

KONCEPCJA BADAŃ WOLNOOBROTOWYCH SILNIKÓW PNEUMATYCZNYCH

Adam ILNICKI¹, Mariusz RZAŚA²

1. Politechnika Opolska
tel.: 77 449 80 71 e-mail: a.ilnicki@doktorant.po.edu.pl
2. Politechnika Opolska
tel.: 77 449 80 71 e-mail: m.rzasa@po.opole.pl

Streszczenie: Celem pracy jest opisanie koncepcji badań wolnoobrotowych silników pneumatycznych. W pracy przedstawiono budowę oraz zasadę działania trzech konstrukcji, opisano stanowisko badawcze oraz problematykę związaną z wolnoobrotowymi silnikami pneumatycznymi.

Słowa kluczowe: wolnoobrotowy silnik pneumatyczny, stanowisko badawcze, badania silników pneumatycznych.

1. WPROWADZENIE

Silniki pneumatyczne cechuje duża odporność na przeciążenia, niewielka uciążliwość dla środowiska oraz wysoki stopień bezpieczeństwa pod względem wybuchowości. W związku z tym mogą one znaleźć zastosowanie w przemyśle wydobywczym, spożywczym oraz wszędzie tam gdzie priorytetem jest bezpieczeństwo gdyż napędy pneumatyczne są urządzeniami iskrobezpiecznymi. W przemyśle spożywczym niejednokrotnie obecność pyłów powoduje, że występuje wybuchowa mieszanina na przykład podczas młócenia lub transportu i przesiewania mąki. Łatwość z jaką można odwrócić pracę silnikową na sprężarkową umożliwia zastosowanie ich w układach odzysku energii np. podczas hamowania.

Podstawową zaletą silników pneumatycznych jest ich niewielka masa w stosunku do mocy przy stosunkowo dużych dopuszczalnych przeciążeniach. Znanych jest wiele wysokoobrotowych konstrukcji silników pneumatycznych [7]. Zastosowanie tego typu silników do napędu maszyn i urządzeń niejednokrotnie wymaga stosowania przekładni redukujących prędkość obrotową. Obecnie jest stosunkowo mało konstrukcji wolnoobrotowych silników pneumatycznych. Zastosowanie wolnoobrotowych silników pneumatycznych nie wymaga stosowania takich przekładni mechanicznych, co znacznie obniża koszty wykonania i eksploatacji maszyn. Aby zapewnić odpowiednią moc silnika konieczne jest posiadanie konstrukcji silników o dużym momencie obrotowym. Celem pracy jest opracowanie koncepcji stanowiska badawczego oraz programu badań umożliwiającego określenie istotnych parametrów eksploatacyjnych dla wolnoobrotowych silników pneumatycznych. Znajomość tego rodzaju parametrów jest ważna z uwagi na potrzebę modernizacji i wprowadzania zmian konstrukcyjnych w znanych konstrukcjach wolnoobrotowych silników pneumatycznych.

W pracy przedstawiono trzy opatentowane rozwiązania konstrukcyjne silników i na ich podstawie opracowano koncepcję planu badań oraz zaprojektowano stanowisko pomiarowe.

2. WOLNOOBROTOWE SILNIKI PNEUMATYCZNE

Obecnie jest niewiele znanych konstrukcji wolnoobrotowych silników pneumatycznych. Przez silnik wolnoobrotowy rozumie się silniki, których prędkość obrotowa nie przekracza 1000 obr/min. Bardzo pożądane są konstrukcje o stosunkowo niskim stopniu skomplikowania konstrukcji, a co z tym się wiąże niewielkim koszcie wytworzenia i obsługi. Celowe jest poszukiwanie takich konstrukcji z uwagi na łatwość pozyskania i bezpiecznego przechowywania sprężonego powietrza oraz fakt, że silniki pneumatyczne są odporne na przeciążenia oraz umożliwiają szybkie wznowienie pracy po zatrzymaniu. Posiadają duży moment obrotowy oraz niską emisyjność związków szkodliwych dla środowiska. Niejednokrotnie zaletą silników pneumatycznych jest to że mogą pracować w dowolnym położeniu: poziomym lub pionowym, a także łatwo można odwrócić ich pracę z silnikowej na sprężarkową. Silniki pneumatyczne nie wytwarzają ciepła zatem mogą być stosowane w strefach zagrożonych wybuchem takich jak: kopalnie, przemysł drzewny, rolniczy i przetwórstwa spożywczego [1]. W przemyśle wydobywczym priorytetem jest bezpieczeństwo, a dostępność sprężonego powietrza w korytarzach kopalni powoduje ekonomiczne uzasadnienie ich zastosowania.

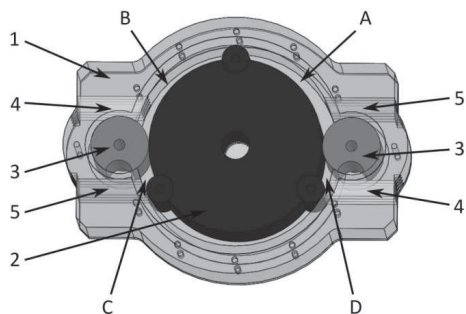
Szerokie możliwości zastosowania silników pneumatycznych uzasadniają poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych takich silników. Nowe konstrukcje silników powinny gwarantować uzyskanie wyższych sprawności. Celowe jest poszukiwanie konstrukcji wolnoobrotowych silników pneumatycznych o dużym momencie obrotowym, gdyż to rozwiązanie nie będzie wymagało stosowania wielostopniowych przekładni, dla silników o znacznej mocy mechanicznej.

W pracy skupiono się na rozwiązaniach konstrukcyjnych trzech nowatorskich wolnoobrotowych silników pneumatycznych opisanych w patentach: „Maszyna z obrotowym wirnikiem” [2], [3] i „Silnik wielocylindrowy zwłaszcza na sprężone gazy lub spalinowy wewnętrzny spalania ze zmiennym stopniem sprężania” [4]. Rozwiązania

te jak i większość konstrukcji silników pneumatycznych charakteryzuje stosunkowo niewielka sprawność. Zatem parametr ten będzie jednym z podstawowych, który decyduje o możliwości zastosowania danego silnika. W silnikach wolnoobrotowych na sprawność silnika bardzo duży wpływ ma uszczelnienie układu oraz opory tarcia.

2.1. Silnik pneumatyczny „Maszyna z obrotowym wirnikiem”

Na rysunku 1 przedstawiono budowę silnika pneumatycznego opisanego „Maszyna z obrotowym wirnikiem”. Prezentowany silnik składa się z obudowy 1, w której wykonano otwory dolotowe 5 i wylotowe 4 sprężonego powietrza. Elementem roboczym jest tłok w kształcie cylindra 2 z trzema wypustami równomiernie rozmieszczonymi na jego obwodzie. W obudowie zamontowano dwa obrotowe uszczelniacze 3, o kształcie dopasowanym do wypustów tłoka. Uszczelniacze te są ułożyskowane w pokrywach obudowy, a ich obroty są zsynchronizowane z obrotami tłoka poprzez zewnętrzne koła zębate tak, że prędkość obrotowa tłoka do prędkości obrotowej uszczelniaczy wynosi 1/3.



Rys. 1. Budowa silnika wg patentu [2]

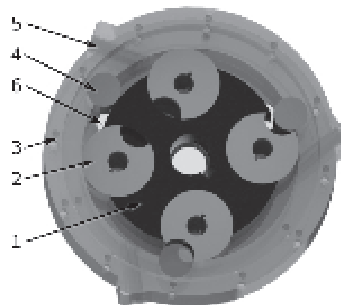
W konstrukcji silnika można wyodrębnić cztery komory, których objętość zmienia się. Dostarczając do komory A sprężone powietrze, powstaje w niej siła powodująca obrót tłoka. W tym samym czasie w komorze B następuje dekompresja przez opróżnianie komory poprzez otwór wylotowy 3. Analogicznie działają komory C i D. Praca jest zatem jednocześnie wykonywana po przeciwległych stronach wału napędowego, co ogranicza siły zginające wał silnika.

2.2. Silnik pneumatyczny „Maszyna z obrotowym wirnikiem”

Rysunek 2 przedstawia budowę silnika pneumatycznego o konstrukcji opisanej w „Maszyna z obrotowym wirnikiem”. Jest to zmodyfikowana konstrukcja rozwiązania przedstawionego w punkcie 2.1. Tak samo posiada ona otwory dolotowe 5 oraz wylotowe 6, jednak są one nieco inaczej rozmieszczone. Modyfikacja polega na tym, że obrotowe uszczelniacze 2 zamontowano w konstrukcji tłoka, a nie jak poprzednio w obudowie. Ponadto nieruchome wypusty tłoka zastąpiono obracającymi się rolkami 4. Rozwiązanie to powoduje zmniejszenie oporów ruchu poprzez zastosowanie większej liczby elementów toczyńnych. Tego typu rozwiązanie ogranicza znacząco potrzebę smarowania silnika.

Rozwiązania przedstawione w pkt. 2.1 i 2.2 oparte są na zasadzie wirującego tłoka podobnie jak to ma miejsce w

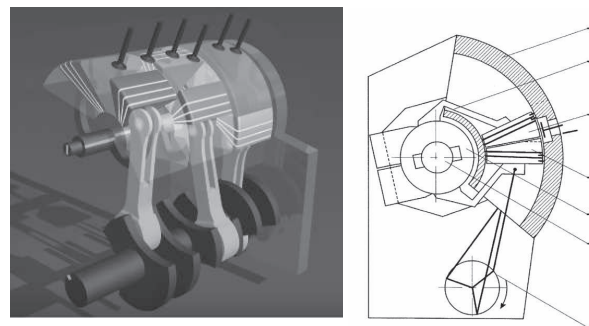
silnikach przepływowych, jednak sposób uszczelnienia wirników z powierzchnią cylindra stanowią nowatorskie rozwiązanie. Ponieważ na stopień uszczelnienia nie ma w nich wpływu siła odśrodkowa, stąd mogą one mieć zastosowanie jako silniki wolnoobrotowe.



Rys. 2. Budowa silnika wg patentu [3]

2.3. Silnik pneumatyczny „Silnik wielocylindrowy zwłaszcza na sprężone gazy lub spalinowy wewnętrzny spalania ze zmiennym stopniem sprężania”

Odmienne rozwiązanie opisano w patencie nr 216801 (rys. 3). Jego zasada działania jest zbliżona do silnika dwusuwowego. Zastosowano w nim wahadłowe tłoki. Tłok główny 1 i pomocniczy 2. Tłoki pracują parami, wykonując przeciwsobny ruch w wycinkach toroidalnych cylindrów. W cylindrach tworzy się wspólna dla dwóch tłoków komora sprężania o zmiennej objętości. Tłok pomocniczy 2 jest zsynchronizowany ze swoimi odpowiednikami w kolejnych cylindrach za pomocą mechanizmu 7. Mechanizm ten składa się z wałka, dwóch tulei oraz łańcuchów drabinkowych. Tłoki główne 1 i tłoki pomocnicze 2 zamocowane są bezpośrednio na pierścieniach 4 za pomocą łącznika 3. Cylindry zamyka głowica 5, wyposażona w odpowiedni układ zaworów. Tłoki główne 1 połączone są z wałem korbowym 6 poprzez sworzeń tłokowy i korbowód.



Rys. 3. Budowa silnika wg patentu [4]

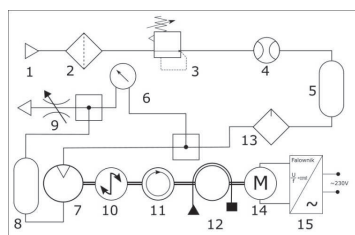
Zasada działania silnika trójcylindrowego polega na tym, że w jednym cylindrze pracują przeciwsobnie wahadłowo dwa tłoki, tłok główny 1 i tłok pomocniczy 2. Tłoki te przybliżając i oddalając się od siebie tworzą komory o zmiennej objętości. Kiedy tłok główny 1 w cylindrze znajduje się w górnym zwrotnym położeniu, tłok pomocniczy 2 zbliża się do niego możliwie blisko, co powoduje, że objętość pomiędzy tłokami jest minimalna. Następnie obydwie tłoki w tym ułożeniu poruszają się jednocześnie do dolnego zwrotnego położenia dla tłoka głównego 1. W chwili, kiedy tłok pomocniczy 2 osiągnie górne zwrotne położenie, zostaje otwarty zawór dolotowy i

do cylindra dostaje się gaz roboczy, wywierając nacisk na obydwie tłoki. Rozpoczyna się suw pracy. Tłok główny 1 w tym momencie znajduje się w dolnym zwrotnym położeniu, a wykorbienie wału korbowego 6 znajduje się w optymalnej pozycji do generowania momentu obrotowego. Moment obrotowy od tego tłoka generowany jest od początku suwu pracy. Tłok pomocniczy 2 znajduje się w górnym zwrotnym położeniu i pozostaje tam nieruchomo przez pewien czas – wał korbowy 6 wykona w tym czasie *obrót o* kilkanaście stopni. Moment obrotowy na wale nie jest w tej chwili generowany od tłoka pomocniczego 2. Po tym czasie rozpoczyna się generowanie momentu obrotowego również przez tłok pomocniczy 2. Od tej chwili moment obrotowy generują obydwie tłoki. Kiedy tłok główny 1 osiąga dolne zwrotne położenie, pozostanie tam nieruchomo przez pewien czas, a moment obrotowy generowany jest tylko od tłoka pomocniczego 2. Po zakończeniu suwu pracy przez tłok pomocniczy 2, następuje otwarcie zaworu wylotowego.

Do badań zostanie użyty prototypowy silnik trójcyldrowy. Każdy z cylindrów wykonuje pracę zgodnie z cyklem opisanym powyżej, jednak cykle te w poszczególnych cylindrach przesunięte są względem siebie o 120° obrotu wału korbowego. Powoduje to, że czas trwania każdego cyklu wynosi 165° obrotu wału korbowego.

3. KONCEPCJA BADAŃ

W koncepcji badań założono, że podstawowymi parametrami mierzonymi będą: sprawność całkowita oraz straty mocy wynikające z nieszczelności i moc tracona w wyniku tarcia elementów uszczelniających. Założono, że stanowisko badawcze powinno umożliwiać wyznaczenie tych parametrów oraz powinno być na tyle uniwersalne, aby możliwe było przebadanie opisanych konstrukcji na tym samym stanowisku. Założono, że silniki badane nie będą przekraczać prędkości obrotowej 1000 obr/min i mocy od 100 W do 3 kW. W koncepcji badań założono pomiar: mocy dostarczanej do silnika w postaci sprężonego powietrza, mocy na wale silnika, spadku ciśnienia pomiędzy wejściem i wyjściem z silnika, prędkość obrotowej silnika oraz strumień powietrza dostarczanego do silnika. Ponadto stanowisko powinno umożliwiać pomiar mocy strat związanych z nieszczelnościami oraz oporami ruchu. Wyniki badań posłużą do wyznaczenia obszarów największych strat mocy, co będzie stanowiło podstawę do opracowania zmian konstrukcyjnych. Ponadto badania powinny uwypuklać zalety i wady poszczególnych konstrukcji.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego

Do określenia podstawowych parametrów eksploatacyjnych silników pneumatycznych zbudowano stanowisko laboratoryjne (rys.4) [5]. Na podobnym stanowisku przeprowadzono już badania wstępne silnika opisanego w pkt 2.1 [6]. Przedstawione stanowisko zostało rozbudowane o możliwość badania różnych konstrukcji wolnoobrotowych silników pneumatycznych oraz

rozszerzono zakres parametrów mierzonych. Założono, że maksymalne ciśnienie robocze nie przekroczy 6 barów. Stanowisko będzie zasilane z sieci pneumatycznej. Wartość ciśnienia dostarczanego do silnika będzie stała i regulowana za pomocą reduktora ciśnienia 3. Ponadto układ zasilania powietrzem wyposażono w filtr cząstek stałych 2 i smarownicę 13. Ponieważ silniki pneumatyczne wykonują pracę cykliczną, w celu uniknięcia wpływu pulsacji ciśnienia zasilania na wyniki pomiaru zastosowano zbiornik wyrównawczy 5, z którego zasilane będą badane silniki pneumatyczne 7. Strumień powietrza zasilający silnik jest regulowany zaworem dławiącym 9 a jego wartość jest mierzona przepływomierzem 4. Spadek ciśnienia na silniku jest mierzony czujnikiem różnicy ciśnień 6 Thermokon DPL6/V. Obciążenie na wale silnika jest regulowane za pomocą hamulca 12. Moment obrotowy jest mierzony momentomierzem 10 Megatron DFM2X. Prędkość obrotowa mierzona jest enkoderem 11 Wobit MOK40-200/1224/BZ/K.

Silnik elektryczny 14 służy do wyznaczenia oporów ruchu badanych silników pneumatycznych. Silnik elektryczny napędzając silnik pneumatyczny przy rozszczelnionym układzie zasilania umożliwi pomiar momentu wynikającego z oporu ruchu. W celu pomiaru oporów ruchu dla różnych prędkości obrotowych prędkość kątowna silnika elektrycznego regulowana jest za pomocą falownika 15.

Na tak przygotowanym stanowisku zostaną przeprowadzone badania prototypowych silników pneumatycznych, których konstrukcja została opisana w przytoczonych wcześniej patentach. Wyniki badań posłużą do opracowania wytycznych do projektowania silników o wyższej sprawności. Głównym celem badań będzie określenie obszarów głównych strat mocy. Na tej podstawie zostaną zaproponowane zmiany konstrukcyjne wybranych elementów.

Moc dostarczana do silnika w postaci sprężonego powietrza zostanie wyliczana na podstawie pomiaru strumienia przepływającego powietrza i ciśnienia roboczego.

$$P_{we} = Q \cdot \Delta p \quad (1)$$

gdzie:

Δp – spadek ciśnienia na silniku [Pa]
 Q – strumień powietrza [m³/s]

Moc na wale silnika pneumatycznego zostanie wyznaczona na podstawie pomiaru prędkości obrotowej i momentu obciążenia. Moment obciążenia regulowany jest za pomocą hamulca taśmowego, a prędkość obrotowa zależy od strumień przepływającego powietrza. Moc silnika pneumatycznego można obliczyć na podstawie zależności:

$$P_M = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot M \quad (2)$$

gdzie:

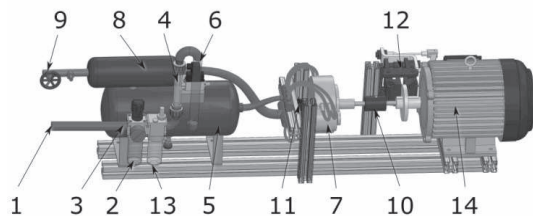
M – moment obrotowy [Nm]
 n – liczba obrotów [obr/min]

Całkowita sprawność silnika wyraża się stosunkiem mocy na wale silnika do mocy dostarczonej, zgodnie ze wzorem:

$$\eta = \frac{P_M}{P_{we}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Na moc wejściową składa się moc na wale silnika oraz moc strat. Główną przyczyną straty mocy są opory ruchu oraz straty związane z nieszczelnościami i przemianami gazowymi. W celu wyznaczenia wpływu poszczególnych strat należy wyznaczyć straty wynikające z nieszczelności silnika. Wyznaczenia mocy strat wynikającej z nieszczelności silnika oblicza się na podstawie zależności (1). Badanie polega na ustawieniu zaworu 9 na maksymalny przepływ oraz maksymalne obciążenie silnika hamulcem 12, tak aby prędkość obrotowa była równa zero. Dla takiego ustawienia cały strumień powietrza przepływający przez silnik stanowi straty wynikające z nieszczelności pomiędzy ruchomymi elementami silnika. Stąd moc obliczona z zależności (1) będzie równa mocy strat wynikającej z nieszczelności silnika.

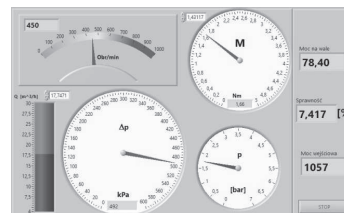
Moc strat wynikającą z oporów ruchu oblicza się na podstawie zależności (2). Moment na wale jest mierzony dla całkowicie rozszczelnionego silnika, tzn. przewody zasilające i wylotowe są odłączone, a silnik pneumatyczny jest napędzany silnikiem elektrycznym przy regulowanej prędkości obrotowej za pomocą falownika 15. Zakłada się, że straty przemiany gazowej podczas przepompowywania powietrza przy zerowym spadku ciśnienia na silniku są pomijalnie małe.



Rys. 5. Stanowisko badawcze

Na rysunku 5 przedstawiono budowę stanowiska badawczego. Wszystkie elementy stanowiska zamontowano osiowo na wspólnej szynie montażowej. Miernik momentu obrotowego 10 zamontowano bezpośrednio na wale silnika pneumatycznego 7. Przeciwny wałek miernika momentu obrotowego połączono z hamulcem 12 za pomocą sprzęgła kłowego. Na wspólnym wale z hamulcem zamontowano silnik elektryczny 14 służący do wyznaczania oporów ruchu. Sprężone powietrze dostarczane jest przewodem 1 do układu przygotowania powietrza składającego się z filtra cząstek stałych 3, reduktora ciśnienia 2 oraz naolejacza 13. Strumień powietrza zasilający silnik pneumatyczny poprzez zbiornik kompensacyjny 5 mierzony jest przepływomierzem 4. Wypływ powietrza z silnika pneumatycznego odbywa się poprzez zbiornik kompensacyjny 8. Strumień powietrza zasilający silnik jest regulowany za pomocą zaworu dławiącego 9 zamontowanego na wylocie ze zbiornika 8. Spadek ciśnienia na silniku pneumatycznym jest mierzony czujnikiem różnicy ciśnienia 6 do którego przewody impulsowe podłączono odpowiednia przed i za zbiornikami

5 i 8. Dane pomiarowe są rejestrowane w komputerze wyposażonym w kartę pomiarową LabJack U12 oraz oprogramowanie LabVIEW 2015. W programie LabVIEW wykonano panel pomiarowy (rys. 6). Podczas pracy silnika operator ma możliwość kontroli podstawowych parametrów mierzonych, takich jak: spadek ciśnienia, prędkość obrotowa, moment na wale i strumień gazu. Oprogramowanie na podstawie wartości mierzonych oblicza podstawowe parametry zgodnie z zależnościami (1) - (3).



Rys. 6. Panel operatora

4. PODSUMOWANIE

Nowoczesne konstrukcje silników pneumatycznych charakteryzuje dbałość konstruktorów o zwiększenie sprawności tych silników. W przypadku chęci zastosowania tych silników w obecnie używanych urządzeniach konieczne jest określenie ich rzeczywistych parametrów pracy. Dlatego niezbędne są badania eksperymentalne prototypów silników. Zaproponowany w pracy sposób badania silników pneumatycznych umożliwia wyznaczenie podstawowych parametrów ruchowych, silników pneumatycznych.

5. BIBLIOGRAFIA

- Śliwiński P.: Porównanie zjawisk w hydraulicznych silnikach satelitowych zasilanych emulsją wodno-olejową lub olejem, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, 2006.
- Ilnicki, A.: Maszyna z obrotowym wirnikiem, Patent nr PL 214371.
- Ilnicki, A.: Maszyna z obrotowym wirnikiem, Patent nr PL 218357.
- Wójtowicz D.: Silnik wielocylindrowy zwłaszcza na sprężone gazy lub spalinowy wewnętrznego spalania ze zmiennym stopniem sprężania Patent nr PL 216801.
- Ilnicki, A., Rząsa, M.: Nowe rozwiązanie konstrukcyjne silnika pneumatycznego, Napędy i Sterowanie, Nr 4, 2016.
- Ilnicki, A., Rząsa, M.: Stanowisko do badania silnika pneumatycznego, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr 49, 2016.
- Beater P.: Pneumatic Drives, System Design, Modelling and Control, Springer 2007.

THE CONCEPT OF TESTING OF LOW SPEED PNEUMATIC ENGINES

Air motors are characterized by high resistance to overload, a small toxicity for the environment and a high degree of safety in terms of explosion. Due to these facts, these devices may find use in the mining industry, food industry and energy industry. The overall objective of the project is to assess the possibility of using low-speed air motor to drive the machine.

The subject is planned to study and describe the three new structures by identifying areas where there are the greatest power losses. Prototypes will be made engines in order to carry out basic research and evaluation of the economic aspects of different technologies. The work will be carried out using new solutions by patents numbers: 214371, 218357 and 216801.

Keywords: low speed pneumatic engines, test stand.