

Sławomir LUFT<sup>1</sup>  
Tomasz SKRZEK<sup>2</sup>

### **ANALIZA ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH UKŁADÓW ZASILANIA SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM**

*W artykule omówione są przykłady kilku rozwiązań konstrukcyjnych układów zasilania silników z zapłonem samoczynnym. Przedstawione w ujęciu chronologicznym rozwiązania wskazują tendencje oraz kierunki rozwoju układów zasilania. W artykule przedstawiono także podstawowe cechy kolejnych rozwiązań oraz ich zasady funkcjonowania.*

### **ANALYSIS OF THE POWER ENGINEERING SOLUTIONS COMPRESSION IGNITION ENGINES**

*The paper discusses examples of several fuel system design solutions of diesel engines. The solutions, presented in a chronological order, show tendencies and trends in fuel system development. The paper presents also basic features of the consecutive solutions and their working principles.*

#### **1. WSTĘP**

Cechą charakterystyczną silnika o zapłonie samoczynnym, odróżniającą go od silników innych typów jest to, że silnik ten zasysa czyste powietrze i spręża je następnie do tak wysokiego ciśnienia, że temperatura w wyniku tego procesu wzrasta powyżej temperatury samozapłonu paliwa, które pod koniec suwu sprężania zostaje wtrysnięte do cylindra. Silnik ten nazywany jest także silnikiem wysokoprężnym lub od nazwiska jego twórcy silnikiem Diesla.

Nowoczesny silniki o zapłonie samoczynnym, niezależnie od jego zastosowania, bardzo odbiega od swojego prototypu zbudowanego w latach 1893-1897 w wytwórni MAN. Jednak jego podstawowa cecha, polegająca na samoczynnym zapłonie paliwa bez udziału pomocniczych urządzeń zapłonowych, nie zmieniła się. Najbardziej istotne zmiany dotyczą układów zasilania, co spowodowane jest stale zastrzanyimi przepisami dotyczącymi emisji spalin, hałasu oraz względami ekonomicznymi. Poszukuje się więc nowych możliwości poprawy spalania, przy zachowaniu niskiego zużycia paliwa oraz ograniczonego poziomu

<sup>1</sup>Politechnika Radomska, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn; 26-600 Radom; ul. Chrobrego 45.  
tel: + 48 48 361-76-42, tel: kom. 600-201-991e-mail: s.luft@pr.radom.pl

<sup>2</sup> Politechnika Radomska, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn; 26-600 Radom; ul. Chrobrego 45.  
tel: kom. 694-601-858

emisji związków toksycznych. Dlatego w stosunku do układów wtryskowych stawiane są następujące wymagania:

- wtrysk musi nastąpić w ściśle określonym położeniu tłoka pod koniec suwu sprężania, nawet niewielkie odchylenia zwiększają znacznie zużycie paliwa, toksyczność spalin oraz hałas,
- ciśnienie wtrysku powinno być możliwie indywidualnie dostosowane do poszczególnych punktów charakterystyki pracy silnika (np. obciążenie, prędkość obrotowa),
- wtrysk powinien kończyć się w sposób definitywny, niekontrolowany „dotrysk” zwiększa emisję szkodliwych składników spalin.

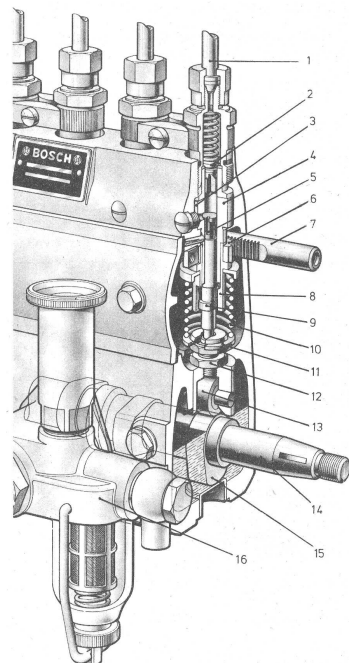
Ponadto w zależności od rodzaju i zastosowania silnika, przebiegowi wtrysku stawia się następujące warunki dodatkowe:

- wtrysk wstępny w celu zmniejszenia hałasu podczas pracy i ograniczenie emisji NOx,
- trwale wysokie ciśnienie podczas wtrysku zasadniczego w celu zmniejszenia emisji związków toksycznych w spalinach,
- dotrysk bezpośrednio po wtrysku zasadniczym ograniczający emisję sadzy,
- późny dotrysk jako zabieg utleniający (redukujący), wspomagający katalizator NOx.

Jedną z możliwości poprawy przebiegu spalania w silniku wysokoprężnym jest dążenie do homogenizacji mieszaniny paliwowo-powietrznej poprzez zastosowanie aparatury wtryskowej umożliwiającej bezpośredni wtrysk paliwa przy skrajnie wysokich ciśnieniach rzędu 250 MPa z możliwością podziału dawki oraz indywidualnym ich doбором do poszczególnych cylindrów silnika. Obecnie wszystkim tym wymaganiom mogą sprostać jedynie zasobnikowe układy wtryskowe (Common Rail). Ze względu na możliwości jakie dają te układy zasilania są one stosowane coraz powszechniej nie tylko w silnikach samochodowych. Warto podkreślić, że zmiany jakie dokonują się w układach zasilania są efektem szybkiego rozwoju elektroniki, która we współpracy z elementami mechanicznymi układów zasilania daje niemal nieograniczone możliwości. Nie mniej jednak zmiany, jakie dokonywały się na przestrzeni ponad stu lat w układach zasilania silników z zapłonem samoczynnym to głównie zmiany konstrukcji mechanicznych, bez których współczesne konstrukcje nie byłyby możliwe.

## **2. RZĘDOWE I ROZDZIELACZOWE POMPY WTRYSKOWE**

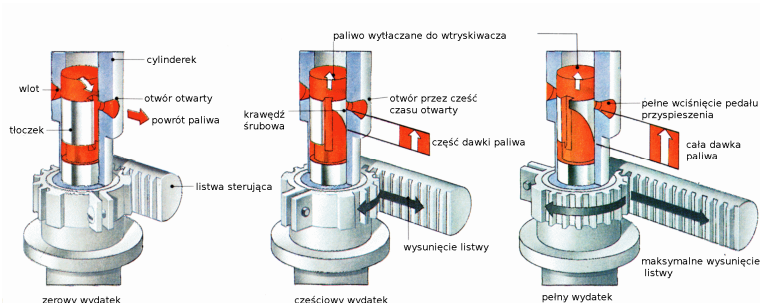
Jedne z pierwszych konstrukcji układów zasilania, które zostały mocno rozpowszechnione, wykorzystywały rzędową pompę wtryskową. Charakterystyczna dla pomp tego typu jest ilość sekcji tłoczących równa ilości cylindrów silnika. Sekcje umieszczone są w jednej obudowie, w której osadzony jest wałek napędzający o konstrukcji krzywkowej, oraz mechaniczny regulator odśrodkowy.



Rys.1. Rzędowa pompa wtryskowa PE (Robert Bosch) - elementy składowe [1]

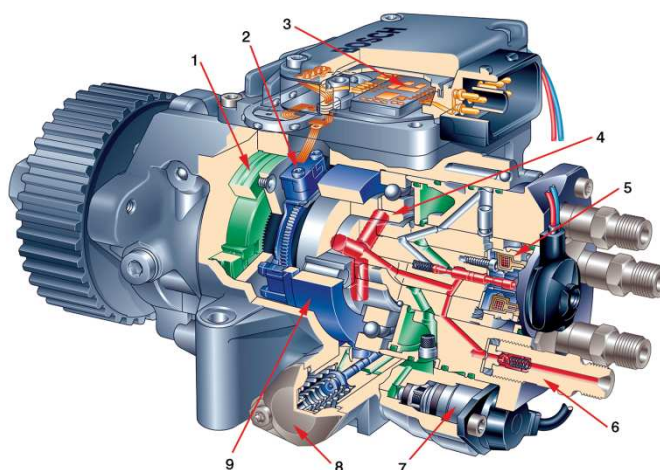
- 1 - przewód wtryskowy, 2 - zawór tłoczący,  
 3 - komora zasilania, 4 - cylinder, 5 - tłok,  
 6 - wieniec zębaty, 7 - listwa regulacyjna,  
 8 - tuleja regulacyjna, 9 - skrzydełko tłoka,  
 10 - sprężyna popychacza, 11 - talerzyk sprężyny,  
 12 - śruba popychacza z nakrętką kontrującą,  
 13 - popychacz rolkowy,  
 14 - wałek krzywkowy, 15 - krzywka,  
 16 - pompa zasilająca

Aby możliwy był wtrysk paliwa pompa zasilająca (16 rys. 1) zasysa paliwo ze zbiornika pojazdu i tłoczy je poprzez filtr do komory zasilania pompy wtryskowej (3). Stąd w dolnych położeniach tłoka (5) paliwo napływa do cylindrów pompy (4) otworami wlotowymi. Tłoki pompy napędzane wałkiem krzywkowym (14) tłoczą paliwo poprzez zawory tłoczące (2) i przewody wtryskowe (1) do wtryskiwaczy, które wtryskują je drobno rozpylnym strumieniem do komór spalania silnika. Po zakończeniu suwu tłoczenia, tłoki pompy powracają w położenie wyjściowe pod działaniem sprężyn popychaczy (10). Obciążone sprężynami zawory tłoczące zamykają przy tym przewody wtryskowe łączące pompy z wtryskiwaczami. Tłok pompy i cylinder pompy są wzajemnie dopasowane i wspólnie tworzą zespół nazywany elementem tłoczącym. Do sterowania wielkością dawek paliwa tłok ma na boku śrubowe sfrezowanie. Krawędzie powstałe w wyniku tego na ścianie tłoka są nazywane krawędziami sterującymi (rys. 2). Obracając tłok pompy można zmienić skok roboczy tłoczenia paliwa. Obrót tłoka jest dokonywany wieniec zębatym i zębatą listwą regulacyjną. Regulacja prędkości obrotowej odbywa się przez ciągłą zmianę ilości wtryskiwanego paliwa, przy czym listwa regulacyjna pompy wtryskowej musi być odpowiednio przesuwana. W tym celu listwa regulacyjna jest połączona poprzez regulator prędkości obrotowej i zespół dźwigni oraz drążków z pedałem przyspieszenia. W chwili obecnej zastosowanie rzędowych pomp wtryskowych zostało mocno ograniczone szczególnie w przemyśle samochodowym głównie z powodów restrykcyjnych norm emisji, bowiem sposób przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej nie pozwala na spełnienie wymogów w nich zawartych. Ponadto w pełni mechaniczne sterowanie mocno ogranicza możliwości regulacyjne, a sposób przygotowania mieszanki uzależniony jest od bardzo precyzyjnej regulacji początku wtrysku jak i wielkości dawki paliwa na poszczególne cylindry silnika.



Rys. 2. Regulacja wielkości dawki przez obrót tłoka pompy za pośrednictwem zębatej listwy regulacyjnej [2]

Późniejsze próby elektronicznego sterowania pracą pompy poprawiły jakość pracy silników wpływając na: dokładniejszą regulację początku wtrysku, poprawę warunków rozruchu i nagrzewania czy w końcu poprawę płynności jazdy. Elektroniczne podzespoły i układy regulacyjne są wykorzystywane do optymalizacji pracy silników, w rezultacie czego uzyskuje się zwiększoną moc, mniejsze zużycie paliwa oraz obniżoną emisję szkodliwych składników spalin.

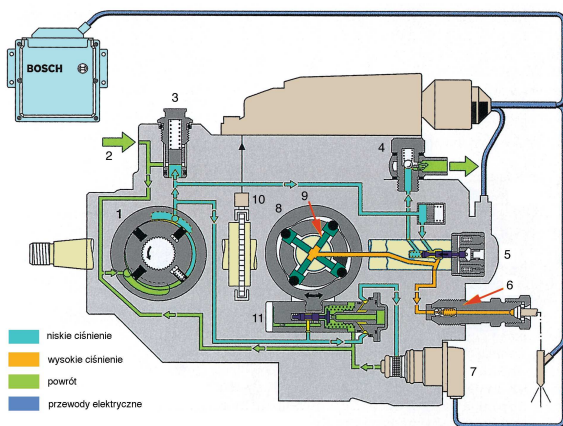


Rys. 3. Rozdzielaczowa pompa wtryskowa Bosch VP44 - S3 z trzema tłoczkami promieniowymi, zastosowana w samochodzie Audi 2.5 V6 TDI [3]

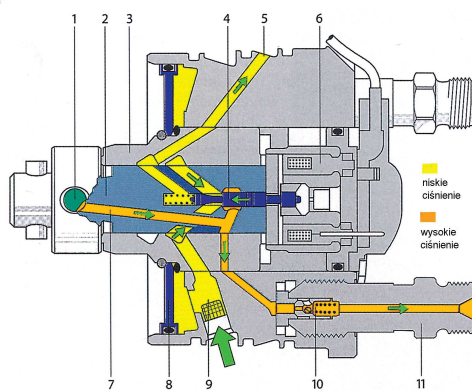
1 - pompa łopatkowa 2 - czujnik położenia kąтового 3 - sterownik pompy 4 - tłoczek promieniowy 5 - zawór elektromagnetyczny wysokiego ciśnienia 6 - dławik przelewu 7 - zawór elektromagnetyczny przestawiacza wtrysku 8 - przestawiacz wtrysku 9 - pierścień krzywkowy

Innym rodzajem pompy wtryskowej są rozdzielaczowe pompy wtryskowe, z wbudowanym regulatorem prędkości obrotowej oraz z przestawiaczem wtrysku. Różnią się one w sposób zasadniczy od rzędowych pomp wtryskowych. W rozdzielaczowych pompach wtryskowych wszystkie wtryskiwane dawki paliwa są tłoczone tylko przez jeden zespół tłoczący (tłok cylinder). Tłok ten rozdziela również dawki do poszczególnych

wtryskiwaczy, odpowiednio do kolejności zapłonów. W tym celu tłok pompy, zwany tłokiem rozdzielczym lub tłoko-rozdzielaczem, wykonuje zarówno ruchy posuwisto zwrotne, jak i obrotowe. Mocowane na zewnątrz rzędowych pomp wtryskowych urządzenia dodatkowe (np.: automatyczny przestawiacz wtrysku, pompa zasilająca, regulator) są umieszczone wewnątrz pompy rozdzielaczowej. W rezultacie uzyskano zwartą budowę pompy, co stało się główną przyczyną stosowania ich w małych szybkoobrotowych silnikach z ZS w samochodach osobowych. Ponadto sposób mocowania pompy jest dowolny w odróżnieniu do rzędowych pomp wtryskowych, w których istniała konieczność smarowania wałka krzywkowego. W osiowej pompie rozdzielaczowej łopatkowa pompa przetłaczająca (1 rys. 3) tłoczy olej napędowy do przestrzeni pompy paliwa, wytwarzając ciśnienie (ok. 2,0 MPa) oraz zasila paliwem tłoczkową pompę promieniową wysokiego ciśnienia, która wytwarza wysokie ciśnienie niezbędne do wtrysku paliwa. Wraz z pompą wysokiego ciśnienia obraca się wałek rozdzielacza, doprowadzający paliwo do poszczególnych cylindrów. Kiedy wałek rozdzielacza (2 rys. 5) obraca się rolki popychacza poruszają się po krzywiznach pierścienia krzywkowego. Tłoczki (9, rys. 4) są wtedy wciskane do wewnątrz i sprężają paliwo do wysokiego ciśnienia do ok. 160 MPa. Jednak tłoczenie paliwa pod wysokim ciśnieniem rozpoczynało się wtedy, gdy zawór elektromagnetyczny (6 rys. 5) został zamknięty sygnałem ze sterownika umieszczonego na pompie. Wałek rozdzielacza ustawiał się przed wylotem sprężonego paliwa do odpowiedniego cylindra. Paliwo przedostawało się przez zawór zwrotny dławiący (15) i złącze (16) przewodem do wtryskiwacza, który wtryskiwało je do komory spalania. Wtrysk kończył się wtedy, gdy zawór elektromagnetyczny (4) został otwarty. Kolejny zawór elektromagnetyczny (7 rys. 4) odpowiedzialny był za położenie przestawiacza wtrysku (11 rys. 4), który odpowiednio obracał pierścieniem krzywkowym pompy wysokiego ciśnienia zmieniając tym samym kąt wyprzedzenia wtrysku. Na (rys.4) przedstawiono schematycznie wewnętrzną budowę zelektronizowanej, promieniowej rozdzielaczowej pompy wtryskowej.



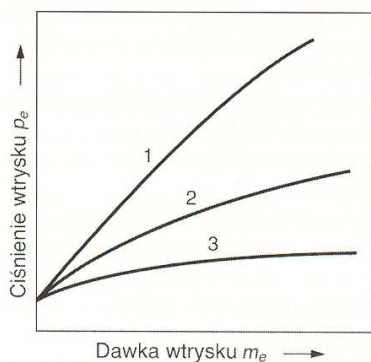
Rys. 4. Zasilanie paliwem pompy wtryskowej VP: [3]  
 1 - pierścień krzywkowy, 2 - doprowadzenie paliwa z filtra, 3 - zawór regulacyjny ciśnienia, 4 - przelewowy zawór dławiący, 5 - elektromagnetyczny zawór wysokiego ciśnienia, 6 - przelew, 7 - elektromagnetyczny zawór przestawiacza wtrysku, 8 - pierścień krzywkowy, 9 - tłoczek wysokiego ciśnienia, 10 - czujnik kąta obrotu, 11 - przestawiacz wtrysku



Rys. 5. Głowica rozdzielcza pompy - faza napełniania przestrzeni wysokiego ciśnienia:[3]  
 1 - tłoczek 2 - wałek rozdzielacza 3 - tulejka sterująca 4 - iglica zaworu 5 - przelew paliwa 6 - elektromagnetyczny zawór wysokiego ciśnienia 7 - kanał wysokiego ciśnienia 8 - przepona 9 - dopływ paliwa pod niskim ciśnieniem 10 - zwrotny zawór dławiący 11 - króciec przewodu wtryskowego

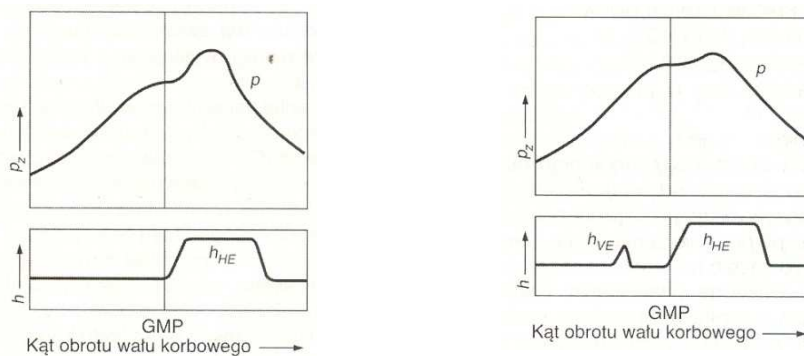
W konwencjonalnych układach wtryskowych zmianę ciśnienia wtrysku uzyskiwano poprzez odpowiednie ustawienie tłoczka pompy wtryskowej, również wytwarzanie ciśnienia i przygotowanie dawki wtrysku były współzależne wskutek mechanicznego sprzężenia krzywki i tłoczka. Wywoływało to następujące konsekwencje dla wtrysku paliwa:

- ciśnienie wtrysku zwiększało się wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej i dawki wtrysku (rys. 6.),
- na początku ciśnienie wtrysku rośnie, natomiast w końcowej fazie spada do wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, czego skutkami są:
  - małe dawki wtryskiwane przy niskich ciśnieniach,- trójkątna charakterystyce przebiegu ciśnienia („miękkie” narastanie ciśnienia rys. 15).



Rys. 6. Przebieg ciśnienia wtrysku [4]  
 1- duża prędkość obrotowa silnika  
 2- średnia prędkość obrotowa silnika  
 3- mała prędkość obrotowa silnika

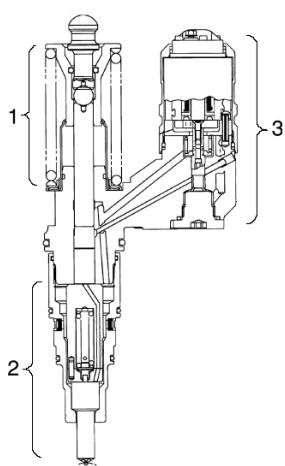
W pompach wtryskowych rozdzielaczowych i rzędowych początkowo regulacja początku wtrysku oraz wielkości dawki dokonywana była mechanicznie. Paliwo było wtryskiwane jednorazowo jako wtrysk zasadniczy bez wtrysku wstępnego i dotrysku. W pompach rozdzielaczowych sterowanych elektronicznie istnieją możliwości realizacji wtrysku wstępnego (rys.7. b). Wtrysk małej dawki pilotującej (przedwtrysk) decyduje o rozpoczęciu i przebiegu spalania. Wielkość tej dawki i początek wtrysku wpływają na szybkość wywiązywania ciepła, a zatem na przebieg narastania ciśnienia spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego.



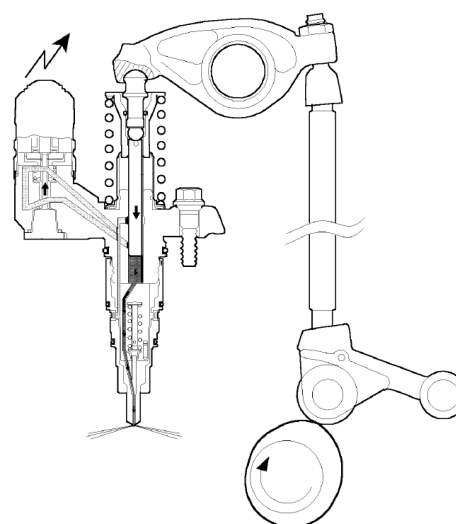
Rys. 7. Przebieg ciśnienia w cylindrze oraz wzniosu igły rozpylacza [4]  
 a- bez wtrysku wstępnego  
 b- z wtryskiem wstępnym

### 3. POMPOWTRYSKIWACZE

Kolejny etap w rozwoju układów wtryskowych przyniósł bardzo udaną konstrukcję w postaci indywidualnych zespołów wtryskowych zwanych pompowtryskiwaczami, w których pompa wtryskowa oraz wtryskiwacz tworzą zwartą całość, a każdy cylinder silnika ma własny pompowtryskiwacz zamocowany na głowicy i napędzany bezpośrednio przez popychacz albo pośrednio dźwignią od wału rozrządu. Wyeliminowanie przewodów wtryskowych wysokiego ciśnienia pozwoliło na bardziej precyzyjne podanie paliwa do komory spalania, co szczególnie istotne jest w przypadku podziału dawki paliwa w jednym cyklu, przy jednoczesnym podwyższeniu ciśnienia wtrysku do 205 MPa. Dzięki wysokiemu ciśnieniu wtrysku oraz elektronicznej regulacji charakterystyki początku i czasu wtrysku (względnie dawki) jest możliwa znaczna redukcja szkodliwych składników spalin. Elektroniczna regulacja umożliwia realizację różnych funkcji dodatkowych takich jak: recyrkulacja spalin, regulacja ciśnienia doładowania, odłączanie cylindrów, regulacja prędkości jazdy, elektroniczna blokada silnika (immobiliser). Moment wtrysku oraz czas jego trwania uzależniony jest ściśle od wielu sygnałów określających chwilowe warunki pracy silnika takich jak: położenie kątowe i prędkość wału korbowego oraz wałka rozrządu, położenie pedału przyspieszenia, ciśnienia doładowania, temperatury cieczy chłodzącej i paliwa, temperatury i ciśnienia powietrza doładowania. Tak duża ilość sygnałów przetwarzanych przez jednostkę sterującą zazwyczaj wykorzystywana jest również do monitorowania pracy silnika, co staje się istotnym narzędziem diagnostycznym. Wszystkie te sygnały konieczne do określenia wielkości dawki paliwa mogą być zapisywane w pamięci trwałej jednostki a przez to w łatwy sposób odczytane, dzięki temu mogą posłużyć np. do weryfikacji stanu silnika uwzględniając pojedyncze jego cylindry, kontroli pracy poszczególnych pompowtryskiwaczy, czy kontroli zużycia paliwa. Tak więc możliwości jakie daje układ zasilania z pompowtryskiwaczami są o wiele większe niż w układach z rzędową czy rotacyjną pompą wtryskową. Budowę pompowtryskiwacza przedstawia (rys. 8.)



Rys. 8. Pompowtryskiwacz [4]  
 1 zespół wytwarzający ciśnienie  
 2 zespół wtryskujący  
 3 elektromagnetyczny zawór sterujący



Rys.9. Pompowtryskiwacz w chwili wtrysku paliwa [4]

Z powodu łączenia funkcji takich jak wytwarzanie wysokiego ciśnienia, wtryskiwanie paliwa do komory spalania oraz, sterowanie zaworem paliwowym pompowtryskiwacz stanowi zwarty element układu zasilania. Aby możliwy był wtrysk paliwa do cylindra pompowtryskiwacz musi otrzymać paliwo pod ciśnieniem około 0,4 MPa co realizowane jest najczęściej za pomocą zębatej pompy paliwa. Wielkość dawki jak również moment wtrysku paliwa uzależniona będzie od czasu trwania impulsu elektrycznego oraz chwili w której zostanie on wystereowany przez jednostkę sterującą i podany na cewkę elektromagnesu. Takie sterowanie pozwala podobnie jak w przypadku rotacyjnych pomp wtryskowych z zaworem elektromagnetycznym wysokiego ciśnienia na uzyskanie wtrysku wstępnego.

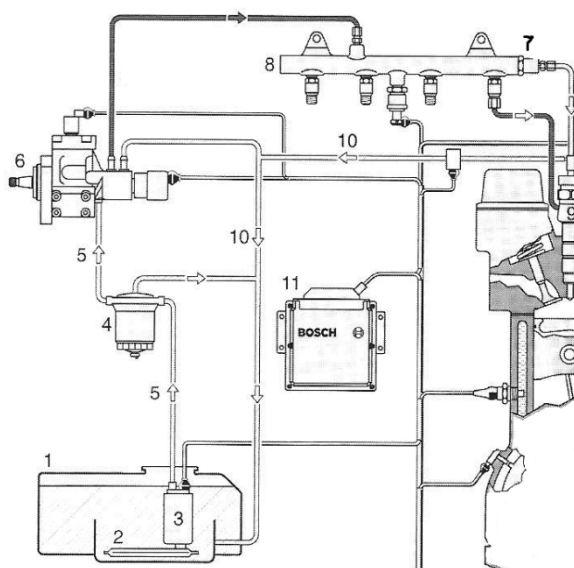
#### 4. ZASOBNIKOWE UKŁADY WTRYSKOWE COMMON RAIL

Poszukiwanie wciąż nowych możliwości poprawy spalania przy zachowaniu niskiego zużycia paliwa oraz ograniczonego poziomu emisji związków toksycznych spowodowało pojawienie się nowego rozwiązania w układzie zasilania jakim jest zasobnikowy układ wtryskowy popularnie nazywany Common Rail. Charakterystyczne dla tego układu jest bardzo wysokie ciśnienie wtrysku, które nie zależy od prędkości obrotowej silnika, a wtryskiwana dawka może zostać podzielana nawet na siedem części o różnej wielkości.

W 1990 r. rozpoczął się etap przemysłowego wdrażania układu Unijet, pierwszej odmiany Common Rail, opracowanego przez Magneti Marelli, Centrum Badawcze Fiata i Elasis. Sposób regulacji oraz wielkość ciśnienia stanowią główne kryterium podziału kolejnych generacji układu CR. Pierwsza z nich charakteryzowała się ciśnieniem wtrysku dochodzącym do 130 MPa z jednym tylko wtryskiem zasadniczym. W kolejnej generacji ciśnienie wtrysku zostało podwyższone do 160 MPa przy jednoczesnym podziale dawki paliwa. Zmiana w budowie wtryskiwaczy, w których elektromagnes został zastąpiony elementem piezokwarcowym pozwoliła na powstanie kolejnej generacji układu CR. Obecnie czwarta już generacja nie różni się istotnie od poprzedniej za wyjątkiem jeszcze wyższych ciśnień na poziomie 200 MPa.

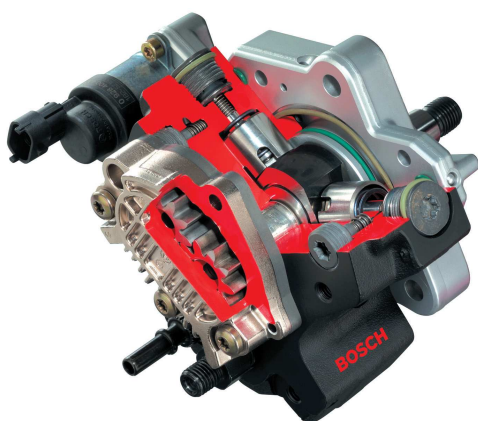
Rys. 10. Układ zasilania paliwem Common Rail [5]

- 1 - zbiornik paliwa,
- 2 - filtr wstępnego oczyszczania paliwa,
- 3 - pompa zasilająca,
- 4 - filtr paliwa,
- 5 - przewody paliwa niskiego ciśnienia,
- 6 - pompa wysokiego ciśnienia,
- 7 - przewody paliwa wysokiego ciśnienia,
- 8 - zasobnik paliwa,
- 9 - wtryskiwacz,
- 10 - przewód przelewowy paliwa,
- 11 - sterownik elektroniczny

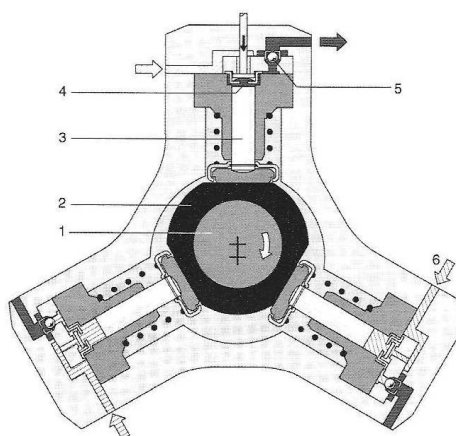




Podobnie jak w wyżej wymienionych rozwiązaniach układów zasilania taki tu można wyodrębnić dwa obwody czyli obwód wysokiego oraz niskiego ciśnienia paliwa. W skład obwodu niskiego ciśnienia wchodzi: zbiornik paliwa (1 rys. 10) z filtrem wstępnego oczyszczania (2), pompa zasilająca (3), filtr paliwa (4), przewody paliwa niskiego ciśnienia. Zadaniem pompy zasilającej jest tłoczenie paliwa do pompy wysokiego ciśnienia. Stosuje się zazwyczaj dwa rodzaje pomp: elektryczną rolkową pompę wyporową lub mechanicznie napędzaną pompę zębatą, umieszczoną w jednej obudowie z pompą wysokiego ciśnienia (rys. 11). W skład obwodu wysokiego ciśnienia wchodzi: pompa wysokiego ciśnienia (6 rys. 10) z zaworem wyłączającym sekcję tłoczącą i zaworem regulacyjnym ciśnienia, zasobnik paliwa wysokiego ciśnienia z czujnikiem (8), zawór redukcyjny ciśnienia (7), wtryskiwacze (9). Pompy wysokiego ciśnienia bez względu na rodzaj czy generację to pompy wyporowe jedno, dwu, lub trzy tłoczkowe.



Rys. 11. Zintegrowana pompa wysokiego oraz niskiego ciśnienia [3]

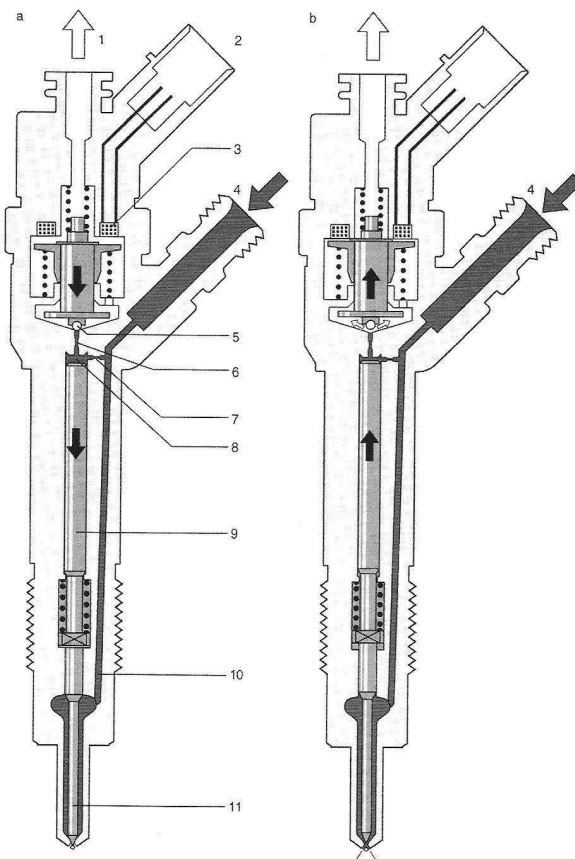


Rys. 12. Tłoczkowa pompa wysokiego ciśnienia [5]  
1 - wałek napędowy, 2 - krzywka mimośrodowa,  
3 - sekcja tłocząca, 4 - zawór wlotowy, 5 - zawór wylotowy, 6 - dopływ paliwa

Ponieważ zapotrzebowanie na paliwo zmienia się w bardzo szerokim zakresie w zależności od obciążenia silnika pompa wysokiego ciśnienia dostarcza paliwo z dużym nadmiarem szczególnie, na biegu jałowym oraz w zakresie obciążeń częściowych. Nadmiar sprężonego paliwa, musi zatem powrócić do zbiornika przez zawór regulacyjny ciśnienia. Wiąże się to ze stratą energii dostarczonej w momencie tłoczenia, a więc zmniejsza się sprawność. Środkiem zaradczym może być częściowo dostosowanie wydatku tłoczenia do zapotrzebowania paliwa przez wyłączenie sekcji tłoczącej. Wyłączenie sekcji tłoczącej, powodujące zmniejszenie ilości paliwa przetwarzanej do zasobnika wysokiego ciśnienia, odbywa się dzięki stałemu utrzymywaniu zaworu wlotowego (4 rys. 12.) w położeniu otwartym. Po włączeniu zaworu elektromagnetycznego wyłączania sekcji tłoczącej trzpień naciska stale na zawór wlotowy. Dzięki temu zasysane paliwo powraca na stronę niskiego ciśnienia i nie może być sprężone podczas skoku tłoczenia. Wskutek tego ciśnienie w przestrzeni sekcji nie wzrasta, przez co spada wydajność tłoczenia pompy.

Kolejnym istotnym elementem budowy układu CR jest elektromagnetyczny zawór regulacyjny ciśnienia montowany bezpośrednio na pompie wysokiego ciśnienia lub na listwie zbiorczej. Zawór regulacyjny ma dwa obwody regulacji: elektryczny obwód regulacji powolnego działania (w celu ustawienia zmiennej średniej wartości ciśnienia w zasobniku paliwa), mechaniczno-hydrauliczny obwód regulacji szybkiego działania (w celu wyrównania drgań ciśnienia o dużej częstotliwości). Paliwo pod wysokim ciśnieniem gromadzi się w zasobniku (8 rys. 10). Ciśnienie we wspólnym dla wszystkich cylindrów zasobniku paliwa jest utrzymywane w przybliżeniu na stałym poziomie nawet przy pobieraniu większych ilości paliwa, a objętość zasobnika musi być tak dobrana by w wyniku tłoczenia czy też wtrysku dochodziło do tłumienia drgań ciśnienia. W ten sposób zapewnia się stałe ciśnienie wtrysku bez względu na warunki pracy silnika.

Wtryskiwacze istotnie różnią się od tych stosowanych w układach z rzędowymi czy rotacyjnymi pompami wtryskowymi, głównie za sprawą otwierania i zamykania rozpylacza z pomocą hydraulicznego układu wspomagania. Poniższy rysunek przybliży sposób



działania wspomagania hydraulicznego ruchu igły rozpylacza. Na rysunku a) w chwili gdy cewka elektromagnesu nie jest zasilana zawór kulowy jest zamknięty ciśnienie paliwa pomaga w wytworzeniu siły zamykającej rozpylacz poprzez wywieranie nacisku na tłoczek sterujący (9). W czasie gdy elektrozawór zostaje zasilony zawór kulowy rozszczelnia się powodując spadek ciśnienia nad tłoczkiem sterującym a tym samym redukcję siły zamykającej rozpylacz. Ciśnienie w kanale (10) doprowadzającym paliwo do rozpylacza jest wystarczające do uniesienia iglicy rozpylacza, a tym samym do realizacji wtrysku paliwa.

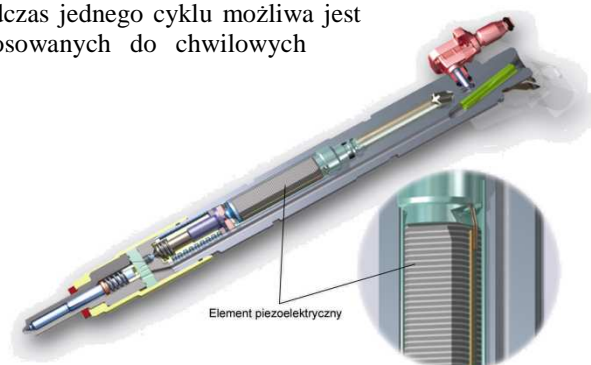
Domeną III generacji układów CR stały się wtryskiwacze piezoelektryczne, które cechuje znacznie szybszy czas reakcji niż wtryskiwacze elektromagnetycznych.

Rys. 13. Wtryskiwacz układu CR [5]

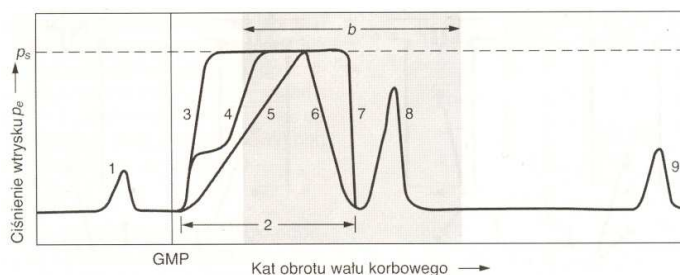
a - wtryskiwacz zamknięty (stan spoczynku), b - wtryskiwacz otwarty (wtrysk paliwa)  
 1 - króciec przelewu paliwa, 2 - złącze elektryczne, 3 - cewka elektromagnesu, 4 - złącze dopływu paliwa wysokiego ciśnienia z zasobnika, 5 - kulka kotwicy zaworu, 6 - dławik odpływu, 7 - dławik dopływu, 8 - komora sterująca zaworu, 9 - tłoczek sterujący zaworu, 10 - kanał dopływu paliwa do rozpylacza, 11 - igła rozpylacza

Wtryskiwacz piezoelektryczny zbudowany jest z następujących podzespołów: silownika piezoelektrycznego, przetwornika hydraulicznego, zaworu sterującego oraz rozpylacza. W odróżnieniu od wtryskiwaczy elektromagnetycznych, które mają trzpień naciskowy, we wtryskiwaczach piezoelektrycznych nie występują siły mechaniczne działające na iglicę rozpylacza. Umożliwiło to zmniejszenie mas ruchomych i tarcia oraz polepszenie stabilności działania wtryskiwacza w porównaniu z wtryskiwaczami elektromagnetycznymi. Dodatkowo zapewniono możliwość uzyskania małych odstępów czasowych między wtryskami. Podczas jednego cyklu możliwa jest realizacja pięciu wtrysków dostosowanych do chwilowych warunków pracy silnika.

Rys. 14. Wtryskiwacz III generacji CR [6]



Możliwości kształtowania charakterystyki wtrysku w różnych typach układów zasilania przedstawia rysunek 15.



Rys. 15. Przebiegi wtrysku dla różnych typów układów zasilania [4]

1 - wtrysk wstępny, 2 - wtrysk zasadniczy, 3 - stromy wzrost ciśnienia (CR), 4 - zmienny („łódkowaty”)wzrost ciśnienia, 5 - narastający przebieg ciśnienia (wtrysk konwencjonalny), 6 - płaski spadek ciśnienia (pompy wtryskowe rządowe i rozdzielaczowe), 7 - stromy spadek ciśnienia (pompowtryskiwacz, CR), 8 - wczesny dotrysk, 9 - późny dotrysk,  $p$  - ciśnienie maksymalne,  $b$  - czas spalania

## 5. WNIOSKI

Tłokowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym dominuje w zastosowaniach zarówno w stacjonarnych jak i do napędu pojazdów samochodowych ze względu na wysoką sprawność (dochodzącą już do 50%) oraz korzystną zawartość związków w spalinach. Jednym z podstawowych układów decydujących o dużej sprawności pracy

takiego silnika oraz o jego dobrych parametrach eksploatacyjnych jest układ zasilania. Głównymi cechami współczesnego układu zasilania silnika o zapłonie samoczynnym są:

- elektroniczne sterowanie parametrami wtrysku (głównie chodzi o precyzję wyzwalania kąta początku wtrysku, wielkości dawki paliwa a także konfigurację podziału tej dawki,
- zachowanie wysokich stałych wartości ciśnień paliwa w czasie trwania wtrysku bezpośredniego do komory spalania (ciśnienie wtrysku powyżej 200 MPa) pozwala na to najczęściej obecnie stosowany system Common Rail, takie rozwiązanie umożliwia dobre rozpylenie całej dawki paliwa, skrócenie zwłoki samozapłonu, co w efekcie prowadzi do umożliwienia pracy silnika o ZS z prędkościami powyżej 4000 obr/min – jest to ważna cecha silnika samochodu osobowego,
- uzyskanie korzystnego składu spalin ze względu na zapewnienie dobrych warunków spalania dawki paliwa,
- zelektronizowanie systemy sterowanie pracy układów zasilania pozwalają na bieżącą diagnostykę poprawności ich funkcjonowania (diagnostyka pokładowa).

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kasedorf J.: *Zasilanie wtryskowe olejem napędowym* Warszawa, WKŁ 1990
- [2] Luft Sławomir: *Podstawy budowy silników* Warszawa WKŁ 2006
- [3] Trzeciak K.: *Wtrysk bezpośredni w silnikach Diesla Poradnik Serwisowy*
- [4] Bosch *Układy wtryskowe* Informator techniczny Warszawa WKŁ 2000
- [5] Bosch *Zasobnikowe układy wtryskowe Common Rail* Informator techniczny Warszawa WKŁ 2009
- [6] Hubertus Gunther : *Układy wtryskowe Common Rail w praktyce warsztatowej* Warszawa WKŁ 2010