

Tomasz KOSZTYŁA

## NIERÓWNOMIERNOŚĆ NAPEŁNIANIA CYLINDRÓW SILNIKA ZI

### Streszczenie

Praca jest pierwszą z zaplanowanego cyklu badań związanych z nierównomiernością napełniania świeżym ładunkiem. W wielocylindrowym silniku rozdział czynnika roboczego zależy w dużej mierze od zjawisk gazodynamicznych, zachodzących w układzie dolotowym. W silnikach zasilanych mieszanką homogeniczną, wytwarzaną centralnie, nierównomierność rozdziału świeżego ładunku przyczynia się do powiększenia różnicowania prac indykowanych w poszczególnych cylindrach. Nie powoduje ona natomiast szczególnych różnic w wartościach współczynnika nadmiaru powietrza w tych cylindrach. W pracy przedstawiono analizę pomiarów porównawczych nierównomierności napełniania cylindrów silnika ZI. Jako kryterium porównawcze wybrano pomiar temperatury spalin wydechowych. Badania przeprowadzono w zależności od wybranych zmienionych parametrów pracy silnika: jego prędkości obrotowej i temperatury cieczy chłodzącej.

### WSTĘP

W silnikach spalinowych wielocylindrowych ZI zadaniem układu dolotowego jest doprowadzenie odpowiedniej ilości oraz równomierne rozdzielanie do cylindrów czynnika roboczego (powietrza lub mieszanki paliwowo-powietrznej). Sterowanie ilościowe ładunku napływającego do cylindrów odbywa się na drodze dławienia przepływu czynnika (najczęściej rolę tę spełnia przepustnica), natomiast na równomierne napełnienie cylindrów mają wpływ cechy konstrukcyjne układu dolotu powietrza, a szczególnie gałęzi kolektora dolotowego konstrukcja kolektora dolotowego. Nierównomierny rozdział czynnika roboczego na poszczególne cylindry może powodować wahania rozwijanej przez silnik mocy i momentu obrotowego oraz podwyższoną poziom emisji toksycznych składników w spalinach. Mogą towarzyszyć temu również drgania układu napędowego, a także podwyższony poziom hałasu [4]. Każda nierównomierność rozdziału mieszanki powoduje zróżnicowanie pracy indykowanych w poszczególnych cylindrach. Skutkiem tego jest zmniejszenie mocy użytecznej rozwijanej przez silnik, zwiększenie nierównomierności jego pracy a także zużycia paliwa.

W pracy przedstawiono wyniki badań porównawczych nierównomierności napełniania cylindrów silnika ZI. Do oceny nierównomierności napełniania cylindrów czynnikiem roboczym wybrano pomiar temperatury spalin wydechowych. Badania przeprowadzono w zależności od wybranych parametrów pracy silnika spalinowego: prędkości obrotowej oraz temperatury silnika.

## 1. STANOWISKO POMIAROWE

### 1.1. Obiekt badań

Obiektem badań był silnik czterocylindrowy o zapłonie iskrowym, produkcji Renault typ F3P678. Wybór tego typu silnika wynikał z właściwości konstrukcyjnych układu dolotowego, charakteryzujących się dużą nierównością długości i przekrojów gałęzi kolektora dolotowego. Skutkiem różnej długości a także, choć w mniejszym stopniu, przekrojów gałęzi kolektora dolotowego, jest różnica nie tylko w oporach przepływu świeżego ładunku, ale również w zjawiskach dynamiczno-falowych, jakie zachodzą w układzie dolotowym. Rozdział czynnika roboczego pomiędzy poszczególne cylindry zależy w bardzo dużym stopniu od niestabilnych procesów przepływowych w układzie dolotowym.



Rys. 1 Kolektor dolotowy badanego silnika

Efektom tych zjawisk zachodzących w układzie dolotowym jest zróżnicowanie napełnienia cylindrów mieszanką paliwowo-powietrzną [3]. Skutkuje to zmiennymi dla poszczególnych cylindrów charakterystycznymi parametrami obiegu pracy, w tym również temperaturą spalin wydechowych. Zastosowany w badanym silniku układ zasilania, wyposażony w jednopunktowy wtrysk paliwa z podgrzewanym kolektorem dolotowym, zapewnia równomierność dawki paliwa dla wszystkich cylindrów, niezależnie od stopnia napełnienia [2].

### 1.2. Warunki przeprowadzania pomiarów

W celu zminimalizowania wpływu pozostałych czynników wpływających na pomiar temperatury spalin, w badanym silniku przeprowadzono:

- kontrolę i regulację luzu zaworowego
- kontrolę stanu technicznego i niezbędną naprawę układu zapłonowego (w celu wyeliminowania zjawiska tzw. „wypadania zapłonów”)
- weryfikację stanu szczelności komory spalania poprzez pomiar ciśnienia sprężania
  - Dla każdej z serii przyjęto stałe warunki pomiaru takie jak:
- temperatura zewnętrzna

- temperatura początkowa silnika (pokojowa lub temperatura pracy)
- stałą prędkość obrotową
- minimalne dla danej prędkości obrotowej i stałe otwarcie przepustnicy

## 2. METODYKA BADAŃ

W celu przeprowadzenia badań nierównomierności napełniania cylindrów silnika wielocylindrowego w pierwszej kolejności dokonano analizy obecnego stanu wiedzy odnośnie pomiarów parametrów termodynamicznych silnika spalinowego i ich zależności od napełnienia cylindrów silnika. Analiza ta pozwoliła posłużyć się pomiarem temperatury spalin wydechowych poszczególnych cylindrów. Skutkiem nierównomiernego stopnia napełnienia cylindrów ilość czynnika roboczego w poszczególnych cylindrach, jest zróżnicowana. Założono równą dla wszystkich cylindrów sprawność termodynamiczną (niezależną od zmian współczynnika napełnienia w zakresie występujących różnic między badanymi cylindrami). W efekcie występującej ilościowej różnicy energii cieplnej wywiązanej ze spalania paliwa, zróżnicowaniu ulegają parametry termodynamiczne obiegu, jak np. temperatura spalin wydechowych.

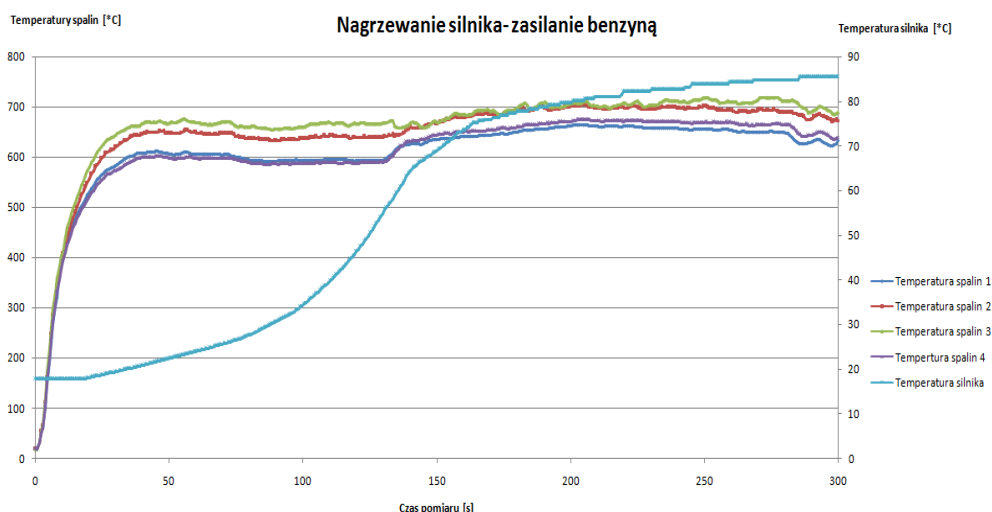
Do pomiaru temperatury spalin wydechowych wykorzystano cztery termopary typu TP-204K-1b-25-1,5-KMP10xl-SPEC, umieszczone w kolektorze wydechowym, w jednakowych odległościach od zaworów wydechowych. Odczyt wartości i zapis danych

wykonano dzięki kartom pomiarowym i komputerze czasu rzeczywistego Ni oraz oprogramowaniu LabVIEW. Następnie na podstawie zapisanych wyników pomiarów wyznaczono wartości średnie z rozkładu t-Studenta dla badanych warunków pomiarowych. Dodatkowo obliczono największe i najmniejsze różnice w temperaturach spalin poszczególnych cylindrów a także odchylenie wartości średniej cylindrów wewnętrznych i zewnętrznych. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie wykresów wartości bezwzględnych i względnych w funkcji zmiennych warunków badań (prędkość obrotowa i temperatura silnika).

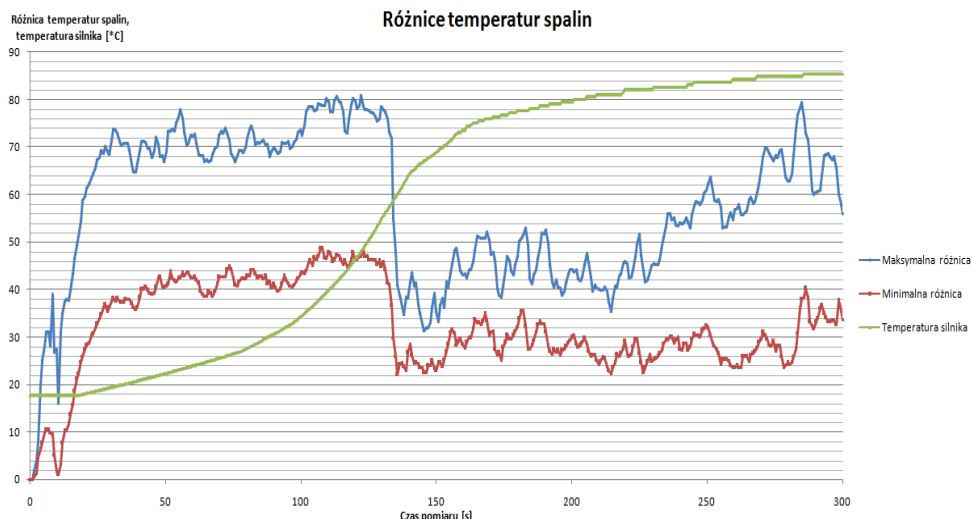
## 3. WYNIKI BADAŃ

W pierwszym etapie badań, przeprowadzono pomiar temperatury spalin poszczególnych cylindrów w zależności od temperatury silnika, mierzonej w kanale cieczy chłodzącej omywającej kolektor dolotowy. Pomiar trwał od uruchomienia zimnego silnika do jego nagrzania do znamionowej temperatury pracy, przy prędkości obrotowej biegu jałowego.

Widoczne na wykresach zmiany różnicy w temperaturach spalin wydechowych, zaobserwowane po 130 sekundzie od rozpoczęcia pomiarów, wynikają ze zmiany strategii sterowania dawką paliwa. W czasie po uruchomieniu silnika mieszanka jest bogata (współczynnik lambda w przedziale 0,78-0,8) a przepustnica bardziej otwarta. Po osiągnięciu zadanej temperatury, sterowanie dawką paliwa jest nadzorowane sprzężeniem zwrotnym z sondy

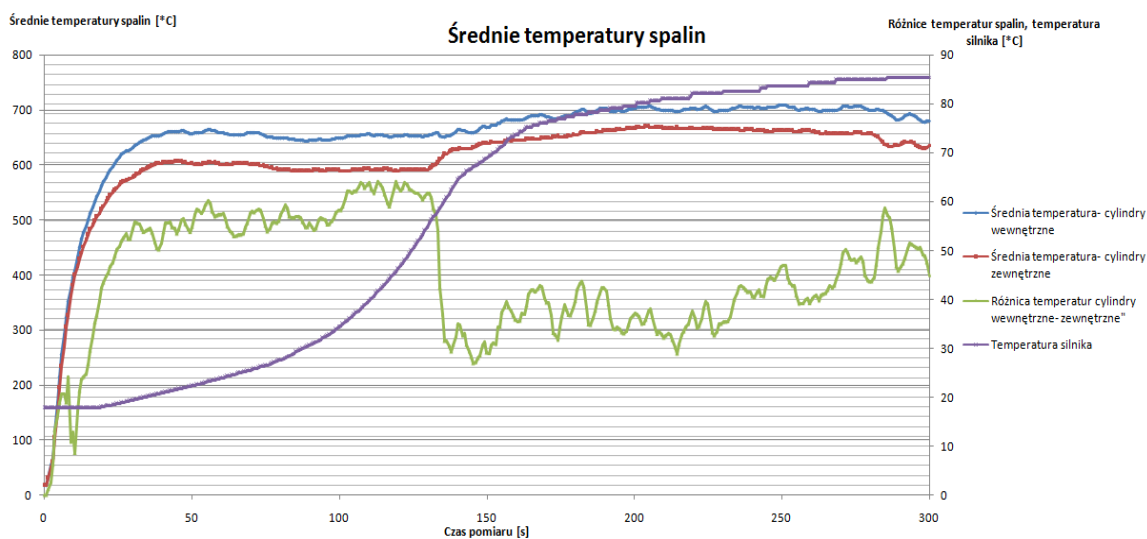


Rys. 2 Zmierzone temperatury spalin podczas nagrzewania silnika

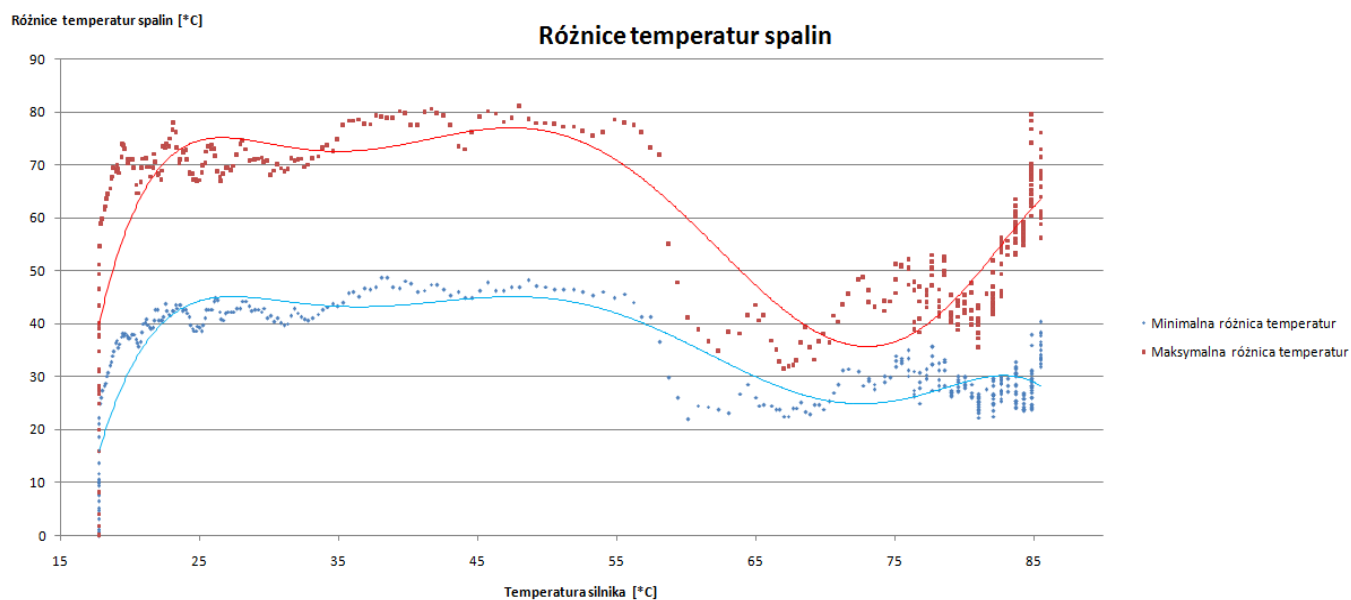


Rys. 3. Różnice temperatur spalin podczas nagrzewania silnika

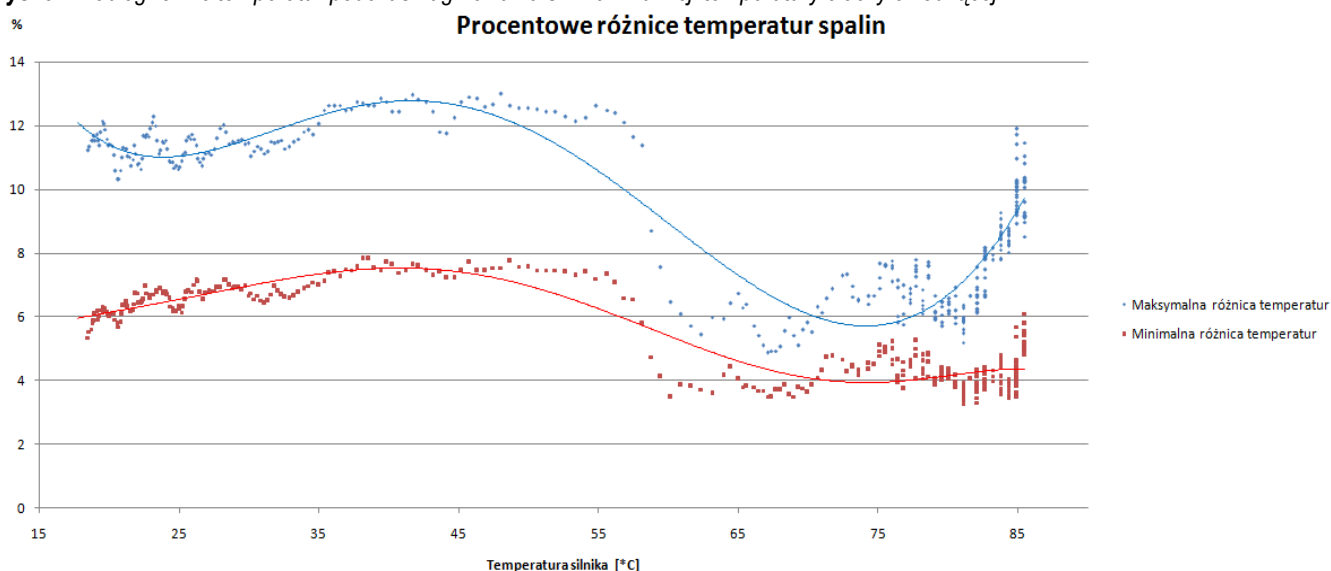
lambda a skład mieszanki paliwowo-powietrznej odpowiada stosunkowi stechiometrycznemu (współczynnik lambda ~1).



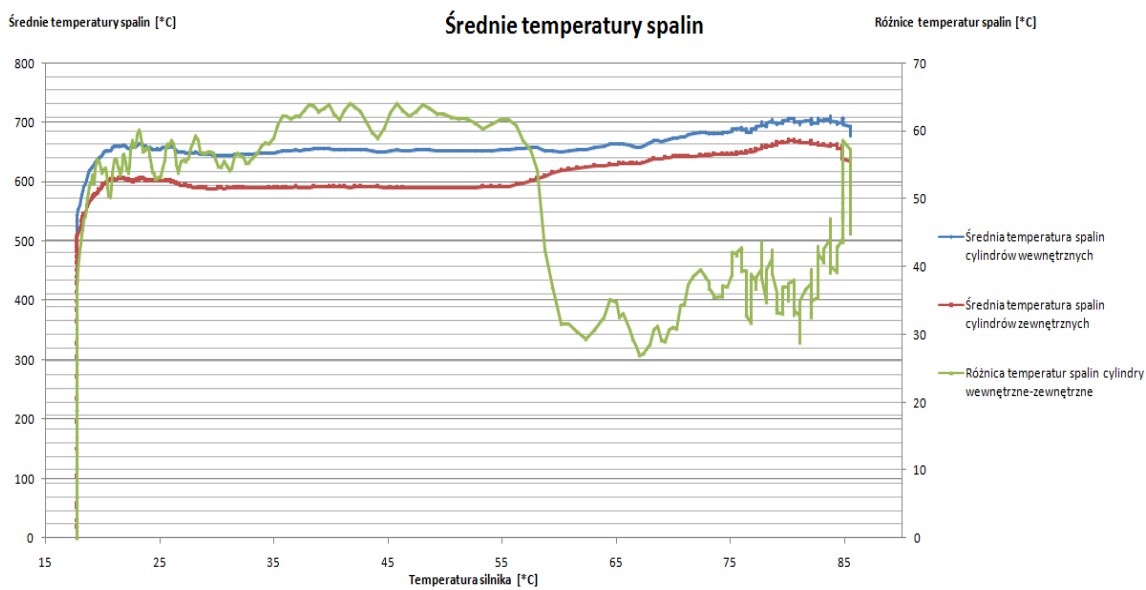
Rys. 4 Średnie temperatury spalin



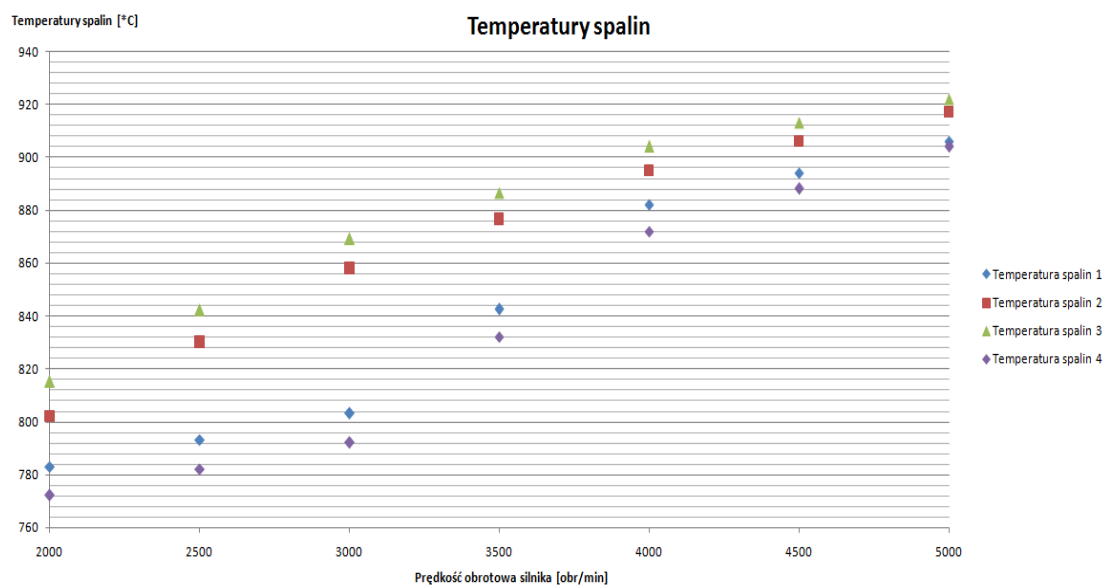
Rys. 5 Przebieg różnic temperatur podczas nagrzewania silnika w funkcji temperatury cieczy chłodzącej



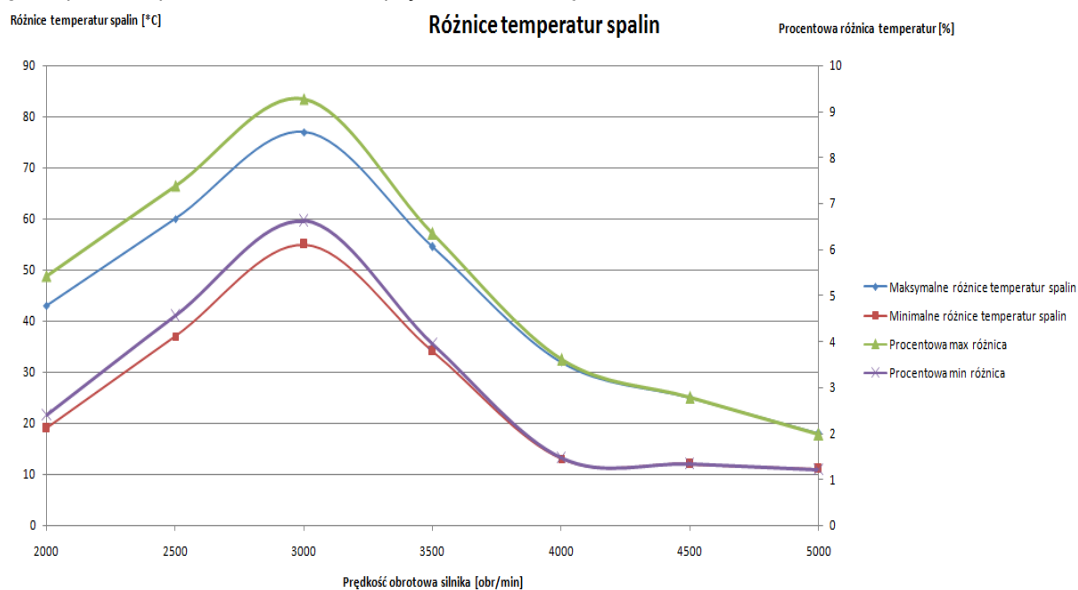
Rys. 6 Procentowe różnice temperatur spalin podczas nagrzewania silnika w funkcji temperatury cieczy chłodzącej



Rys. 7 Średnie temperatury w funkcji temperatury cieczy chłodzącej

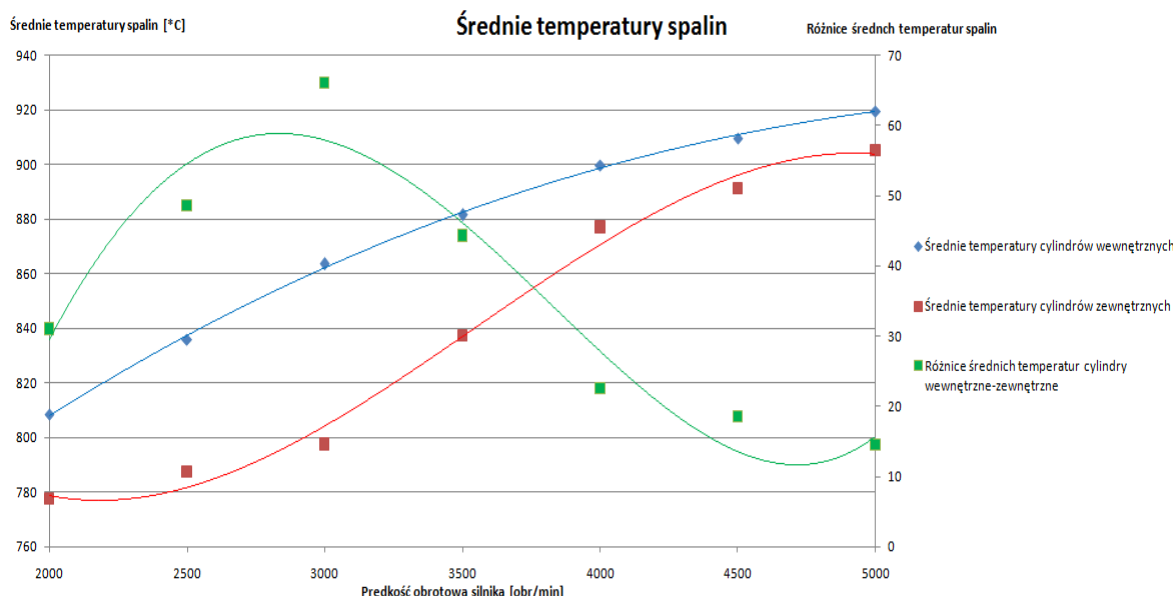


Rys. 8 Przebieg temperatur spalin w zależności od prędkości obrotowej



Rys. 9 Różnice w temperaturach spalin w zależności od prędkości obrotowej

turę ładunku świeżego ładunku, poprzez podgrzewanie kolektora



Rys. 10 Średnie wartości temperatur spalin w funkcji prędkości obrotowej silnika

Podsumowaniem przeprowadzonych pomiarów jest załączona poniżej tabela, w której przedstawiono wartości maksymalne różnic temperatur gazów spalinowych oraz warunki pracy silnika, przy których owe różnice wystąpiły.

Tab. 1. Wybrane wartości temperatur spalin

Pomiar	Wartość maksymalna	Argument funkcji	Opis argumentu
Rozgrzewanie- różnice bezwzględne	81 [°C]	42 [°C]	Temperatura silnika
Rozgrzewanie-różnice względne	13,00%	39-43 [°C]	Temperatura silnika
Rozgrzewanie- średnia	687 [°C]	81 [°C]	Temperatura silnika
Prędkość obrotowa- różnice bezwzględne	77 [°C]	3000 [obr/min]	Prędkość obrotowa
Prędkość obrotowa-różnice względne	9,00%	3000 [obr/min]	Prędkość obrotowa
Prędkość obrotowa- średnia	912 [°C]	5000 [obr/min]	Prędkość obrotowa

## WNIOSKI

Badania wykazały zgodny z przewidywaniami opartymi na analizach konstrukcji układu dolotowego znaczną nierównomierność napełnienia cylindrów. Wyraźnie efekty nierównomiernego napełnienia cylindrów są widoczne w fazie po uruchomieniu zimnego silnika (stosunkowo duże otwarcie przepustnicy zapewniające znaczny, w porównaniu z pozostałymi pomiarami, przepływ czynnika roboczego w układzie dolotowym) oraz w zakresie prędkości obrotowej maksymalnego rozwijanego przez silnik momentu obrotowego. Wpływ temperatury cieczy chłodzącej silnika na równomierność napełnienia można tłumaczyć jej zależnością na tempera-

dolotowego i kanałów w głowicy. Dodatkowo przy zachowaniu kryterium stałej prędkości obrotowej podczas pomiarów, dla silnika nienagrzanego konieczne jest większe otwarcie przepustnicy. W efekcie przepływ ładunku wzrasta a proporcjonalnie wraz z nim jego różnicowanie rozdziela.

Nierównomierność napełnienia występująca w obszarze prędkości obrotowych maksymalnego momentu (a tym samym i często wykorzystywany zakres prędkości obrotowej w użytkowaniu silnika napędowego pojazdu samochodowego) jest zjawiskiem szczególnie niekorzystnym. Na podstawie przeprowadzonych badań można stanowczo stwierdzić, że różnica w napełnianiu poszczególnych cylindrów, w przypadku układu zasilania z wtryskiem jednopunktowym i asymetrycznym kolektorem dolotowym, jest zauważalna i ma bezpośredni wpływ na przebieg procesu spalania, co za tym idzie na pracę indykowaną w poszczególnych cylindrach i moc użyteczną całego silnika. Największa zmierzona różnica temperatur spalin wydechowych wynosi 13% i dotyczy ona fazy rozgrzewania silnika. Dla silnika nagrzanego maksymalne rozbieżności temperatur spalin wynoszą 9% w obszarze prędkości obrotowych rozwijanego przez silnik maksymalnego momentu obrotowego.

## BIBLIOGRAFIA

1. Kordziński Cz., Środulski T. Układy dolotowe silników spalinowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1968.
2. Kowalewicz A. Tworzenie Mieszanki i Spalanie w Silnikach o ZI, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1984
3. Rawski F. Przepływ i rozdział czynnika roboczego w układzie dolotowym wielocylindrowego silnika spalinowego, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1984
4. Rawski F., Szpica D. Równomierność pracy silnika spalinowego jako ważny czynnik w odniesieniu do ekologii i ekonomii,
5. Rychter T., Teodorczyk A., Teoria silników spalinowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006

## **THE NON-UNIFORMITY OF SI ENGINE CYLINDER CHARGE**

### ***Abstract***

*The article is the first of a planned series of studies related to the non-uniform filling of fresh charge. In multi-cylinder engine distribution working medium depends largely on gas-dynamic phenomena occurring in the intake. The engines powered by a blend of a homogeneous, centrally produced, the uneven distribution of fresh charge adds to the diversity of the work of indicated in each cylinder. It does not however the specific differences between the excess air ratio in the cylinders. The paper has an analysis of comparative measurements of inequality filling cylinder SI engine. As a comparative criterion chosen to measure the temperature of exhaust fumes. The study was conducted according to the selected engine operating variables: the speed of rotation and temperature of the coolant.*

Autorzy:

Mgr inż. **Tomasz Koszyła** – Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Stanisława Pigońa w Krośnie, Zakład Mechaniki i Budowy Maszyn.