

ANALISE OF POSSIBILITY OF THE SB3.1 DIESEL ENGINE MODERNISATION

Leszek Szczęch

Faculty of Mechanical Engineering
Military University of Technology
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 6839546, fax: +48 22 6839546
e-mail: l.szczech@wme.wat.edu.pl

Abstract

Analysę możliwości zmodernizacji silnika badawczego SB3.1 przedstawiono w tym artykule. Silnik ten jest doskonałym narzędziem pozwalającym na prowadzenie prac badawczych nad przebiegiem wytwarzania mieszanki, samozapłonu i spalania w silniku o ZS z wtryskiem bezpośrednim. Umożliwia wprowadzanie zmian stopnia sprężania, faz rozrządu i kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Jego wadą jest przestarzały układ zasilania wyposażony w rzędową pompę wtryskową i wtryskiwacz wielootworowy pochodzące z silnika SW-680. Rozwiązaniem niedoskonałości tego silnika może być zastosowanie układu wtryskowego typu Common-Rail, który pozwoliłby na poszerzenie możliwości badawczych silnika SB3.1 na badania procesów ograniczania emisji związków toksycznych w spalinach silnika o zapłonie samoczynnym, a zwłaszcza filtrów sadzy i dopalaczy katalitycznych czy układów zmniejszających emisję tlenków azotu. Modernizacja silnika SB3.1 musi przewidywać zmianę pompy wtryskowej na pompę wysokiego ciśnienia, podającą paliwo pod ciśnieniem co najmniej 135 MPa, wtryskiwacza hydromechanicznego na wtryskiwacz sterowany elektronicznie. Silnik musi zostać wyposażony także w szereg urządzeń kontrolno- pomiarowych i jednostkę sterującą przetwarzającą zbierane sygnały pomiarowe na dawkę paliwa wtryskiwaną do cylindra.

Keywords: combustion engine, Common Rail system

ANALIZA MOŻLIWOŚCI MODERNIZACJI SILNIKA SB 3.1

Streszczenie

Referat zawiera analizę możliwości zmodernizowania silnika badawczego SB3.1. Silnik ten jest doskonałym narzędziem pozwalającym na prowadzenie prac badawczych nad przebiegiem wytwarzania mieszanki, samozapłonu i spalania w silniku o ZS z wtryskiem bezpośrednim. Umożliwia wprowadzanie zmian stopnia sprężania, faz rozrządu i kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Jego wadą jest przestarzały układ zasilania wyposażony w rzędową pompę wtryskową i wtryskiwacz wielootworowy pochodzące z silnika SW-680. Rozwiązaniem niedoskonałości tego silnika może być zastosowanie układu wtryskowego typu Common-Rail, który pozwoliłby na poszerzenie możliwości badawczych silnika SB3.1 na badania procesów ograniczania emisji związków toksycznych w spalinach silnika o zapłonie samoczynnym, a zwłaszcza filtrów sadzy i dopalaczy katalitycznych czy układów zmniejszających emisję tlenków azotu. Modernizacja silnika SB3.1 musi przewidywać zmianę pompy wtryskowej na pompę wysokiego ciśnienia, podającą paliwo pod ciśnieniem co najmniej 135 MPa, wtryskiwacza hydromechanicznego na wtryskiwacz sterowany elektronicznie. Silnik musi zostać wyposażony także w szereg urządzeń kontrolno- pomiarowych i jednostkę sterującą przetwarzającą zbierane sygnały pomiarowe na dawkę paliwa wtryskiwaną do cylindra.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, układ Common Rail

1. Wstęp

Większość silników o zapłonie samoczynnym zwłaszcza stosowanych do napędu samochodów ciężarowych jest wciąż wyposażanych w tradycyjne układy zasilania wykorzystujące do wytwarzania mieszanki paliwowo powietrznej rzędowe pompy wtryskowe i wielootworowe lub

czopikowe wtryskiwacze. Niestety w coraz mniejszym zakresie umożliwiają one spełnienie coraz bardziej zastrzegających się norm dotyczących emisji związków toksycznych w spalinach. Poszukiwanie nowych rozwiązań doprowadziło do opracowania różnych typów układów wtryskowych sterowanych elektronicznie, wykorzystujących do sterowania przebiegiem wytwarzania i spalania mieszanki paliwowo-powietrznej całego szeregu czujników pomiarowych, układów elektronicznych i elektromechanicznych. Pozwalają one na sterowanie silnikiem w szerokim zakresie prędkości obrotowej i obciążenia przy utrzymaniu wysokiej czystości spalin opuszczających silnik.

Jednym z takich rozwiązań jest układ Common Rail (CR) pozwalający na precyzyjne sterowanie dawką paliwa, realizujący wysokociśnieniowy wtrysk paliwa, wpływający na poprawę rozpylania paliwa podawanego do komory spalania silnika.

Wiele silników o zapłonie samoczynnym nie jest w stanie pracować przy obecnym reżimie czystości spalin, mimo że pod względem technicznym są jeszcze zupełnie sprawne. Dotyczy to zwłaszcza silników badawczych często stanowiących unikalne, jednostkowe konstrukcje o dużych możliwościach adaptacyjnych. Rozwiązaniem w ich przypadku może być zastąpienie tradycyjnego układu zasilania z pompą wtryskową układem z elektronicznie sterowanymi pompowtryskiwaczami lub układem Common Rail. Ten ostatni układ zresztą jest chyba najłatwiejszy do zaadaptowania ze względu na brak konieczności doprowadzania napędu do pompowtryskiwaczy (z reguły umieszczanych na głowicy). Wystarczy jedynie napędzić pompę wysokiego ciśnienia, która może być umieszczona w miejsce usuniętej pompy wtryskowej.

2. Stanowisko badawcze z silnikiem SB3.1



Rys. 1. Widok silnika badawczego SB3.1; a) prawa strona, b) lewa strona
Fig. 1. The SB3.1 test diesel engine, a) right side, left side

SB3.1 jest silnikiem jednocylindrowym czterosuwowym z wtryskiem bezpośrednim, chłodzonym cieczą. Część elementów do budowy tego silnika wykorzystano z silnika SW-680. W skład tych elementów można zaliczyć: tłok z pierścieniami, sworzeń tłokowy, korbówód z panewką, tuleję cylindrową, zawory i ich napęd, wtryskiwacz. Część elementów takich jak głowica, która w oryginalnym silniku SW-680 obejmuje trzy cylindry zostały przerobione tak, aby mogła być zastosowana w silniku jednocylindrowym. Głowica została przecięta a powstałe otwory odsłoniętych przestrzeni wodnych zostały zaślepione specjalną pokrywą. Dodatkowo w głowicy wykonano gniazdo do mocowania czujnika piezokwarcowego umożliwiającego prowadzenie indykowania komory spalania. Pozostałe elementy musiały zostać wykonane na indywidualne zamówienie. Do tych elementów można zaliczyć kadłub silnika blok cylindrowy, pokrywy przednią i tylną, koło zamachowe wraz z osłoną, miskę olejową, podstawę i napęd pompy wtryskowej. Silnik ma kadłub odlany z żeliwa o konstrukcji tunelowej. Wał korbowy jest

łożyskowany na łożyskach rolkowych. Blok cylindra ma przestrzeń wodną odwzorowaną z przestrzeni silnika SW- 680. Między kołnierzem cylindra a kadłubem znajdują się wymienne podkładki umożliwiające zmianę stopnia sprężania w granicach od 15 do 20. W silniku użyto dzielonego wału rozrządu, który umożliwia zmianę faz rozrządu. Dopuszczalna prędkość obrotowa silnika wynosi 2500 obr/min. Dane techniczne zostały zawarte w tabeli nr.3.1.

Tab. 1. Dane techniczne silnika
Tab. 1. Technical data of the engine

Silnik	SB3.1 (SW 670)
Wymiary (szer./dł./wys.)	950/1160/1160 mm
Masa	650 kg
Objętość skokowa	1,845 cm ³
Stopień sprężania	≈15,8
Średnica tłoka	127 mm
Skok tłoka	146 mm
Jednostkowe zużycie paliwa	245 g/kWh
Ciśnienie w układzie smarowania	0,41 MPa
Kąt początku tłoczenia	26 ⁰

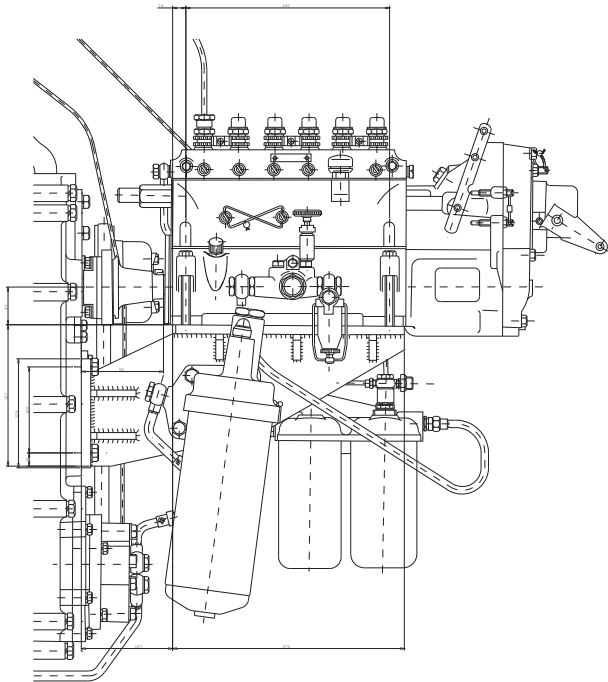
Silnik SB3.1 wyposażony jest w układ wtryskowy z wtryskiem bezpośrednim do komory spalania silnika. Komora spalania typu toroidalnego umieszczona jest w tłoku. W obecnym rozwiązaniu paliwo podawane jest przez pompę rzędową sześćosekcyjną typu P-56 (rys. 2) stosowaną do zasilania silnika SW-680. Silnik badawczy SB3.1 jest silnikiem jednocylindrowym, więc konstrukcja pompy wtryskowej musiała zostać zmodernizowana tak by silnik mógł być zasilany jest tylko przez jedną sekcję. Pozostałe sekcje tłoczące zostały zdemontowane a gniazda i podstawy zamocowanej w przedniej części silnika. Ze względu na znaczną długość pompy wtryskowej i niebezpieczeństwo występowania drgań podstawa została wzmocniona zastrzałem. Przekazanie napędu z silnika na pompę następuje poprzez sprzęgło kłowe, które umożliwia pracę elementów o osiach nieprzecinających się. Elementy kłowe na silniku i na pompie wtryskowej przekazują napęd za pomocą tekstolitowej wkładki sprzęgającej. Od strony silnika tarcza kłowa mocowana jest na wałku wyprowadzonym z silnika w sposób umożliwiający bezstopniowe wprowadzanie zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Skala kątowa umożliwiająca prowadzenie tej regulacji umieszczona jest na wale korbowym silnika. Pompa wtryskowa wyposażona jest w regulator wielozakresowy umożliwiający utrzymywanie stałej prędkości obrotowej silnika przy zmianach obciążenia silnika. Dane techniczne pompy zostały umieszczone w tabeli nr 2.

Tab. 2. Charakterystyka pompy wtryskowej
Tab. 2. The injection pump characteristic

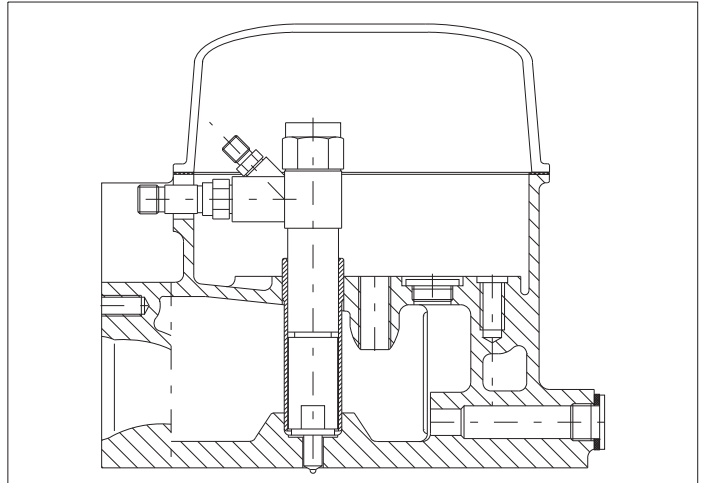
Typ pompy	P 56-D
Liczba sekcji tłoczących	1 (pięć sekcji jest wymontowanych)
Element tłoczący	FPE2-10
Średnica tłoka	10 mm
Skok wstępny tłoka	4,5 ^{-0,1} mm
Regulator prędkości obrotowej	R2V20a-110/384A/M
Nominalna dawka paliwa	130 mm ³ /cykl
Nominalna prędkość obrotowa	1100 obr/min
Masa pompy	18,5 kg

Wtryskiwacz silnika SB3.1 umieszczony jest pod pokrywą głowicy. Wstawiony jest w mosiężną tuleję z gniazdem w dolnej części i dociśnięty przy pomocy zacisku jarzmowego.

Paliwo doprowadzone jest z pompy wtryskowej przez króciec wyprowadzony na zewnątrz głowicy przez przepust (rys.3). Odprowadzenie nadmiaru paliwa wykonane jest rurkami metalowymi przez przepust w tylnej ścianie głowicy. Końcówka rozpylająca wtryskiwacza wyprowadzona jest przez otwór w głowicy i wystaje około 2-3 mm do komory spalania.



Rys. 2. Pompa rzędowa P-56 na silniku SB3.1
Fig. 2. The P-56 injection pump on the SB3.1 engine



Rys. 3. Wtryskiwacz silnika SB3.1 umieszczony na głowicy
Fig. 3. The SB3.1 engine injector on engine head

3. Zakres modernizacji silnika SB3.1

Silnik SB3.1 jest przeznaczony do realizacji prac badawczych nad układami wtrysku wysokociśnieniowego. W związku z planowaną modernizacją przewidziano przede wszystkim zmianę pompy podającej paliwo i wtryskiwacza sterowanego elektronicznie.

Przyjęty do modernizacji układ zasilania Common Rail powinien zapewnić stabilną pracę silnika SB3.1 zasilanego olejem napędowym, paliwami z grupy nafty oraz estrami olejów roślinnych.

Ciśnienie wtrysku paliwa przyjęto zgodnie z danymi układów CR I generacji. Ciśnienie to powinno wynosić 135 MPa.

Układ sterowania powinien wykorzystywać dane obliczeniowe z czujników:

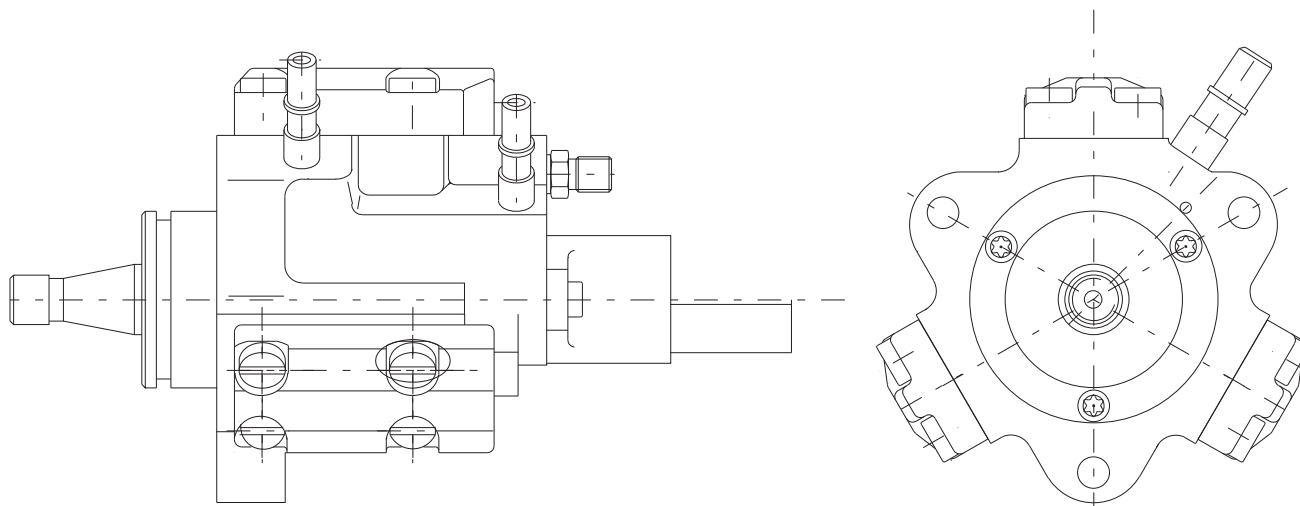
- prędkości obrotowej,
- położenia wału korbowego,
- ciśnienia paliwa,
- temperatury cieczy chłodzącej,
- położenia pedału przyspieszenia,
- przepływomierza powietrza.

Wtryskiwacz powinien umożliwiać podanie dawki paliwa o objętości od 10 do 200 mm³. Dawka nominalna dla silnika SB3.1 wynosi ok. 110 mm³. Zalecane jest przyjęcie sterownika, który umożliwi dowolne sterowanie zarówno kątem wyprzedzenia wtrysku, objętością dawek przedwtrysku, wtrysku zasadniczego i kilku powtrysków. Szeroki zakres sterowania przebiegiem wtryskiwania powinien zapewnić możliwość prowadzenia prac badawczych nad przebiegiem spalania paliwa w silniku o ZS oraz osprzętu dodatkowego w tym układów dopalających poszczególne składniki spalin a także filtry sadzy.

Moment obrotowy niezbędny do napędu pompy wysokiego ciśnienia nie powinien przekroczyć 10% momentu maksymalnego silnika wynoszącego ok. 140 Nm.

Paliwo pod wysokim ciśnieniem jest przetłaczane do zasobnika ciśnienia, który ma jedno wejście i jedno wyjście a także zamontowany czujnik ciśnienia paliwa.

Do zastosowania w modernizowanym silniku SB3.1 przewidziano pompę wysokiego ciśnienia produkcji firmy Siemens typ FIP6186-10F (rys. 4). Pompa ta jest pompą wielotłoczkową, trójsekcyjną, podającą paliwo pod ciśnieniem do 135 MPa.



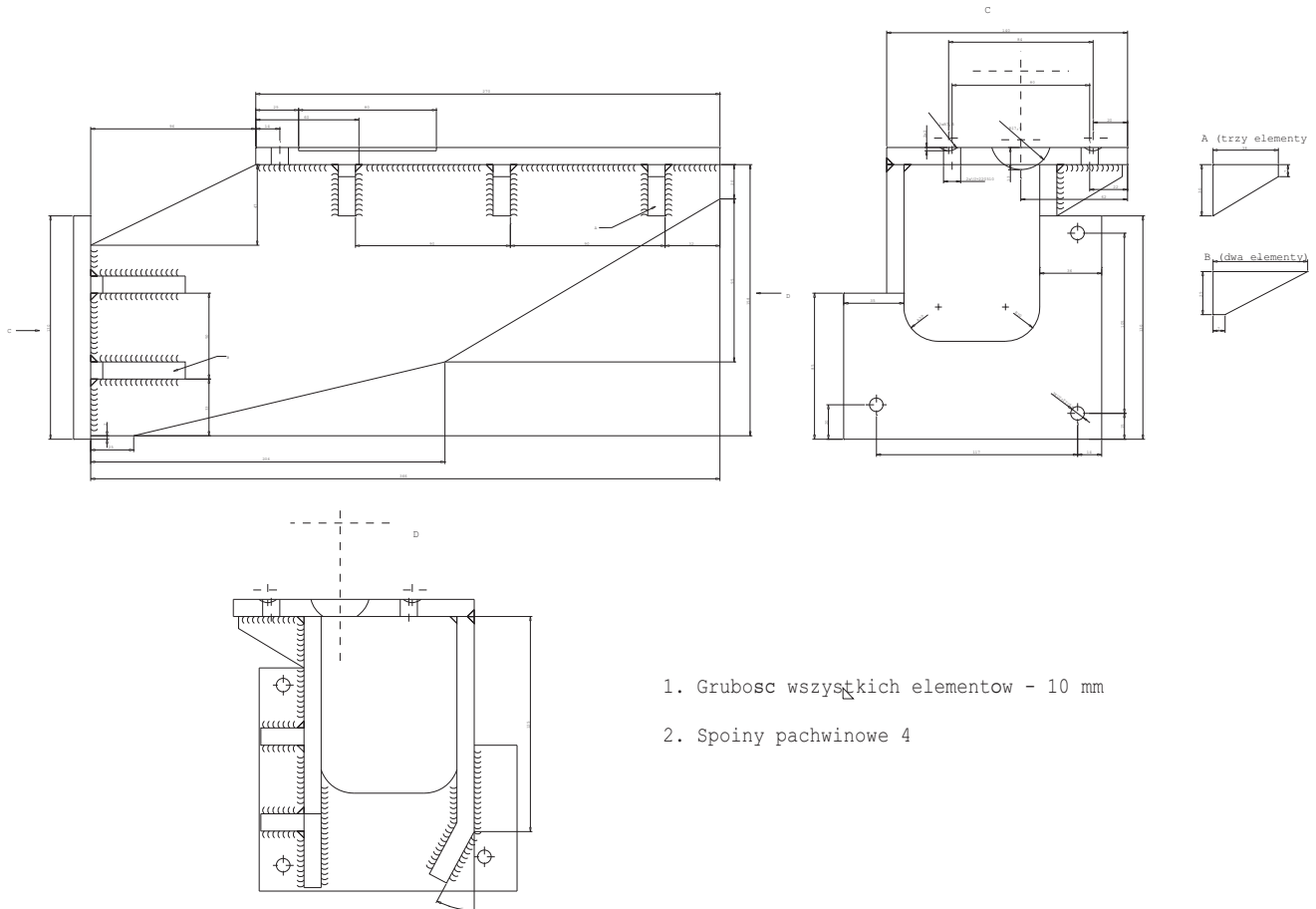
Rys. 4. Pompa wysokiego ciśnienia Siemens typ FIP6186-10F
Fig. 4. The high pressure pump type FIP6186-10F

Wybrana pompa wysokiego ciśnienia musi być napędzana przez wał korbowy silnika. Jedyнным możliwym punktem odbioru napędu w silniku SB3.1 jest wałek napędu pompy wtryskowej, który wyprowadzony jest na pokrywę po lewej stronie z przodu silnika. Do pokrywy przymocowany jest wspornik pompy wtryskowej. Wspornik ten planuje się wykorzystać jako miejsce mocowania pompy wysokiego ciśnienia. Oś wałka napędowego pompy wtryskowej znajduje się 50 mm powyżej górnej płaszczyzny wspornika. Fakt ten powoduje problem z bezpośrednim przymocowaniem pompy wysokiego ciśnienia do wspornika. Rozwiązaniem może być wykonanie podfrezowania w powierzchni wspornika, tak aby wystające części kołnierza mocującego nie kolidowały ze wspornikiem pompy wtryskowej. Dolna wystająca część kołnierza pompy wysokiego ciśnienia jest położona w odległości 58 mm od osi pompy. Do wspornika pompy wtryskowej należy także przymocować pionowy wspornik, do którego za pomocą kołnierza pompa wysokiego ciśnienia będzie mogła być przymocowana. Przykład zamocowania pompy wysokiego ciśnienia na wsporniku pompy wtryskowej silnika SB3.1 przedstawiono na rysunku 8.

Na rysunku 5 przedstawione są zmiany wspornika. Ponieważ nowa pompa wysokiego ciśnienia podparta jest tylko w przedniej części na złączu kołnierzowym, tylna część wspornika może zostać skrócona w celu zmniejszenia masy i zwiększenia częstości drgań własnych, które podczas pracy silnika mogą doprowadzić do urywania elementów wspornika. W powierzchni wspornika wykonano otwory do mocowania pionowego elementu łączącego, do którego mocowany jest kołnierz pompy wysokiego ciśnienia oraz wyfrezowane jest gniazdo służące do pomieszczenia dolnego narożnika kołnierza pompy wysokiego ciśnienia. Pompa ta będzie mocowana do elementu pionowego za pomocą trzech śrub.

Mocowanie pompy powinno zapewnić przekazanie napędu od silnika i montaż sprzęgła kłowego. Sprzęgło kłowe jest elementem wykorzystanym z oryginalnej konstrukcji przeniesienia napędu na pompę wtryskową P-56. Zamocowane jest zaciskowo i posiada możliwość regulacji kąтового ustawienia sprzęgła. Drugi element jest osadzony na stożkowej końcówce wałka

napędzającego pompę wysokiego ciśnienia i zamocowany przy pomocy centralnej nakrętki. Przekazanie napędu odbywa się poprzez wkładkę sprzęgającą nawet wtedy gdy pompa nie jest ustawiona idealnie w osi wałka napędowego silnika. Możliwe jest zastosowanie innego sprzęgła w celu przekazania napędu na pompę wysokiego ciśnienia pod warunkiem, że sprzęgło to będzie mogło przekazać moment obrotowy o wystarczającej wartości.



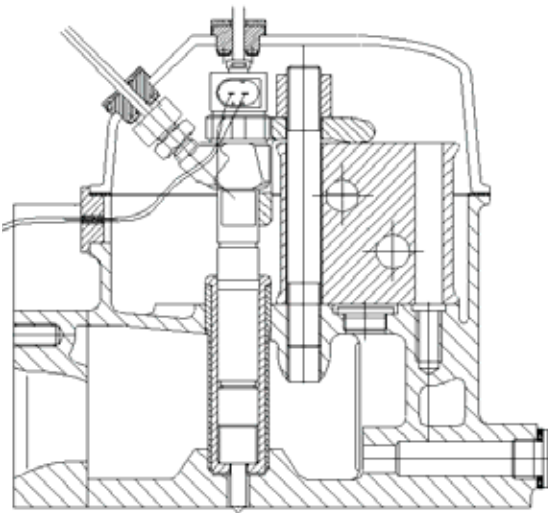
Rys. 5. Wspornik pompy wysokiego ciśnienia układu CR silnika SB3.1

Fig. 5. The high pressure pump bracket of the SB3.1 CR system

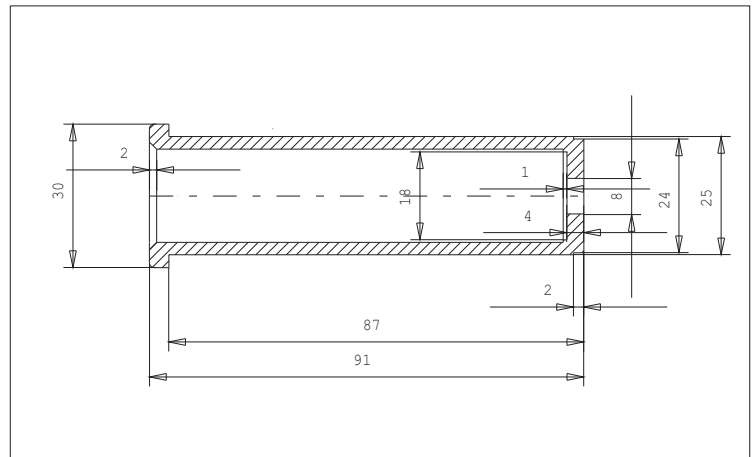
Do opracowania modernizacyjnego przyjęto wtryskiwacz silnika G9TD produkowany przez firmę Renault (2.2 CDI) wyposażony w układ CR produkowany przez Firmę Bosch. Ponieważ nowy wtryskiwacz z silnika G9TD (rys. 6) różni się w stosunku do wtryskiwacza silnika SB3.1 zarówno co do wymiarów jak i położenia króćców należy dokonać działań modernizacyjnych zarówno tuleję wtryskiwacza jak i sposób doprowadzenia i odprowadzenia paliwa z głowicy.

Wtryskiwacz silnika G9TD ma mniejszą średnicę, ale jest nieco dłuższy od wtryskiwacza SB3.1. Dłuższa jest także końcówka rozpylacza. Różnice wymiarów pozwalają na zastosowanie tulejki redukcyjnej, pozwalającej na zamontowanie tego wtryskiwacza w głowicy silnika SB3.1 (rys. 7). Nowa tulejka powinna być wsunięta w tulejkę głowicy silnika SB3.1 z wykorzystaniem miedzianej uszczelki, którą w oryginalnym silniku uszczelniony był wtryskiwacz. Nowy wtryskiwacz powinien być mocowany z wykorzystaniem oryginalnej uszczelki wtryskiwacza silnika G9TD. Górne zakończenie nowego wtryskiwacza zostało przesunięte o ok. 32 mm wyżej w kierunku pokrywy głowicy. Wymusza to całkowitą zmianę konstrukcji jarzma mocującego wtryskiwacz. Zmianę konstrukcyjną należy wprowadzić w sposobie doprowadzenia paliwa do nowego wtryskiwacza. Króciec wlotowy w tym wtryskiwaczu skierowany jest do góry pod kątem 45° . Ponieważ oryginalnego otworu w głowicy, przez który doprowadzane było paliwo nie da się obecnie wykorzystać, otwór ten powinien zostać zaślepiony.

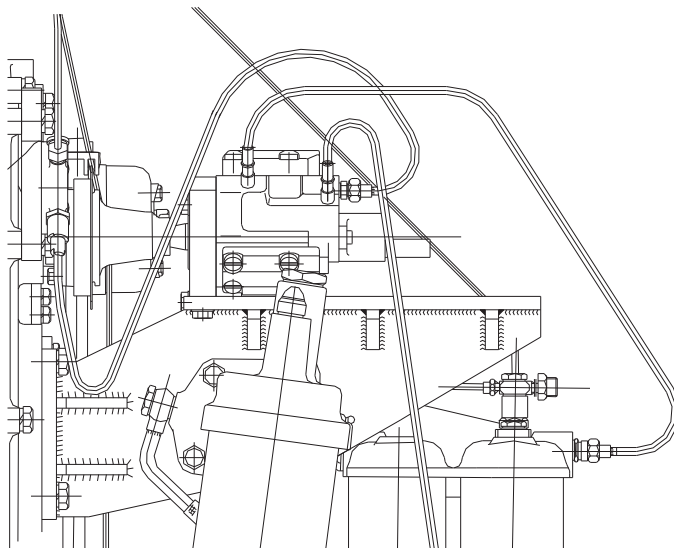
Ponieważ silnik badawczy SB3.1 jest silnikiem jednocylindrowym nie ma potrzeby stosowania obszernego zasobnika ciśnienia. Większość stosowanych zasobników ma kształt wydłużonej grubościenniej rury umieszczonej wzdłuż rzędu cylindrów silnika. Przy jednym cylindrze można zastosować niewielki zwarty zasobnik ciśnienia produkowany przez firmę Delphi (rys. 9). Zasobnik ten ma bardzo zwartą, kulistą budowę. Po zaślepieniu trzech niepotrzebnych wyjść może być z łatwością zamontowany w prawie dowolnym miejscu na silniku. Do zasobnika podawane jest paliwo pod ciśnieniem z pompy wysokiego ciśnienia. Z zasobnika paliwo przepływa do wtryskiwacza umieszczonego na głowicy. Zasadne jest, aby miejsce zamontowania zasobnika znajdowało się na głowicy lub w górnej części bloku cylindrowego. Z tego względu przewidziano montaż tego zasobnika na specjalnej płycie montażowej, którą przymocowano do bloku cylindrowego z przodu silnika powyżej pompy wysokiego ciśnienia.



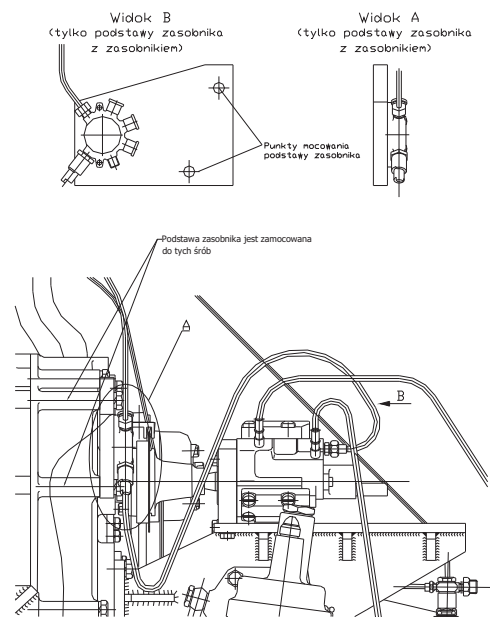
Rys. 6. Wtryskiwacz silnika G9TD
Fig. 6. The G9T engine injector



Rys. 7. Tulejka redukcyjna wtryskiwacza
Fig. 7. The reductive muff of the injector



Rys. 8. Zamocowanie pompy wysokiego ciśnienia układu CR na wsporniku pompy wtryskowej silnika SB3.1
Fig. 8. Montage of the CR system high pressure pump on the bracket of the SB3.1 engine



Rys. 9. Sposób montażu zasobnika ciśnienia paliwa układu CR na silniku SB3.1
Fig. 9. Montage of the fuel pressure accumulator of the SB3.1 engine CR system

Układ CR wypracowuje przebieg wtryskiwania na podstawie informacji zbieranych z całego szeregu czujników kontrolujących stan jego pracy. Są to czujniki:

- prędkości obrotowej silnika,
- położenia wału korbowego,
- położenia pedału przyspieszenia,
- natężenia przepływu powietrza w kolektorze dolotowym,
- ciśnienia otoczenia (opcjonalnie),
- ciśnienia paliwa w układzie zasilania,
- temperatury spalin,
- temperatury cieczy chłodzącej.

Wszystkie informacje z czujników kierowane są do jednostki centralnej, która wypracowuje dane do sterowania przebiegiem wtrysku paliwa. W przypadku silnika badawczego SB3.1 nie może to być układ standardowy. Największy kłopot polega na tym, że silnik ten jest jednocylindrowy, a większość silników z układem CR to jednostki czterocylindrowe, w których pracują cztery wtryskiwacze włączane kolejno zgodnie z kolejnością pracy cylindrów. Nie można także wpływać na kształtowanie charakterystyki wtrysku, liczby wtrysków itd. Problem ten jest bardzo szeroki i wymaga do rozwiązania wykonania szerokiego zakresu przedsięwzięć, które mogą być tematem oddzielnej pracy.

4. Wnioski

1. Silnik badawczy SB3.1 znajduje się w dobrym stanie technicznym i mimo wieloletniej eksploatacji doskonale nadaje się do prowadzenia prac badawczych nad przebiegiem spalania w komorze otwartej typu toroidalnego lub nad doborem paliw (w tym także biopaliw).
2. Jednym z większych problemów do rozwiązania jest przestarzały układ zasilania, który nie potrafi sprostać potrzebom badawczym nad wpływem kształtowania przebiegu wtrysku paliwa na przebieg spalania. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie wysokociśnieniowego układu zasilania typu Common Rail z układem sterowania umożliwiającym realizację wtrysku wielofazowego.
3. Zastosowanie układu CR wymusza wprowadzenie kilku zmian konstrukcyjnych umożliwiających montaż elementów tego układu a zwłaszcza pompy wysokiego ciśnienia, która musi być napędzana, wtryskiwacza elektronicznego z doprowadzeniem i odprowadzeniem paliwa spod pokrywy głowicy, rury zbiorczej i układu sterowania elektronicznego.
4. Moment oporowy stawiany przez pompę wysokiego ciśnienia wynosi ok. 14 Nm, co jest wartością bardzo znaczną stanowiącą 10% momentu maksymalnego silnika. Jediną nadzieją na poprawę tego niekorzystnego układu jest w spodziewanym przyroście mocy silnika w wyniku poprawy jakości mieszanki paliwowo-powietrznej tworzonej pod wpływem wysokiego ciśnienia.
5. Zastosowany układ elektroniczny musi zapewnić możliwość sterowania w szerokim zakresie przebiegu wtrysku paliwa zwłaszcza przedwtrysków i powtrysków. Możliwe powinno być także realizowanie funkcji zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa w funkcji prędkości obrotowej i w funkcji obciążenia.