

WPLYW FAZ ROZRZĄDU I WZNIOSÓW ZAWORÓW NA NAPEŁNIANIE CYLINDRÓW SILNIKA TŁOKOWEGO

PAWEŁ BOGUSZEWICZ*, SABINA CZYŻ**

* Zakład Napędów Lotniczych, Centrum Technologii Kosmicznych, Instytut Lotnictwa,
Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

** Dürr Poland Sp. z o.o., ul. Żółkiewskiego 125, 26-600 Radom

Streszczenie

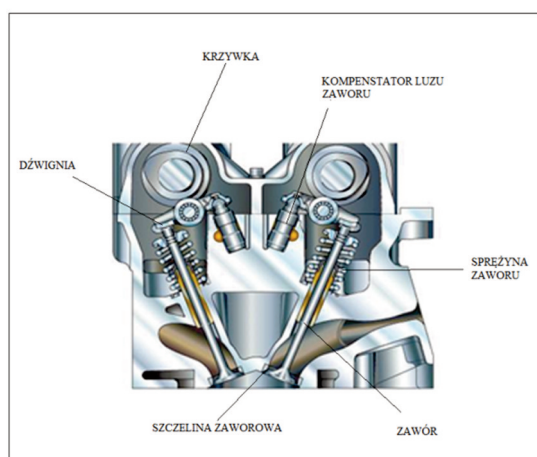
Celem pracy było przedstawienie wpływ ustawienia parametrów układu rozrządu silnika na sprawność napełniania. W pracy przedstawiono również kilka przykładowych systemów zmiennych faz rozrządu stosowanych w silnikach trakcyjnych. Za pomocą uproszczonego modelu matematycznego wymiany ładunku w cylindrze przedstawiono wpływ zmiany czasu otwarcia zaworów oraz wzniosu na napełnienie cylindra. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że maksymalną sprawność napełniania uzyskuje się przy najniższych prędkościach obrotowych silnika. Przy maksymalnych prędkościach obrotowych, gdy spodziewamy się największych osiągnięć, konieczne jest odpowiednie dobranie momentu otwarcia i zamknięcia zaworów dolotowych.

Słowa kluczowe: silnik tłokowy, napełnianie cylindra, rozrząd.

1. WPROWADZENIE

W wyniku ciągłego udoskonalania konstrukcji spalinowych silników tłokowych na przestrzeni lat konstruktorzy i inżynierowie bezustannie je modernizują. Modernizacji podlegają wszystkie zespoły, które choćby w minimalny sposób poprawią osiągi silnika. Moc silnika zależy od jego momentu obrotowego i prędkości obrotowej.

Moment obrotowy silnika zależy od wymiarów geometrycznych cylindra i wału korbowego oraz ciśnienia w cylindrze silnika podczas suwu pracy. Z kolei, wartość ciśnienia zależy od ilości powietrza zassanego, podczas napełniania cylindra, czyli od sprawności napełniania. Stąd efektywność wymiany ładunku jest istotnym czynnikiem wpływającym na sprawność silnika tłokowego, a także jego masę i wymiary gabarytowe – co jest „od zawsze” szczególnie ważne w lotnictwie [1].

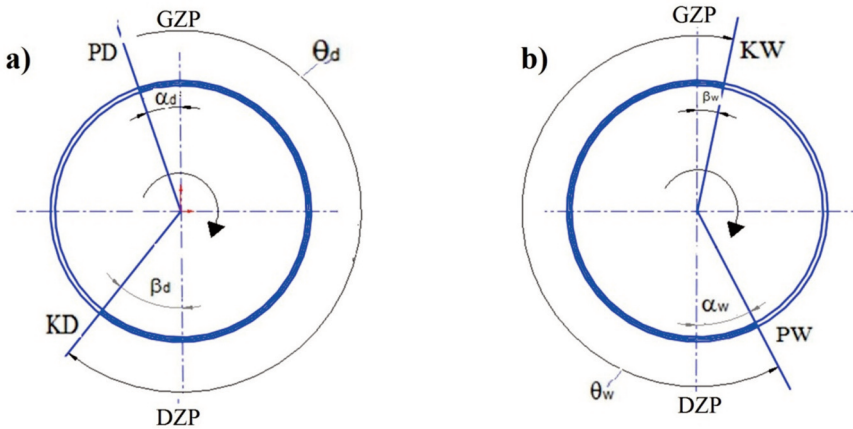


Rys. 1. Przekrój głowicy silnika [2]

W tej pracy przedstawiono kilka czynników wpływających na sprawność napełniania oraz konstrukcyjne rozwiązania stosowane w spalinowych silnikach lotniczych i trakcyjnych.

2. FAZY ROZRZĄDU

Układ rozrządu służy do wymiany ładunku w silniku spalinowym. Decyduje on o efektywności dostarczania świeżego ładunku i usuwania spalin. Skuteczne napełnienie cylindra ma bezpośredni wpływ na moment obrotowy i moc silnika. Efektywność wymiany ładunku zależy w dużym stopniu od prawidłowego dobrania faz rozrządu, czyli momentu otwarcia i zamknięcia zaworów względem położenia kąтового wału korbowego.



Rys. 2. Kołowy wykres faz rozrządu silnika czterosuwowego [Czyż, 2014], gdzie:

a) cykl dolotu

α_d – kąt wyprzedzenia otwarcia zaworów dolotowych,
 β_d – kąt opóźnienia zamknięcia zaworów dolotowych,
 α_w – kąt wyprzedzenia otwarcia zaworu wylotowego);

b) cykl wylotu

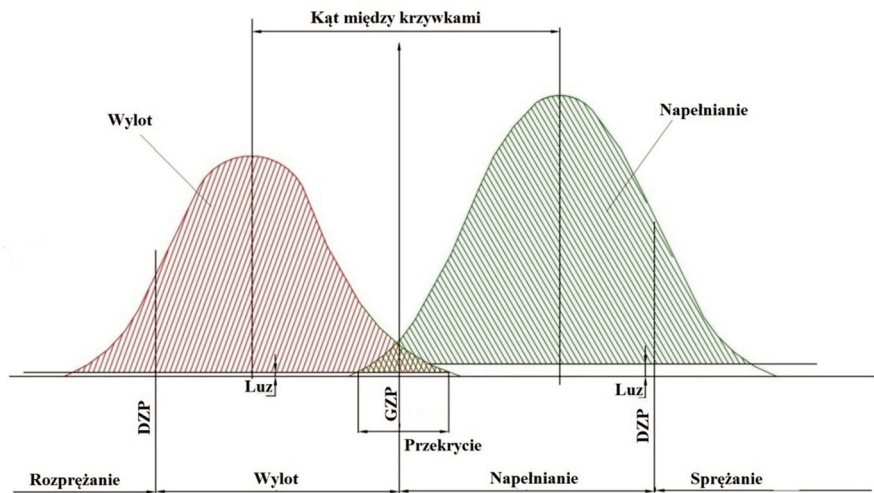
β_w – kąt opóźnienia zamknięcia zaworu wylotowego,
 θ_d – całkowity kąt otwarcia zaworu dolotowego,
 θ_w – całkowity kąt otwarcia zaworu wylotowego

W celu zwiększenia współczynnika napełniania dąży się do ograniczenia oporów przepływu stawianych przez układ dolotowy. Zamiast jednego dużego zaworu dolotowego można stosować dwa mniejsze, co skutecznie zmniejszy opory przepływu. Bardziej wydajna wymiana ładunku nastąpi przy 4 albo 3 zaworach (2 dolotowych i 2 wylotowych lub 2 dolotowych i 1 wylotowego na cylinder). Konstrukcje pięcio zaworowe z trzema zaworami dolotowymi umożliwiają nieznacznie poprawienie napełnienia kosztem znacznej komplikacji konstrukcji. Zwiększenie ilości zaworów poprawia sprawność wymiany ładunku, ponieważ zawór staje się lżejszy, czyli szybciej można go otworzyć i zamknąć. Konstrukcje wiele zaworowe pozwalają na uzyskanie większych prędkości obrotowych, a tym samym na zwiększenie mocy.

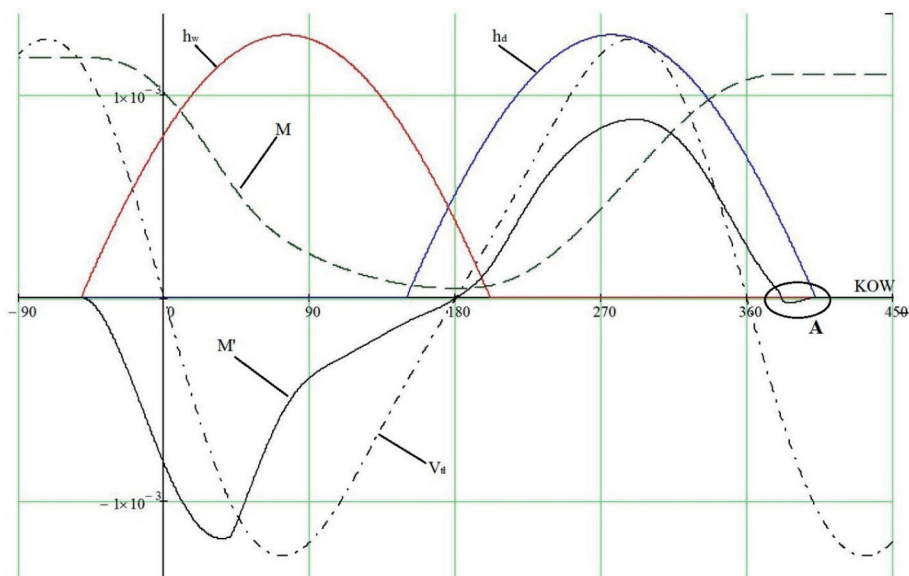
W lotnictwie układy 2-zaworowe stosowane były powszechnie w silnikach gwiazdowych (np. ASz-82 czy BMW-801). Układy 3-y zaworowe w rodzinie silników Jumo 210...213, a 4-o zaworowe w silnikach AM-38, AM-42 oraz rodzinach DB600..., Allison 1701 i wielu innych rzędowych silnikach dużych mocy w lotnictwie bojowym II Wojny Światowej

Parametrem opisującym napełnianie cylindra jest współczynnik napełniania. Jest to stosunek rzeczywistej masy powietrza doprowadzonej do cylindra do teoretycznej masy powietrza wynikającej z pojemności skokowej. Maksymalne wartości współczynnika napełniania uzyskuje się gdy pole

charakterystyki otwarcia zaworów (rys. 3) jest maksymalne. Zwiększenie wspomnianego parametru powoduje zwiększenie przyśpieszeń elementów w mechanizmie napędu zaworów. Przy wysokich prędkościach obrotowych może to wywołać tzw. odklejenie zaworów, czyli przeważanie sił bezwładności zaworów nad siłą sprężyny zaworowej dociskającej miseczkę zaworu do dźwigni zaworowej.



Rys. 3. Wykres czasoprzekrojów rozrządu silnika czterosuwowego [Czyż, 2014].



Rys. 4. Zależność prędkości tłoka (V_d), wzniosu zaworów (h_w – wylotowego, h_d – dolotowego), chwilowego wydatku masowego na zaworach (M') i masy czynnika roboczego w cylindrze (M) w funkcji kąta obrotu wału korbowego (KOW) [Boguszewicz, 2014].

W celu poprawienia napelnienia cylindra i zmniejszenia oporów w czasie wydechu zawory są otwierane odpowiednio wcześniej i zamykane odpowiednio później względem skrajnych położeń tłoka. Wcześniejsze otwarcie Zaworu Wydechowego (dalej ZW) przed dotarciem tłoka do Dolnego

Zwrotnego Punktu (dalej DZP) powoduje brak przyrostu ciśnienia w cylindrze na początku suwu wydechu (co nastąpiło by w przypadku rozpoczęcia otwierania zaworu w DZP). Opóźnienie zamknięcia ZW po ociążeniu Górnego Zwrotnego Punktu (dalej GZP) powoduje przedostanie się mniejszej ilości spalin do kanału dolotowego poprzez już otwierający się Zawór Dolotowy (ZD), ale również zassanie części spalin z kanału wydechowego przed zamknięciem ZW.

Otwarcie ZD rozpoczyna się przed osiągnięciem przez tłok GZP w trakcie suwu wydechu. Powoduje to przedostanie się niewielkiej ilości spalin do kanału dolotowego lecz po przekroczeniu GMP zawór dolotowy jest otwarty w większym stopniu co skutkuje mniejszym oporem na zaworach w trakcie suwu napełniania. Opóźnienie zamknięcia ZD umożliwia wykorzystanie energii kinetycznej powietrza w kolektorze dolotowym. Ten efekt można zaobserwować na rysunku 4 – Krzywa M' przecina oś rzędnych wyraźnie po przekroczeniu przez tłok DZP. W końcowej fazie napełniania następuje ucieczka (p. A) już zassanego czynnika przez zamykający się zawór. Im mniejsze prędkości obrotowe tym większa jest ucieczka czynnika roboczego na ZD [3].

2.1. Zmienne fazy rozrządu – przegląd stosowanych konstrukcji

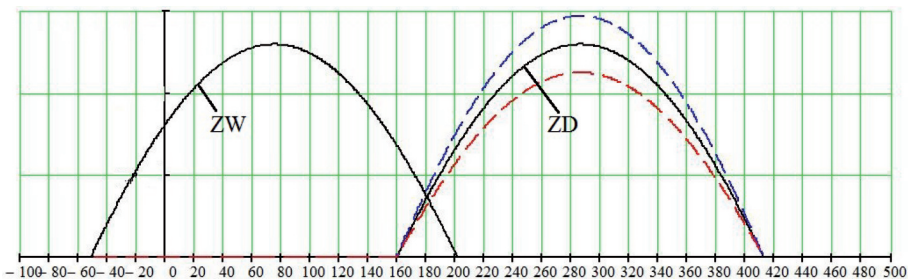
Poniżej przedstawiono kilka rozwiązań systemu zmiennych faz rozrządu czteresuswowego silnika tłokowego. Wszystkie systemy bazują na przybliżonym schemacie działania i umożliwiają dążenie do uzyskania coraz lepszych osiągnięć silnika:

- podniesienie wartości momentu obrotowego,
- poprawienie przebiegu krzywej momentu, w całym zakresie prędkości obrotowych silników.

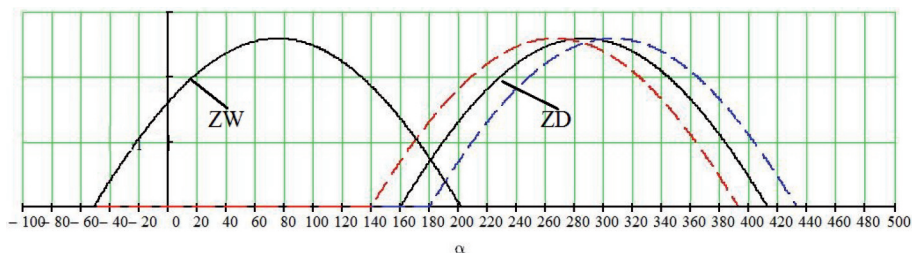
Wysoka prędkość obrotowa silnika, której odpowiada największa moc, generuje większe opory przepływu świeżego ładunku w układzie dolotowym, zmniejszając napełnianie cylindrów. Powoduje to zmniejszenie mocy w warunkach największego zapotrzebowania. Z kolei zbyt wysoki wznios zaworów dolotowych przy niskich prędkościach obrotowych silnika (gdy zapotrzebowanie na moc jest małe) powoduje lepsze napełnianie, ale wymusza większą dawkę paliwa (stechiometryczna mieszanka). Powoduje to niepotrzebne zwiększenie zużycia paliwa. Istotne jest również właściwe dobranie położenia otwarcia i zamknięcia zaworów względem zwrotów tłoka wpływających na opory przepływu i ucieczkę zassanego już czynnika. Wpływ tych zjawisk w silnikach trakcyjnych zminimalizowano poprzez zastosowanie:

- *zmiennych wzniosów zaworów dolotowych*, które przy dużych wartościach prędkości obrotowych osiągają maksymalne wartości (rys. 5),
- *zmiennych czasów otwarcia zaworów dolotowych*, dobierając odpowiednie wyprzedzenie otwarcia i opóźnienie zamknięcia (rys. 6).

Rozwiązania te umożliwiają utrzymanie maksymalnej sprawności napełnienia cylindra dla różnych prędkości obrotowych. Głównymi zaletami tych konstrukcji są zwiększenie mocy w całym zakresie prędkości obrotowych, zmniejszenie zużycia paliwa oraz emisji toksycznych składników spalin.



Rys. 5. Zmienny wznios ZD [Boguszewicz, 2014].



Rys. 6. Zmiana czasu otwarcia ZD [Boguszewicz, 2014].

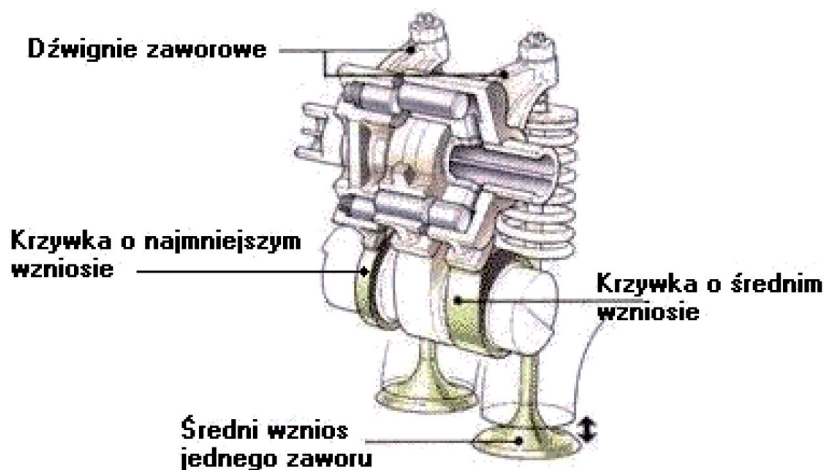
Różni producenci proponują różne sposoby zmiennych wzniosów zaworów dolotowych.

VTEC – Honda

Mechanizm wprowadzony już w 1988 roku, który następnie wielokrotnie modyfikowano. W ostatecznej wersji pozwala na 3-stopniową regulację faz rozrządu. (rys. 7, rys. 8, rys. 9).

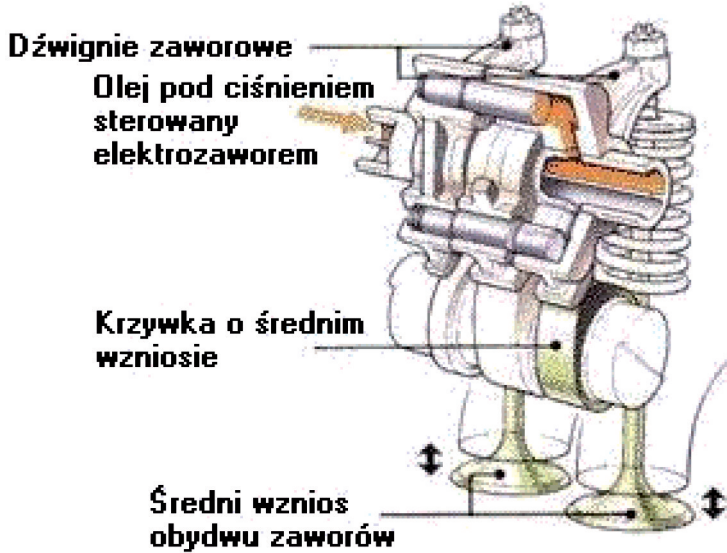
Krzywki napędzające każdy z zaworów (najczęściej 2 dolotowe i 2 wydechowe) różnią się. Pierwsza z krzywek zaworu dolotowego (prawie okrągła) powoduje bardzo mały wznios zaworu, który otwiera się tylko w celu chłodzenia zaworu. Zarys drugiej krzywki odpowiada najbardziej wydajnemu napełnianiu przy niskich prędkościach obrotowych silnika. Jest też trzecia krzywka umieszczona pomiędzy wspomnianymi dwoma, zarys której odpowiada najbardziej wydajnemu napełnianiu cylindra przy wysokich obrotach. W zależności od prędkości obrotowej silnika, VTEC spinając dźwignie zaworowe umożliwia pracę zaworów zgodnie z zarysem odpowiedniej krzywki lub kilku krzywek. Sworznie łączące dźwignie zaworowe są napędzane przez układ hydrauliczny z elektrozaworem sterowanym elektronicznie.

- poniżej 2500 obr/min napełnianie odbywa się praktycznie poprzez jeden z dwóch zaworów dolotowych, sterowany krzywką o średnim wzniosie (rys. 7). Drugi zawór ma bardzo mały wznios, jest sterowany krzywką o najmniejszym wzniosie. W tym trybie pracy silnik ma zmniejszoną moc ale i zmniejszone zużycie paliwa, a co za tym idzie produkuje mniej toksycznych substancji i dwutlenku węgla.



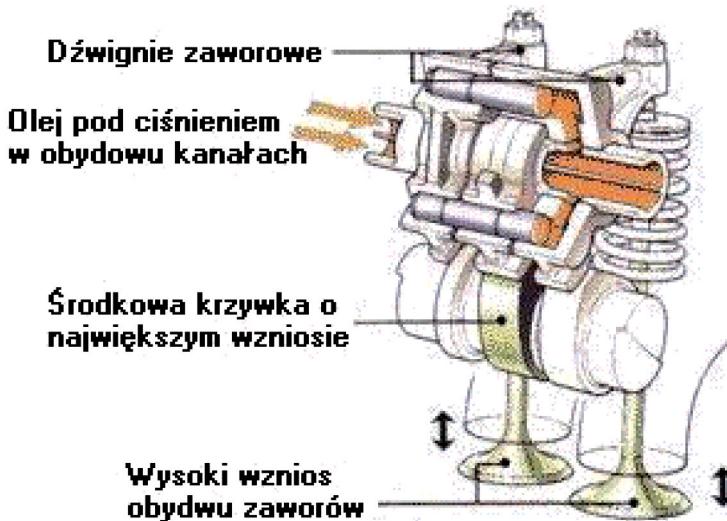
Rys. 7. Praca układu VTEC dla prędkości poniżej 2500 obr/min [4]

- powyżej 2500obr/min (rys. 8) główny sworzeń spina obie dźwignie zaworowe, które od tej chwili są sterowane przez krzywkę o średnim wzniosie.



Rys. 8. Praca układu VTEC dla prędkości powyżej 2500 obr/min [4]

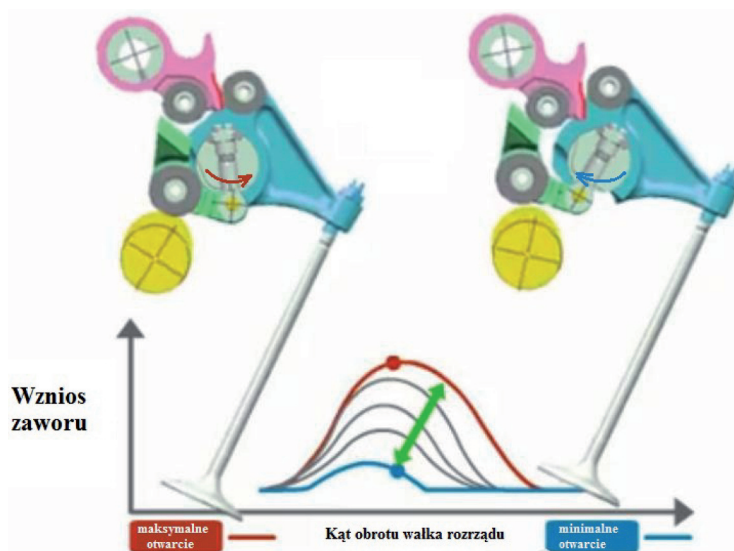
- powyżej 6000obr/min (rys. 9) drugi sworzeń spina już połączone dźwignie zaworowe, z dźwignią sterowaną przez krzywkę o najwyższym wzniosie.



Rys. 9. Praca układu VTEC dla prędkości powyżej 6000 obr/min [4]

MIVEC – Mitsubishi

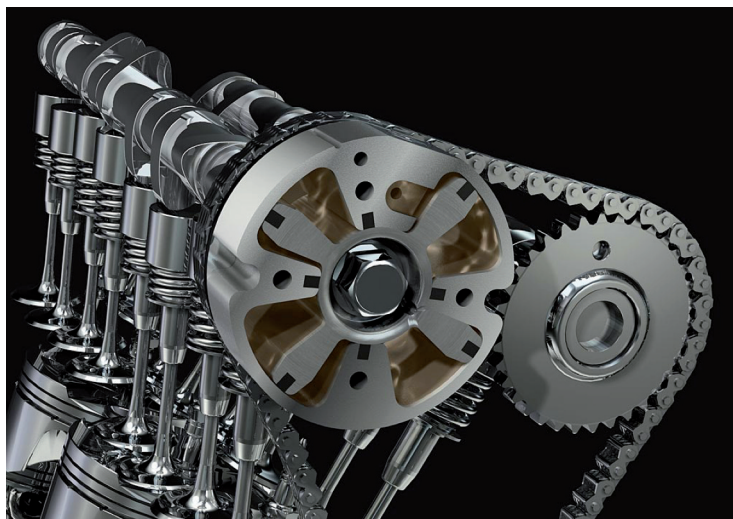
Mechanizm wprowadzony w 1992 roku. Umożliwia zmianę czasu otwarcia zaworów i ich wznios w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia silnika. Regulacja faz rozrządu jest ciągła. Mechanicznie układ oparty jest na zestawie dźwignek i hydraulicznie sterowanych sworzni (rys. 10).



Rys. 10. Mechanizm MIVEC [5]

VVT-i – Toyota

Ten system umożliwia zmianę kąтового położenia wałka rozrządu względem wału korbowego (rys. 11). Jest to sterowany elektronicznie system ustalający optymalny czas wyprzedzenia otwarcia zaworu dolotowego dla danych warunków pracy silnika. Elementem wykonawczym jest elektrozawór sterujący ciśnieniem oleju w komorach zmniejszających lub zwiększających wyprzedzenie otwarcia zaworu dolotowego.



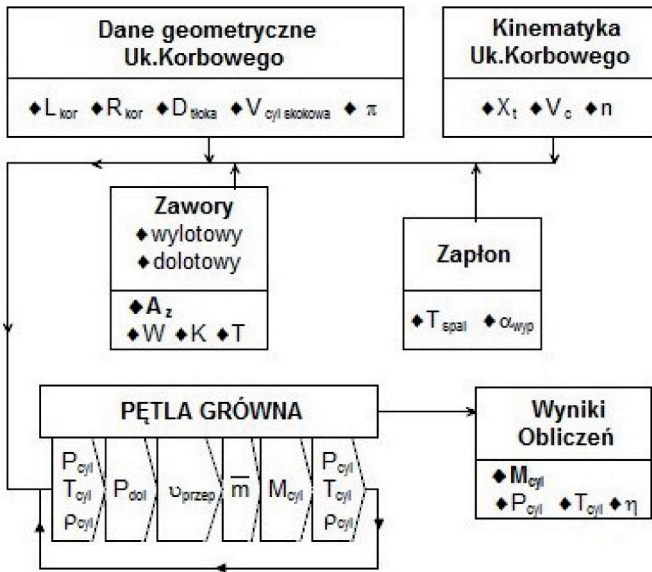
Rys. 11. Widok układu VVT-i [6]

Obecnie większość koncernów motoryzacyjnych opracowała własne systemy zmiany faz rozrządu oraz wartości wzniosów zaworów. W zależności od stopnia komplikacji konstrukcji

pozwalają one na skokowy lub ciągłe zmiany parametrów. Próbuje się również wprowadzić krzywki o trzywymiarowej powierzchni oraz prowadzone są badania nad elektro-hydraulicznymi systemami sterowania zaworami.

3. OPIS MODELU MATEMATYCZNEGO

Powstał uproszczony model uproszczony matematyczny w środowisku Mathcad umożliwiający obserwację wpływu zmiany parametrów układu wymiany ładunku na napełnienie cylindra. Obserwowano wpływ następujących parametrów: kąt wyprzedzenia otwarcia każdego z zaworów oraz zmianę wartości wzniosu zaworów [7]. Czas otwarcia zaworu nie był zmieniany.



Rys. 12. Schemat obliczania parametrów wymiany ładunku silnika tłokowego, gdzie:

L_{kor} – długość korbowodu, R_{kor} – promień wykorbienia, D_{tloka} – Średnica tłoka, V_{cyl} – Objętość cylindra, π – spręż, X_t – chwilowe położenie tłoka, V_c – Chwilowa objętość cylindra, n – prędkość obrotowa, A_z – powierzchnia szczeliny zaworowej, W, K, T parametry modelu zaworu odpowiednio: Wzniosu, Kąta, Czasu, T_{spal} – temperatura spalania, α_{wyp} – kąt wyprzedzenia zapłonu, $P_{cyl}, T_{cyl}, \rho_{cyl}$ – kolejno ciśnienie, temperatura, gęstość w cylindrze, P_{dol} – ciśnienie przed zaworem, v_{przep} – prędkość przepływu na zaworze, m – wydatek masowy, M_{cyl} – masa powietrza w cylindrze [Boguszewicz, 2014].

W opisanym poniżej modelu przyjęto następujące założenia:

- do obliczeń przyjęto wymiary geometryczne czterocylindrowego czterosuwowego silnika lotniczego Franklin-4A,
- przyjęto odpowiednio rozmieszczone względem siebie fragmenty funkcji sinus do zamodelowanie linii wzniosów zaworów,
- zapłon jest symulowany poprzez skokowy wzrost temperatury w cylindrze o 1000K z wyprzedzeniem 5° przed GMP,
- parametry czynnika roboczego w cylindrze obliczane są co $0,1^\circ$ OWK,
- w obliczeniach zakłada się, że paliwo do cylindra dostaje się jako nieodparowane dlatego jego objętość można pominąć w obliczeniach oporów napełniania cylindra.

W pierwszej części modelu wprowadzane są konieczne dane konstrukcyjne układu korbowego oraz wyznaczane położenie tłoka w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Znając położenie tłoka

określana jest chwilowa objętość cylindra [8]. Zadawana jest również dokładność obliczeń liczona w stopniach OWK.

Następnie jest wprowadzona funkcja otwarcia zaworu, w której zmieniając odpowiednio wprowadzone parametry, zmienia się wznios, czas otwarcia i moment otwarcia zaworu.

$$Z(W, K, T) := \left| \begin{array}{l} k \leftarrow \text{length}(\alpha) \\ \text{for } j \in 1 .. k - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} Z_{t_j} \leftarrow W \left[\sin \left[T(\alpha_j + K) \cdot \text{rad} \right] - 0.45 \right] \text{mm} \\ Z_j \leftarrow \left| \begin{array}{l} Z_{t_j} \text{ if } Z_{t_j} \geq 0 \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A_{z_j} \leftarrow D_z \cdot Z_j \cdot \pi \end{array} \right. \\ A_z \end{array} \right.$$

Rys. 13. Funkcja otwarcia zaworu, gdzie:

A_z – pole powierzchni otwarcia zaworu, D_z – średnica zaworu, Z – wznios,

W – parametr wzniosu, K – parametr momentu otwarcia zaworu względem

kąta obrotu wału korbowego, T – parametr czasu otwarcia zaworu [Boguszewicz, 2014].

Funkcja sinus nie odwzorowuje rzeczywistego przebiegu wzniosu zaworu. To założenie zostało przyjęte w celu uproszczenia modelu obliczeniowego. Tak uproszczony model umożliwia porównywanie wpływu zmiany momentu otwarcia zaworu oraz wartości wzniosu w sensie jakościowym. W celu wyznaczenia rzeczywistych wartości napełnienia należy uwzględnić rzeczywistą geometrie krzywki.

Model oparty jest na pętli, w które z zadawaną dokładnością są obliczane parametry w cylindrze (ciśnienie i temperatura). Algorytm uwzględnia energię kinetyczną powietrza w kanale dolotowym [9]. Model nie uwzględnia strat ciepła i oparty jest na przemianach izentropowych.

$$Pc_i \leftarrow Pc_{i-1} \left(\frac{V_{i-1}}{V_i} \right)^\kappa \quad Tc_i \leftarrow Tc_{i-1} \left(\frac{Pc_i}{Pc_{i-1}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Na spadek ciśnienia w kolektorze dolotowym wpływa wiele czynników: stopień otwarcia przepustnicy, rodzaj filtra powietrza, ukształtowanie kanału dolotowego, prędkość obrotowa silnika itd. W rozważanym modelu obliczeniowym zakładamy, że przepustnica jest maksymalnie otwarta. Spadek ciśnienia w modelu obliczeniowym został dobrany w taki sposób by przy zadanej prędkości obrotowej model obliczeniowy uzyskiwał jednakową sprawność napełniania ze zmierzoną podczas badań hamownianych silnika Franklin-4A.

Znając parametry powietrza w kolektorach i w cylindrze obliczana jest prędkość i kierunek przepływu ładunku w szczelinie zaworowej, a następnie chwilowy wydatek masowy. Masa powietrza w cylindrze obliczana jest w każdym kroku poprzez sumę chwilowych wydatków masowych na zaworach [10, 11].

Za pomocą modelu uzyskujemy całkowitą masę czynnika roboczego, który został zasany do cylindra podczas jednego cyklu. Podczas badań hamownianych silnika Franklin 4-A był mierzony wydatek powietrza zasysanego przez silnik za pomocą lemniskaty. Znając prędkość obrotową silnika

wyznaczamy rzeczywistą sprawność napełniania. W celu porównania rzeczywistej i obliczeniowej sprawności napełniania należy uwzględnić masę spalin zassaną powtórnie z kolektora wydechowego oraz masę spalin która przedostała się do kolektora dolotowego podczas przekrycia zaworów w trakcie suwu wydechu. Odejmując od masy czynnika znajdującego się w cylindrze masę zassanych spalin otrzymamy wydatek świeżego powietrza zasysanego przez silnik.

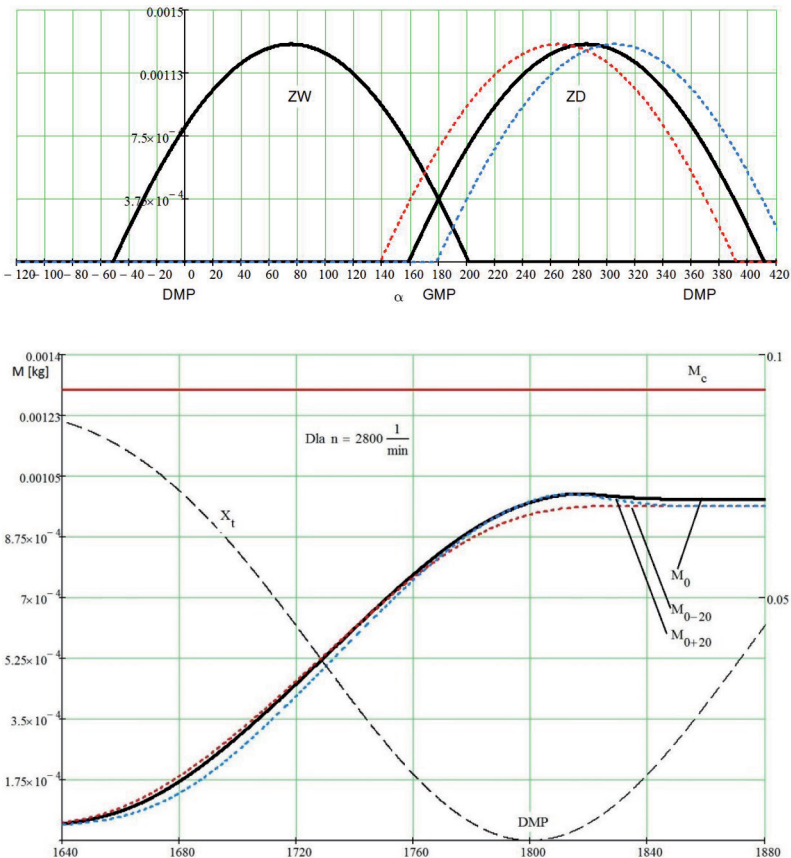
Ostatni moduł algorytmu umożliwia porównywanie różnych ustawień zaworów. Tworzone są wykresy przedstawiające wpływ zmiany ustawień zaworów na napełnienie.

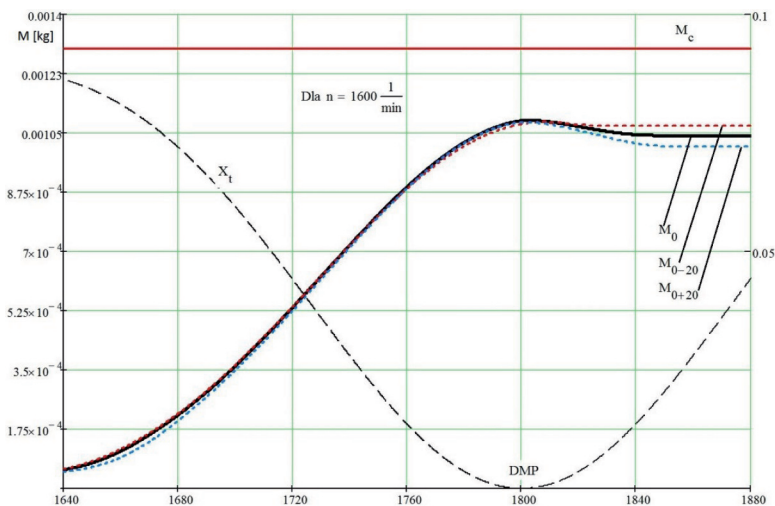
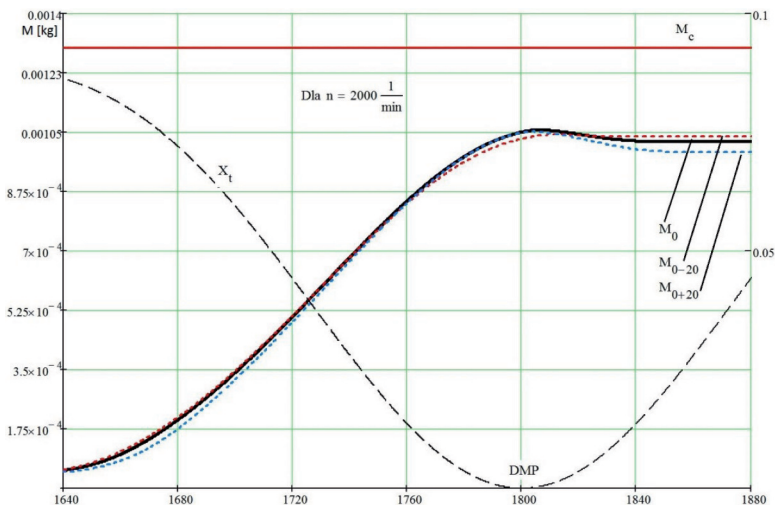
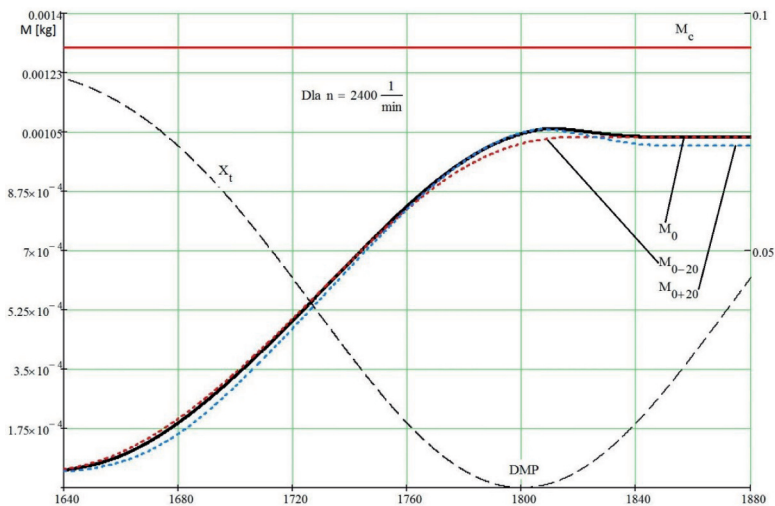
4. WYNIKI OBLICZEŃ

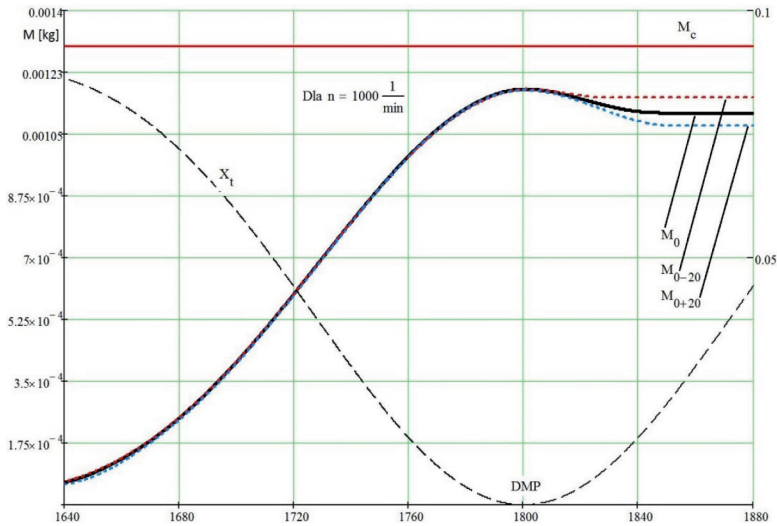
Wykorzystując opisany wyżej model matematyczny zbadano kilka parametrów wpływających na napełnienie cylindra. Do programu wprowadzono dane silnika lotniczego Franklin 4A i dobrano takie ustawienie zaworów, aby osiągnąć największą sprawność napełnienia w warunkach maksymalnej mocy odpowiadającej przy 2800 obr/min.

4.1. Wpływ kąta wyprzedzenia otwarcia zaworu dolotowego

Na wykresach przedstawiono wpływ zbyt wczesnego i zbyt późnego otwarcia zaworu dolotowego dla różnych prędkości obrotowych na napełnianie cylindra (rys. 14).





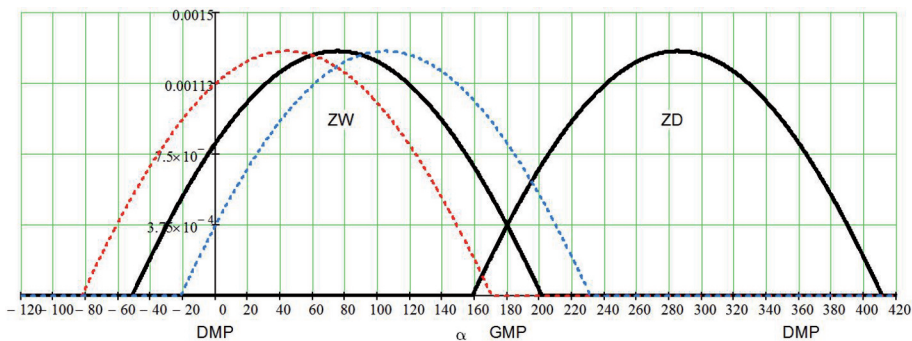


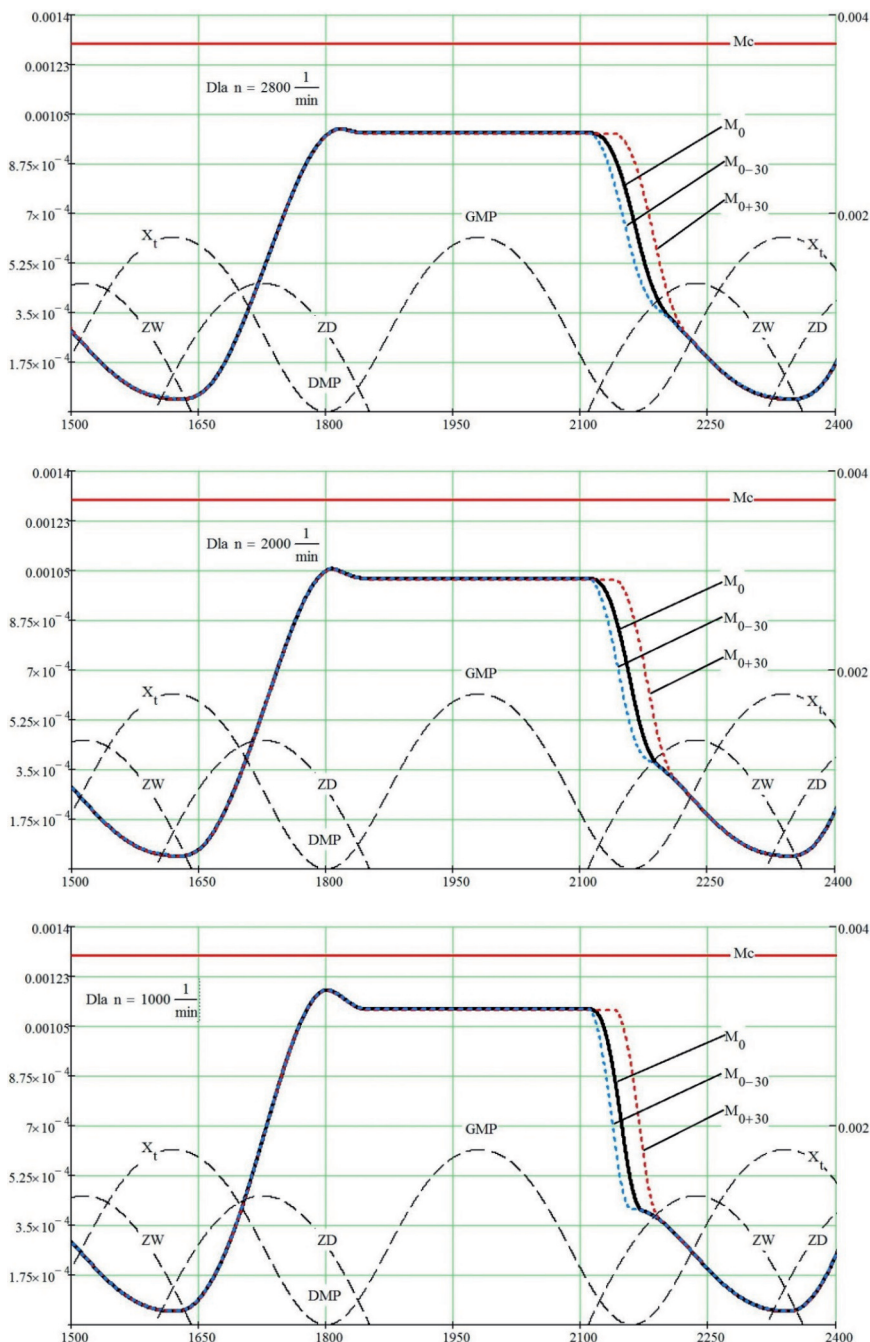
Rys. 14. Wykresy przedstawiają wpływ zmiany kąta otwarcia zaworu dolotowego na napętnienie cylindra dla pięciu prędkości obrotowych, gdzie: M_c – oblicz. masa powietrza w cylindrze dla normalnych warunków; M_0 – masa powietrza dla optymalnego ustawienia zaworów przy prędkości 2800obr/min; M_{0-20} i M_{0+20} – Masa powietrza w cylindrze przy przesunięciu kąta otwarcia zaworu dolotowego o -20° i $+20^\circ$, X_t – położenie tłoka w cylindrze; [Boguszewicz, 2014].

Na przedstawionych wykresach widać wyraźny wpływ przesuwania krzywej otwarcia zaworów na napętnienie cylindrów. Zbyt wczesne zamknięcie zaworu dolotowego jak i zbyt późne ($\pm 20^\circ$ OWK) powoduje zmniejszenie sprawności napętniania o około $\pm 1,5\%$ przy maksymalnej prędkości obrotowej. Zmniejszając prędkość obrotową silnika sprawność napętniania zwiększa się o około 10%. Wcześniejsze otwarcie zaworu dolotowego o 20° powoduje zwiększenie napętnienia o kolejne 3,5%.

4.2. Wpływ kąta wyprzedzenia otwarcia zaworu wylotowego

Na wykresach przedstawiono wpływ zbyt wczesnego i zbyt późnego otwarcia zaworu wylotowego dla różnych prędkości obrotowych na napętnianie cylindra (rys. 15).



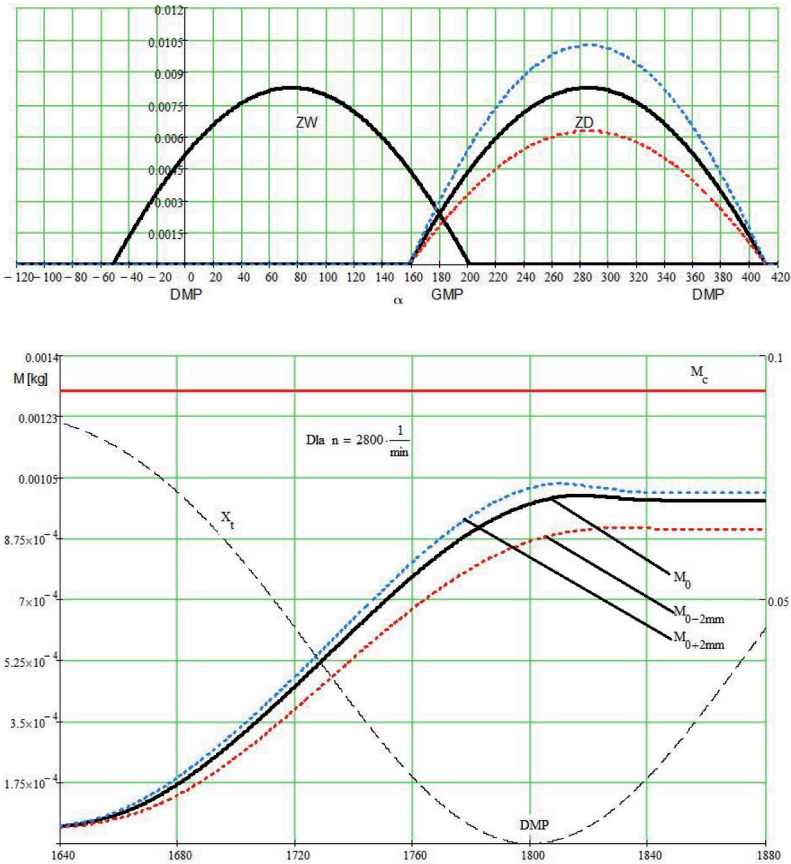


Rys. 15. Wykresy przedstawiają wpływ zmiany kąta otwarcia zaworu wylotowego na napełnienie cylindra dla trzech prędkości obrotowych, gdzie: M_c – oblicz. masa powietrza w cylindrze dla normalnych warunków; M_0 – masa powietrza dla optymalnego ustawienia zaworów przy prędkości 2800obr/min; M_{0-30} i M_{0+30} – Masa powietrza w cylindrze przy przesunięciu kąta otwarcia zaworu dolotowego o -30° i $+30^\circ$, X_t – położenie tłoka w cylindrze [Boguszewicz, 2014].

Z przedstawionych powyżej wykresów wynika, że wartość kąta wyprzedzenia otwarcia zaworu wylotowego ma bardzo mały wpływ na sprawność napełnienia cylindra. Jest to prawdziwe w całym zakresie prędkości obrotowych. Właściwe ustawienie faz dla zaworów wydechowego jest istotne ponieważ wpływa na opory w układzie korbowym podczas suwu wydechu. Opróżnianie cylindra praktycznie w całym zakresie odbywa się z prędkością dźwięku na zaworze wydechowym.

4.3. Wpływ wartości wzniosu zaworu na napełnienie cylindra

Na wykresach przedstawiono wpływ zmiany wzniosu zaworu dolotowego na napełnienie cylindra (rys. 16).



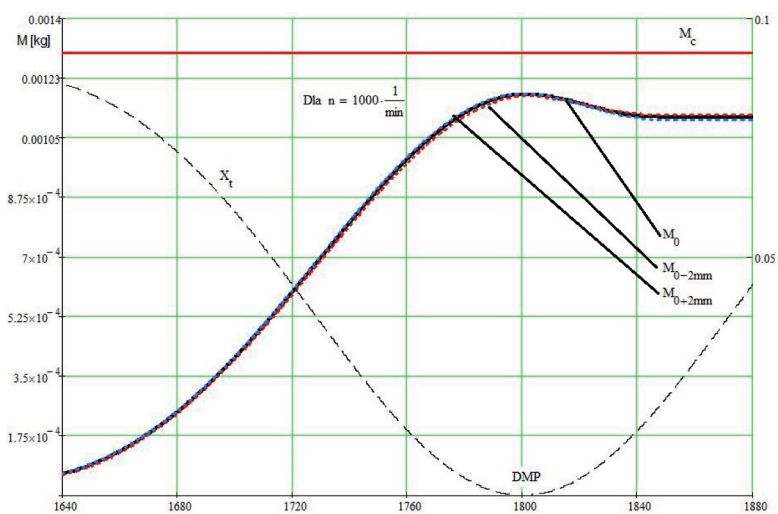
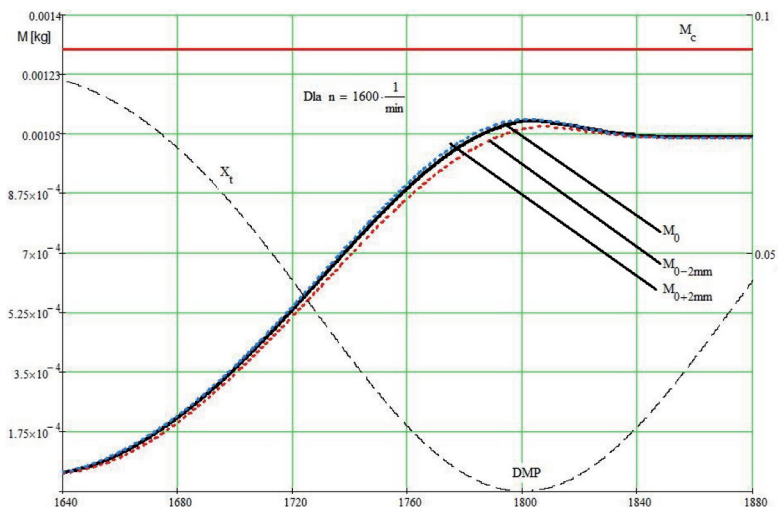
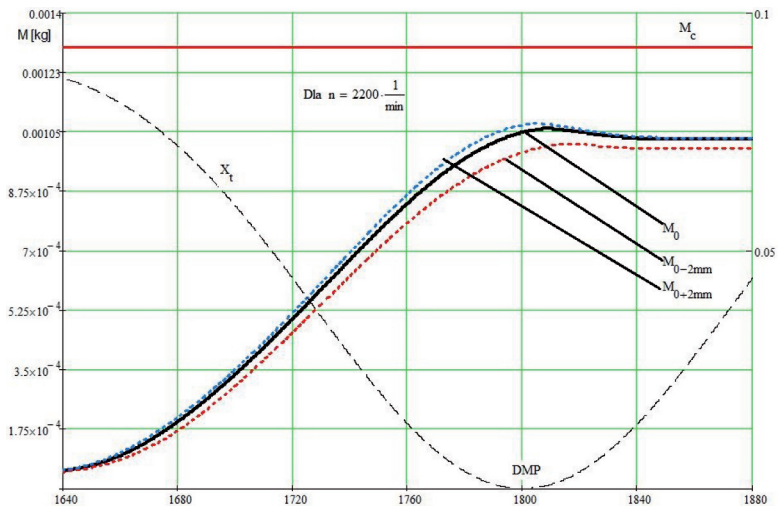
Rys. 16. Wykresy na stronie ... i ... przedstawiają wpływ zmiany wartości wzniosu zaworu dolotowego na napełnienie cylindra dla czterech prędkości obrotowych.

M_c – oblicz. masa powietrza w cylindrze dla normalnych warunków;

M_0 – masa powietrza dla optymalnego ustawienia zaworów przy prędkości 2800obr/min;

M_{0-30} i M_{0+30} – Masa powietrza w cylindrze przy przesunięciu kąta otwarcia zaworu dolotowego o -30° i $+30^\circ$,

X_t – położenie tłoka w cylindrze [Boguszewicz, 2014].



Zwiększenie wzniosu zaworu o 2mm zwiększa sprawność napełnienia cylindra o około 1,7%, a zmniejszenie o tę samą wartość obniża sprawność napełniania o około 6% dla prędkości obrotowej 2800obr/min. Przy niskich prędkościach obrotowych silnika wpływ wzniosu zawory w zakresie ± 2 mm jest praktycznie niezauważalne.

5. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych obliczeń można zaobserwować, że sprawność napełniania cylindra zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się prędkości obrotowej silnika. Taka tendencja jest niekorzystna ponieważ podczas pracy silnika na wysokich obrotach spodziewamy się uzyskania maksymalnych osiągnięć, a przy pracy na niskich obrotach istotnie jest zminimalizowanie zużycia paliwa. Ważne jest ze względów ekologicznych i ekonomicznych by silnik był zasilany mieszanką o składzie maksymalnie zbliżonym do stechiometrycznego, co oznacza, że podawana dawka paliwa jest uwarunkowana ilością zasysanego powietrza.

Podczas konstruowania układ wymiany ładunku silnika tłokowego dobiera się jedną prędkość obrotową silnika, z którą silnik będzie pracował najbardziej wydajnie. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie układów zmiennych faz rozrządu i wzniosów zaworów. Takie układy pozwalają na zwiększenie osiągnięć w całym zakresie prędkości obrotowych oraz na ekonomiczną pracę gdy nie ma zapotrzebowania na moc silnika. Możliwe jest wykorzystanie dobrego napełniania cylindra przy niskich prędkościach obrotowych silnika w celu skrócenia czasu akceleracji.

Opracowana metodyka pozwoli przeprowadzić znacznie szersze badania wpływu różnych czynników jak np. : doładowania mechanicznego i turbodoładowania, doładowania dynamicznego, oporów dolotu (filtry odpylacze), oporów wylotu (tłumiki hałasu, dopalacze katalityczne), wysokość lotu, warunki klimatyczne, itd., itp.

Pozwoli to w perspektywie na precyzyjny wybór sposobu doładowania, umożliwienie zastosowania filtrów powietrza wlotowego i tłumików wylotowych do istniejących już silników – przystosowując do wymogów statku latającego i przewidywanych lądowisk. W nowoprojektowanych konstrukcjach wykorzystanie sukcesów już osiągniętych w motoryzacji. Podnosząc sprawność napełniania cylindrów raz osiągniętych silników dostrojonych do bieżących potrzeb lotu wpłynie korzystnie na zagrożenia ekologiczne przez ograniczenie wytwarzania dwutlenku węgla oraz toksyn spalinowych.

Oczywiście jak każde badania analityczne są one znacznie tańsze i szybciej pozwalają na wybór optymalnej koncepcji konstrukcji i jej regulacji niż ich uzyskiwanie wyłącznie na podstawie badań eksperymentalnych – koniecznych, jako weryfikacja wyników badań analitycznych. Wybranej na ich podstawie koncepcji konstrukcji czy nastaw i regulacji „tylko” modyfikowanych konstrukcji do potrzeb statku powietrznego i jego użytkowania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Balicki W., Chachurski R., Kozakiewicz A., Szczeciński J., Szczeciński S., 2009, „Problematyka wymiany ładunku w cylindrach lotniczego silnika tłokowego”, Prace Instytutu Lotnictwa, 199, s. 135-140.
- [2] „Optymalizacja napędów rozrządu” www.warsztaty.pl
- [3] Balicki W., Szczeciński S., Chachurski R., Kozakiewicz A., Szczeciński J., 2009, „Specyfika obciążeń dynamicznych lotniczych Silników tłokowych”, Prace Instytutu Lotnictwa, 199, s. 128-134.

- [4] Mazur M. „Układy zmiennych faz rozrządu w silnikach spalinowych” referat, Koło naukowe Mechaników i Górników AGH Miękinia 04/2008,
<http://www.kmg.agh.edu.pl/KN/pps/uklady%20zmiennych%20faz%20rozrządu%20w%20silnikach%20spalinowych.pdf>,
- [5] <http://www.mitsubishi-motors.com/en/spirit/technology/library/mivec.html>
- [6] “Automotive technology bible revisited, Variable Valve Timing” 01/2011
- [7] Orkisz M. i Szczeciński S., 1985, „Numeryczna metoda określania efektywnego końca napełniania cylindra silnika spalinowego”, *Silniki spalinowe*, 3, s. 23-27.
- [8] Dzierżanowski P., Łyżwiński M. i Szczeciński S., 1981, *Silniki tłokowe*, WKiŁ, Warszawa.
- [9] Orkisz M., Prociak R. i Szczeciński S., 1982, „Czynnik dynamiczny w procesie napełniania cylindrów silnika tłokowego” *TLiA*, 1, s. 32-34.
- [10] Cupiał K., 1972, „Bezsprężarkowe doładowanie silników spalinowych”, *Silniki spalinowe*, 4, s. 65-73.
- [11] Cupiał K., 1975, „Obliczenia numeryczne procesu wymiany ładunku w silnikach spalinowych” *Silniki spalinowe*, 3, s. 11-18.

INFLUENCE OF VALVES TIMING AND VALVES LIFTS ON PISTON ENGINE CYLINDER FILLING

Abstract

The purpose of this paper was to present the influence of the four stroke engine valve train parameters on the efficiency of cylinder filling. Examples of variable valve timing system were shown as well. The effect of valve timing and lift change versus fill of the cylinder were shown using a simplified mathematical model of charge exchange in the cylinder. The performed calculations show that maximum efficiency of cylinder filling is achieved at the lowest engine rotation speeds. At the maximum engine rotation speeds, at which we expect the largest performance, it is necessary to select the appropriate moment of opening and closing of the intake valves.

Keywords: Piston engine, filling of cylinder, timing.