

Dawid DRABIK, Krzysztof PRAŻNOWSKI

## WYBRANE WSKAŹNIKI PRACY SILNIKA CHARAKTERYZUJĄCEGO SIĘ BEZPOŚREDNIM WTRYSIEM PALIWA DO KOMORY SPALANIA

*W artykule opisana została koncepcja bezpośredniego wtrysku paliwa i jego wpływ na wskaźniki pracy silnika. Silniki o zapłonie iskrowym ponownie stają się bardzo popularne wśród konsumentów. Spowodowane jest to przede wszystkim zastosowaniem bezpośredniego wtrysku paliwa, który to pozwala zwiększyć tak bardzo pożądaną sprawność ogólną silnika. Producenci silników określili jak pozytywne wyniki może przynieść bezpośrednie doprowadzenie paliwa do komory spalania. Artykuł opisuje wybrane wskaźniki pracy silnika, który wyposażony jest w wtrysk bezpośredni.*

### WSTĘP

Współcześnie inżynierowie próbują zaprojektować silnik tak, aby on cechował się największą sprawnością ogólną. Niestety próby poprawy parametrów pracy silnika często stają się nieskuteczne. Pomysł wprowadzenia paliwa bezpośrednio do komory spalania umożliwił poprawę sprawności silnika. Koncepcja wtrysku bezpośredniego jest ciągle udoskonalana, silniki hybrydowe wykorzystują taki pomysł dostarczania paliwa. Innym podejściem może być, także tak ostatnio popularne podejście zmiany stopnia sprężania w komorze spalania, rozwiązanie to również wykorzystuje wtryskiwacz bezpośredni. Aspekty ekologiczne stają się współcześnie jednymi z kluczowych podczas projektowania silnika. Każda nowo tworzona konstrukcja musi uwzględniać redukcję negatywnych skutków jej wpływu na środowisko. Porównanie zużycia paliwa oraz emisji szkodliwych substancji do otoczenia również zostało przedstawione w artykule.

### 1. ZASADA DZIAŁANIA WTRYSIU BEZPOŚREDNIEGO

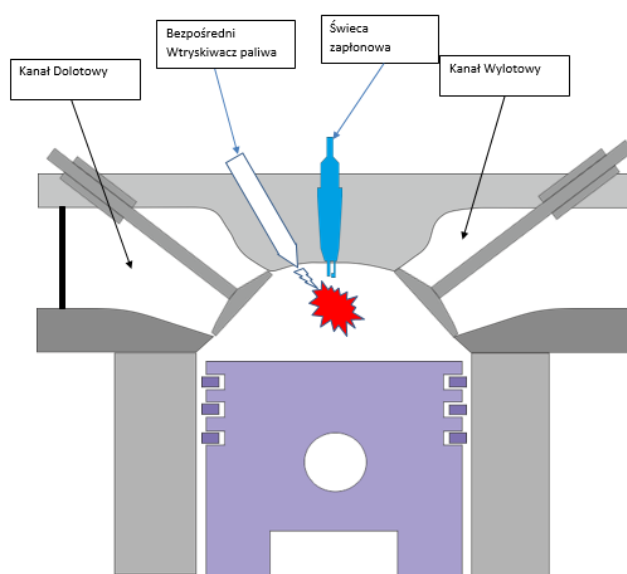
Jednym z głównych celów konstruktorów silników spalinowych jest poprawa sprawności ogólnej silnika. Zastosowanie bezpośredniego wtrysku paliwa do komory spalania pozwoliło znacznie poprawić parametry pracy silnika. Po raz pierwszy zastosowane zostało to rozwiązanie przez firmę Gutbrod, następnie Mercedes udoskonalił pomysł. Marka Mitsubishi również przyczyniła się do udoskonalenia idei dostarczania paliwa bezpośrednio do komory spalania. Obecnie można podzielić pracę silnika w zależności od spalanej mieszanki.

Przeważnie silniki benzynowe wykorzystują w swojej mieszance na jedną porcję paliwa 14 porcji powietrza. Tymczasem silnik benzynowy z zastosowaniem rozwiązania bezpośredniego wtrysku paliwa zadowala się mieszanką, w której na jedną porcję paliwa przypada od 25 do 40 porcji powietrza w zależności od mocy silnika. Dzieje się tak dzięki wprowadzeniu usprawnienia polegającym na wtryskiwaniu paliwa bezpośrednio do cylindra, w którym następuje mieszanie się paliwa z powietrzem. Zastosowanie to sprawiło, iż pozyskana mieszanka w różnych obszarach posiada różną gęstość, co umożliwia zapłon silnika benzynowego przy wykorzystaniu większej ilości porcji powietrza na porcję paliwa.

Najbardziej wyróżniającą cechą silników benzynowych, w których zastosowano bezpośredni wtrysk paliwa jest zróżnicowany

przebieg procesu spalania mieszanki. Proces ten może przebiegać w różny sposób w zależności od zapotrzebowania mocy silnika. Inny jest podczas szybkiej jazdy samochodem, a inny, gdy auto jest prowadzone spokojnie i ekonomicznie.

W przypadku, gdy silnik wykazuje duże zapotrzebowanie na moc, podczas ruchu tłoka powietrze zasysane jest w dół cylindra. Wówczas następuje rozproszenie paliwa oraz schłodzenie powietrza znajdującego się w komorze spalania i na ściankach cylindra. Dzięki ruchowi tłoka w górę następuje sprężenie mieszanki paliwo-powietrznej, która zapala się od iskry przeskakującej między elektrodami świecy. W tym przypadku silnik wykorzystuje paliwo do ochłodzenia powietrza w cylindrze, co wpływa na zwiększenie mocy silnika. Dzięki takiemu przebiegowi procesu spalania mieszanki uzyskano o 10 procent większy moment obrotowy od normalnego silnika benzynowego o tej samej pojemności. Rysunek 1 przedstawia schematyczną budowę silnika z zastosowanym wtryskiem bezpośrednim. Rysunek 2 przedstawia rodzaje bezpośredniego wtrysku paliwa w oparciu o sposób tworzenia mieszanki.



**Rys. 1.** Schemat silnika z zastosowanym bezpośrednim wtryskiem paliwa.

Poprawa sprawności ogólnej silnika jest dążeniem każdego inżyniera zajmującego się tematyką konstrukcji silników. Ze wzorów na moc i sprawność obiegów teoretycznych wynika przede wszystkim, że:

- sprawność zależy od stopnia sprężania,
- moc jest zależna od ładunku znajdującego się w cylindrze,
- ilość traconego ciepła w spalinach i w skutek chłodzenia silnika wpływa na sprawność.

Wpływ na poprawę sprawności ogólnej silnika mają następujące czynniki:

- istnieje możliwość wtrysnięcia paliwa bezpośrednio przed końcem drugiego suwu pracy (sprężania). Pozwala to obniżyć temperaturę podgrzewanego powietrza oraz uniknąć samozapłonu.
- wtrysnięte paliwo przy otwartym zaworze dolotowym zmniejsza objętość ładunku w cylindrze, możliwe jest wtedy dostarczenie większej ilości powietrza do cylindra.

Wzór na sprawność ogólną można przedstawić :

$$\eta_o = \frac{N_e \cdot t}{g_e \cdot N_e \cdot t \cdot W_o} = \frac{1}{g_e \cdot W_o} \quad (1)$$

Gdzie:

$g_e$  - godzinowe zużycie paliwa w (g/h lub kg/h)

$N_e$  - Moc użyteczna w (kW).

W celu poprawy sprawności ogólnej silnika koncern Audi stworzył nowe silniki TFSI wyposażone w dwa rodzaje wtrysku paliwa. Rysunek 3 przedstawia wtryskiwacz paliwa silnika TFSI montowany w pojazdach AUDI. Koncepcja również na stałe została wdrożona do produkcji. Połączenie dwóch sposobów dostarczenia paliwa jest, co prawda bardziej skomplikowane konstrukcyjnie, jednak pozwala znacznie poprawić wskaźniki pracy silnika.



Rys. 3. Wtryskiwacz paliwa silnika TFSI

Bezpośredni wtrysk benzyny posiada szereg zalet a do najważniejszych można zaliczyć:

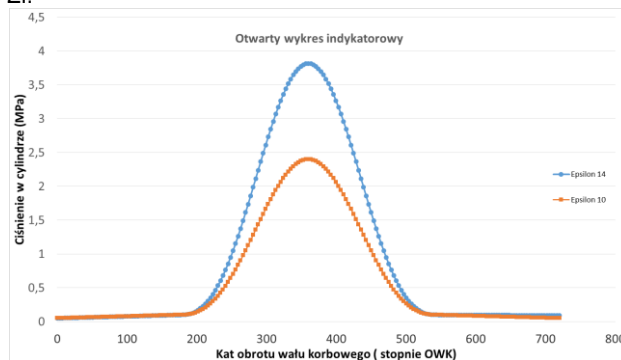
- poprawę mocy pojazdu,
- wzrost sprawności ogólnej silnika,
- redukcja zużycia paliwa,
- wzrost momentu obrotowego silnika,
- szybką reakcję na zmianę obciążenia.

## 2. WSKAŹNIKI PRACY SILNIKA Z BEZPOŚREDNIM WTRYSKIEM BENZYNY

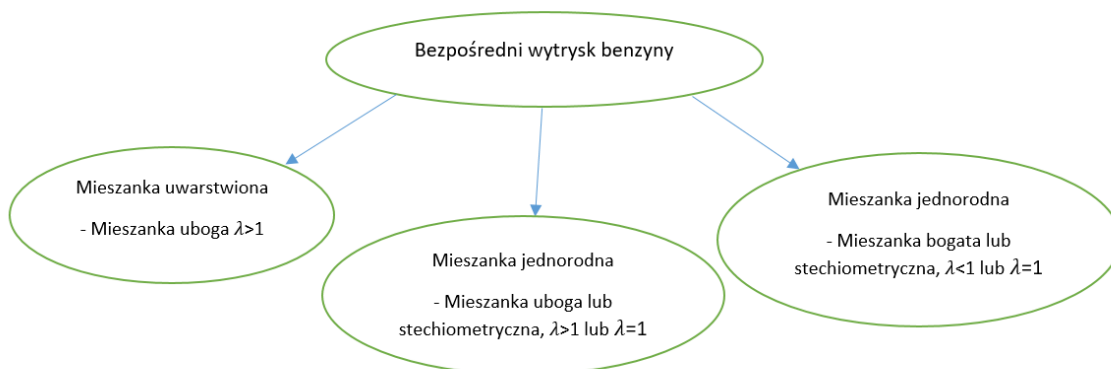
Silnik spalinowy jest konstrukcją, która na przestrzeni lat ewoluowała, pierwsze silniki nie dysponowały dużą mocą ani momentem obrotowym. O tym, czym charakteryzuje się dana jednostka napędowa informują wskaźniki pracy silnika. Do wskaźników pracy silnika zaliczyć można:

- moc,
- prędkość obrotową,
- średnie ciśnienie indykowane,
- średnie ciśnienie użyteczne,
- średni moment obrotowy,
- sprawność silnika,
- jednostkowe oraz godzinowe zużycie paliwa.

Pojęcie indykowania silnika odnosi się głównie do pomiarów ciśnienia w cylindrze. Odpowiednie zastosowanie technik indykowania daje możliwość zaobserwowania zjawisk zachodzących w komorze spalania przy niskim koszcie. Pomiar ciśnienia obejmuje zazwyczaj pełen cykl pracy silnika. Rysunek 4 przedstawia wyliczony komputerowo teoretyczny otwarty wykres indykatorowy silnika spalinowego dla stopnia sprężania 14 oraz otwarty wykres indykatorowy dla stopnia sprężania 10. Oba przebiegi dotyczą bezpośredniego wtrysku paliwa jako sposobu dostarczenia paliwa do silnika o ZI.



Rys. 4. Otwarty teoretyczny wykres indykatorowy dla stopnia sprężania 14 oraz 10.



Rys. 2. Podział bezpośredniego wtrysku benzyny ze względu na rodzaj mieszanki

Zmiana stopnia sprężania wpływa bezpośrednio na obniżenie ciśnienia w cylindrze. Przebieg ciśnienia w cylindrze pozwala na przeprowadzenie szeregu różnych analiz. Parametry indykowania można podzielić na dwie kategorie:

- pośrednie parametry indykowania,
- bezpośrednie parametry indykowania.

Różnica pomiędzy bezpośrednimi a pośrednimi jest taka, że bezpośrednie parametry indykowania są wyznaczane z krzywej ciśnienia w czasie jednego cyklu. Pośrednie parametry indykowania wymagają dalszych obliczeń do ich wyznaczenia. Tabela 1 przedstawia podział pośrednich i bezpośrednich parametrów indykowania.

**Tab. 1.** Pośrednie parametry indykowania oraz bezpośrednie parametry indykowania

Pośrednie parametry indykowania	Bezpośrednie parametry indykowania
- średnie ciśnienie indykowane	- ciśnienie maksymalne
- średnie ciśnienie tarcia	- położenie ciśnienia maksymalnego
- początek spalania	- przyrost ciśnienia
- długość spalania	- położenie maksymalnego przyrostu ciśnienia
- konwersja energii	- prędkość narastania ciśnienia
- stopień wypalenia ładunku	
- hałaśliwość spalania	

Przeprowadzając badania laboratoryjne, można stwierdzić, że możliwe jest modyfikowanie ciśnieniem w komorze spalania. Przekłada się to na zmiany mocy, momentu obrotowego czy jednostkowego zużycia paliwa. Na Rysunku 5 przedstawiono wykres indykatorowy otwarty rzeczywisty. Badany silnik wyposażony był w bezpośredni wtrysk benzyny do komory spalania.

## PODSUMOWANIE

Produkcja silników spalinowych ciągle wzrasta, należy jednak pamiętać, że ograniczenia związane z ochroną środowiska i ograniczonymi zasobami sprawiają, że konieczne jest poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Bezpośredni wtrysk paliwa umożliwia poprawę wskaźników paliwa, co przekłada się na lepsze moż-

liwości wykorzystania energii zawartej w paliwie.

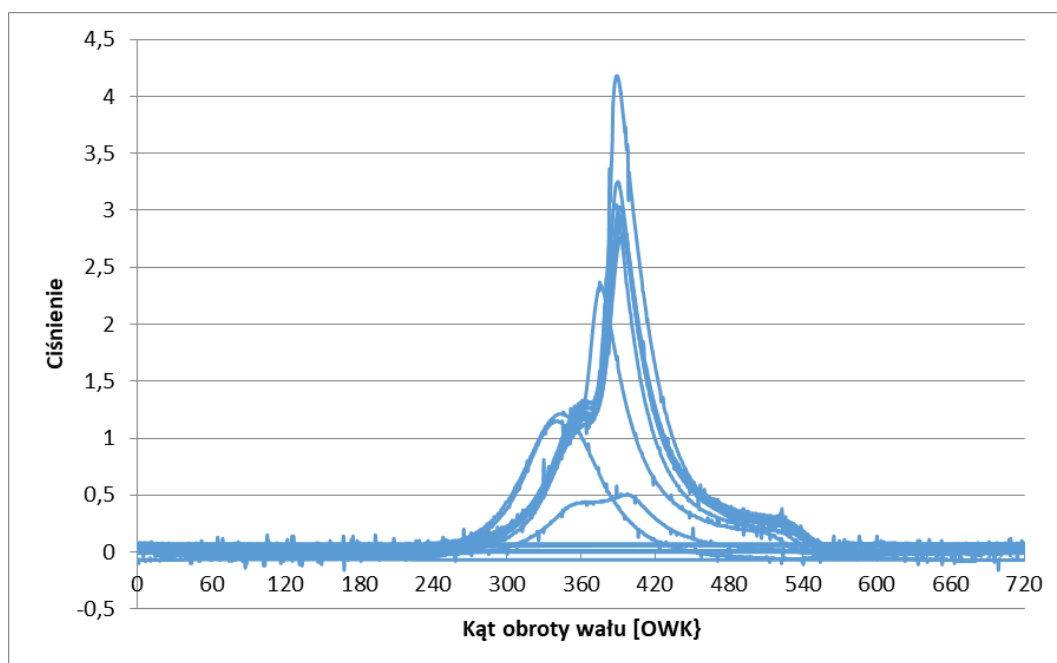
Badając wskaźniki pracy silnika, możliwe jest wyszczególnienie takich obszarów, które można zmodyfikować by sprawność ogólna była większa. Z wykresów indykatorowych otwartych wynika, że im wyższy założony stopień sprężania tym ciśnienie w układzie jest większe. Przekłada się to na podniesienie sprawności ogólnej silnika. Wyższy stopień sprężania to także mniejsze jednostkowe zużycie paliwa, zmniejszenie zużycia paliwa to redukcja emisji dwutlenku węgla do środowiska. Silniki spalinowe są ciągle unowocześniane a czynnikami wpływającymi na ich modernizację są :

- nowoczesne materiały,
- nowoczesne oleje i paliwa,
- normy emisji spalin,
- technologie hybrydowe,
- nowoczesne systemy elektroniczne.

Niestety oprócz wielu korzyści wynikających z zastosowania bezpośredniego wtrysku paliwa w silniku benzynowym pojawia się także jedna ogromna wada wynikająca z zastosowania w silniku tego typu rozwiązania. Silniki o wtrysku bezpośrednim idealnie sobie radzą z dwutlenkiem węgla, lecz niestety emitują zbyt dużą ilość tlenu azotu. Inżynierowie nieprzerwanie starają się udoskonalić koncepcje wtrysku paliwa do komory spalania, aby w pełni wykorzystać możliwości takiego rozwiązania. Pewnym wydaje się fakt, że na przestrzeni kilka najbliższych lat większość konstrukcji silnika wykorzystywało będzie wtryskiwacz bezpośredni.

## BIBLIOGRAFIA

1. Heiko P., *Układy bezpośredniego wtrysku benzyny w praktyce warsztatowej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ 2016.
2. Changming G., Fenghua L., Jingzhen S., Kang W., *Effect of compression ratio on performance and emissions of a stratified-charge DISI (direct injection spark ignition) methanol engine*, Energy 2016,
3. Drabik D., Mamala J., *Effective compression ratio of combustion engine as a way of increasing efficiency.*, Journal of KONES. 2016,



**Rys. 5.** Rzeczywisty wykres indykatorowy otrzymany w wyniku zmiany stopnia sprężania

- Luft S., *Podstawy budowy silników*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2011.
- Mamala J., *Kompensacja niedostatku siły napędowej w procesie rozprężania samochodu osobowego*, Wydawnictwa Politechniki Opolskiej 2011.
- Mysłowski J., *Doładowanie silników Pojazdy samochodowe*, Oficyna Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ Warszawa 2011.
- Sobieszcański M., *Modelowanie procesów zasilania w silnikach spalinowych*, Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji Łączności, Warszawa 2000.
- Wajand J., *Mikrokomputerowe obliczenia silnika spalinowego*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1990.
- Wimmer A., Glaser J., *Indykowanie silnika*, Wydawnictwo AVL List GmbH, Warszawa 2004
- www.audi.pl

### Indicators of engine performance with direct fuel injection to the combustion chamber

*Spark-ignition engines are becoming very popular among consumers. It is mainly caused by using direct fuel injection, which increases the overall efficiency of the engine. Those positive effects were described by engine manufac-*

*tures. This article presents some of the indicators of engine performance with direct fuel injection. It also describes the results of engine tests and characterizes performance of an engine.*

*The idea of direct fuel injection is still being refined. Not only it is used in hybrid engines to supply fuel, but also in changing compression ratio in a combustion chamber. Ecological aspects are one of the most crucial when it comes to engine construction and each engine project must consider lowering its negative effects on the environment. In this article the comparison of fuel consumption and emission of harmful substances was presented.*

Autorzy:

mgr inż. **Dawid Drabik** - Politechnika Opolska, Katedra Pojazdów, drabteam@wp.pl.

dr inż. Krzysztof Prażnowski - Politechnika Opolska, Katedra Pojazdów, k.praznowski@po.opole.pl

**JEL:** L62 **DOI:** 10.24136/atest.2018.102

**Data zgłoszenia:** 2018.05.22 **Data akceptacji:** 2018.06.15