

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA
KATEDRA POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH I
TRANSPORTU

LABORATORIUM Z PRZEDMIOTU
OCHRONA ŚRODOWISKA W TRANSPORCIE

BUDOWA I BADANIE UKŁADU
RECYRKULACJI SPALIN TŁOKOWEGO
SILNIKA SPALINOWEGO I PRZEGLĄD METOD
OGRANICZANIA EMISJI TLENKÓW AZOTU

opracował:
Tomasz Ambrozik

Kielce 2014

Wprowadzenie

Recyrkulacja spalin w głównej mierze opiera się na wprowadzeniu pewnej ilości spalin do układu zasilania silnika. Zasada działania systemu recyrkulacji polega na zastosowaniu zaworu (zazwyczaj elektronicznego), który umieszczony jest pomiędzy kolektorem wydechowym a kolektorem dolotowym. Z racji, że sposób regulacji mocy silnika o zapłonie iskrowym i samoczynnym jest inny różni się też wpływ recyrkulacji spalin na parametry robocze obu silników. W pierwszym z nich występuje ilościowa regulacja mocy, dlatego też recyrkulowane spaliny, które zostają doprowadzone do układu dolotowego stają się dodatkowym ładunkiem cylindrów, które pracują przy częściowych obciążeniach, a więc tym samym przy niepełnym otwarciu przepustnicy. Całkowite otwarcie przepustnicy realizowane jest jedynie przy pełnym obciążeniu silnika, natomiast w silniku o zapłonie samoczynnym z racji występowania jakościowej regulacji mocy spaliny, które wraz ze świeżym ładunkiem trafiają do cylindrów silnika zdecydowanie pogarszają ich napełnienie.

Po suwie pracy w cylindrze silnika pozostaje pewna ilość spalin. Dobierana jest ona celowo, na podstawie faz rozrządu, co nazywamy wewnętrzną recyrkulacją, natomiast doprowadzając część spalin z układu wylotowego do układu dolotowego przez zawór recyrkulacji (ewentualnie przez chłodnicę) mamy do czynienia z zewnętrzną recyrkulacją spalin. Ostatnio wymieniona, zewnętrzna recyrkulacja spalin (ang. EGR – Exhaust Gas Recirculation) jest najskuteczniejszym sposobem zmniejszania emisji tlenków azotu NO_x . Jedynie przy pełnym obciążeniu silnika, całkowite otwarcie przepustnicy sprawia, że dodawane spaliny zastępują część świeżego ładunku, pogarszając sprawność napełnienia, jak ma to miejsce w całym zakresie obciążeń silnika o zapłonie samoczynnym.

Występuje jeszcze podział ze względu na temperaturę spalin, które biorą udział w procesie recyrkulacji. Podzielić możemy ją na recyrkulację gorącą, gdy w grę wchodzi spaliny gorące, oraz recyrkulację zimną, gdy spaliny są chłodzone przed uprzednim dodaniem ich do świeżego ładunku powietrza. W tabeli 1 przedstawiono przyczyny i okoliczności powstawania składników spalin w silnikach spalinowych.

Stopień recyrkulacji spalin oznaczam skrótem SRS. Obliczamy go z wzoru:

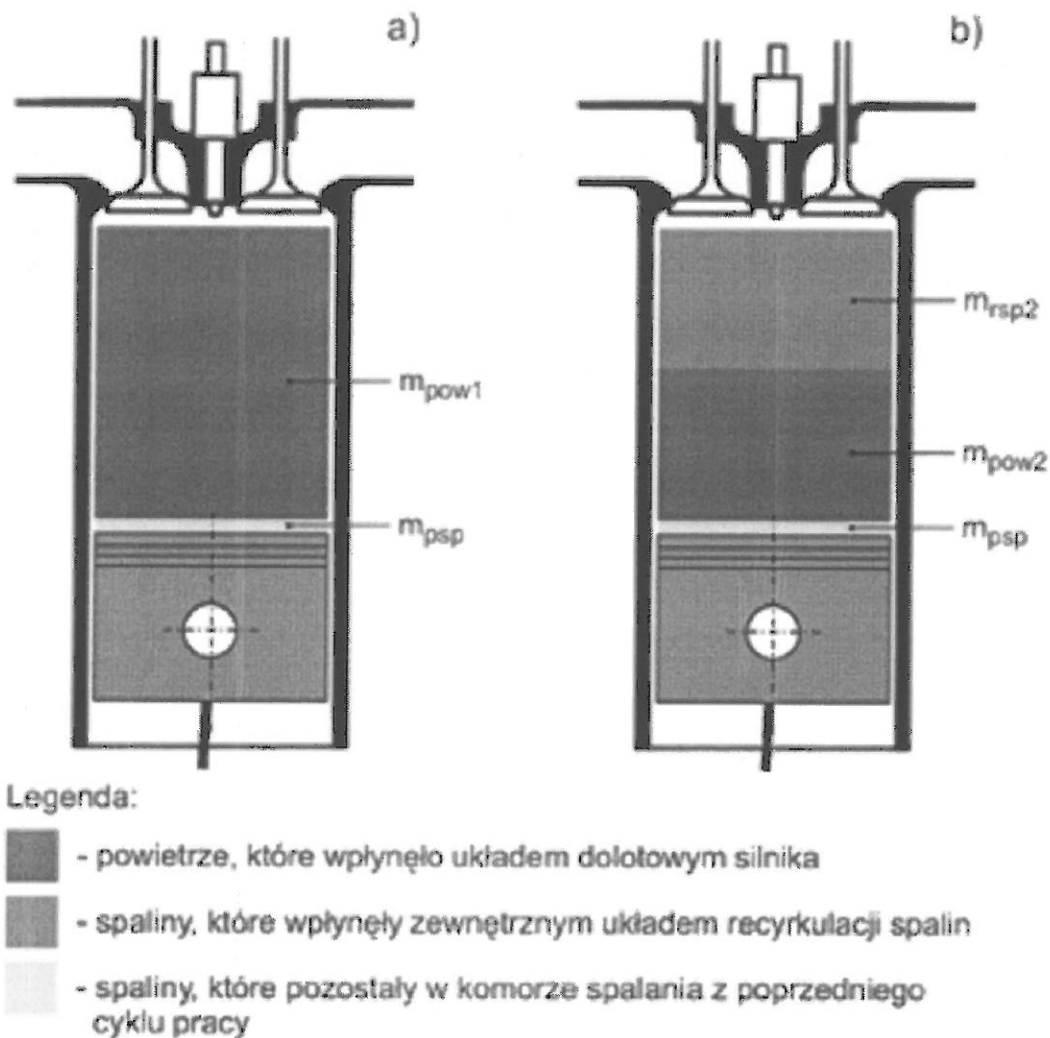
$$\text{SRS} = \frac{m_{\text{rsp}}}{m_{\text{rsp}} + m_{\text{pow}}}$$

gdzie:

m_{rsp} - masa recykulowanych spalin, wprowadzonych do komory spalania [kg]

m_{pow} - masa powietrza, wprowadzona do komory spalania [kg]

We wzorze suma: $m_{rsp} + m_{pow}$ oznacza łączną masę mieszaniny powietrza i recykulowanych spalin, wprowadzonych do komory spalania silnika, z wykorzystaniem zewnętrznej lub wewnętrznej recykulacji spalin.



Rysunek. 1. Masa powietrza i masa spalin, w komorze spalania silnika z zapłonem samoczynnym (ZS) po zakończeniu cyklu napełniania, dla tej samej, określonej wartości prędkości obrotowej silnika, przy: a - wyłączonej zewnętrznej recykulacji spalin; b - włączonej zewnętrznej recykulacji spalin.

Oznaczenia na rysunku 1:

m_{pow1} - masa powietrza, wprowadzona do komory spalania silnika, przy wyłączonej zewnętrznej recykulacji spalin;

m_{pow2} - masa powietrza, wprowadzona do komory spalania silnika, przy włączonej zewnętrznej recyrkulacji spalin;

m_{rsp2} - masa spalin, wprowadzona do komory spalania, przez układ zewnętrznej recyrkulacji spalin;

m_{psp} - masa spalin, które pozostały w komorze spalania, po poprzednim cyklu pracy silnika.

Tabela 1. Przyczyny i okoliczności powstawania składników spalin w silnikach spalinowych.

Zanieczyszczenie	NO _x	PM
Przyczyny powstawania	Strefa popromienna przy składzie mieszanki zbliżonej do stechiometrycznej.	Rozpad termiczny paliwa, np. przy jego wtrysku do strefy gorących objętych przez płomień
Okoliczności powstawania	Wysoka temperatura w cylindrze podczas spalania, wysokie ciśnienie	Długi czas wtrysku, zbyt mało powietrza do spalania, zwłaszcza przy dużych obciążeniach.

Systemy recyrkulacji spalin

Działanie układu recyrkulacji spalin EGR (ang. Exhaust Gas Recirculation) polega na wprowadzeniu pewnej ilości spalin do układu zasilania silnika, realizowane jest to na dwa sposoby: wewnętrzna i zewnętrzna recyrkulacja spalin.

Zewnętrzna recyrkulacja spalin.

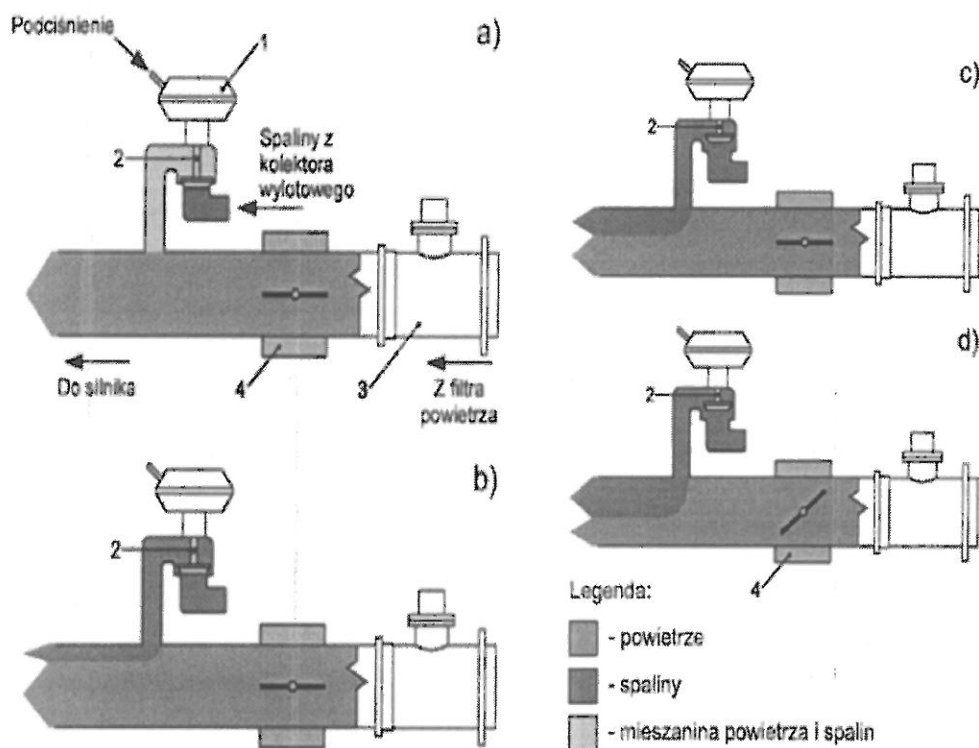
Z układu wylotowego pobierana jest część spalin, która kierowana zostaje do układu dolotowego z użyciem dodatkowego przewodu wyposażonego w zawór recyrkulacji spalin EGR o regulowanym przekroju przepływu (opcjonalnie też w chłodnicę spalin). Przepływ spalin realizowany jest za pomocą różnicy ciśnień w układzie wylotowym, a dolotowym, gdzie spaliny są wprowadzane – ciśnienie tam musi być więc niższe. W przypadku, gdy różnica ciśnień nie jest wystarczająca do efektywnego przepływu spalin, przepływ powietrza jest blokowany przez przepustnicę. Od początków lat dziewięćdziesiątych rozwiązanie konstrukcyjne układu recyrkulacji spalin nie zmieniało się. Realizowane są głównie zmiany dotyczące dostosowania dokładności parametrów recyrkulowanych spalin do warunków

pracy silnika spalinowego. Układ zewnętrznej regulacji spalin może mieć również chłodnicę recyrkulowanych spalin, której zadaniem jest zniwelowanie lub obniżenie do minimum temperatury spalin przed wpływieniem ich do układu dolotowego silnika. Ciekawostką jest, że pierwsze zawory EGR uruchamiane były za pomocą serwa w układzie hamulcowym. Najnowszym jednak, bardzo zaawansowanym konstrukcyjnie rozwiązaniem jest uruchamianie zaworu recyrkulacji spalin elektronicznie za pomocą silnika prądu stałego.

Układ zewnętrzny kierujący część spalin do układu dolotowego wyposażony jest w zawór o zmiennym stopniu otwarcia. Otwarcie zaworu sprawia ze spaliny z kolektora wylotowego przemieszczają się dzięki różnicy ciśnień. W przypadku braku różnicy ciśnień możliwe jest mechaniczne skierowanie spalin o pożądanej sile przepływu poprzez dławienie przepustnicy. Takie zabiegi stosowane są w silnikach o zapłonie samoczynnym oraz o zapłonie iskrowym z układem bezpośredniego wtrysku paliwa. Regulacji przepływu spalin dokonujemy przy użyciu kilku rodzajów układów:

- Mechaniczno-pneumatyczny, z wykluczeniem modułów elektrycznych i elektronicznych,
- Elektryczno-pneumatyczny kontrolowany elektronicznie przez sterownik ciśnienia,
- Elektryczny regulowany elektronicznie.

Jeśli zachodzi taka potrzeba taki układ może być wyposażony w chłodnicę spalin.



Rys.2. Sposób sterowania masą recyrkulowanych spalin, napływających zewnętrznym

układem recyrkulacji spalin, oraz masą powietrza, napływającą układem dolotowym silnika, do komory spalania silnika ZS. Elementy ma rysunku:

- 1 - zawór recyrkulacji spalin, np. pneumatyczny;
- 2 - grzybek zaworu recyrkulacji spalin; 3 - masowy przepływomierz powietrza;
- 4 - przepustnica powietrza w układzie dolotowym.

Poszczególne rysunki przedstawiają:

- a - zamknięty grzybek 2 zaworu recyrkulacji spalin;
- b - małe otwarcie grzybka 2 zaworu recyrkulacji spalin;
- c - duże otwarcie grzybka 2 zaworu recyrkulacji spalin;
- d - duże otwarcie grzybka 2 zaworu recyrkulacji spalin i dławienie przepustnicą 4 przepływu powietrza w układzie dolotowym silnika.

Wewnętrzna recyrkulacja spalin

Recyrkulacja wewnętrzna może być realizowana jedynie w silnikach o zmiennych fazach rozrządu, gdyż ilość spalin która pozostaje w cylindrze silnika jest zależna od chwili zamknięcia zaworu wylotowego i dolotowego. Sterowanie chwilami zamknięcia zaworów ma miejsce za pomocą obrotu wału rozrządu względem wału korbowego. Najlepszym rozwiązaniem dla polepszenia efektów wewnętrznej recyrkulacji spalin jest stosowanie układu rozrządu z elektromagnetycznie otwieranymi zaworami. W tego typu rozwiązaniach konstrukcyjnych nie ma potrzeby stosowania zewnętrznej recyrkulacji z racji, że wszystkie spaliny są oczyszczane za pomocą recyrkulacji wewnętrznej, która jest jedną z najprostszych metod zostawienia w komorze spalania części spalin. Zaletą recyrkulacji wewnętrznej jest to, że odbywa się ona bez użycia układu dolotowego, który nie zostaje zanieczyszczony składnikami spalin. Wadą tej metody jest brak możliwości sterowania i regulacji ilości recyrkulowanych spalin oraz chłodzenia spalin. Wewnętrzna recyrkulacja nie posiada dodatkowego układu więc spaliny zawracane są prosto z układu wylotowego, bądź też pozostają w komorze spalania po spaleniu mieszanki. Ilość spalin także w tym wypadku można regulować poprzez:

- Ustawienie odpowiednich faz rozrządu, takie rozwiązanie zastosowano w silnikach ze zmiennymi układami faz rozrządu,
- Właściwą budowę kolektora wylotowego, pozwalającą na zwiększenie spalin w tego typu układzie w zakresie małych i średnich obciążeń.

Wadą tego typu recyrkulacji spalin jest brak możliwości:

- Chłodzenia spalin,

- Szczegółowego kontrolowania masy recyrkulowanych spalin.

Typy zaworów recyrkulacji spalin

Zadaniem zaworu recyrkulacji spalin jest jak największe ograniczenie emisji szkodliwych związków, które są wypuszczone do atmosfery przez układ wylotowy silników zasilanych zarówno benzyną (silniki o zapłonie iskrowym) jak i olejem napędowym (silniki o zapłonie samoczynnym). Zawory EGR podobnie jak inne eksploatowane elementy i części jest narażony na uszkodzenia. Najczęstszy problem jaki ich dotyka to zatykanie się zaworu na skutek gromadzonego nagaru czy sadzy.

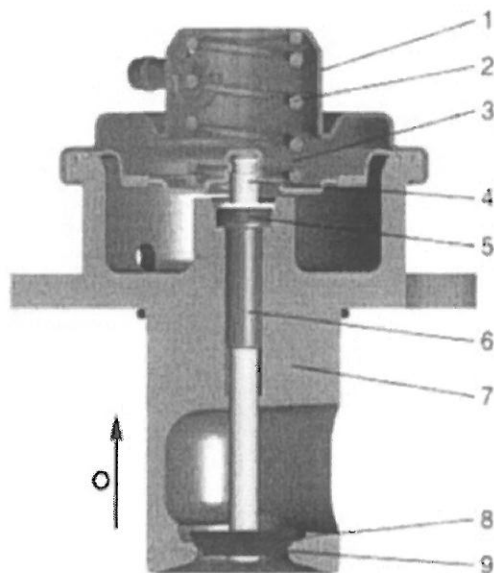
Pneumatyczny, wzniosowy zawór recyrkulacji spalin

Jest jednym z najczęściej stosowanych zaworów. Zawór jest otwierany za pomocą podciśnienia, a zamykany sprężyną wymuszającą ruch powrotny grzybka zaworu

Zdarza się, że sterowanie odbywa się tylko za pomocą zaworu. Wynika to z faktu, że zawór nie posiada czujnika położenia grzybka, zatem sterownik nie jest w stanie określić wielkości otwarcia zaworu. W przypadku, kiedy zawór posiada czujnik położenia grzybka to istnieje możliwość regulacji zaworu. Sterownik jest w stanie określić aktualną wielkość otwarcia grzybka i za pomocą podciśnienia reguluje wartość położenia grzybka aż do uzyskania wartości wymaganej.

Pneumatyczny zawór recyrkulacji spalin charakteryzuje się dużą szczelnością, która uzależniona jest od zanieczyszczenia grzybka zaworu i gniazda zaworu. Wymienione elementy są zależne od sprężyny wymuszającej ruch powrotny grzybka zaworu i muszą zapewniać również szczelne zamknięcie grzybka zaworu względem gniazda zaworu także podczas pracy silnika z dużymi prędkościami obrotowymi.

Drugą z kolei wadą omawianego zaworu recyrkulacji spalin są w pewnym stopniu zanieczyszczenia i pokrycia osadami trzonka zaworu i grzybka zaworu. Konkretniej chodzi o sytuację, gdzie sterownik nie może poruszyć czy przemieścić trzonka i grzybka zaworu, podczas gdy pokryte są one osadami. W przypadku zaworu z czujnikiem położenia grzybka sterownik, mimo, że otrzyma sygnał o zmianie wielkości otwarcia zaworu to nie będzie możliwe przemieszczenie się grzybka.



Rysunek.3. Przekrój pneumatycznego, wzniosowego zaworu recyrkulacji spalin. Elementy zaworu: 1 - siłownik pneumatyczny; 2 - sprężyna wymuszająca ruch powrotny grzybka zaworu; 3 - membrana; 4 - trzonek zaworu; 5 - uszczelnienie trzonka zaworu; 6 – tuleja ślizgowa; 7 - obudowa zaworu; 8 - grzybek zaworu; 9 - gniazdo zaworu. Strzałka oznaczona literą „O” wskazuje kierunek ruchu grzybka zaworu w kierunku otwarcia.

Elektryczny, wzniosowy zawór recyrkulacji spalin

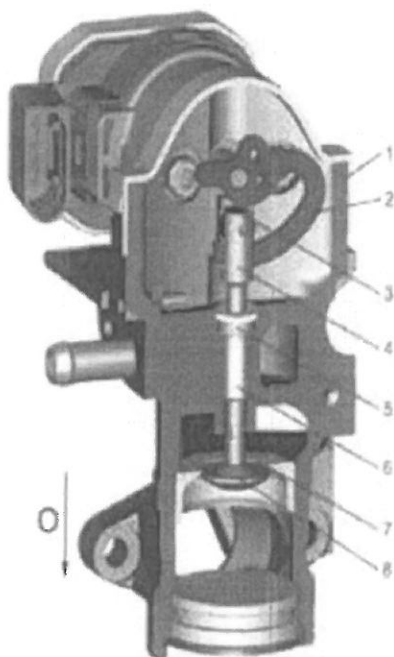
Na początku warto wspomnieć, że istnieją dwa wykonania zaworów elektrycznych, a mianowicie jednym z nich jest zawór w którym grzybek zaworu steruje przepływem spalin, w drugim przypadku zawór recyrkulacji spalin, który chłodzony jest płynem z układu chłodzenia silnika.

Pneumatyczny wzniosowy zawór recyrkulacji różni się tym, że w elektrycznym zaworze grzybek zaworu jest dociskany siłą, która jest wytworzona ciśnieniem spalin w układzie wylotowym. W przypadku, gdy brak jest zasilania elektrycznego, zawór zostaje w położeniu zamkniętym. Zawory, zarówno w przypadku pneumatycznego jak i elektrycznego wzniosowego wykazują wysoką szczelność w odniesieniu do gniazda zaworu.

Ustawienie wielkości otwarcia zaworu wynosi do około 50 ms. Jest on liczony od chwili wydania polecenia zmiany wielkości otwarcia (otwarcie oznacza tutaj ruch otwarcia jak i zamknięcia zaworu)przez sterownik.

Istnieje również elektryczny, wzniosowy zawór recyrkulacji spalin, którego działanie zależne jest od różnicy ciśnień pomiędzy ciśnieniem powietrza w układzie dolotowym, a

ciśnieniem spalin w układzie wylotowym. Zrównoważenie się tych sił prowadzi do zmniejszenia siły, która jest niezbędna do otwarcia i zamknięcia zaworu.



Rysunek. 4. Przekrój elektrycznego, wzniosowego zaworu recyrkulacji spalin. Elementy zaworu: 1 - obudowa zaworu; 2 - krzywka płaska; 3- ułożyskowana rolka współpracująca z krzywką; 4 - trzonek zaworu; 5 – uszczelnienie trzonka zaworu; 6 - tuleja ślizgowa; 7 – gniazdo zaworu; 8 - grzybek zaworu. Strzałka oznaczona literą „O” wskazuje kierunek ruchu grzybka zaworu w kierunku otwarcia.

Elektryczny, obrotowy zawór recyrkulacji spalin

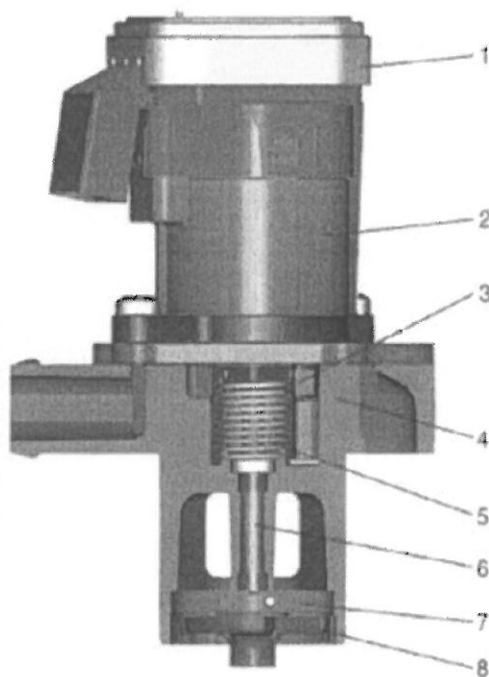
W opisywanych wcześniej pneumatycznych zaworach wzniosowych recyrkulacji spalin nie jest możliwe utrzymanie małego otwarcia zaworu podczas, gdy występuje bardzo duża różnica ciśnień pomiędzy ciśnieniem powietrza w układzie dolotowym, a ciśnieniem spalin w układzie wylotowym. Podobna sytuacja jest w przypadku elektrycznych zaworów wzniosowych recyrkulacji spalin, gdyż zdolność zachowania otarcia zaworu przy znaczącej różnicy ciśnień byłoby równoznaczne z ciągłym zasilaniem zaworu prądem co nie wpływałoby korzystnie na elementy wykonawcze.

Elektryczny, obrotowy zawór został zaprojektowany w związku z zapotrzebowaniem motoryzacji na zawór, który zapewni duży przepływ spalin w zakresie małych i średnich prędkości obrotowych. Drugim powodem jest zdolność utrzymywania małego natężenia

przepływu spalin przy utrzymywaniu dużego obciążenia silnik – a co za tym idzie przy stosunkowo wysokich ciśnieniach w układzie wylotowym.

Charakterystykę zaworu możemy sporządzić na podstawie doboru odpowiedniego kształtu kanalików przepływu spalin. Element sprzęgający jest jednym z najważniejszych elementów zaworu obrotowego. Jego głównym zadaniem jest wyregulowanie wymiarów trzpienia (przesunięcia promieniowego i wydłużenia) aby nie było możliwości przeniesienia ich na element wykonawczy. Przy braku elektryki zawór pozostaje w pozycji zamkniętej. Zawór otwierany jest dzięki momentowi obrotowemu elementu wykonawczego, a zamykany pod wpływem momentu obrotowego sprężyny. Omawiane wcześniej zawory typu wzniosowego są zdecydowanie bardziej szczelne niż zawory elektryczne, obrotowe (przez nieszczelności ucieka do pięciu razy więcej spalin).

Jak każde rozwiązanie, to też posiada swoje wady, zalicza się do nich między innymi wrażliwość zaworu na zanieczyszczenia.

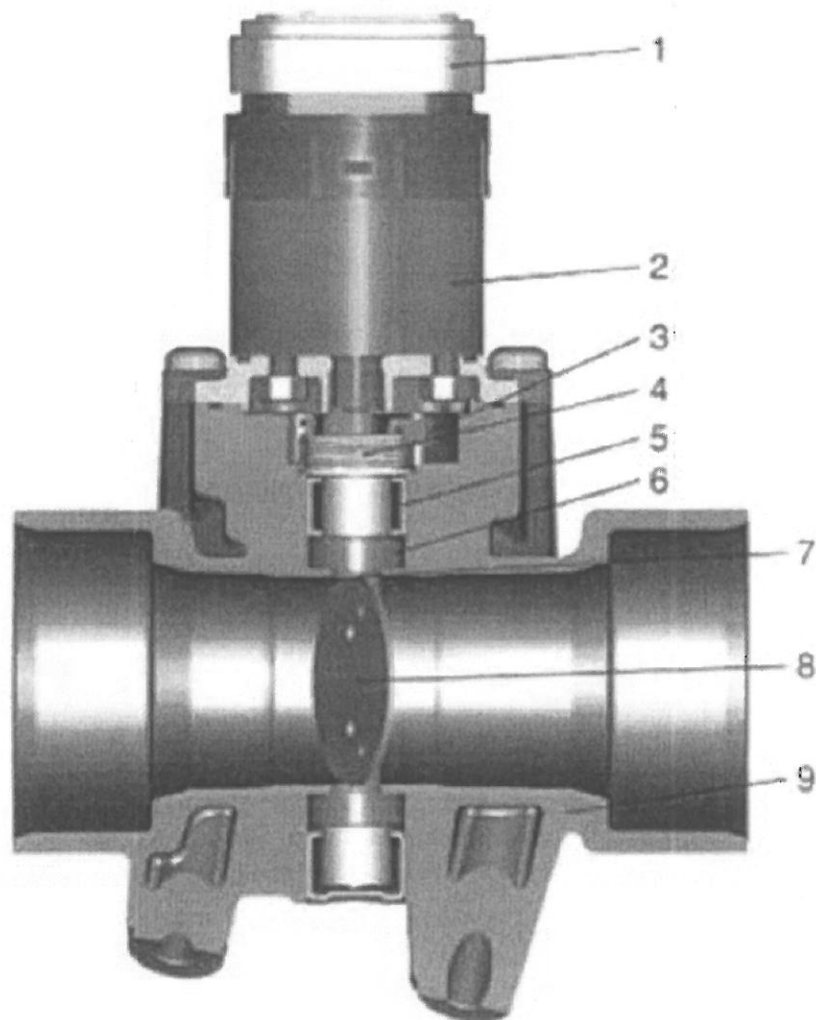


Rysunek. 5. Przekrój elektrycznego, obrotowego zaworu recyrkulacji spalin. Elementy zaworu: 1 - elektroniczny układ sterujący wraz z czujnikiem kąta otwarcia zaworu; 2 - elektryczny element wykonawczy, wymuszający obrót talerzyka zaworu, w kierunku otwarcia; 3 - element sprzęgający; 4 - obudowa zaworu; 5 - sprężyna wymuszająca obrót talerzyka zaworu w kierunku zamknięcia; 6 - trzpień talerzyka zaworu; 7 – gniazdo talerzyka zaworu; 8 - talerzyk zaworu

Elektryczny, klapowy zawór recyrkulacji spalin

Zawór stosowany głównie przy dużych masowych przepływach spalin, czyli w silnikach samochodów ciężarowych. Zawór elektryczny jest sterowany podobnie jak elektryczny obrotowy zawór recyrkulacji spalin – otwierany jest dzięki momentowi obrotowemu elementu wykonawczego, zamykany jest zaś za pomocą sprężyny (jej momentu obrotowego). Dużo uwagi podczas projektowania i konstruowania poświęcane jest łożyskom od których wymaga się naprawdę dużej trwałości i niezawodności. Klapowy elektryczny zawór podobnie jak obrotowy ma stosunkowo niską szczelność (w tym wypadku zależy ona od średnicy klapy).

Kłapa zaworu i obudowa zaworu są narażone na blokowanie się względem siebie w związku z zanieczyszczeniami i osadami, które mogą pokrywać elementy wykonawcze. Oczywiście, układ elektroniczny elektrycznego klapowego zaworu w porę powinien tą usterkę wykryć, niestety niekiedy jest to dostrzegane zbyt późno. Zauważyć wtedy możemy lekki wzrost wartości natężenia prądu, który powoduje wzrost momentu obrotowego.



Rysunek. 6. Przekrój elektrycznego, klapowego zaworu recyrkulacji spalin. Elementy zaworu: 1 - elektroniczny układ sterujący wraz z czujnikiem kąta otwarcia zaworu; 2 – elektryczny element wykonawczy, wymuszający obrót kłapy zaworu, w kierunku otwarcia; 3 – element sprzęgający, 4 - sprężyna wymuszająca obrót kłapy zaworu w kierunku zamknięcia; 5 – łożysko toczne; 6 - uszczelnienie trzpienia kłapy zaworu; 7 - trzpień kłapy zaworu; 8 - kłapa zaworu. 9 - obudowa zaworu.

Korzyści ze stosowania recyrkulacji spalin w silnikach ZS

Podstawową korzyścią ze stosowania recyrkulacji spalin silniku ZS jest obniżenie emisji tlenków azotu (NO_x), do 50%, wskutek:

- zmniejszenia masy spalin opuszczających układ wylotowy silnika;
- obniżenia szczytowych, lokalnych temperatur procesu spalania - dodatek spalin, pełniących rolę gazu obojętnego, który nie uczestniczy w procesie spalania, powoduje

zmniejszenie prędkości spalania, co powoduje obniżenie lokalnych temperatur procesu spalania;

- zmniejszenia stężenia tlenu w komorze spalania – recykulowane spaliny zawierają mniej tlenu niż powietrze, dzięki czemu tworzy się mniej tlenków azotu (NOX), ale nadal ilość tlenu w komorze spalania jest wystarczająca dla prawidłowego przebiegu procesu spalania.
- recyrkulacja niechłodzonych spalin bezpośrednio po uruchomieniu silnika i w fazie jego nagrzewania, pozwala uniknąć spalania stukowego, nierównej pracy silnika oraz zmniejszyć emisję węglowodorów;
- spowolnienie procesu spalania, pozwala uzyskać również bardziej miękką pracę silnika - jest to praca z mniejszą ilością nagłych wzrostów ciśnień podczas procesu spalania, które powodują między innymi głośną pracę silnika;

