

SPALANIE W NAPĘDACH LOTNICZYCH

LABORATORIUM

Ćwiczenie 7 - Badania parametrów pracy komory spalania silnika pulsacyjnego

Wprowadzenie

Silnik pulsacyjny - rys teoretyczny

Pierwszy silnik pulsacyjny został zbudowany w Rosji na początku XX wieku. Konstrukcję opatentował w 1906 roku Rosyjski inżynier Karavodin, który rok później ukończył pierwszą działającą konstrukcję. W krótkim czasie powstało kilka innych rozwiązań, które nieznacznie się od siebie różniły. Można wskazać dwa trendy rozwojowe - silniki zaworowe i bezzaworowe. Konstrukcją bardzo mocno zainteresował się rząd III Rzeszy, który jeszcze przed II wojną światową, na początku lat '30 ubiegłego wieku, począł wspierać rozwój tego napędu. Finalnie, swoje zastosowanie silniki pulsacyjne znalazły w słynnych niemieckich raketach V-1 (latających bombach).

Silnik pulsacyjny jest odmianą silników przepływowych, przypominających silniki strumieniowe - brak tutaj klasycznej sprężarki lub turbiny - nie są one potrzebne. Silniki pulsacyjne, jak nazwa wskazuje nie pracują w sposób ciągły (jak turboodrzutowe, strumieniowe, itp.), ich praca ma charakter powtarzalnych deflagracji o określonej częstotliwości, przypisanej do danego silnika - dla V-1 było to 42-45 Hz.

Zasada działania silnika pulsacyjnego zaworowego

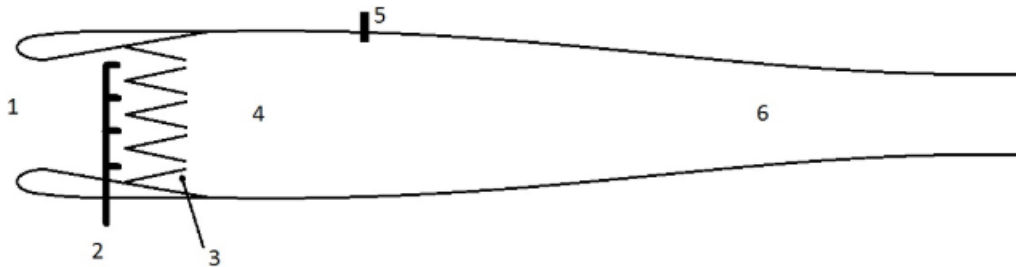
Spalanie paliwa w zaworowych silnikach pulsacyjnych odbywa się w sposób powtarzalny. W czasie jednego cyklu pracy silnika do komory spalania zasysana jest mieszanka paliwowa za pomocą podciśnienia wewnątrz komory spalania. Po wypełnieniu komory spalania mieszanką paliwową dochodzi do jej zapłonu na skutek jej zetknięcia się z rozgrzaną, wewnętrzną ścianą komory spalania.

Gwałtowny zapłon mieszanki powoduje wzrost ciśnienia tym samym zamykając zawory, w związku z czym fala ciśnienia może przemieszczać się wyłącznie wzdłuż rury wylotowej. Zgęszczeniowej fali ciśnienia po dotarciu do końca rury wylotowej towarzyszy wypływ gorących gazów (ciśnienie w komorze spalania spada do poziomu ciśnienia atmosferycznego) oraz odbicie się fali. Przemieszczająca się w stronę komory spalania fala rozrzedzenia powoduje spadek ciśnienia w komorze, co z kolei przyczynia się do otwarcia zaworów oraz zassania kolejnej dawki mieszanki paliwowej, tym samym rozpoczyna się kolejny cykl pracy silnika.

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Wady silnika pulsacyjnego zaworowego:

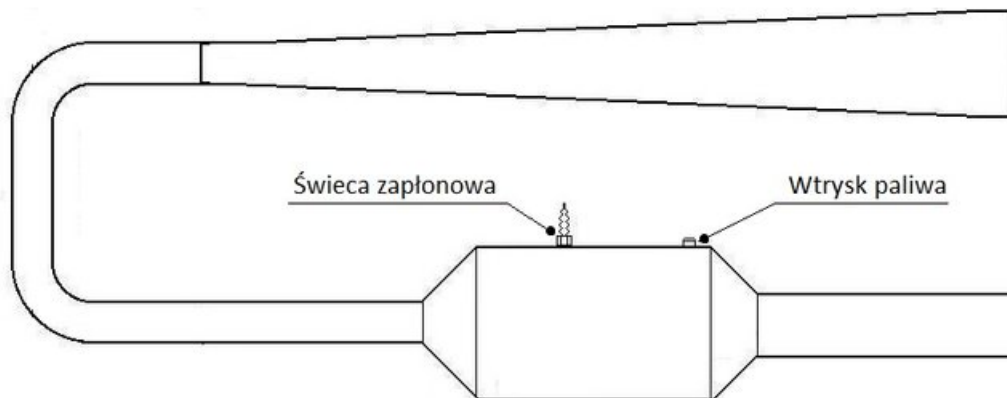
- niska wytrzymałość zaworów dochodząca do 50 godzin pracy,
- brak możliwości dostosowania się silnika do zmiany ciśnienia atmosferycznego wraz ze wzrostem wysokości lotu (spadek sprawności silnika) - zastosowanie tego silnika jest ograniczone przez pułap lotu,
- wysoka sprawność pracy jedynie dla częstotliwości pracy odpowiadającej częstotliwości własnej zaworów



Schemat silnika pulsacyjnego zaworowego: 1- wlot powietrze, 2 - wtrysk paliwa, 3 - zawory klapowe (jednostronne), 4 - komora spalania, 5 - świeca zapłonowa, 6 - dysza (wydech)

Silniki z gazowymi zaworami bezwładnościowymi (fizycznie bez zaworów)

Silniki tego typu opracowane zostały po raz pierwszy w 1950 r. przez Bertina. Silnik jego pomysłu posiadał długą rurę wlotową, gorące gazy powstałe w wyniku spalania mieszanki wypływają przez przewód wlotowy jak i dyszę wylotową. W wyniku bezwładności obu wypływów powstaje podciśnienie w komorze spalania, jednakże bezwładność strumienia wychodzącego przez dyszę wylotową jest większa, co powoduje zakończenie wypływu spalin przez przewód wlotowy, oraz zaczerpnięcie do komory spalania nowej dawki mieszanki paliwowej.



Schemat silnika pulsacyjnego z gazowymi zaworami bezwładnościowymi

Zasada działania silnika pulsacyjnego z gazowymi zaworami bezwładnościowymi:

1. W komorze spalania zachodzi nagłe spalanie przy ciśnieniu atmosferycznym, a gorące produkty spalania zaczynają się rozprężać w kierunku dyszy wylotowej oraz wlotu. Ze względu na różnicę przekrojów oraz długości, większość gazów jest kierowana w stronę dyszy wylotowej. Z silnika nie wydostaje się jednak cały

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

ładunek – część spalin nie zdąży dotrzeć do końca rury wylotowej zanim nastąpi kolejny cykl spalania.

2. Gwałtowne rozprężanie się gazów w obu kierunkach wywołuje znaczne podciśnienie w komorze spalania. Podciśnienie to hamuje wypływ gazów i zasysa świeże powietrze poprzez wlot, a także cofa część gorących spalin znajdujących się w rurze wylotowej do komory spalania (efekt Kadenacy'ego, występujący również w silnikach dwusuwowych).
3. Wtrysk paliwa powoduje powstanie mieszanki palnej, która ulega zapłonowi od gorących spalin oraz rozgrzanych ścianek komory spalania (początkowo ścianki są zimne, a ich wpływ pomijalny pod tym względem). Cały proces wraca do punktu wyjścia i powtarza się.

Silniki pulsacyjne cechują się przede wszystkim pozornie łatwą budową oraz dużą niezawodnością wynikającą z braku ruchomych części (wyjątkami są zawory oraz układ rozruchowy i zasilający paliwem). Ponadto teoretycznie są bardzo elastyczne w kwestii spalanego paliwa. Do ich negatywnych cech należą: duża emisja hałasu, niska sprawność ogólna (dla zaworowych około 25%), okresowe przebiegi parametrów pracy (stała częstotliwość, zmienne prędkości i ciśnienia na wylocie) zależące od rozmiarów konstrukcji, duże pulsacje ciągu oraz małe jego wartości średnie możliwe do uzyskania.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania silników pulsacyjnych, pomiar ciągu silnika pulsacyjnego. Pomiar temperatur w poszczególnych elementach silnika. Określenie ilości zużycia paliwa oraz obliczenie mocy dostarczonej do silnika pulsacyjnego. Przy użyciu analizatora bada się skład spalin pod kątem zawartości tlenu i zanieczyszczeń (CO, NO_x). Jednocześnie mierzy się zawartość sadzy metodą Bacharacha (pomiar na podstawie zacinienia filtra papierowego).

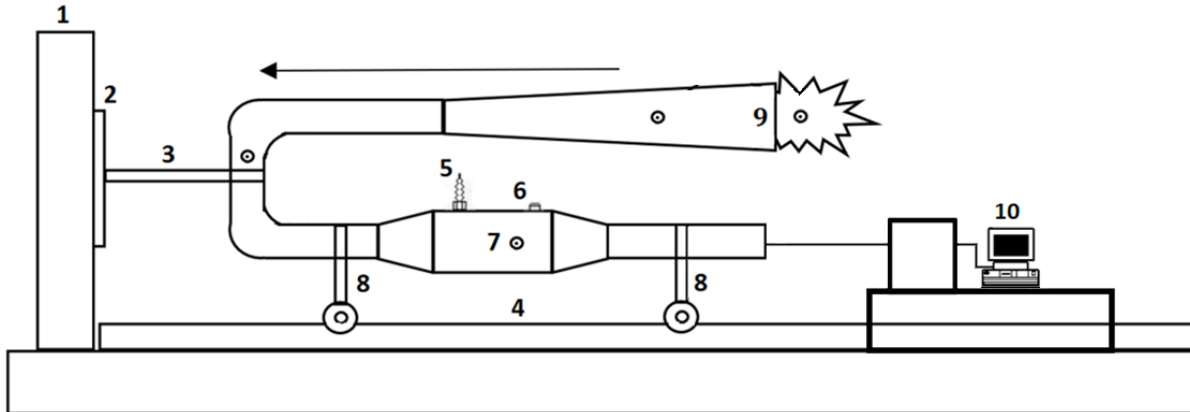
Przebieg ćwiczenia

Podczas realizacji ćwiczenia student zapoznaje się z budową i działaniem silnika pulsacyjnego z gazowymi zaworami bezwładnościowymi. Podczas ćwiczenia laboratoryjnego zostanie zmierzona siła ciągu silnika za pomocą hamowni: schemat przedstawiony na rysunku. Przy użyciu analizatora bada się skład spalin pod kątem zawartości tlenu i zanieczyszczeń (CO, NO_x). Wykonuje się też pomiar temperatur oraz ciśnień w określonych miejscach silnika pulsacyjnego.

Określa się również zawartości niedopалonych węglowodorów (C_nH_m). Jednocześnie mierzy się zawartość sadzy (odpowiedzialnej za dym w spalinach) metodą Bacharacha. Pomiar wykonywany jest na podstawie zacinienia filtra papierowego, na którym zatrzymuje się sadza podczas zaciągania próbki spalin z komory spalania. Zawartość sadzy określa się na podstawie porównania koloru otrzymanego na filtrze z dziesięciostopniową (0-9) skalą porównawczą.

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Schemat stanowiska pomiarowego



1 - podstawa wagi, 2 - waga tensometryczna, 3 - ramię wagi tensometrycznej, 4 - prowadnice, na których umieszczony jest silnik pulsacyjny, 5 - świeca zapłonowa, 6 - wtrysk mieszanki, 7 - komora silnika pulsacyjnego – pomiar temperatury i ciśnienia w komorze, 8 - podpory ruchome utrzymujące silnik pulsacyjny na prowadnicy, 9 - wylot spalin z silnika pulsacyjnego wraz z pomiarem temperatury i ciśnienia, 10 - układ pomiarowy spalin (analizator spalin z komputerem)

Opracowanie wyników pomiarów

Ubytek paliwa podczas jednego pomiaru:

$$\dot{V} = \frac{V}{t}$$

gdzie: V – ubytek paliwa w zbiorniku, m^3
 t – czas pomiaru ubytku paliwa, s

Moc doprowadzona do silnika pulsacyjnego:

$$P_d = \dot{V} \cdot \rho \cdot Q_w$$

gdzie: ρ – gęstość paliwa, $\frac{kg}{m^3}$
 Q_w – wartość opałowa paliwa, MJ/kg

Wyznaczenie współczynnika nadmiaru powietrza λ :

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2}$$

gdzie: λ – współczynnik nadmiaru powietrza, -
21 – zawartość tlenu w powietrzu, %
 O_2 – zawartość tlenu w spalinach, %

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Przeliczenie udziału zanieczyszczeń na odniesiony do stałej zawartości tlenu 3%:

$$CO^{3\%} = CO^{zm} \cdot \frac{21-3}{21-O_2}$$

$$NO_x^{3\%} = NO_x^{zm} \cdot \frac{21-3}{21-O_2}$$

gdzie: **CO^{3%}**– przeliczona zawartość CO w spalinach, ppm
NO_x^{3%}– przeliczona zawartość NO_x w spalinach, ppm
CO – zmierzona zawartość CO w spalinach, ppm
NO_x – zmierzona zawartość NO_x w spalinach, ppm
21 – zawartość tlenu w powietrzu, %
3– referencyjna zawartość tlenu w spalinach, %
O₂ – zawartość tlenu w spalinach, %

Wykonanie wykresów

W sprawozdaniu należy wykonać wykresy zależności: emisji zanieczyszczeń przeliczonych na 3% udział tlenu w spalinach (**CO^{3%}** oraz **NO_x^{3%}**), zawartości sadzy (**S**), oraz temperatury płomienia i spalin (**t_p** i **t_s**) w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza (**λ**).

Literatura

1. „Zagadnienia napędów lotniczych“, Prace Instytutu Lotnictwa – kwartalnik naukowy 4/2009, S. Szczeciński, Warszawa 2009
2. <https://steemit.com/>
3. <https://www.samoloty.pl/>