

Alois HIRSCH
Paul KAPUS
Harald PHILIPP
Ernst WINKLHOFER

PTNSS-2010-SS4-403

Irregular ignition events in TC GDI engines: phenomenology, analysis and engine development

Gasoline engine development has to respond to requirements for fuel efficient and clean combustion. In meeting such targets, the automotive industry has responded with the introduction and continuous improvement of turbocharged gasoline direct injection (TC GDI) combustion systems. Specific challenges to such engines include irregular ignition and combustion events which are rarely met in conventional engines. The paper describes ignition phenomena and mechanisms relevant for the development of such TC GDI engines. Focus then is given to combustion measurement techniques applied for the identification of these spontaneous and riskfull combustion events. As analysis of such ignition events must be done in real, high load multicylinder engine operation, suitable sensors together with measurement and analysis procedures are described. The paper concludes with analysis examples derived from various engine testing situations.

Key words: ignition, knock, mega-knock, hot spots, deposits, combustion measurement

Nieregularny zapłon w silnikach turbodoładowanych z bezpośrednim wtryskiem benzyny: opis zjawiska, analiza i przeciwdziałanie

Rozwój silników benzynowych musi podążać za zmieniającymi się wymaganiami dotyczącymi efektywności i czystości spalania. Aby sprostać tym wymaganiom przemysł samochodowy wprowadza ciągle zmiany i ulepszenia procesów spalania w silnikach benzynowych z wtryskiem bezpośrednim i z turbodoładowaniem. Szczególnym wyzwaniem w konstruowaniu tych silników są zjawiska nieregularnego zapłonu i spalania stukowego rzadko występujące w silnikach konwencjonalnych. Ten artykuł opisuje zjawiska towarzyszące zapłonowi oraz inne mechanizmy istotne z punktu widzenia rozwoju tych silników. Dużo uwagi poświęcono technikom pomiaru spalania stosowanym do opisu przypadków niebezpiecznych ze względu na ryzyko niekontrolowanego spalania stukowego. Analiza takich przypadków nieprawidłowego zapłonu musi być dokonana podczas rzeczywistej pracy wielocylindrowego silnika przy dużych obciążeniach. W artykule opisano odpowiednie do tego celu czujniki wraz z metodami pomiaru i analizy danych. W części końcowej artykułu przedstawiono analizę przykładów zaczerpniętych z różnych badań silnikowych.

Słowa kluczowe: zapłon, spalanie stukowe, spalanie detonacyjne, punkty krytycznej temperatury, reszta spalin, pomiary spalania

1. Introduction

Downsizing, downspeeding, turbocharging and direct injection are ever more important technologies and development directions for SI engines with fuel efficient and clean combustion features and attractive torque and power characteristics [1]. Design trends aim at small displacement engines operating under high boost pressure at BMEP levels which are two or even three times above NA engine's. As such power density rise is attractive for handling the vehicle, the simultaneous rise in heat production calls for adequate measures to handle all heat related issues. Irregular ignition with subsequent "mega-knock" pressure oscillations and noise or even engine damage events is a particular topic which needs specific attention in combustion system development.

In order to understand and prevent mechanisms leading up to irregular self ignition, the paper describes some basics relevant to ignition and flame propagation in SI engines. Potential self ignition mechanisms are described together with consequent measures to reduce individual risks for such events to appear. This sets the task to select and apply measurement techniques in engine combustion analysis in

1. Wprowadzenie

Metody stosowane w celu zmniejszenia objętości skokowej i maksymalnych prędkości obrotowych, a także technologie doładowania i wtrysku bezpośredniego, wytyczają główne kierunki rozwoju silników o zapłonie iskrowym z uwzględnieniem małego zużycia paliwa oraz czystego spalania przy optymalnym momencie obrotowym i mocy użytecznej [1]. W rozwoju konstrukcji silników dąży się do uzyskania małej pojemności skokowej przy dużym ciśnieniu doładowania na takim poziomie średniego ciśnienia użytecznego, który dwu- do trzykrotnie przewyższa silniki nie doładowane. Chociaż wzrost mocy użytecznej silnika jest atrakcyjny z punktu widzenia kierowania pojazdem, to jednoczesny wzrost temperatury wymaga zastosowania odpowiednich środków do rozwiązania problemów związanych z wywiązywaniem się ciepła. Przypadki nieregularnego zapłonu, po którym ciśnienie wzrasta do poziomu jakie pojawia się podczas spalania stukowego, hałas albo nawet przypadki uszkodzenia silnika są konkretnymi problemami wymagającymi szczególnej uwagi w rozwoju systemu spalania.

order to identify adequate measures for practical engine development.

2. Irregular combustion – the risks for engine operation

Irregular combustion is a terminology to describe combustion events in SI engines as a result of self ignition of in-cylinder charge, whereas regular combustion is the consumption of the charge via turbulent flame propagation following ignition controlled by the spark discharge. The schematic in Fig. 1 adopted from Heywood [2] is well suited to classify ignition and combustion phenomena related to regular and irregular ignition and combustion events.

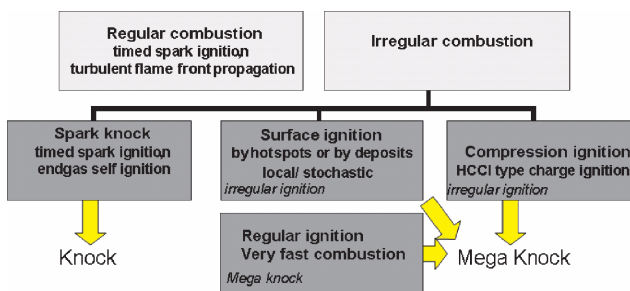


Fig. 1. Regular and Irregular combustion with knock and mega knock. Schematic as per Heywood [2]

Rys. 1. Zjawiska zapłonu i spalania w aspekcie ich regularności i nieregularności, wg Heywooda [2]

Irregular combustion has become an important topic, as engines with direct injection, turbocharging and high torque at low speed operation are especially suffering from uncontrolled ignition at high load conditions. The pressure traces in fig. 2 give a comparison of such irregular ignition and mega knock combustion as opposed to the low amplitude “ringing” under regular ignition and borderline knock operation.

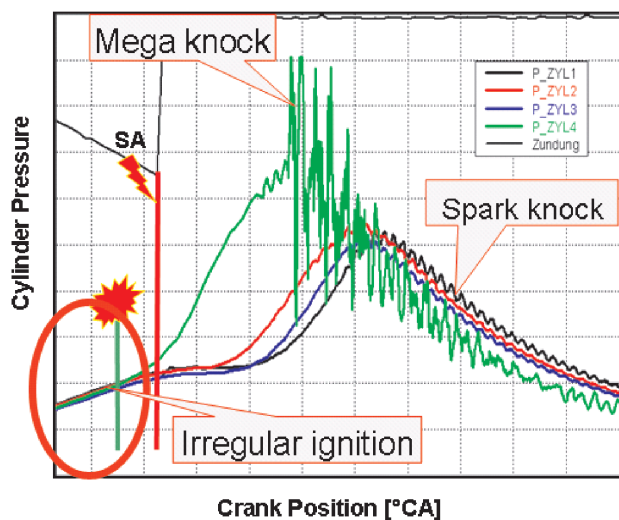


Fig. 2. 4-cylinder engine at knock limit with irregular ignition and mega knock in cylinder 4

Rys. 2. Silnik 4-cylindrowy z nieregularnym zapłonem i spalaniem detonacyjnym w 4 cylindrze

Aby zrozumieć i zapobiegać mechanizmom prowadzącym do nieregularnego samozapłonu, w artykule opisano najistotniejsze aspekty procesu zapłonu i rozchodzenia się płomienia w silnikach o zapłonie iskrowym. Potencjalne mechanizmy samozapłonu opisano wraz z metodami, jakie w konsekwencji są stosowane w celu zmniejszenia ryzyka pojawienia się tych anomalii. Wywołuje to potrzebę wybrania i zastosowania technik pomiarów do analizy spalania w celu określenia właściwych pomiarów w aspekcie praktycznego rozwoju silników spalinowych.

2. Nieregularne spalanie – zagrożenia dla pracy silnika

Zjawisko nieregularnego spalania obejmuje przypadki spalania na skutek samozapłonu dawki paliwa w cylindrach silników o zapłonie iskrowym, natomiast spalanie regularne jest spalaniem dawki paliwa w wyniku turbulentnego rozchodzenia się płomienia na skutek zapłonu wywołanego wyładowaniem iskrowym. Diagram na rys. 1 zapożyczony z pracy Heywooda [2] doskonale klasyfikuje zjawiska zapłonu i spalania w aspekcie ich regularności i nieregularności.

Nieregularne spalanie stało się ważnym zagadnieniem, gdyż silniki z wtryskiem bezpośrednim, turbodoładowaniem i dużym momentem obrotowym przy małych prędkościach obrotowych szczególnie są narażone na niekontrolowany samozapłon w warunkach dużych obciążeń silnika. Przebieg ciśnienia na rys. 2 przedstawia nieregularny zapłon, spalanie stukowe i spalanie detonacyjne w porównaniu do małej amplitudy ‘dzwonienia’ przy regularnym zapłonie i pracy silnika na granicy spalania stukowego.

Rezultatem dużych amplitud ciśnienia spalania jest zauważalny hałas. Pojedynczy skok ciśnienia może także przyczynić się do mechanicznego uszkodzenia tłoka. W sytuacji pojawienia się sekwencji wielu cykli spalania stukowego i następującego po nim spalania detonacyjnego, poszczególne części silnika mogą doznać cieplno-mechanicznych uszkodzeń. Przykłady pokazano na rys. 3.

Uniknięcie tak niekorzystnych zjawisk spalania polega przede wszystkim na unikaniu warunków, w jakich pojawia się nieregularne spalanie. Aby sprostać temu zadaniu, w artykule przedstawiono mechanizmy zapłonu i procedury diagnostyczne stosowane podczas pracy silnika w normalnych i wysokich obciążeniach.

3. Nieregularne spalanie – mechanizmy zapłonu

Zapłon zachodzi dzięki dostarczeniu odpowiedniej energii aktywacji do reagentów i utrzymaniu w równowadze reakcji egzotermicznych i strat ciepła, co w prosty i praktyczny sposób opisali Arrhenius and Livengood – Wu [2], a przedstawiono na rys. 4.

Mechanizmy zapłonu:

- Punkty o temperaturze krytycznej: energia aktywacji jest dostarczona do gazu przez strumień ciepła pochodzący z gorącej powierzchni. Gaz zapala się w sytuacji odpowiedniej podaży ciepła i wystarczającego czasu do wzbudzenia samopodtrzymującej się reakcji. Potencjalnym źródłem ciepła są świece zapłonowe, zawory wylotowe i części powierzchni tłoka. Małe prędkości obrotowe silnika

The result of such high combustion pressure amplitudes is a remarkable noise event. Singular, high pressure peaks can also give rise to mechanical piston destruction. In case of multicycle knock and mega knock sequences, components can even suffer from thermomechanical destruction. Examples are given in Fig. 3.

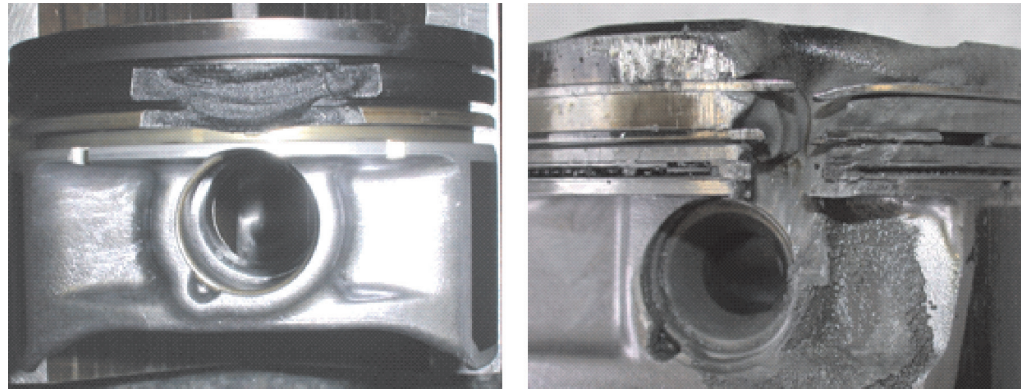


Fig. 3. Mechanical and thermal piston damage at irregular combustion

Rys. 3. Mechaniczne i ciepłe uszkodzenia tłoka przy nieregularnym spalaniu

Avoiding such risk-full combustion events

is first of all a matter of avoiding irregular ignition conditions. In order to address this task, ignition mechanisms and diagnostic procedures applicable to engine operation under normal and high load operation are discussed.

3. Irregular combustion – ignition mechanisms

Ignition is accomplished by providing activation energy to the reactants and by maintaining an environment balancing exothermal reactions against heat losses. This is in a simple, yet practical way described by the Arrhenius and Livengood – Wu relations [2] given Fig. 4.

Ignition mechanisms:

- Hot spots: Activation energy is provided by heat flux from a hot surface into the gas. The gas will ignite in case of sufficient heat input and sufficient time to establish a self sustaining reaction. Potential heat sources are the spark plug, exhaust valves and piston surface parts. Low engine speed raises the risk of self ignition occurring before the regular flame can consume the overheated reactants.
- Knock: gas dynamics under knocking conditions enhances heat flux from burned gas into combustion chamber surfaces. Subsequent knocking cycles, hence, create hot spots. Knocking combustion transits into mega knock combustion events.
- Residual gas, compression and low engine speed: at high load, such combination raises the risk for HCCI type self ignition.
- Oil vapor ignition: lube oil vapor acts as ignition source.
- Deposits chemistry: thermochemical ignition source.
- Flaking deposits: glowing deposits survive exhaust stroke and ignite fresh charge.

As root causes for irregular ignition are as diverse as hot spots or flaking deposits, measures to reduce irregular combustion first of all need identification of the actual mechanism dominant in any specific operating mode.

4. Identify irregular ignition mechanisms

In engine testing, mega knock events are either a response to specific operating conditions, such as driving the engine into overload, or it appears spontaneously and again disappears without apparent reasons as to what might have provoked such stochastic events. Peak cylinder pressure sequences for both cases are shown in Fig. 5.

zwiększając ryzyko pojawienia się samozapłonu zanim regularny płomień zużyje przegrzane reagenty.

- Spalanie stukowe: dynamika gazu w warunkach spalania stukowego intensyfikuje przepływ strumienia ciepła ze spalonego gazu na powierzchnię komory spalania. Następujące cykle spalania stukowego wywołują tym samym punkty krytycznej temperatury, w wyniku czego spalanie stukowe przekształca się w spalanie łańcuchowe detonacyjne.
- Reszkowe gazy, sprężanie i małe prędkości obrotowe silnika: przy dużych obciążeniach kombinacja tych czynników podwyższa ryzyko samozapłonu typu HCCI.
- Zapłon oparów olejów: opary oleju smarującego działają jak źródła zapłonu.
- Właściwości chemiczne produktów niepełnego spalania paliwa: ciepło-chemiczne źródło zapłonu.
- Obecność produktów niepełnego spalania paliwa: nadal żarzące się po fazie wydechu pozostałości spalania doprowadzają do zapłonu nowej dawki paliwa.

Z uwagi na to, iż przyczyny nieregularnego spalania mogą być tak odmienne jak punkty krytycznej temperatury czy obecność produktów niepełnego spalania paliwa, metody zapobiegania nieregularnemu spalaniu sprowadzają się przede wszystkim do zdeterminowania dominującego mechanizmu w danych warunkach pracy silnika.

$$\tau = A * p^{-n} * e^{\frac{B}{T}}$$

$$\int_{t_{IVC}}^{t_{IVC}+t_{SOC}} \frac{1}{\tau(s)} ds = 1$$

Parameters of influence on igniting a mixture:
 A, B, n: chemical features
 p, T: engine operation: boost, load
 t_{SOC} : time to establish thermochemical chain reaction
 t_{IVC} : intake valve closure time
 τ : ignition delay time

Fig. 4. Ignition delay and “activation” integral describe mechanisms leading up to self ignition

Rys. 4. Opóźnienie zapłonu i całka ‘aktywacyjna’ opisują mechanizmy prowadzące do samozapłonu

4. Identyfikowanie mechanizmów nieregularnego zapłonu

W badaniach silnikowych przypadki spalania detonacyjnego są albo konsekwencją specyficznych warunków pracy

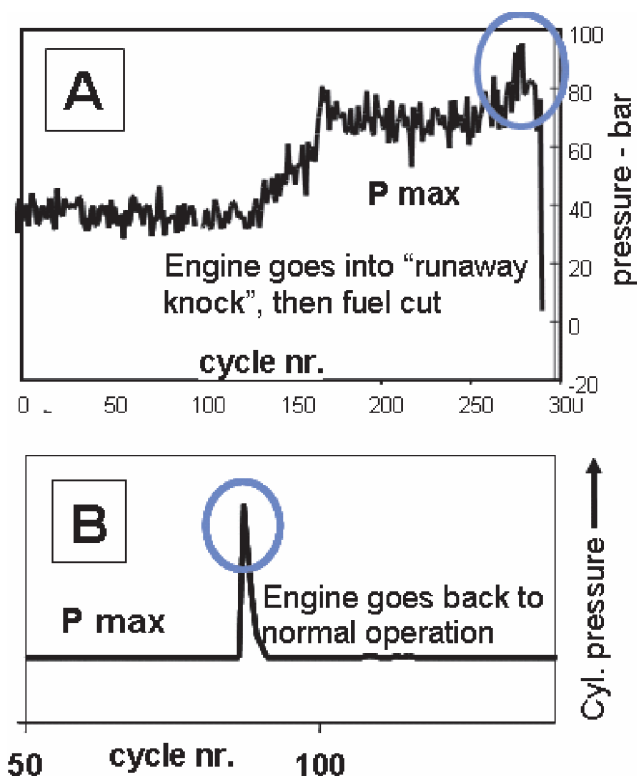


Fig. 5. Mega knock event sequences: A) as a result of engine overload operation, B) in a spontaneous, stochastic event

Rys. 5. Kolejność faz spalania detonacyjnego: A) w wyniku przeciążeń podczas pracy silnika, B) w wyniku spontanicznego i przypadkowego zjawiska

Analysis of such events includes the recording of cycle sequences leading up to mega knock. On top of this, it needs identification of in-cylinder areas where self ignition occurs. With statistics about the mode of occurrence and location of self ignition areas for a significant number of such events, the cycle sequence and ignition spot analysis then yields the basis for engine variants testing.

Such analysis tasks define quite challenging measurement procedures:

- Signal recorders must continuously monitor relevant combustion signals.
- Occurrence of a mega knock event must be identified in real time to yield a “trigger on event” signal.
- With this trigger on event, data recorders must store combustion signals into memory.
- And they must do so for a number of cycles before as well as after any mega knock event.

5. Signal recording for mega knock analysis

Any identification of an irregular combustion or mega knock event is based on a cylinder pressure signal. With real time analysis codes, the pressure signal provides an event trigger to control recording procedures for the cycles of interest.

Identification of self ignition locations is accomplished with multichannel fiber optic sensors. Such sensors enable continuous recording of in-cylinder brightness signals for any

silnika, takich jak doprowadzenie silnika do przeciążeń, albo pojawiają się spontanicznie i zanikają bez wyraźnej przyczyny wskazującej na to, co mogłoby wzbudzić takie przypadkowe działanie silnika. Sekwencje maksymalnego ciśnienia w cylindrze przedstawiono dla obu przypadków na rys. 5.

Analiza tych przypadków wymaga zarejestrowania sekwencji cykli prowadzących do spalania detonacyjnego, a następnie określenia obszarów wewnątrz cylindra, w których pojawia się samozapłon. Z wykorzystaniem statystyk charakteryzujących obszary samozapłonu dla znacznej liczby takich przypadków, analiza przebiegu cyklu i miejsca zapłonu stanowi podstawę zróżnicowanych testów silnikowych.

Celem takiej analizy jest zdefiniowanie metod pomiarów:

- rejestratory dźwięku muszą nieustannie monitorować istotne dźwięki spalania,
- pojawienie się spalania detonacyjnego musi zostać zarejestrowane w czasie rzeczywistym, aby móc określić dźwięk towarzyszący samozapłonowi,
- rejestratory muszą przechowywać dźwięki spalania w pamięci,
- muszą to robić dla wielu cykli zarówno przed, jak i po pojawieniu się spalania detonacyjnego.

5. Rejestrowanie dźwięków na potrzeby analizy spalania detonacyjnego

Każda próba identyfikacji przypadków nieregularnego spalania lub spalania detonacyjnego oparta jest na dźwięku sygnalizującym ciśnienie w cylindrze. Dzięki analizie w czasie rzeczywistym, dźwięk informujący o zmianie ciśnienia dostarcza wiedzy na temat przyczyny wywołującej samozapłon w celu kontroli metod rejestrowania wybranych cykli.

Zlokalizowanie samozapłonu umożliwia wielokanałowy czujnik optyczny z włókna szklanego. Pozwala

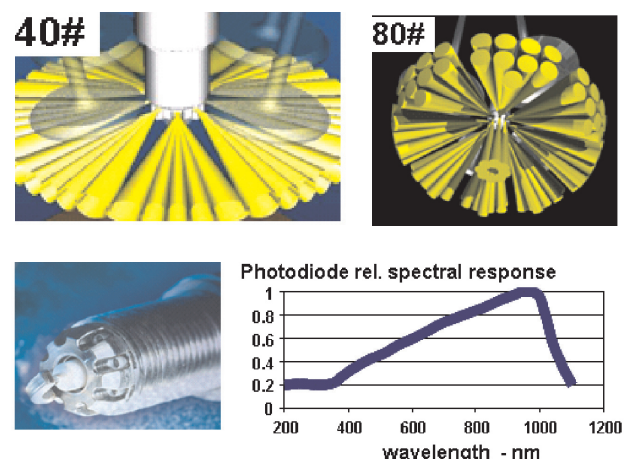


Fig. 6. Fiber optic spark plug sensors with up to 80 sensor channels. Schematics show aperture fields. Spectral sensitivity is given by photodiode selection

Rys. 6. Czujniki optyczne świec zapłonowych z włókna złożone z 80 kanałów; rysunek przedstawia przekrój otworu; wrażliwość spektralną zapewnia wybór fotodiod

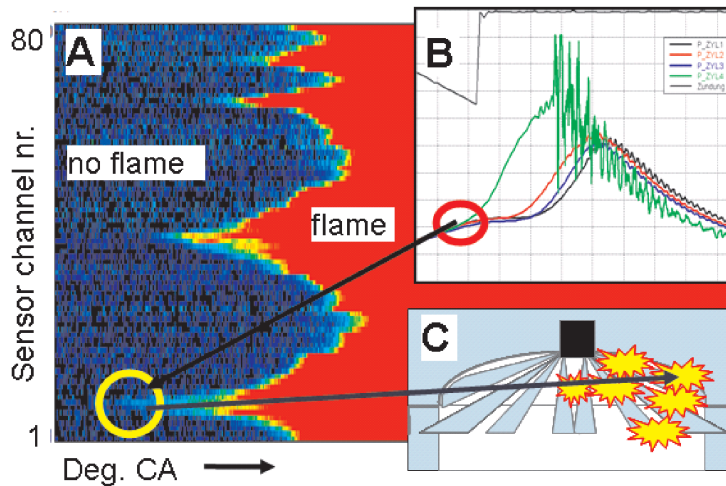


Fig. 7. A) Flame traces recorded with an 80# sensor at irregular ignition B). Ignition spots C) evaluated from repeated self ignition events

Rys. 7. A) Ślady płomienia zarejestrowane przy użyciu układu z 80 kanałami, B) miejsca zapłonu, C) miejsca określone na podstawie przypadków powtarzającego się samozapłonu

radiation of suitable wavelength present within the aperture of each fiber optic channel. Spark plug sensor arrangements with 40 or even 80 sensor channels are used for such tasks. Fig. 6 gives a schematic of such sensors together with a spectral sensitivity graph of photodiodes used to record the flame radiation.

Locating an ignition spot with such sensor configurations is accomplished with signals shown in Fig. 7. The sensor channels provide direct angular resolution and the sensor layers in the 80 channel arrangement distinguish ignition on the cylinder head surface from ignition on the piston surface. Radial position of an ignition event is based on flame propagation time evaluation. This allows a resolution along a radial line of sight of about 1/4 radius.

A combustion measurement system capable of handling such tasks in an industrial test bed environment is shown in Fig. 8.

6. The cycle sequence of irregular ignition events

One defining feature for mega knock events is the mode of its appearance. Operating an engine at high load and then further incrementing the load can drive it into a self ignition mode as already noticed in Fig. 5. Such reproducible operating conditions for mega knock are opposed to sporadic events which at first sight appear without any regularity or the chance to reproduce them.

The cycle sequence of Fig. 5 is again shown in the diagram of Fig. 9, now with an additional trace showing the thermal radiation signal recorded with the optical channels

on na ciągły zapis zmian natężenia światła wewnątrz cylindra dla każdego promieniowania o określonej długości fali transmitowanej przez włókna kanału optycznego. Do tych zadań stosowane są układy czujników świec zapłonowych złożone z 40 lub nawet 80 takich kanałów odbierających sygnały. Rys. 6 schematycznie przedstawia czujniki wraz z wykresem wrażliwości spektralnej fotodiod użytych do rejestrowania promieniowania płomienia.

Proces lokalizowania zapłonu przy pomocy sygnałów odbieranych przez układ czujników przedstawiono na rys. 7. Kanały czujników dostarczają bezpośrednią rozdzielczość kątową, natomiast warstwy czujników w układzie 80-kanałowym odróżniają zapłon na powierzchni głowicy cylindra od zapłonu na powierzchni tłoka. Rozkład promieniowy zjawiska zapłonu jest oparty na ocenie czasu rozchodzenia się płomienia, co umożliwia przyjętą rozdzielczość obserwacji wzdłuż 1/4 zasięgu promienia.

System pomiarów spalania wykorzystywanych do podobnych badań silnikowych o charakterze przemysłowym pokazano na rys. 8.

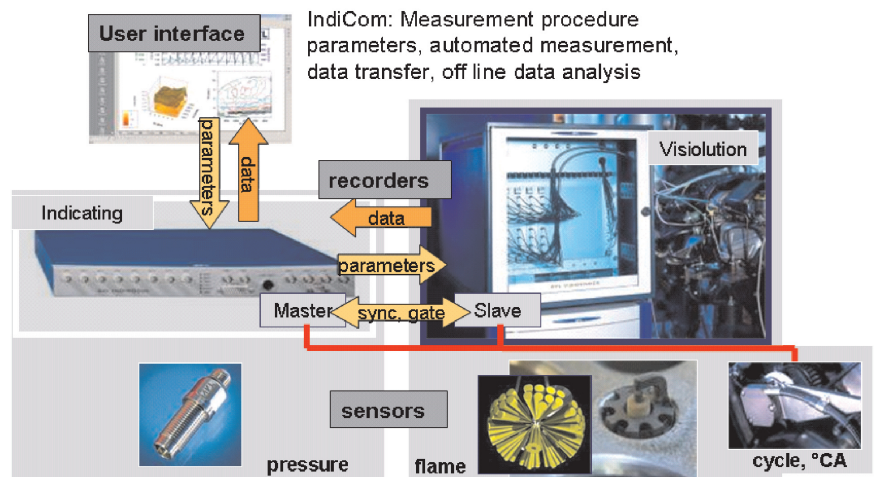


Fig. 8. The multichannel pressure – flame measurement system to enable recording and analysis of irregular ignition events

Rys. 8. Układ wielokanałowy do mierzenia ciśnienia i zasięgu płomienia umożliwia rejestrowanie i analizę przypadków nieregularnego zapłonu

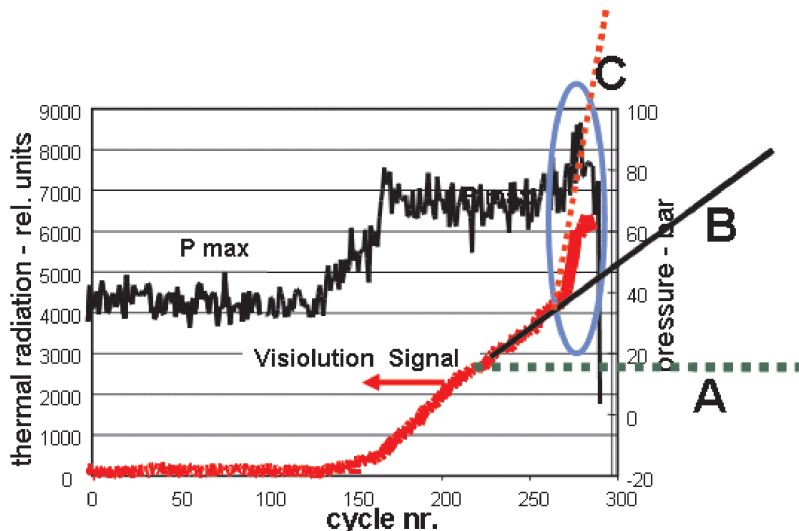
6. Sekwencja cyklu z nieregularnym zapłonem

Jedną z cech definiujących spalanie detonacyjne jest sposób jego powstania. Praca silnika przy dużych obciążeniach i dalsze zwiększanie tego obciążenia może prowadzić do pojawienia się samozapłonu, co zostało już pokazane na rys. 5. Powtarzanie się takich warunków pracy silnika podczas spalania detonacyjnego przeciwstawiono sporadycznym przypadkom samozapłonu, które w pierwszej chwili zdają się nie mieć żadnej regularności ani powtarzalności.

Sekwencja cyklu przedstawionego na rys. 5 jest ponownie przedstawiona na rys. 9 z dodatkowym zapisem poka-

of a Visiolution spark plug sensor. As the engine is operated at medium load, the thermal radiation signal (recorded for a crank angle window around gas exchange TDC) is negligibly small. With rising engine load, thermal radiation increases. In case of a thermally well balanced combustion chamber,

zującym promieniowanie ciepła zarejestrowane za pomocą kanałów optycznych czujników świec zapłonowych Visiolution. Podczas pracy silnika przy średnich obciążeniach sygnał promieniowania termicznego (zarejestrowanego dla kąta obrotu wału korbowego w pobliżu GMP w czasie wymiany ładunku) jest pomijalnie mały. Wraz z rosnącym obciążeniem silnika wzrasta promieniowanie ciepła. W przypadku zrównoważonej termicznie komory spalania sygnał odbierany z czujników osiągnie stały poziom (A). Jednakże wzrost odbieranego sygnału (B) oznacza pojawienie się spalania stukowego, w którym rozbieg silnika charakteryzuje się wzrostem amplitudy wartości maksymalnych ciśnienia do czasu pojawienia się sygnału odciążenia wtrysku paliwa podczas testu. Narastające spalanie stukowe jest zjawiskiem samopodtrzymującym wraz ze wzrostem ciepła docierającego do komory spalania (C), które pierwotnie stanowiło przyczynę nieregularności spalania.



*) Visiolution Signal: thermal background radiation

Fig. 9. Thermal overload is driving the combustion chamber into a “runaway” knock mode. A: thermal signal should settle at a constant level, yet it rises along B until irregular combustion puts it into the thermal runaway mode C

Rys. 9. Przeciżenia cieplne komory spalania powoduje powstanie spalania stukowego takiego, jak przy rozbiegu silnika; A – sygnały cieplne powinny wyrównać się na stałym poziomie jednak rosną one zgodnie z B aż do czasu, gdy nieregularne spalanie przekształca sygnały cieplne w tryb C cieplnego rozbiegu silnika

the signal would approach a constant level (A). However, as it continues to rise (B), the engine responds with knock and transits into “runaway” knock with ever rising peak pressure amplitudes until a test bed control signal stops fuel injection. This runaway knock mode is self-promoting as it raises heat input into the combustion chamber (C) which initially was the root cause for such irregular combustion behavior.

In the spontaneous singular mega knock event of Fig. 5, the combustion chamber has correct thermal status as it enters the irregular combustion phase. However, as is shown in Fig. 10, it responds to the thermal input generated by the mega knock event, until after some 10 cycles, it settles back to its original low level.

Both cycle sequence examples raise questions about root causes for such irregular behavior, in particular:

Oba przykłady sekwencji cyklu wywołują pytania dotyczące przyczyn tych nieregularności, w szczególności:

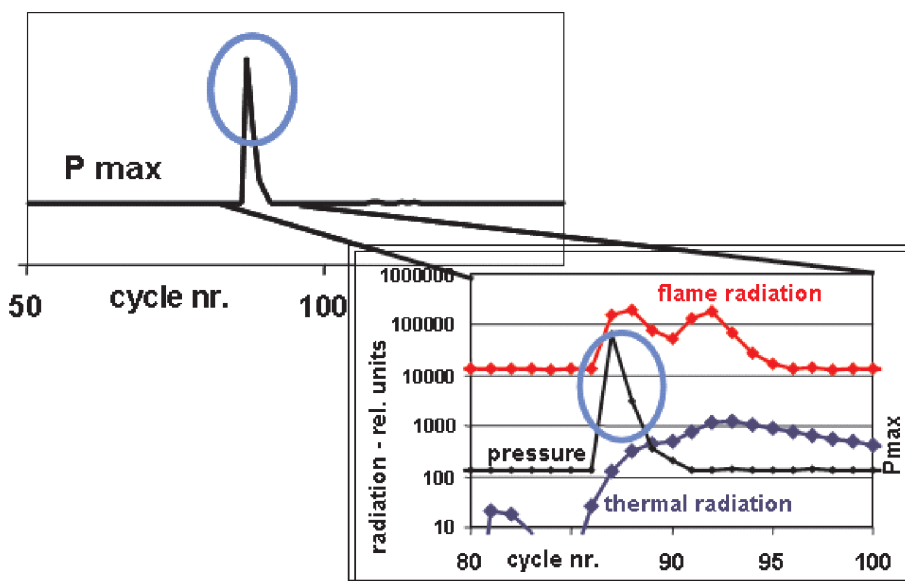


Fig. 10. Cycle sequence with a spontaneous mega knock event. Thermal radiation signal shows that overheating can be excluded as primary cause

Rys. 10. Sekwencja cyklu wraz z przypadkiem samorzutnego spalania detonacyjnego; sygnał promieniowania cieplnego pokazuje, że przegrzanie nie stanowi pierwotnej przyczyny tego zjawiska

- where does ignition start,
- how reproducible are ignition locations and,
- how to further use such local and cycle sequence analysis results.

7. Irregular ignition location statistics

Exploiting the local information content of multichannel Visiolution spark plug sensors provides information on the origin of irregular ignition. The 40-channel sensor data of Fig. 11 yield direct angular resolution and allow some limited estimate on radial appearance of the flame kernel, based on flame transit time evaluation. The example of Fig. 11 A is typical of a situation with irregular ignition introduced at thermal overload operation. Repetition of such overload initiates irregular ignition and provides a data base for ignition location statistics. The polar plot in Fig. 11 A then shows appearance of all ignition events inside a narrow angular regime with the conclusion of one exhaust valve acting as hot spot ignition source.

Self ignition events for the engine in Fig. 11 B appear as stochastic events as already discussed in the cycle sequence analysis of Fig. 10. Ignition locations are random. Prior to ignition, luminous traces are frequently found. They appear to act as ignition kernels. This appearance of luminous traces prior to self ignition, as well as the randomness of the events, suggest deposits to be the primary cause for this type of irregular ignition.

8. Engine development

Phenomenology and analysis examples as shown above provide guidance for engine development measures. With identification of local hot spot ignition, it is conclusive to focus on components selection with improved heat transfer features or on enhanced local cooling. On the other hand, understanding deposits to be responsible for mega knock events, requires fuel injection and lubrication to be improved for reducing the deposits risks. Consequently, any root cause as listed in table 1 requires specific measures to reduce the risk for self ignition and irregular combustion. The primary purpose of applying above described analysis techniques is identification of root causes in order to test appropriately selected engineering actions.

Summary

Testing of TC GDI engines for the risks of irregular ignition and subsequent mega knock combustion events is

- kiedy rozpoczyna się zapłon,
- na ile powtarzalne są miejsca zapłonu,
- jak można dalej wykorzystywać wyniki analizy sekwencji cyklu w danym miejscu.

7. Lokalizacja nieregularnego zapłonu w ujęciu statystycznym

Wykorzystanie danych z czujników wielokanałowych świec zapłonowych Visiolution dostarcza informacji na

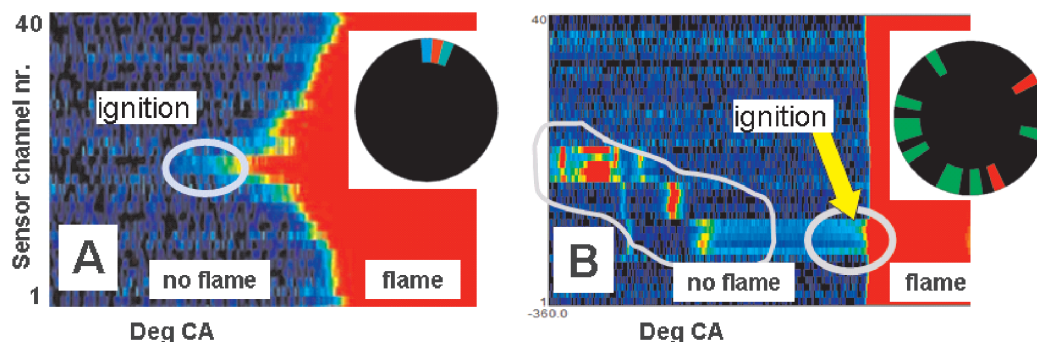


Fig. 11. Ignition location evaluation with 40 channel sensor, angular resolution only. Single cycle flame traces and polar plots for event statistics. A: hot spot ignition at one exhaust valve. B: free moving glowing deposits settle into stochastic ignition spots

Rys. 11. Ocena miejsc zapłonu za pomocą czujnika z 40 kanałami na podstawie rozdzielczości kątowej; ślady płomienia w pojedynczym cyklu przedstawione w ujęciu statystycznym: A – zapłon w punktach temperatury krytycznej przy otworze wylotowym; B – wolno przemieszczające się żarzące produkty niepełnego spalania paliwa w losowych punktach zapłonu

temat początku nieregularnego zapłonu. Dane z 40-kanałowego czujnika pokazanego na rys. 11 pozwalają określić bezpośrednio rozdzielczość kątową i do pewnego stopnia ocenić promieniście rozchodzący się jądro płomienia w oparciu o czas jego rozchodzenia się. Przykład na rys. 11 A ilustruje typową sytuację nieregularnego zapłonu na skutek cieplnych przeciążeń podczas pracy silnika. Powtórne pojawienie się przeciążeń inicjuje nieregularny zapłon i dostarcza dane statystyczne na temat lokalizacji zapłonu. Rys. 11 A pokazuje wszystkie sytuacje zapłonu wewnątrz wąskiego obszaru dawki z wnioskiem, że jeden z zaworów wylotowych działa jak źródło zapłonu w miejscu pojawienia się krytycznej temperatury.

Przypadki samozapłonu w silniku na rys. 11 B pojawiają się losowo, o czym już wspomniano w analizie sekwencji cyklu na rys. 10. Miejsca zapłonu są przypadkowe. Przed zapłonem zaobserwowano promieniujące ślady, które funkcjonują jako punkty zapłonu. Zarówno pojawienie się tych świecących śladów, jak i przypadkowość miejsca zapłonu świadczą o tym, że to produkty niepełnego spalania paliwa stanowią główną przyczynę nieregularnego zapłonu tego rodzaju.

8. Rozwój silników

Opis zjawiska wraz z analizą i przykładami przedstawione powyżej stanowią drogowskaz dla rozwoju silników. Po zidentyfikowaniu zapłonu w punktach temperatury krytycznej, należy skupić się na wyborze części z lepszym przewodzeniem ciepła lub z lepszym miejscowym chłodzeniem. Z drugiej strony zrozumienie, że produkty nie-

Table 1. Potential root causes for mega knock and consequent focus on engine development actions
 Tablica 1. Potencjalne przyczyny spalania stukowego i konsekwencje dla kierunków rozwoju silników

Root cause/pierwotna przyczyna	Engine development actions/kierunki rozwoju silnika	
Hot spot/punkty temp. krytycznej	Component selection/wybór części	Local cooling/miejscowe chłodzenie
Knock/spalanie stukowe	Local cooling/miejscowe chłodzenie	Knock calibration/kalibracja spalania stukowego
HCCI type ignition/zapłon HCCI	Charge composition and heterogeneity/skład dawki paliwa i heterogeniczność	Fuel injection, cam phasing/wtrysk paliwa, zmiana faz rozrządu
Oil vapor ignition/zapłon oparów oleju	Lube oil selection/wybór oleju smarowania	–
Deposits chemistry/właściwości chemiczne produktów niepełnego spalania paliwa	Fuel injection/wtrysk paliwa	Lube oil/olej smarowania
Flaking deposits/obecność produktów niepełnego spalania paliwa	Fuel injection/wtrysk paliwa	Lube oil/olej smarowania

accomplished with multichannel fiber optic spark plug sensors under normal multicylinder engine operating conditions. Signal recording techniques are especially adopted to the spontaneous nature of the self ignition events. Sensors are selected to enable continuous signal recording and – once the event has occurred – to locate the ignition spot in order to classify the root cause mechanisms. Both the cycle sequence pattern as well as ignition location statistics provide the data basis for root cause classification and selection of engine development actions.

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Bibliography/Bibliografia

- [1] Kapus P., Fraidl G.K., Neubauer M.: Niedrige CO₂-Emissionen und Fahrspaß – ein Widerspruch?, 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2007.
- [2] Heywood J.: Internal combustion engine fundamentals, p450 ff, McGraw Hill, 1988.

zupelnego spalania paliwa są odpowiedzialne za przypadki pojawienia się spalania detonacyjnego, wymaga poprawy wtrysku paliwa i smarowania w celu obniżenia ryzyka pojawienia się produktów niepełnego spalania paliwa. W konsekwencji każda przyczyna znajdująca się na liście w tabeli 1 wymaga przedsięwzięcia pewnych środków, aby obniżyć ryzyko samozapłonu i nieregularne spalanie. Głównym celem zastosowania opisanych powyżej metod analizy jest zidentyfikowanie pierwotnej przyczyny tych zjawisk w celu przetestowania poprawności wyboru cech konstrukcyjnych silnika.

Podsumowanie

Testowanie turbodoładowanych silników z wtryskiem bezpośrednim (typu GDI) pod kątem ryzyka wystąpienia nieregularnego zapłonu, który wyzwała spalanie detonacyjne, przeprowadzono przy użyciu wielokanałowych czujników optycznych z włókna szklanego w normalnych warunkach pracy silnika wielocylindrowego. Metody rejestrowania sygnałów są specjalnie dostosowane do spontanicznie pojawiającego się samozapłonu. Czujniki tak dobrano, aby umożliwiły nieustanny zapis sygnałów odbieranych przez czujniki jak tylko pojawi się samozapłon, i umożliwiły zlokalizowanie miejsca zapłonu i zidentyfikowanie jego przyczyny. Zarówno schemat sekwencji cyklu, jak i statystyka miejsca zapłonu dostarczają danych na temat klasyfikacji tych przyczyn i odpowiednich kierunków rozwoju silników.

Mr. Alois Hirsch, DEng. – development and applications engineer for optical technologies at AVL List GmbH, Austria.

Dr inż. Alois Hirsch – inżynier ds. zastosowania technologii optycznych w AVL List GmbH, Austria



Mr. Harald Philipp, DEng. – technical specialist for optical technologies at AVL List GmbH, Austria.

Dr inż. Harald Philipp – specjalista w zakresie technologii optycznych w AVL List GmbH, Austria.



Mr. Paul Kapus, DEng. – Team Manager for Gasoline Engines Development, AVL List GmbH, Austria.

Dr Paul Kapus – kierownik zespołu rozwoju silników spalinowych o zapłonie iskrowym, AVL List GmbH, Austria.

e-mail: Paul.Kapus@avl.com



Mr. Ernst Winklhofer, DEng. – skill team leader for optical technologies at AVL List GmbH, Austria.

Dr inż. Ernst Winklhofer – kierownik zespołu technologii optycznych AVL List GmbH, Austria.

e-mail: Ernst.Winklhofer@avl.com

