

JERZY JASKÓLSKI*, PAWEŁ MIKODA**, JAKUB ŁASOCHA ***

SYSTEM EGR A ZMNIEJSZENIE EMISJI SUBSTANCJI SZKODLIWYCH

EGR SYSTEM AND THE PROBLEM OF REDUCING POLLUTANT EMISSION

Streszczenie

Recyrkulacja spalin (EGR) spełnia istotną rolę w nowoczesnym silniku Diesla jako najważniejszy układ redukcji poziomu tlenków azotu w spalinach. System recyrkulacji spalin łączy układ wydechowy silnika z układem dolotowym przez zawór recyrkulacji spalin. W niniejszym artykule przedstawiono podstawy teoretyczne EGR, a następnie praktyczne zastosowania EGR do:

- sterowania chwilą zapłonu pokazane w eksperymencie Volvo,
- przykład recyrkulacji wewnętrznej w benzynowym 6-cyklowym silniku HCCI.

Słowa kluczowe: redukcja emisji spalin, recyrkulacja spalin, zawór EGR, silnik z zapłonem samoczynnym

Abstract

Exhaust gas recirculation (EGR) is an important feature of modern Diesel engines, as it plays a major role in reducing NO_x emissions. The EGR system connecting the exhaust and the intake manifolds by a flow-controlling valve. In the article we show a theoretical rudiments of EGR, and next practical application of EGR to:

- steering moment of ignition by EGR rate illustrated in Volvo experiment,
- example of internal exhaust gas recirculation in gasolin 6-cycle HCCI engine.

Keywords: reduction of exhaust gas emission, recirculation of exhaust gas, EGR valve, diesel engine

* Dr hab. inż. Jerzy Jaskólski, prof. PK, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

** Mgr inż. Paweł Mikoda (doktorant), Wydział Transportu, Politechnika Śląska.

*** Mgr inż. Jakub Łasocha, PP-A Polremako, Sp. z o.o.

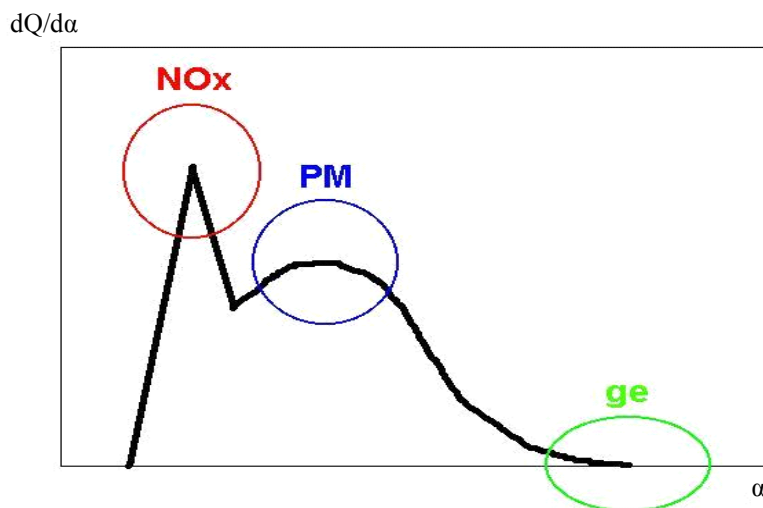
1. Podstawowe procesy zachodzące w czasie spalania w silnikach Diesla

Procesy związane ze spalaniem paliwa w silniku z zapłonem samoczynnym można podzielić na dwa etapy: etap I – spalanie kinetyczne i etap II – spalanie dyfuzyjne.

Proces spalania kinetycznego paliwa wtrysniętego do komory spalania w czasie okresu opóźnienia samozapłonu związany jest z brakiem czasu na homogenizację paliwa z powietrzem. Konsekwencją tego jest powstawanie stref z wartościami współczynnika nadmiaru powietrza sprzyjającym niskiej emisji sadzy, HC i CO. Jednocześnie tak przygotowana mieszanina palna ma skłonność do spalania dynamicznego z dużą prędkością narastania ciśnienia spalania, wysokimi temperaturami, dużą ilością powstałych wówczas NO_x oraz wysokim poziomem hałasu. Natężenie tych zjawisk wzrasta wraz z ilością paliwa dostarczonego do komory spalania w okresie opóźnienia samozapłonu.

W czasie spalania dyfuzyjnego paliwo jest sukcesywnie spalane praktycznie bezpośrednio po dostarczeniu do komory spalania. W tym etapie spalania proces utleniania paliwa odbywa się w szerokim zakresie wartości współczynnika nadmiaru powietrza, zatem prędkością wtrysku paliwa można wówczas sterować prędkość spalania. Wzrost prędkości spalania dyfuzyjnego przyczynia się do obniżenia emisji związków niecałkowitego spalania (HC i PM) oraz – poprzez skrócenie spalania – do zmniejszenia wartości jednostkowego zużycia paliwa.

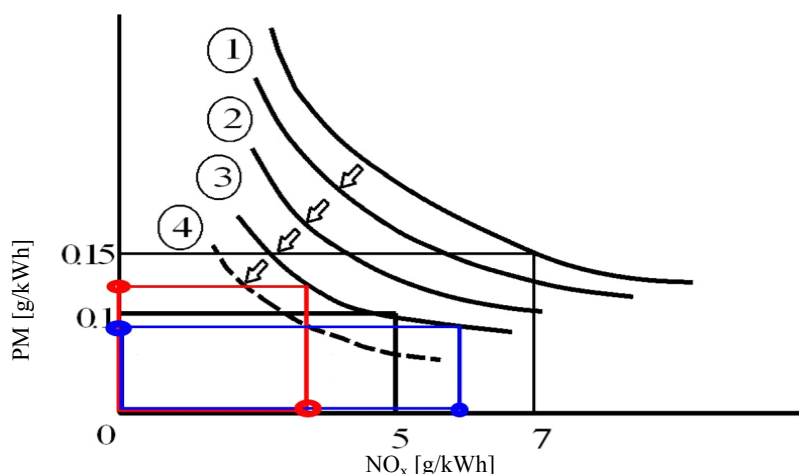
Występowanie dwóch zasadniczych faz spalania prowadzi do powstawania zarówno tlenków azotu w okresie spalania kinetycznego, jak i CO, HC i PM w czasie spalania dyfuzyjnego (rys. 1).



Rys. 1. Prędkość spalania paliwa w silniku z zapłonem samoczynnym z zaznaczeniem faz spalania odpowiedzialnych za kontrolę emisji NO_x , PM i jednostkowego zużycia paliwa g_e

Fig. 1. Rate of heat release in Diesel engine, with combustion phases responsible for emission of NO_x , PM and g_e

Ponadto istnieje znana w konwencjonalnych silnikach z zapłonem samoczynnym współzależność emisji NO_x i PM, zgodnie z którą obniżenie prędkości spalania kinetycznego (zmniejszenie dynamiki spalania) w celu zmniejszenia emisji NO_x powoduje jednocześnie intensyfikację przyczyn powstawania związków niecałkowitego spalania (rys. 2).



Rys. 2. Współzależność emisji tlenków azotu NO_x i cząstek stałych PM

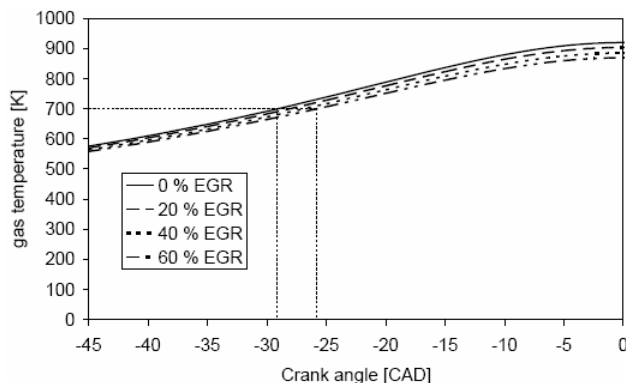
Fig. 2. Connection between emission of nitrogen oxides NO_x and particulate matter PM

2. Recyrkulacja spalin

Recyrkulację spalin początkowo stosowano jedynie do podwyższenia temperatury ładunku w czasie rozgrzewania zimnego silnika. Obecnie EGR wykorzystuje się głównie do redukcji emisji tlenków azotu – poprzez obniżenie temperatury spalania. Obojętne produkty spalania (CO_2 i H_2O) charakteryzują się bowiem większym ciepłem właściwym niż powietrze, a nie biorąc udziału w procesie spalania, wpływają na obniżenie temperatury obiegu (rys. 3).

Oczywiste jest, że recyrkulacja spalin może być stosowana jedynie w ograniczonym zakresie obciążeń silnika. Powodowane jest to przez zmniejszenie napełniania cylindra świeżym powietrzem w przypadku silników Diesla lub świeżym ładunkiem w przypadku silników o zapłonie iskrowym.

Zawór recyrkulacji spalin może być otwierany pneumatycznie bądź elektromagnetycznie, w obu przypadkach na ogół sygnałem ze sterownika elektronicznego, który dobiera do zakresu obciążeń i prędkości obrotowej silnika wydatek strumienia spalin płynących do kolektora dolotowego. Doprowadzane do układu dolotowego spaliny są chłodzone, zapobiegając podwyższeniu temperatury ładunku, co prowadziłoby do zmniejszenia współczynnika napełniania. Jest to także niekorzystne ze względu na emisje NO_x przez podniesienie temperatury spalania.



Rys. 3. Przyrost ciśnienia w cylindrze podczas sprężania w funkcji obrotu wału korbowego przy różnym stopniu recyrkulacji spalin

Fig. 3. Influence of EGR on gas temperature during compression

3. Zastosowania EGR

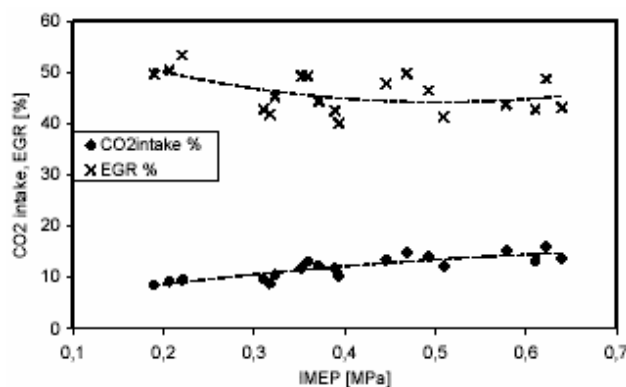
3.1. Eksperyment Volvo

Kombinacja zredukowanego stopnia sprężania i wysokiego stopnia recyrkulacji spalin (EGR) została zastosowana do kontrolowania początku i szybkości spalania w eksperymencie z dieslowskim silnikiem HCCI wykonanym na Politechnice Chalmers. Przy ubogich i nisko sprężanych mieszankach w silniku HCCI recyrkulacja spalin pozwala uzyskać niskie poziomy emisji NO_x i cząstek stałych, natomiast wyższy poziom HC i CO jest redukowany w konwencjonalnych katalizatorach utleniających.

Systemem recyrkulacji spalin sterowano tak, by 50% ciepła było uwolnione najbliżej jak to możliwe GMP. Teoretycznie taka praca powinna dać maksymalną sprawność, jednak w rzeczywistości korzystne jest, gdy największa ilość ciepła wydzieli się tuż po GMP. W eksperymencie opóźnienie momentu wydzielania ciepła spowodowało niestabilność spalania, dlatego powrócono do pierwszego rozwiązania.

Wysoki stopień EGR był potrzebny, by uniknąć spalania stukowego, lecz zbyt wysoka wartość wywoływała wypadanie zapłonów. Przedział EGR, w którym 50% ciepła wydzielano się w pobliżu GMP i nie występowało wypadanie zapłonów okazał się bardzo wąski (kilka procent) i dlatego jakiegokolwiek zakłócenie EGR powodowało nieprawidłowości w pracy silnika.

W zależności od obciążenia wymagany stopień EGR zmieniał się w zakresie 35–55%. W przypadku gdy w układzie dolotowym spaliny zajmują miejsce powietrza, wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ zmniejsza się z 1,9 do 1 dla wyższych obciążeń. Jest to znacznie mniej niż dla konwencjonalnego silnika Diesla. Dla większych obciążeń silnik był doładowywany mechanicznie dla uzyskania λ w przybliżeniu równej 1. Poziom potrzebnego EGR został pokazany na rys. 4. Wykres pokazuje również ilość CO_2 w powietrzu dolotowym.



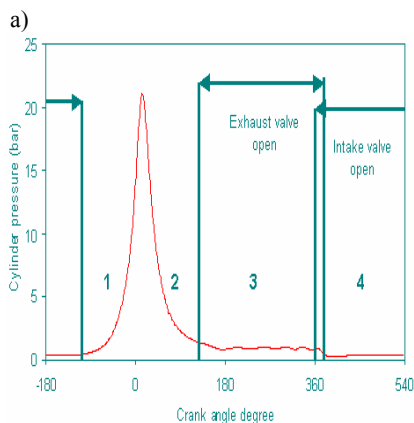
Rys. 4. Procentowa wartość EGR i CO₂ w układzie dolotowym

Fig. 4. Percentage EGR and CO₂ in the intake air

Jakkolwiek praca silnika w myśl obiegu HCCI była możliwa w dość szerokich granicach, to silnik był bardzo czuły na stopień EGR. Dlatego praca silnika w zmiennych warunkach wydaje się problematyczna.

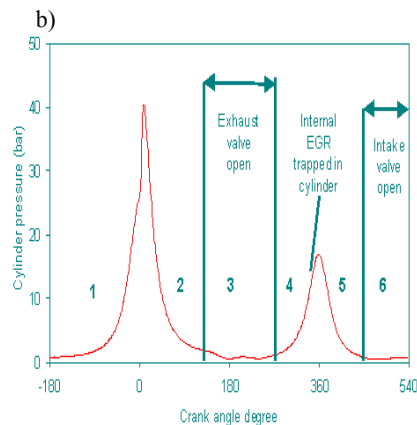
3.2. Sześciocylindrowy silnik benzynowy

Benzynowe silniki CAI mogą być traktowane jako sześciocylindrowe silniki spalinowe. Wynika to z faktu stosowania wewnętrznej recykulacji spalin, która realizowana jest przez zupełnie odmienną organizację faz rozrządu niż w konwencjonalnych silnikach (rys. 5a i b).



Rys. 5a) Wykres indykatorowy z fazami rozrządu dla konwencjonalnego silnika spalinowego

Fig. 5a) Indication graph with valve phases for normal gasoline engine



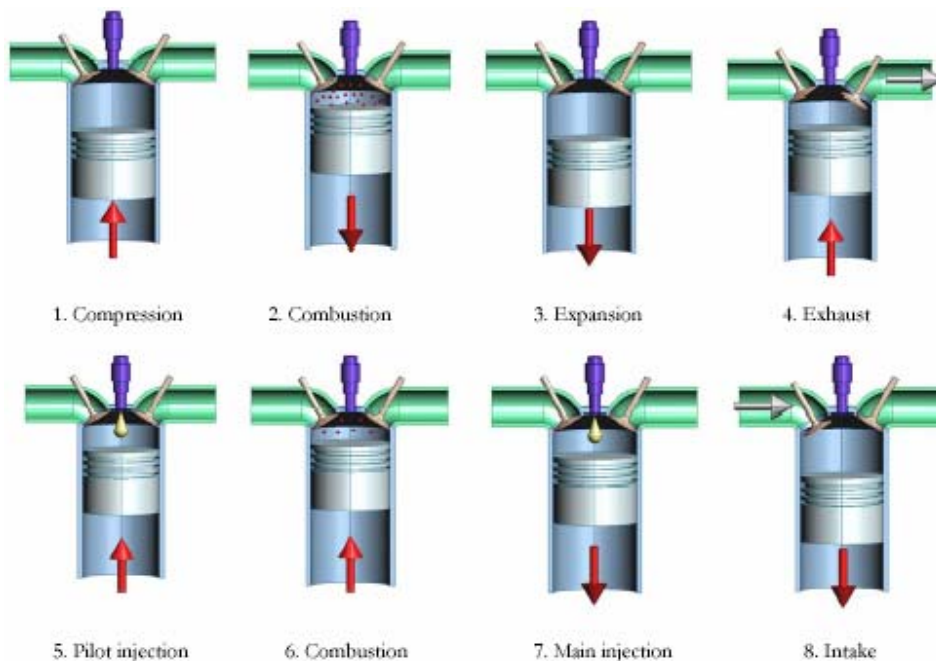
Rys. 5b). Wykres indykatorowy z fazami rozrządu dla benzynowego silnika CAI

Fig. 5b) Indication graph with valve phases for gasoline CAI engine

W końcowym okresie suwu rozprężania następuje otwarcie zaworu wylotowego w takiej samej fazie jak dla silników konwencjonalnych. Jednak zamknięcie zaworu dolotowego dla benzynowych silników CAI odbywa się znacznie wcześniej, ok. 90° OWK po GMP tłoka w suwie wylotu spalin z cylindra silnika. W efekcie w obiegu tym pojawia się nowa faza – sprężanie spalin. Dokonywany jest wówczas wstępny wtrysk dawki pilotującej benzyny. Po przekroczeniu kolejnego GMP tłoka następuje rozprężanie spalin (drugi dodatkowy etap obiegu w porównaniu z silnikiem konwencjonalnym) i wtrysk głównej dawki paliwa.

Kolejnym etapem obiegu CAI jest otwarcie zaworu dolotowego, rozpoczynające suw ssania. Taka organizacja procesu wymiany ładunku pozwala nie tylko na dobrą homogenizację ładunku, ale przede wszystkim umożliwia, poprzez wewnętrzną recyrkulację spalin, kontrolę chwili samozapłonu paliwa oraz prędkości wywiązywania się ciepła.

Zjawiska zachodzące w cylindrze benzynowego silnika CAI przedstawiono poniżej.



Zatem można wydzielić sześć zasadniczych faz obiegu roboczego: I – suw sprężania. Samozapłon następuje przed GMP tłoka. Spalanie odbywa się prawie symetrycznie względem górnego martwego położenia tłoka; II – suw rozprężania; III – wylot spalin; IV – wczesne zamknięcie zaworu wylotowego (ok. 90° OWK po GMP). Sprężanie spalin i wtrysk dawki pilotującej przed kolejnym GMP tłoka; V – rozprężanie spalin i wtrysk dawki głównej paliwa; VI – otwarcie zaworu dolotowego i doprowadzenie do obiegu czystego powietrza w mieszaninie z paliwem (i pozostałościami z poprzedniego obiegu roboczego).

4. Podsumowanie

W podsumowaniu można stwierdzić, że zastosowanie zaworów EGR w znacznej mierze obniża emisję substancji szkodliwych. Nie bez znaczenia jest jednak sterowanie procesem recyrkulacji. Jak bowiem wynika z doświadczenia autorów niniejszego artykułu sterowanie EGR nie jest łatwe i wymaga dostrojenia parametrów regulacyjnych, taką jak kąt wyprzedzenia wtrysku, dawka paliwa, czego potwierdzeniem były opisane eksperymenty przeprowadzone w światowych laboratoriach naukowych.

Literatura

- [1] Helmantel A., *Reducing Diesel Engine Emissions – An Experimental Investigation*, Department of Thermo and Fluid Dynamics Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden 2004.
- [2] Ogin R., *Computer Modeling of HCCI Combustion*, Ph.D. thesis, June 2004.