

ODWZOROWANIE PROCESU WTRYSKU PALIWA W SYGNALE DRGANIOWYM SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Bartosz CZECHYRA

Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań; e-mail: bartosz.czechyra@put.poznan.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad możliwością detekcji oraz stopniem odzworowania procesu wtrysku paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym. Przedstawiono genezę tematu i metodykę badań realizowanych na jednocylindrowym silniku badawczym. Wyniki badań laboratoryjnych zweryfikowano na wielocylindrowym silniku kolejowym. W podsumowaniu przedstawiono możliwości wykorzystania uzyskanych wyników badań do detekcji niesprawności wtryskiwacza paliwa silnika 2112SSF.

Słowa kluczowe: diagnostyka drganiowa, silnik spalinowy o ZS, wtrysk paliwa.

REPRESENTATION OF FUEL INJECTION PROCESS IN A VIBRATION SIGNAL OF A DIESEL ENGINE

Summary

The article presents some results of the research on possibilities of use a vibration signal of diesel engine in order to detect and describe a fuel injection process. This paper includes a genesis of this problem and a methodology of performed tests, which were executed on one-piston laboratory tests engine. Author presents also the verification results, executed on multi-pistons locomotive diesel engine. As a conclusion, the possibilities of implementation of this method are described, for example to perform an injector fault detection on the locomotive diesel engine.

Keywords: vibrodiagnostics, diesel engine, fuel injection.

1. ŹRÓDŁA SYGNAŁU DRGANIOWEGO W CYKLU PRACY SILNIKA SPALINOWEGO O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

1.1. Cykl pracy silnika spalinowego

Silnik spalinowy jest maszyną cieplną o działaniu cyklicznym, zamieniającym energię chemiczną zawartą w paliwie na energię mechaniczną obracającego się wału korbowego. Bez względu na cechy konstrukcyjne silnika spalinowego podstawą jego funkcjonowania jest sekwencja procesów gwarantujących konwersję energii oraz zachowanie ciągłości pracy. W cyklu pracy musi dojść do pobrania powietrza do przestrzeni roboczej silnika, przygotowania ładunku palnego przez uformowanie palnej mieszanki paliwa i powietrza, spalania mieszanki w komorze spalania oraz wykorzystania sił gazodynamicznych spalin w procesie rozprężania gazów spalinowych.

Silnik o zapłonie samoczynnym jest silnikiem, w który spalanie ładunku w cylindrze jest inicjowane samoczynnie poprzez bardzo złożone mechanizmy fizyko-chemiczne. Ze względu na dużą dynamikę przebiegu poszczególnych procesów zachodzących podczas cyklu pracy silnika można wskazać na dynamiczne oddziaływania pomiędzy czynnikiem roboczym a poszczególnymi elementami konstrukcji. Efektem tych oddziaływań jest generowanie sygnału wibroakustycznego.

Zgodnie z klasyfikacją zaproponowaną przez Piętaka [8] dynamikę silnika spalinowego, a przez to i efekty dynamiczne w postaci drgań, można rozpatrywać w skali makro- i mikrozjawisk. W ujęciu *makrodynamicznym* zakłada się, że przepływ energii od silnika spalinowego do odbiornika ma charakter ciągły, stacjonarny i nie związany z jego cykliczną pracą [9]. W konsekwencji można wyprowadzać równania bilansu energetycznego silnika i budować modele diagnostyczne, jako procesora energii.

Mikrodynamika silnika jest związana z jego cykliczną pracą kolejnych cylindrów. Wytwarzają one moment obrotowy zmienny w czasie, o złożonym, pulsującym przebiegu. Jest on uwarunkowany przebiegiem ciśnień w cylindrach oraz działaniem sił bezwładności, a także dynamiką przepływów w układach zasilania (w paliwo i powietrze) i układzie dolotowym silnika.

Proponuje się przejście na jeszcze niższy poziom analizy pracy silnika spalinowego o ZS w aspekcie diagnostyki drganiowej – analiza poszczególnych procesów przetwarzania energii chemicznej i generowania sygnału drganiowego w cylindrze zachodzących podczas cyklu pracy. W takim ujęciu przytoczoną wcześniej klasyfikację rozważań o dynamice silnika spalinowego można rozszerzyć o *dynamikę elementarnych procesów silnikowych* opisującą, wyjaśniającą i analizującą charakter

zjawisk zachodzących w komorze spalania w każdym cyklu pracy silnika spalinowego.

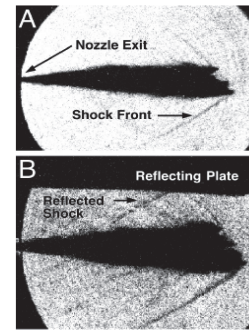
Kompleksową analizę poszczególnych zjawisk i mechanizmów generowania drgań w silniku spalinowym o ZS omówiono w pracach [10] natomiast poniższą pracę poświęcono kluczowemu procesowi jakim jest wtrysk paliwa i formowanie ładunku palnego w komorze spalania.

1.2. Wtrysk paliwa

Wtrysk paliwa do przestrzeni roboczej silnika o ZS jest złożonym procesem mającym na celu dostarczenie w odpowiednim momencie, odpowiednio odmierzonej dawki paliwa tak, aby ułatwić formowanie i samozapłon mieszanki palnej. Niezależnie od rozwiązania konstrukcyjnego układu wtryskowego, jego poprawne funkcjonowanie silnie wpływa na własności użytkowe silnika (moc maksymalna, dynamika, cichobieżność) i ekologiczne (toksyczność spalin), a przede wszystkim ekonomię eksploatacji (zużycie paliwa) [11]. Charakteryzując źródła sygnałów drganiowych w układzie wtryskowym należy zaznaczyć, że ze względu na skomplikowany mechanizm rozpylania paliwa można podzielić je na źródła mechaniczne, hydrauliczne i aerodynamiczne. Jak wynika z przeprowadzonych badań jednym z dominujących źródeł wtryskiwacza, a przez to i całej głowicy silnika jest formowanie strugi i rozpylenie paliwa [1, 4]. Z punktu widzenia mechaniki płynów wtrysk paliwa to przepływ cieczy przez otwór ostrokrawędziowy, którego charakterystycznym wymiarem jest długość dużo mniejsza od $50D$, gdzie D jest średnicą otworu rozpylacza [7]. Przepływ przez otwór ostrokrawędziowy charakteryzuje się przewężeniem (kontrakcja) strumienia, która występuje za przekrojem. Stanowi to źródło silnego zawirowania paliwa, a przy znacznych prędkościach wypływu paliwa (w literaturze wskazuje się prędkość rzędu $80-100 \text{ ms}^{-1}$) prowadzi do rozpadu strugi na skutek niestabilności statycznej. Niestabilność statyczna decyduje o przejściu z jednej formy rozpadu strugi w drugą, a kryterium stateczności pojedynczej kropli może być definiowane kryterialną liczbą Webera [11]. Rozpad strugi na pojedyncze krople jest wykonany kosztem energii pulsacji paliwa w kierunku poprzecznym do osi cylindra. W literaturze spotyka się ściśle zdefiniowane pasmo częstotliwości, w którym skupiona jest większość energii pulsacji czynnika [10] jednakże nie odnaleziono opublikowanych wyników badań potwierdzających słuszność przytoczonych teorii dla warunków niestacjonarnego przepływu cieczy.

Najnowsze, publikowane badania nad procesem rozpylania paliwa wskazują na możliwość powstawania zjawiska kawitacji w rozpylaczu, co stanowi dodatkowe źródło drgań w układzie wtryskowym. Efektem wibroakustycznym takiego wspomaganie rozpylania paliwa są wysokoczęstotliwościowe drgania o energii równej pracy rozprężania/sprężania par paliwa.

Dodatkowo badania wizualizacyjne dowiodły istnienia kolejnego źródła drgań, jakim jest fala uderzeniowa [6]. Zjawisko hipersoniczne było przypisane procesowi spalania ładunku i gwałtownym przyrostom ciśnienia w komorze spalania. Dopiero badania wizualizacyjne z wykorzystaniem fotografii rentgenowskiej wskazały na pierwszeństwo wtrysku nad spalaniem w kwestii powstawania fal uderzeniowych w cylindrze prezentowane na rys. 1.



Rys. 1. Wizualizacja fali uderzeniowej przy wtrysku paliwa z ciśnieniem 80MPa; [6] A – fala uderzeniowa przed czołem strugi paliwa, B – odbicie fali uderzeniowej od ścianki cylindra

Przedstawione rozważania na temat identyfikacji poszczególnych źródeł sygnału drganiowego stały się podstawą opracowania metodyki badań nad odzworowaniem procesu wtrysku w sygnale drganiowym.

2. METODYKA I OBIEKT BADAŃ

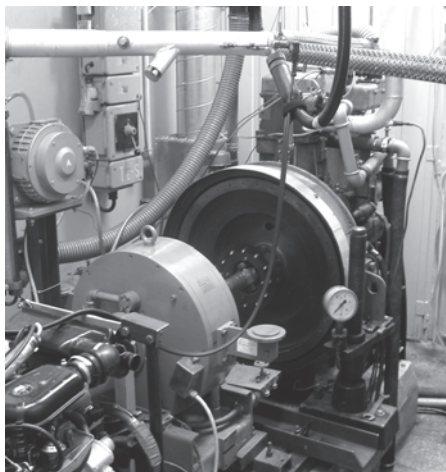
Wtrysk i spalanie paliwa w silniku o ZS jest złożonym, wielofazowym procesem fizykochemicznym, który charakteryzuje się wysoką niestacjonarnością oraz składowymi wysoko częstotliwościowymi [11]. Dlatego też zdecydowano o wykonaniu badań rozpoznawczych, bazujących na pomiarze drgań głowicy jednocylindrowego silnika spalinowego o ZS i wtrysku bezpośrednim typu SB3.1.

Ze względu na nowatorski charakter badań wibroakustycznych oraz konieczność weryfikacji poprawności uzyskanych wyników postanowiono wykonać pomiary przyspieszeń drgań głowicy silnika o ZS w trakcie przeprowadzania rutynowych badań silnikowych. W związku z tym przystosowano stanowisko dynamometryczne silnika SB3.1 do badań wibroakustycznych. Widok silnika spalinowego na stanowisku badawczym przedstawiono na rys. 2.

Badania zostały przeprowadzone w Laboratorium Silnikowym Instytutu Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Stanowisko dynamometryczne pozwala na kontrole i rejestrację między innymi następujących parametrów:

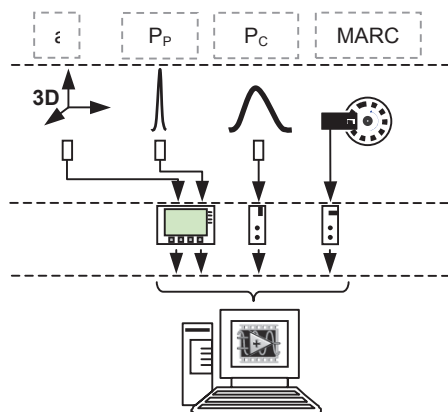
- ciśnienie w przestrzeni nad tłokiem silnika,
- ciśnienie paliwa przed wtryskiwaczem,

- prędkość obrotowa i moment obrotowy na wale korbowym,
- jednostkowe bieżące zużycie paliwa,
- temperatura cieczy chłodzącej i spalin,
- skład spalin (kontrolnie).



Rys. 2. Widok silnika badawczego SB3.1 na stanowisku dynamometrycznym

Na potrzeby badań przystosowano stanowisko zostało zaadaptowanego do badań wibroakustycznych przez montaż przetworników drgań B&K typ 4391 ze wzmacniaczem ładunku B&K typ 2692 NEXUS firmy Brüel&Kjær. Poglądowy schemat toru pomiarowego zamieszczono na rysunku 3.



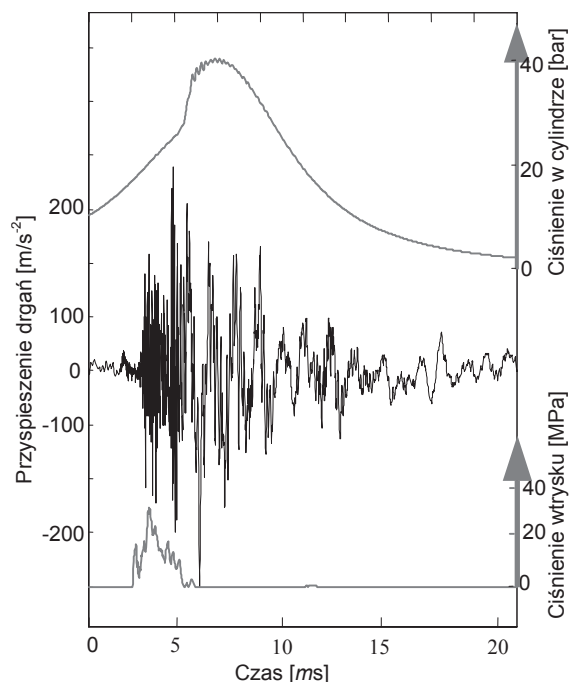
Rys. 3. Schemat toru pomiarowego: a – przyspieszenie drgań, P_p – ciśnienie paliwa P_c – ciśnienie w cylindrze, MARC – znacznik obrotu wału korbowego

Rejestracja dokonywana była z wykorzystaniem komputera PC wyposażonego w kartę analogowo-cyfrową do akwizycji sygnałów dynamicznych NI DAQ – 4472 firmy National Instruments. Sterowanie akwizycją, wizualizacja przebiegów sygnałów oraz ich bieżąca, częściowa analiza była realizowana z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania LabView® tej samej firmy. Szczegółowe analizy zarejestrowanych sygnałów przeprowadzono w środowisku Matlak®. Ze względu na impulsowy charakter przebiegu obserwowanych zjawisk zdecydowano, że sygnały zostaną rejestrowane z szybkością 102400 próbek na

sekundę. Pozwoliło to na akwizycję sygnału drganiowego w użytecznym paśmie częstotliwości 45 kHz. Jednocześnie zwraca się uwagę na wykorzystanie zjawiska mechanicznego autowzmacnienia sygnału w zakresie nieliniowości charakterystyki przetwornika drgań (naturalna częstotliwość rezonansowa dla użytych przetworników to $f_N=52\text{kHz}$). Technika ta pozwoliła dokładniej obserwować składowe wysokoczęstotliwościowe o niskiej energii, które są wynikiem procesów hydrodynamicznych (wtrysk paliwa) i fizykochemicznych (tworzenie ładunku palnego) występujących w czasie cyklu pracy silnika spaliny. Poprawność przyjętej metody uzasadnia się przez rozpoznawczy charakter badań prowadzonych w stałych warunkach.

3. WYNIKI BADAŃ

Przykładowy przebieg zarejestrowanych sygnałów drgań oraz pomocniczych sygnałów ciśnień przedstawiono na rysunku 4.

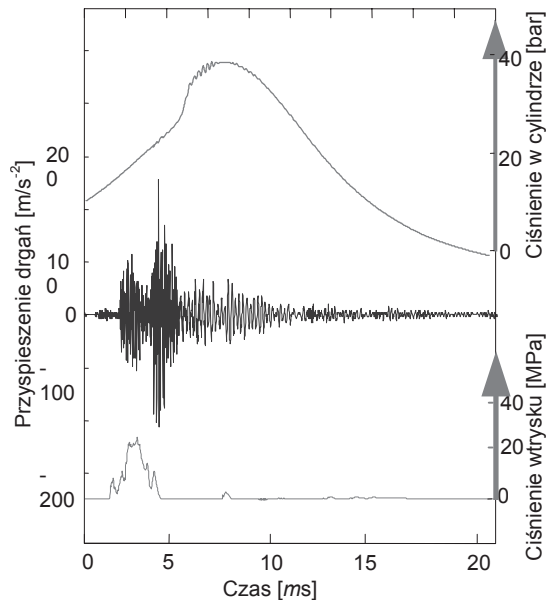


Rys. 4. Przebiegi czasowe drgań w paśmie 45 kHz oraz ciśnień: w cylindrze i paliwa przed wtryskiwaczem; $n=1000$ obr/min, $M_o=20$ N·m

Zarejestrowane sygnały poddano analizie w dziedzinie czasu i częstotliwości. Wykorzystując autorską metodę Operacyjnej Analizy Odpowiedzi Częstotliwościowej **OFRA** (**O**perational **F**requency **R**esponse **A**nalysis) [5] odseparowano drgania strukturalne od drgań generowanych przy wtrysku paliwa i tworzeniu ładunku palnego w cylindrze. Po przeprowadzeniu analizy sygnałów zarejestrowanych dla 48 sytuacji badawczych dokonano selekcji widmowej i filtracji sygnałów drgań głowicy silnika badawczego związanych z wtryskiem paliwa i tworzeniu ładunku palnego. Przykładowy wynik postprocessingu przedstawiono na rys. 5.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione badania potwierdziły wysoką przydatność sygnału drganiowego do oceny przebiegu procesów silnikowych. Istnieje możliwość identyfikacji elementarnych procesów silnikowych, tj. wtrysk paliwa, tworzenie ładunku z podziałem na fizyczny i fizykochemiczny rozpad strugi, agregację samozapłonu oraz spalanie i dopalanie ładunku w cylindrze.



Rys. 5. Przebiegi czasowe filtrowanego sygnału drgań w paśmie 1500÷4000 Hz oraz ciśnień: w cylindrze i paliwa przed wtryskiwaczem; $n=1000$ obr/min, $Mo=0$ N·m

Przeprowadzone badania i analizy pozwoliły na:

- potwierdzenie, że proces wtrysku paliwa i tworzenia ładunku palnego jest bardzo skomplikowanym i wielofazowym procesem fizykochemicznych, którego efekty drganiowe są silnie niestacjonarne,
- wskazanie możliwości wykorzystania efektu autowzmocnienia wysokoczęstotliwościowych sygnałów drganiowych,
- potwierdzenie przydatności metody OFRA do selekcji sygnałów drganiowych.

Uzyskane wyniki analiz posłużyły przygotowaniu eksperymentu na silniku kolejowy typu 2112SSF, których celem była weryfikacja przydatności metod i technik opracowanych dla silnika badawczego SB3.1 w eksploatacyjnych badaniach diagnostycznych lokomotyw spalinowych.

LITERATURA

- [1] Czechyra B.: *Odwzorowanie procesów silnikowych w sygnale drganiowym silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Seria Maszyny Robocze i Transport, nr 59, Poznań 2005.
- [2] Czechyra B.: *Operacyjna analiza odpowiedzi częstotliwościowej OFRA w ocenie procesów*

silnikowych. Wybrane zagadnienia analizy modalnej konstrukcji mechanicznych – praca zb. pod red. T. Uhla, AGH, Kraków 2008.

- [3] Czechyra B., Szymański G. M., Tomaszewski F.: *Ocena luzu zaworów silnika spalinowego w oparciu o parametry drgań – założenia metodyczne*. Silniki Spalinowe nr 1/2004 (118)49.
- [4] Czechyra B., Szymański G. M., Tomaszewski F.: *Odwzorowanie procesu spalania w sygnale drganiowym tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*. 3rd International Congress of Technical Diagnostics, Diagnostics' 2004, 6-9 September 2004, VOL. 30 tom 1 2004.
- [5] Czechyra B., Tomaszewski F.: *OFRA – vibration signal selection method for fast diagnostics of diesel engine*. XXIII Symposium Vibrations In Physical Systems, Poznań – Będlewo 2008.
- [6] MacPhee A. G. and others: *X-ray Imaging of Shock Waves Generated by High-Pressure Fuel Sprays*. Reports. Science, VOL 295/ Feb. 2002.
- [7] Oleśkiewicz-Popiel Cz.: *Osiowosymetryczny strumień swobodny i uderzający*. Seria: Rozprawy Politechniki Poznańskiej, nr 120, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1981.
- [8] Pięta A.: *Diagnozowanie silników o ZS na podstawie przebiegu procesu przejściowego*. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej Seria Rozprawy, nr 340, Poznań 1998.
- [9] Rackmill C. I., Blumberg P. N., Becker D. A., Schuller R. R., Garvey D. C.: *A dynamic model of a locomotive diesel engine and electrohydraulic governor*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME, Vol. 110, No. 3, 1988.
- [10] Tomaszewski F.: *Zastosowanie procesów wibroakustycznych do oceny stanu technicznego silnika spalinowego lokomotywy*. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska Poznań 1987.
- [11] Zabłocki M.: *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1976.



Bartosz CZECHYRA, dr inż., adiunkt w Zakładzie Pojazdów Szynowych Instytutu Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Naukowo poświęca się diagnostyce wibroakustycznej środków transportu ze szczególnym uwzględnieniem własności modalnych obiektów

technicznych oraz ich wpływu na ewaluacje klimatu wibroakustycznego środowiska. Członek Zachodniopomorskiego Zespołu Środowiskowego – Sekcji Eksploatacji – Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk oraz Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych.