotor compressor.