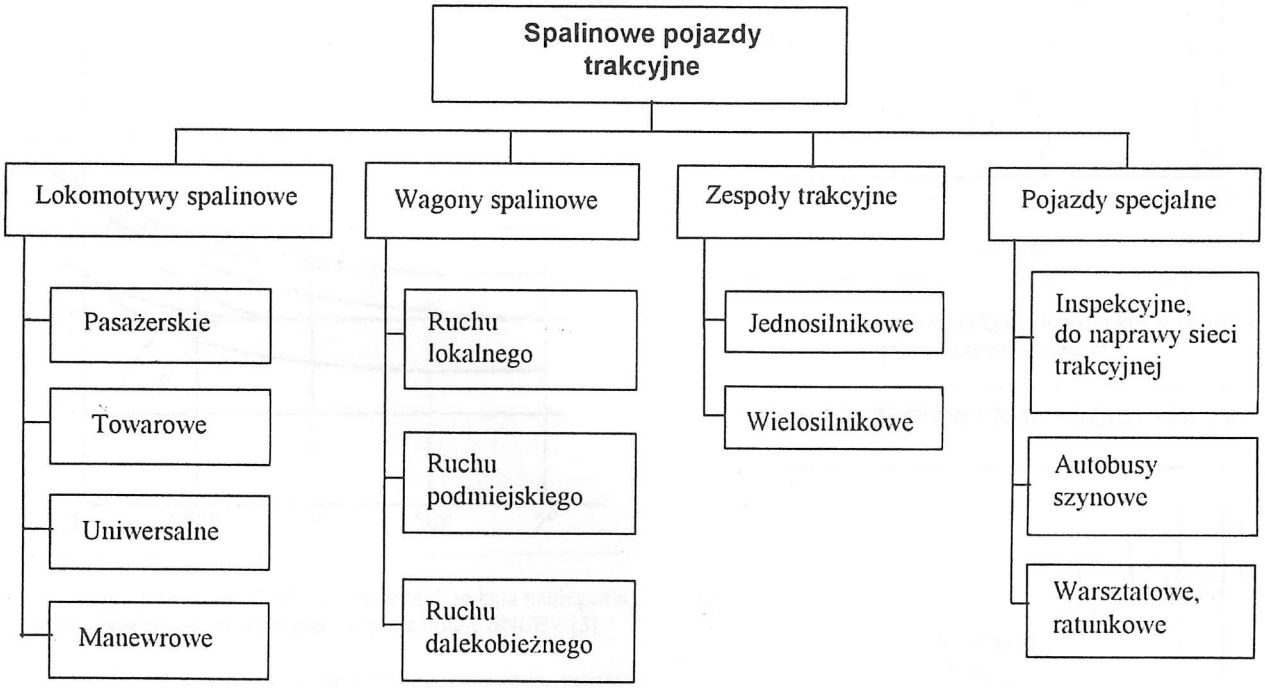
prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
mgr inż. Marek Waligórski
Politechnika Poznańska
dr inż. Piotr Boguś
Akademia Medyczna w Gdańsku
mgr inż. Rafał Grzeszczyk
Automex, Gdańsk

Diagnostyka pokładowa zjawiska wypadania zapłonów w silnikach lokomotyw spalinowych

W pracy przedstawiono rodzaje lokomotyw spalinowych eksploatowanych w Polsce z uwzględnieniem ich parametrów technicznych. Zaprezentowano też wpływ zjawiska wypadania zapłonów na parametry ekologiczne silników spalinowych. Poruszono zagadnienie diagnostyki pokładowej silników o zapłonie samoczynnym pod kątem przyszłych norm emisji. W wyniku tego wskazano kierunki zmian przepisów europejskich w zakresie emisji silników lokomotyw spalinowych, co utwierdza w celowości zastosowania ciągłej kontroli wypadania zapłonu w silnikach spalinowych tych pojazdów. Wskazano różne metody wykrywania zjawiska wypadania zapłonów, stosowane w pojazdach z silnikami o zapłonie samoczynnym już produkowanych, jak i będące w fazie badań. Przedstawione zostały sposoby określenia braku procesu spalania w silniku przez każdą z metod, wymieniono ich wady, zalety i trudności w praktycznej implementacji do silników lokomotyw spalinowych.

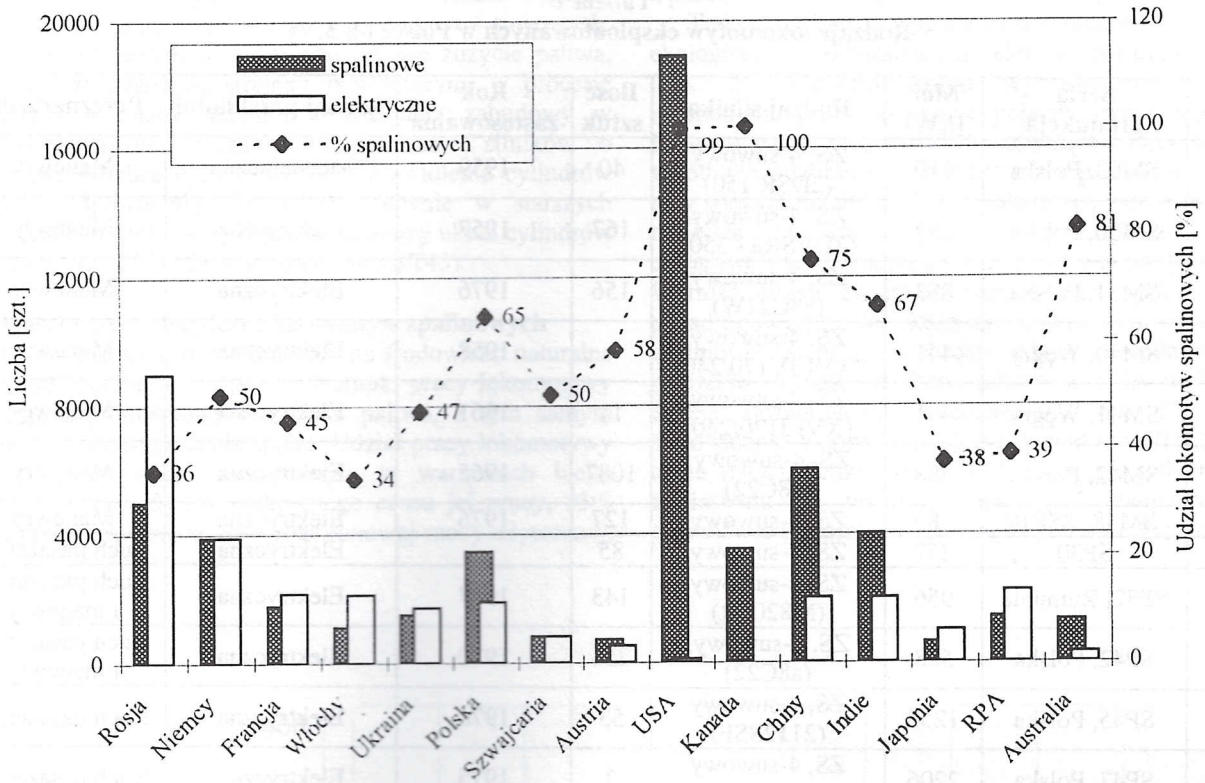
1. Wstęp

Spalinowy pojazd trakcyjny jest to pojazd szynowy napędzany silnikiem spalinowym, który jest przeznaczony do ciągnięcia albo popychania wagonów, bezpośredniego przewozu pasażerów albo ładunków (rys. 1).



Rys. 1. Rodzaje spalinowych pojazdów trakcyjnych [5]

Udział spalinowych pojazdów trakcyjnych (w tym lokomotyw) w transporcie kolejowym w różnych krajach zależy od uwarunkowań historycznych i strategicznych, poziomu techniki w określonych dziedzinach, położenia geograficznego kraju i jego zasobów energii (rys. 2).



Rys. 2. Udziały lokomotyw spalinowych i elektrycznych w trakcji szynowej w poszczególnych krajach [9]

Niezależnie od ocen ekonomicznych, trakcja spalinowa posiada pewne cechy korzystne względem trakcji elektrycznej, takie jak:

- zasilanie niezależne od zewnętrznego źródła, co jest istotne w przypadku klęsk żywiołowych, w sytuacjach wyjątkowych; lokomotywy spalinowe mogą w pełni zastąpić lokomotywy elektryczne,
- możliwość stosowania innowacji w układzie napędowym lokomotyw spalinowych, różnych sposobów przetwarzania energii, różnych rodzajów przekładni elektrycznej,
- możliwość pracy lokomotywy w trudnych warunkach atmosferycznych, które mogą stanowić znaczne utrudnienie dla lokomotyw elektrycznych,
- większa sprawność trakcji spalinowej (η_o = 0,26) niż trakcji elektrycznej (η_o = 0,21) [5].

Lokomotywa spalinowa jest to spalinowy pojazd trakcyjny, który nie posiada pomieszczenia do przewozu pasażerów i ładunku. Na większości kolei krajów europejskich trakcja spalinowa obsługuje tylko część przewozów, a jej podstawowe wykorzystanie jest na liniach o małym natężeniu ruchu, w pracach pomocniczych (w tym manewrowych).

W Polskich Kolejach Państwowych eksploatowanych jest obecnie 12 serii lokomotyw spalinowych o mocach silnika spalinowego od 110 kW do 2200 kW (tabela 1). Corocznie liczba lokomotyw spalinowych, zarówno w krajach Unii Europejskiej, jak i w Polsce maleje wskutek zastępowania tej trakcji przez lokomotywy elektryczne.

Silniki spalinowe stosowane do napędu lokomotyw spalinowych eksploatowanych w Polsce są w większości przypadków 4-suwowymi tłokowymi silnikami o zapłonie samoczynnym i widlastym układzie cylindrów (tabela 2).

Tabela 1
Rodzaje lokomotyw eksploatowanych w Polsce [4, 5, 7]

Lp.	Seria produkcja	Moc [kW]	Rodzaj silnika	Ilość sztuk	Rok zastosowania	Rodzaj przekładni	Przeznaczenie
1	SM03, Polska	110	ZS, 4-suwowy (2DSR 150)	40	1959	Mechaniczna	Manewry
2	SM30, Polska	257	ZS, 4-suwowy (3DVSRa - 350)	167	1957	Elektryczna	Manewry
3	SM31, Polska	883	ZS, 4-suwowy (a8C22W)	156	1976	Elektryczna	Manewry
4	SM40, Węgry	441	ZS, 4-suwowy (XVI JV170/240)	-	1958	Elektryczna	Manewry
5	SM41, Węgry	441	ZS, 4-suwowy (XVI J170/240)	11	1961	Elektryczna	Manewry
6	SM42, Polska	588	ZS, 4-suwowy, (a8C22)	1087	1965	Elektryczna	Manewry
7	SM48, ZSRR	883	ZS, 4-suwowy	127	1976	Elektryczna	Manewry
8	SP30	257	ZS, 4-suwowy	85		Elektryczna	Ruch pasażerski
9	SP32, Rumunia	956	ZS, 4-suwowy (M820SR)	143	1987	Elektryczna	Ruch pasażerski i manewry
10	SP42, Polska	588	ZS, 4-suwowy, (a8C22)	254	1970	Elektryczna	Ruch pasażerski i manewry
11	SP45, Polska	1250	ZS, 4-suwowy (2112SSF)	53	1970	Elektryczna	Ruch pasażerski
12	SP47, Polska	2206	ZS, 4-suwowy (2116SSF)	2	1975	Elektryczna	Ruch pasażerski
13	ST43, Węgry	1544	ZS, 4-suwowy (12LDA28)	346	1965	Elektryczna	Ruch towarowy
14	ST44, ZSRR	1471	ZS, 2-suwowy (14D40)	750	1966	Elektryczna	Ruch towarowy
15	SU45, Polska	1250	ZS, 4-suwowy (2112SSF)	190	1970	Elektryczna	Ruch pasażerski i towarowy
16	SU46, Polska	1655	ZS, 4-suwowy (2112SSF)	48	1976	Elektryczna	Ruch pasażerski i towarowy

Tabela 2
Dane techniczne wybranych silników lokomotyw spalinowych eksploatowanych w Polsce [5]

Typ silnika	Moc [kW]	Prędkość obrotowa $N_{e,max}$ [obr/min]	Objętość skokowa silnika V_{ss} [dm^3]	Ilość cylindrów/ układ cylindrów	Rodzaj zapłonu	p_e [MPa]	$c_{śr}$ [m/s]	Jednostkowe zużycie [g/kWh]	
								paliwa g_e	oleju g_o
2DSR150	110	1500	19,09	6/R	ZS	0,46	9,0	258	6,8
3DVSRa-350	257	1500	38,17	12/V (60°)	ZS	0,47	9,0	245	6,8
a8C22W	882	1000	82,0	8/V (50°)	ZS	1,32	9,0	224	4,8
XVIJV170/240	441	1100	88,34	16/V (40°)	ZS	0,55	9,0	238	4,1
a8C22	588	1000	82,10	8/R	ZS	0,88	9,0	224	4,8
PD1M	883	750	158,7	6/R	ZS	-	10,25	224	5,4
M820SR	956	1500	159,2	12/V (60°)	ZS	1,32	10,25	217,5	-
12LDA28	1544	750	265,8	12/2R	ZS	1,04	9,0	235	2,7
14D40	1470	750	150,6	12/V (45°)	ZS	0,81	7,5	228	2,7
2112SSF	1250	1500	95,6	12/V (90°)	ZS	1,07	11,5	223	2,7
2116SSF	2206	1500	127,46	16/V (90°)	ZS	1,38	11,5	217	-

p_e – średnie ciśnienie użyteczne, $c_{śr}$ – średnia prędkość tłoka, R – rzędowy układ cylindrów silnika (2R – dwurzędowy), V – widlasty układ cylindrów silnika

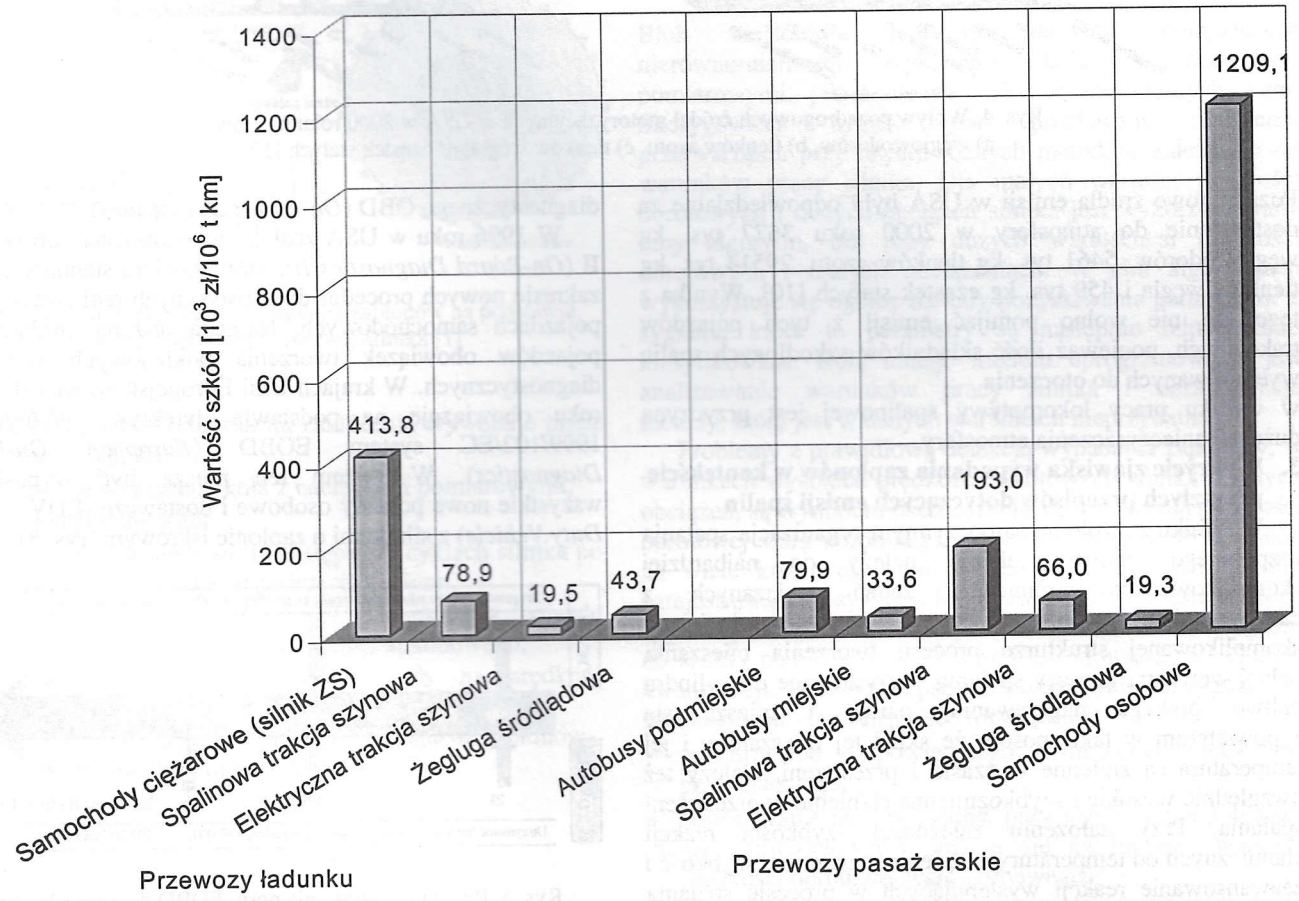
W silnikach 2-suwowych jest możliwe uzyskanie większej mocy przy tej samej objętości niż dla silników 4-suwowych. Ich wadą jest jednak większe jednostkowe zużycie paliwa, które jest związane ze stratami powstającymi w procesie spalania i wymiany ładunku. Wymagania zabudowy w taborze szynowym narzucają zastosowanie silników o widlastym układzie cylindrów. Kąty rozwidlenia cylindrów wynoszą odpowiednio 60° i 90°. Jedynie w starszych rozwiązaniach spotyka się rzędowy pionowy układ cylindrów (np. w silniku 12LDA28 w lokomotywie ST43).

2. Właściwości ekologiczne lokomotyw spalinowych

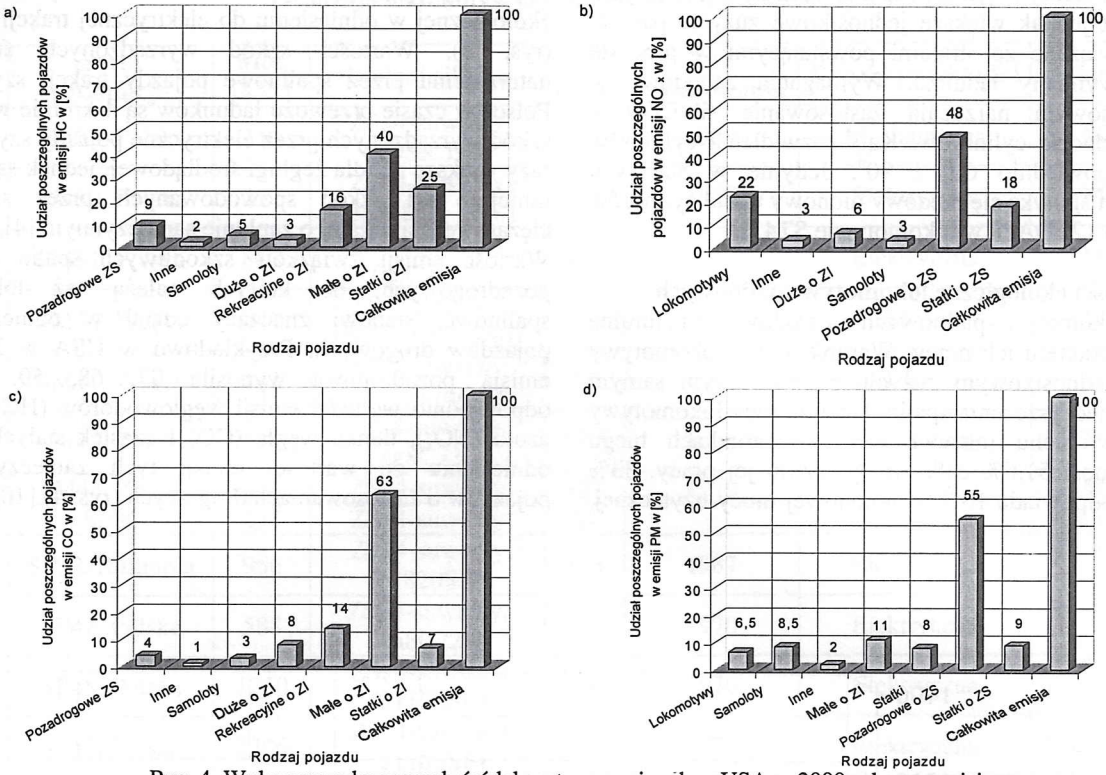
Wpływ lokomotyw spalinowych na środowisko naturalne zależy od charakteru ich pracy. Warunki pracy lokomotywy decydują o jednostkowym zużyciu paliwa, a tym samym o stopniu zanieczyszczenia spalin. Udział pracy lokomotywy spalinowej w ruchu manewrowym w warunkach biegu jałowego wynosi 51,6% całkowitego czasu jej pracy, 33% czasu pracy odpowiada 10% znamionowej mocy użytecznej, a pozostałe udziały są znikome [4].

Trakcja spalinowa wypada bardzo niekorzystnie w ocenie ekologicznej w odniesieniu do elektrycznej trakcji szynowej (rys. 3). Wartości szkód wyrządzonych środowisku naturalnemu przez spalinowe pojazdy trakcji szynowej w Polsce w czasie przewozu ładunków są 4-krotnie większe od szkód wyrządzonych przez elektryczne pojazdy szynowe, 1,8 razy większe niż dla żeglugi śródlądowej, jednak są 5-krotnie mniejsze od szkód spowodowanych przez samochody ciężarowe z silnikami o zapłonie samoczynnym [4].

Wartość emisji związków szkodliwych spalin ze źródeł pozadrogowych, do których należą też lokomotywy spalinowe, stanowi znaczący udział w odniesieniu do pojazdów drogowych. Przykładowo w USA w 2000 roku emisja pozadrogowa wynosiła 97, 68, 59, i 191% odpowiednio wartości emisji węglowodorów (HC), tlenków azotu (NO_x), tlenku węgla (CO) i cząstek stałych (PM) w odniesieniu do wartości emisji tych zanieczyszczeń z pojazdów o zastosowaniach drogowych (rys. 4) [10].



Rys. 3. Porównanie wartości szkód wyrządzanych środowisku naturalnemu przez różne środki transportowe [4]



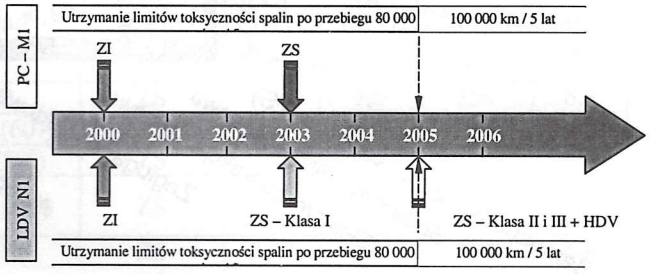
Rys. 4. Wpływ pozadrogowych źródeł motoryzacyjnych w USA w 2000 roku na emisje: a) węglowodorów, b) tlenków azotu, c) tlenków węgla, d) cząstek stałych [10]

Pozadrogowe źródła emisji w USA były odpowiedzialne za dostarczenie do atmosfery w 2000 roku 3677 tys. kg węglowodorów, 5461 tys. kg tlenków azotu, 29514 tys. kg tlenków węgla i 459 tys. kg cząstek stałych [10]. Wynika z tego, że nie wolno pomijać emisji z tych pojazdów trakcyjnych, ponieważ ilość składników szkodliwych spalin wyemitowanych do otoczenia
w wyniku pracy lokomotywy spalinowej jest przyczyną dużego zanieczyszczenia atmosfery.

3. Wykrycie zjawiska wypadania zapłonów w kontekście przyszłych przepisów dotyczących emisji spalin

W silniku o zapłonie samoczynnym organizacja spalania rozpylonego paliwa ciekłego należy do najbardziej skomplikowanych technicznie zadań związanych z zastosowaniem tego procesu. Przyczyna tkwi w skomplikowanej strukturze procesu tworzenia mieszanki palnej wewnątrz komory spalania. Wtryskiwane do cylindra paliwo podlega nagrzewaniu, paruje i miesza się z powietrzem w taki sposób, że skład tej mieszaniny i jej temperatura są zmienne w czasie i przestrzeni. Należy też uwzględnić wysokie i szybkozmienne ciśnienie w przestrzeni spalania. Przy założeniu zależności szybkości reakcji chemicznych od temperatury i stężenia reagentów, szybkość i zaawansowanie reakcji występujących w procesie spalania paliwa mają charakter lokalny, a samozapłon jest możliwy w wielu miejscach komory spalania. Zapewnienie właściwej organizacji procesu rozpylenia paliwa w cylindrze i procesu spalania utworzonej mieszanki palnej wpływa na uzyskiwane parametry pracy silnika. Od niej zależy też, czy w komorze spalania wystąpią ogniska samozapłonu. Skuteczne wykrycie braku procesu spalania w danym cylindrze silnika spalinowego, jak również przeciwdziałanie temu zjawisku jest możliwe też poprzez zastosowanie pokładowego systemu diagnostycznego OBD (*On-Board Diagnostics*).

W 1996 roku w USA została wprowadzona norma OBD II (*On-Board Diagnostics II*), która zawiera standaryzacje w zakresie nowych procedur diagnostycznych realizowanych w pojazdach samochodowych. Nakłada ona na producentów pojazdów obowiązek tworzenia pokładowych systemów diagnostycznych. W krajach Unii Europejskiej, od 1.01.2000 roku obowiązuje na podstawie dyrektywy 98/69/EC i 1999/102/EC system EOBD (*European On-Board Diagnostics*). W system ten muszą być wyposażone wszystkie nowe pojazdy osobowe i dostawcze (LDV – *Light Duty Vehicle*) z silnikami o zapłonie iskrowym (rys. 5).



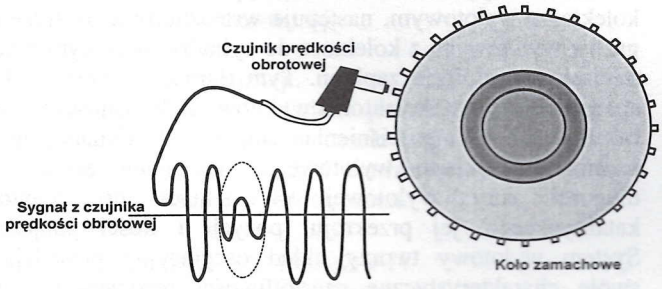
Rys. 5. Projekt zastosowania norm EOBD dla samochodów osobowych, dostawczych (LDV) i ciężarowych HDV (*Heavy Duty Vehicles*) w krajach Unii Europejskiej [8]

Na podstawie normy EURO III planuje się wprowadzenie systemu EOBD jako opcjonalnego wyposażenia silników o zapłonie samoczynnym od 1.01.2003 roku (samochody osobowe kategorii M1 i ciężarowe kategorii N1) a od 1.01.2005 roku również dla samochodów ciężarowych kategorii N1 klasy II i III. Z tej przyczyny należy spodziewać

się, że system OBD będzie zastosowany w niedalekiej przyszłości również w pojazdach HDV o zastosowaniach pozadrogowych wyposażonych w silniki o ZS. Z uwagi na to, że lokomotywy spalinowe należą do tej grupy pojazdów, niezbędne będzie zastosowanie w nich pokładowych systemów diagnostycznych.

4. Wykrywanie wypadania zapłonów na podstawie analizy chwilowej wartości prędkości obrotowej (lub położenia) wału korbowego silnika

Jedną z metod wykrywania zjawiska wypadania zapłonów, która jest stosowana powszechnie w silnikach produkowanych seryjnie, jest analiza chwilowej wartości prędkości kątowej wału korbowego silnika [2]. Brak spalania mieszanki w jednym cyklu pracy silnika powoduje zmniejszenie momentu obrotowego i zmniejszenie chwilowej wartości prędkości obrotowej wału korbowego silnika (rys. 6).

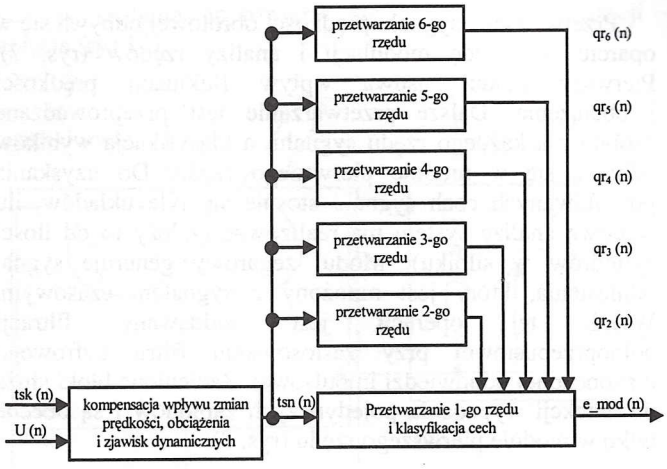


Rys. 6. System wykrywania wypadania zapłonów na podstawie analizy prędkości obrotowej silnika [1]

Metoda ta musi być odporna na zakłócenia wywołane przez następujące czynniki:

- tolerancje wykonania koła z nacięciami pomiarowymi,
- drgania skrętne wału,
- drgania pojawiające się w następnych cyklach silnika po wystąpieniu zjawiska wypadnięcia zapłonu,
- dynamiczne zmiany prędkości i obciążenia pojazdu przenoszone na wał korbowy silnika spalinowego,
- wpływ nierównomierności toru jazdy na prędkość kątową wału korbowego silnika,

System wykrywania zjawiska wypadania zapłonów podzielony jest na bloki funkcjonalne (rys. 7).



Rys. 7. Ogólny schemat metody modulacji [2]: tsk (n) – skorygowany sygnał elementarnego okresu czasu; U (n) – sygnał obciążenia; tsn (n) – odfiltrowany filtrem wyższego rzędu i standaryzowany elementarny sygnał czasowy, który jest niezależny od wpływu obciążenia i prędkości silnika spalinowego; qr_i (n) – sygnał odniesienia i-tego rzędu; e_mod (n) – sygnał wyjściowy uzyskany w wyniku modulacji

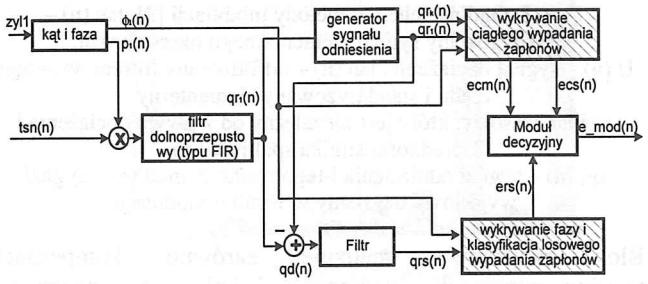
Blok wejściowy realizuje zarówno kompensację nierównomierności wykonania koła z nacięciami pomiarowymi, jak i usuwa efekt drgań skrętnych wału. Skorygowany sygnał jest poddawany dalszemu przetwarzaniu przy użyciu różnych metod, w zależności od warunków pracy silnika. Dla małych wartości prędkości obrotowych i dużych obciążeń silnika jest wykorzystywany inny algorytm, niż przy dużych wartościach prędkości obrotowych i małych obciążeniach. W obu algorytmach wykorzystuje się ogólne metody pozyskiwania parametrów z sygnału, które to parametry są następnie odpowiednio klasyfikowane. Rolą innego modułu oprogramowania jest analizowanie warunków pracy silnika i dezaktywacja metody, która jest w danych warunkach nieprzydatna.

Problemy z prawidłową detekcją wypadania zapłonów, w warunkach wysokich prędkości obrotowych silnika i małych obciążeń, są wynikiem przenoszenia się zaburzenia prędkości obrotowej wału korbowego, wywołanego brakiem spalania, na wiele kolejnych cykli silnika i pogorszeniem jakości zarejestrowanego sygnału. Mniejsza jakość zarejestrowanego sygnału jest wynikiem zmniejszenia ilorazu wartości sygnału do szumu pomiarowego, co jest spowodowane, np. błędem kwantyzacji. W celu polepszenia ilorazu wartości sygnału do szumu stosuje się następujące rozwiązania:

- zastosowanie odpowiedniego filtrowania środkowo-przepustowego,
- zastosowanie analizy rzędów przy wykorzystaniu analizy częstotliwościowej i oparciu się na bieżącej wartości prędkości obrotowej wału korbowego.

W czasie stosowania analizy rzędów wykorzystuje się zjawisko, że ciągłe wypadanie zapłonu w jednym cylindrze powoduje w danych pomiarowych wystąpienie efektu o dominującej częstotliwości związanej z obrotami wału korbowego (efekt pierwszego rzędu). Przy użyciu dyskretnej transformacji Fouriera (DFT – *Discrete Fourier Transform*) otrzymuje się transformatę zespoloną, a na podstawie jej charakterystyki fazowej jest możliwa identyfikacja cylindra. Jednak tą metodą trudno jest wykrywać pojedyncze zjawiska wypadania zapłonów.

Przetwarzanie sygnału prędkości obrotowej odbywa się w oparciu o metodę modulacji i analizy rzędów (rys. 7). Pierwszy moduł usuwa wpływ fluktuacji prędkości i obciążenia. Dalsze przetwarzanie jest przeprowadzane osobno dla każdego rzędu sygnału, a klasyfikacja wyników odbywa się w module pierwszego rzędu. Do uzyskania poszukiwanych cech sygnału stosuje się tyle układów, ilu rzędową analizę system ma realizować (zależy to od ilości cylindrów w silniku). Moduł zegarowy generuje sygnał odniesienia, który jest mnożony z sygnałem czasowym. Wynik tej operacji jest poddawany filtracji dolnoprzepustowej przy zastosowaniu filtru cyfrowego o skończonej odpowiedzi impulsowej. Zacienione bloki służą do detekcji wypadania pojedynczych zapłonów i są obecne tylko w module pierwszego rzędu (rys. 8).



Rys. 8. Schemat modułu przetwarzania pierwszego rzędu [2]: φ_1 (n) – modulacja sygnału z następnym odfiltrowaniem przez filtr dolnoprzepustowy; tsn (n) – odfiltrowany filtrem wyższego rzędu i standaryzowany elementarny sygnał czasowy, który jest niezależny od wpływu obciążenia i prędkości silnika spalinowego; p_1 (n) – funkcja trygono- metryczna użyta aby wytworzyć zespolony wskaźnik kąta obrotu wału korbowego; qr_i (n) – sygnał odniesienia i-tego rzędu, ecm (n) – sygnał rozpoznawczy dla ciągłego wypadania zapłonów w wielu cylindrach; ecs (n) – sygnał rozpoznawczy dla ciągłego wypadania zapłonów w jednym cylindrze; ers (n) – sygnał rozpoznawczy dla losowego wypadania zapłonów w jednym cylindrze; e_mod (n) – sygnał wyjściowy uzyskany w wyniku modulacji

5. Wykrywanie wypadania zapłonów na podstawie analizy chwilowej wartości ciśnienia gazów wylotowych silnika

W trakcie każdego cyklu pracy w silniku spalinowym zawór wylotowy otwiera się raz w celu wymiany ładunku w komorze spalania. Ciśnienie w kolektorze wylotowym wzrasta w wyniku nagłego uwolnienia produktów spalania i ruchu tłoka w czasie otwarcia zaworu wylotowego. Pulsacje ciśnienia zależą od parametrów procesu spalania i właściwości układu wylotowego.
W przypadku wystąpienia zjawiska wypadania zapłonu, ciśnienie gazów wylotowych gwałtownie maleje z powodu braku spalania i wynikowego niskiego ciśnienia w cylindrze [6].

Częstotliwość przebiegu ciśnienia w kolektorze wylotowym wynika z ilości cylindrów i chwilowej prędkości obrotowej silnika. Widmo sygnału ciśnienia w kolektorze wylotowym w przypadku poprawnej pracy silnika i w przypadku występowania zjawiska wypadania zapłonów różni się znacznie [14].

Pomiar ciśnienia realizuje się za pomocą przetwornika ciśnienia podłączonego do kolektora wylotowego za pomocą krótkiego elastycznego połączenia i trójnika. W odróżnieniu od czujników montowanych na kadłubie silnika nie jest potrzebny układ chłodzenia. Dzięki temu do pomiaru może być zastosowany tani przetwornik ciśnienia. Wymagane pasmo przenoszenia rejestrowanych sygnałów zależy od dynamiki zjawisk w kolektorze wylotowym. Częstotliwość wyłączania czujnika powinna wynosić co najmniej 200 Hz. Znaczenie ma także konstrukcja i wykonanie przyłączenia czujnika, jego charakterystyka tłumienia zmian sygnału. Możliwym miejscem przyłączenia czujnika jest ta część układu wylotowego pomiędzy kolektorem a reaktorem katalitycznym. Położenie punktu pomiarowego za reaktorem katalitycznym nie jest wskazane, ponieważ znacznie zniekształca (uśrednia) on pulsacje ciśnienia uniemożliwiając analizę procesu spalania na podstawie zarejestrowanego tam sygnału. Najlepsze efekty uzyskano przy przyłączeniu czujnika przy użyciu przyłącza o długości 165 mm. Maksymalna temperatura diafragmy czujnika w tym przypadku wynosiła 85°C [14].

W przypadku wystąpienia zjawiska braku zapłonu, ciśnienie w cylindrze jest około trzy/cztery razy mniejsze niż w przypadku regularnego procesu spalania. Ponieważ ciśnienie w cylindrze w takim przypadku jest niższe niż w kolektorze wylotowym, następuje wsteczne przemieszczenie gazów wylotowych z kolektora do cylindra, w którym miało miejsce wypadnięcie zapłonu. Tym tłumaczyć można silny spadek ciśnienia w kolektorze wylotowym. Własności falowe rozchodzącego się ciśnienia zależą od dynamicznych parametrów układu wylotowego. Tłumienie zależy od długości rury wylotowej od silnika do reaktora katalitycznego, jej przekroju, pozycji i ilości połączeń. System wylotowy tworzy układ oscylacyjny posiadający swoje charakterystyczne częstotliwości rezonansowe, dla których tłumienie układu znacznie zmniejsza się powodując powstawanie zjawiska fali stojącej.

Czujnik ciśnienia nie jest podłączony bezpośrednio do układu wylotowego przy zaworach wylotowych silnika, lecz w pewnej odległości od nich. Jeżeli na podstawie sygnału ciśnienia ma być identyfikowany cylinder, w którym proces spalania jest zakłócony, należy uwzględnić wszelkie występujące opóźnienia. Biorąc to pod uwagę, możliwe jest wyznaczenie czasu otwarcia zaworu odpowiadającego za przebieg sygnału w danym punkcie pomiarowym dla różnych warunków pracy silnika. Do wykrywania i lokalizacji wypadania zapłonów na podstawie sygnału ciśnienia można zastosować różne metody obróbki sygnałów i strategie decyzyjne.

6. Wykrywanie wypadania zapłonów na podstawie pomiaru i analizy sygnału jonizacji w komorze spalania

Pomiar prądu jonizacji dostarcza informacji o jakości procesu spalania. Na jego podstawie możliwe jest wyznaczenie wielu parametrów tego procesu, takich jak estymacja ciśnienia w komorze spalania, chwila rozpoczęcia spalania, wykrywanie domieszek do paliwa, itp.
W szczególności mała wartość sygnału jonizacji świadczy o braku spalania w cylindrze, a informacja ta może służyć do realizacji monitora wypadania zapłonów.

W wyniku reakcji chemicznych zachodzących w komorze spalania silnika podczas procesu spalania paliwa powstają wolne elektrony (jonizacja chemiczna). Jonizacja chemiczna

ma miejsce w czasie reakcji egzotermicznej, kiedy wyzwolona w wyniku niej energia jest na tyle duża, aby zjonizować jeden z produktów reakcji. Proces jonizacji powstającej w płomieniu przebiega według następującej reakcji [3]:

$$CH + O \rightarrow CHO^+ + e^- \quad (1)$$

W wyniku reakcji wymiany ładunków powstaje następnie jon H_3O^+ [3]:

$$CHO^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + e^- \quad (2)$$

Ilość tych jonów jest znacznie wyższa niż jonów CHO^+, ponieważ reakcja, w wyniku której powstają przebiega znacznie szybciej od reakcji (1). Proces powstawania dodatkowych wolnych elektronów następuje pod wpływem wzrostu temperatury w komorze spalania (jonizacja termiczna) i może być opisany za pomocą następującej reakcji [3]:

$$M + E_{ion} \leftrightarrow M^+ + e^- \quad (3)$$

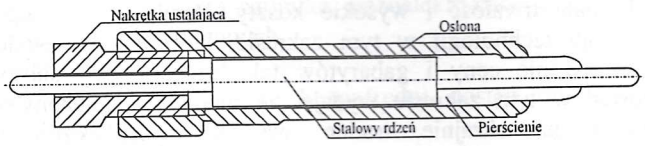
gdzie: M – dany rodzaj cząsteczki,
M^+ - jon dodatni,
E_{ion} – energia jonizacji.

Wytworzone w wyniku jonizacji chemicznej i termicznej jony [3] po krótkim czasie łączą się ponownie z elektronami i tworzą cząsteczki bardziej stabilne (4). Ich szybkość rekombinacji jest jednak różna.

$$H_3O^+ + e^- \leftrightarrow H_2O + H \quad (4)$$

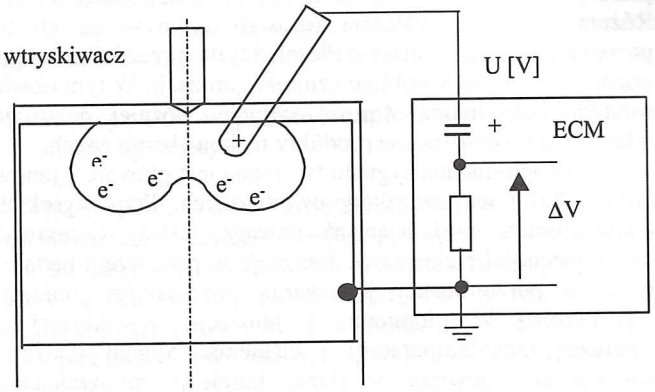
Pole elektryczne wytworzone przez źródło prądu stałego przez dodatnią elektrodę (czujnik jonizacyjny), będzie przyciągać elektrony wytworzone w komorze spalania, co spowoduje przepływ prądu. Powierzchnia tłoka i ścianek cylindra stanowi powierzchnię o ujemnym ładunku.

W przypadku silnika o zapłonie iskrowym pomiar prądu jonizacji jest stosunkowo prosty do zrealizowania bez większych modyfikacji silnika. Jako sondę pomiarową można w tym przypadku wykorzystać istniejącą świecę zapłonową. Pomiar następuje po okresie generowania przez świecę zapłonową iskry do zapalenia mieszanki, gdy energia w układzie zapłonowym została już wyładowana, a w komorze zachodzi proces spalania. W silniku o zapłonie samoczynnym umieszcza się czujnik jonizacyjny w oprawie świecy żarowej. Składa się on z metalowego rdzenia (przewodnik), stalowej osłony, nakrętki ustalającej i dwóch pierścieni, których zadaniem jest odizolowanie rdzenia od metalowej osłony (rys. 9).



Rys. 9. Widok czujnika jonizacyjnego dla silnika o zapłonie samoczynnym [3]

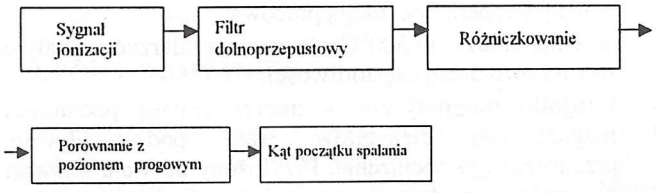
W celu pełnej oceny zjawiska wypadania zapłonów konieczne jest połączenie pomiaru prądu jonizacji z pomiarem ciśnienia w komorze spalania. Zanim nastąpi początek spalania doprowadza się do czujnika jonizacji napięcie (rys 10).



Rys. 10. Układ do pomiaru prądu jonizacji w silniku o zapłonie samoczynnym [3]

Przed rozpoczęciem procesu spalania na powierzchniach okładek kondensatora występuje napięcie U, które powoduje, że czujnik jonizacyjny posiada ładunek dodatni. W chwili rozpoczęcia procesu spalania paliwa w cylindrze silnika spalinowego następuje przepływ prądu od czujnika, przez komorę spalania, aż do powierzchni uziemienia (tłoka i ścianek cylindra). Bezwzględna wartość natężenia prądu przepływającego w obwodzie elektrycznym zależy od konstrukcji czujnika i przyłożonego do niego napięcia. Jej wartość jest na poziomie 1÷10 □A/V napięcia czujnika. Wartość natężenia prądu przepływającego przez obwód czujnika jonizacyjnego jest mierzona przez elektroniczny moduł sterujący silnika (ECM – *Electronic Control Module*) przy użyciu opornika, który powoduje powstanie sygnału napięciowego, zwanego sygnałem jonizacji. Sygnał ten jest proporcjonalny do napięcia czujnika jonizacyjnego i intensywności jonizacji w jego otoczeniu.

Początek spalania na podstawie pomiaru prądu jonizacji jest równoznaczny z chwilą, kiedy pierwsza pochodna sygnału jonizacji przyjmie wstępnie założony poziom progowy. Wartość poziomu progowego powinna być jak najbliższa wartości zerowej, ponieważ powoduje to, że pomiar jest wykonany szybko i precyzyjnie. Sygnał jonizacji jest przepuszczany przez filtr dolnoprzepustowy (rys. 11) zapewniając zminimalizowanie błędów wykrycia początku spalania (tym samym też jego braku). Proces tworzenia wolnych elektronów rozpoczyna się w chwili, kiedy zaczyna się proces spalania. Wykrycie tej chwili przebiega z pewnym opóźnieniem, które wynika z wymaganej zmiany w sygnale i z opóźnienia wynikającego z właściwości urządzeń elektronicznych.



Rys. 11. Definicja określenia początku spalania na podstawie pomiaru prądu jonizacji [3]

W fazie frontu płomienia sygnał jonizacji ma dużą amplitudę w związku z intensywną jonizacją, która ma miejsce w płomieniu. W płomieniu generowane są różne rodzaje jonów. Różnią się one trwałością (czasem życia – od chwili powstania do rekombinacji). Płomień tylko przez krótki okres czasu znajduje się w pobliżu czujnika jonizacji. W tym czasie wystąpi maksymalna wartość sygnału. Później pozostają tylko trwałe, zjonizowane produkty reakcji chemicznych.

Faza popłomienna sygnału tworzona jest głównie z jonów H_3O^+, CO^- i ich związków uwodnionych. Przy wysokich temperaturach, zakładając równowagę, należy oczekiwać także obecności elektronów. Jonizacja w przestrzeni będącej w fazie popłomiennej jest sumą pozostałości jonizacji wytworzonej w płomieniu i jonizacji, wynikającej z panującej tam temperatury i ciśnienia. Sygnał jonizacji zmienia się głównie, w dużej korelacji, ze zmianami temperatury. Ponieważ ciśnienie i temperatura są ze sobą ściśle związane, sygnał jonizacji w tej fazie nadąża za zmianami ciśnienia. Najmniejsza wartość prądu jonizacji występuje w czasie pracy silnika w warunkach biegu jałowego.

Aby z zarejestrowanego sygnału wydobyć wymagane cechy jest on poddawany przetwarzaniu analogowemu i cyfrowemu. Przy zastosowaniu układów analogowych usuwana jest składowa stała z sygnału. Informacje o procesie spalania zawarte są głównie w składowych o niskiej częstotliwości. Częstotliwość sygnału jest ograniczana przez zastosowanie odpowiedniego filtra. Sygnał jest parametryzowany do dwóch jego właściwości: wartości maksymalnej i całki z przebiegu w określonym oknie pomiarowym. Okno pomiarowe powinno być dostatecznie długie, aby zarejestrować także późne spalanie. Optymalna długość okna pomiarowego powinna wynosić około 360 stopni obrotu wału korbowego.

7. Wykrywanie wypadania zapłonów na podstawie pomiaru i analizy momentu obrotowego

Inną metodą wykrywania wypadania zapłonów jest pomiar chwilowej wartości momentu obrotowego na wale silnika. Mimo iż realizacja tego pomiaru jest rzadko stosowana w obecnie produkowanych silnikach, nowoczesne techniki pomiarowe potencjalnie umożliwiają jej implementację w rozwiązaniach seryjnych [13]. Pomiar momentu obrotowego może być realizowany za pomocą różnych czujników pomiarowych i przy wykorzystaniu różnych zjawisk fizycznych.

Wyróżnia się następujące metody i czujniki pomiaru chwilowej wartości momentu obrotowego na wale silnika:

- **Czujniki piezoelektryczne** – wykorzystują one efekt piezoelektryczny – generowanie ładunku pod wpływem siły odkształcającej krystaliczną strukturę elementu aktywnego. Wymagają stosowania układów kondycjonujących o dużej impedancji i nie nadają się do pomiarów statycznych. Wykazują małą wrażliwość na zmiany temperatury (mogą pracować w temperaturze do 500°C). Pozwalają mierzyć sygnały o stosunkowo dużej częstotliwości;
- **Czujniki magnetyczne** – mierzą zmianę podatności magnetycznej elementów wału pod wpływem przenoszonego obciążenia. Przyłożony do wału moment obrotowy powoduje skręcenie i powstanie naprężeń w wale oraz proporcjonalną zmianę mierzonego parametru (podatności magnetycznej). Pomiar tą metodą silnie zależy od temperatury i zmian szerokości szczeliny powietrznej;
- **Elementy pomiarowe naklejane na wał silnika** – wykonane z materiałów o właściwościach magnetycznych silnie zależnych od naprężeń mechanicznych. Do określenia zmian przepływu w szczelinie powietrznej służą w tym przypadku dodatkowe czujniki pola magnetycznego;
- **Analiza chwilowej wartości prędkości kątowej wału silnika** – stosowana do estymacji wartości momentu obrotowego. Stwierdzono korelację pomiędzy momentem obrotowym i różnicą kwadratów prędkości kątowej w wybranych położeniach wału korbowego [12];
- **Pomiar kąta skręcenia wału silnika** przy użyciu dwóch tarcz pomiarowych umieszczonych na jego końcach. Metoda ta jest stosunkowo tania i prosta w realizacji. Wykryte tą metodą skręcenie wału jest wprost proporcjonalne do momentu przenoszonego przez wał.

Moment obrotowy jest superpozycją dwóch czynników: ciśnienia wywołanego procesem spalania i dynamiką pozostałych wirujących elementów w silniku. Wykrywanie wypadania zapłonów tą metodą jest utrudnione w niektórych zakresach pracy silnika. Sytuacja taka ma miejsce przy wysokich prędkościach obrotowych silnika i wysokich obciążeniach. Przy wysokich prędkościach obrotowych, dominujący wpływ na dynamikę układu ma bezwładność mas wirujących i może ona „maskować" zmniejszanie się wartości momentu obrotowego w wyniku wypadania zapłonów. Ponadto przy małych obciążeniach silnika wpływ ciśnienia w komorze spalania na wartość momentu obrotowego także maleje i powoduje skutki podobne jak przy dużych prędkościach obrotowych.

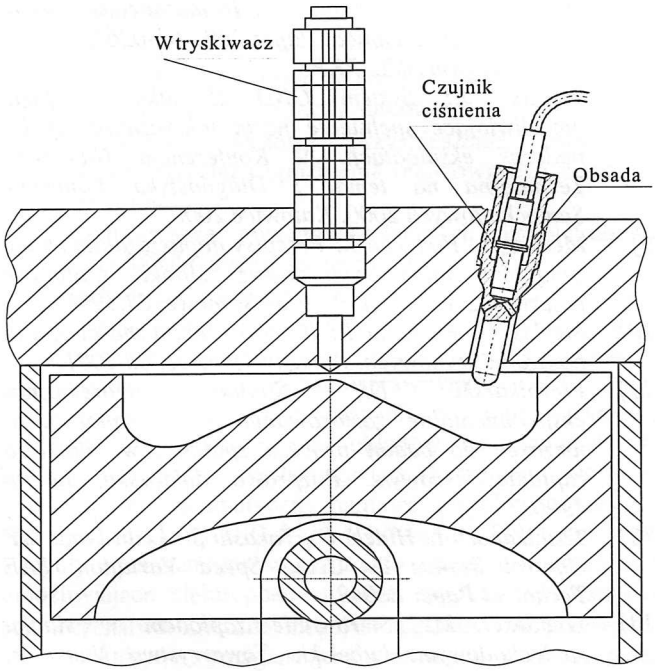
Oscylacyjny charakter odpowiedzi wartości momentu wywołany brakiem spalania w cylindrze może być bardzo podobny do innych przebiegów momentu w warunkach normalnej eksploatacji, np. wywołanych w chwili zmiany przełożenia (pozycji nastawnika w lokomotywie). Także ten stan przejściowy może pokryć odpowiedź w przypadku wystąpienia kolejnego braku spalania, w krótkim odstępie czasu po pierwszym.

8. Wykrywanie wypadania zapłonów na podstawie analizy wartości ciśnienia w komorze spalania

Metoda ta jest najlepszym wskaźnikiem oceny procesu spalania i przez to też wypadania zapłonów w silnikach spalinowych. Wartość ciśnienia w komorze spalania pozostaje w bezpośrednim związku z jakością przebiegu procesu spalania. Zastosowanie najczęściej dotychczas używanych bezpośrednich (inwazyjnych) czujników ciśnienia obarczone było poważnymi ograniczeniami, takimi jak mała trwałość i wysokie koszty. Pomimo znacznego rozwoju technologii w tym zakresie, które spowodowało zmniejszenie ceny i gabarytów takich czujników, dalszy postęp w tym zakresie wydaje się mocno ograniczony z uwagi na skrajnie trudne warunki pracy czujnika umieszczonego bezpośrednio w komorze spalania. Z tego powodu są prowadzone prace mające na celu opracowanie metod pośredniego pomiaru ciśnienia w komorze spalania, poprzez pomiar naprężeń w istniejących elementach silnika, np. w śrubach mocujących głowicę do bloku silnika. Dzięki integracji z istniejącymi elementami zmniejsza się koszt

takich rozwiązań, co zwiększa szansę ich praktycznej realizacji w produkcji seryjnej. Jednak jakość sygnału, otrzymywanego przez pośredni pomiar naprężeń w elementach silnika, jest często mniejsza od wymaganej. Pewnym rozwiązaniem jest integracja czujników pomiarowych ze świecą żarową albo wtryskiwaczem, przez co nie jest potrzebny dodatkowy otwór w głowicy silnika i jest zapewniony bezpośredni dostęp do komory spalania. Niestety prace te jak dotąd nie doprowadziły do opracowania rozwiązania, które zostałoby wdrożone do seryjnej produkcji.

Prowadzone są jednak prace, które mają na celu opracowanie czujników i metod pomiaru ciśnienia w komorze spalania, które spełniałyby zakładane wymagania. Jednym z możliwych rozwiązań jest pomiar naprężeń powstających w głowicy silnika za pomocą piezoelektrycznego czujnika montowanego w obsadzie świecy żarowej (rys. 12). Czujnik powinien mieć liniową charakterystykę odpowiedzi na zmiany ciśnienia w komorze spalania w oknie pomiarowym (-50 do +70° GMP). Istotny jest pomiar względny, a nie wartość absolutna, stąd dopuszczalne są niewielkie zmiany wzmocnienia i stałe przesunięcie sygnału, jeżeli nie przekroczą one pewnej określonej wartości. Zamontowany w obsadzie świecy żarowej czujnik jest poddawany oddziaływaniu, które jest efektem ciśnienia w komorze spalania, które dzięki elastycznej strukturze głowicy przenosi się na czujnik.



Rys. 12. Czujnik ciśnienia zamontowany w obsadzie świecy żarowej silnika o zapłonie samoczynnym

Zalety zastosowania czujnika piezoelektrycznego do badań ciśnień szybkozmiennych
w komorze spalania:

- nie jest wymagany bezpośredni dostęp do komory spalania,
- możliwość pracy do temperatury 500 °C,
- montaż na zewnątrz komory spalania uniezależnia pomiar od wpływu wielu możliwych przyczyn powstawania błędów, wynikających z występowania w komorze spalania ekstremalnych warunków termicznych i wysokich ciśnień (na przykład w stanach przejściowych pracy silnika),
- wysoka czułość na zmiany ciśnienia w komorze spalania.

Wadą tych czujników jest ich wysoki koszt, niewielka żywotność i wrażliwość na interferencje elektromagnetyczne.

9. Wykrywanie wypadania zapłonów z zastosowaniem metod optycznych

Jednym ze sposobów uzyskania informacji o zjawiskach zachodzących w komorze spalania są metody wizyjne [11]. Do tej kategorii metod należą badawcze metody optyczne, które polegają na rejestrowaniu lub pomiarze emisji elektromagnetycznej w zakresie promieniowania widzialnego i cieplnego. Metody wizyjne stosuje się do bezpośredniej obserwacji takich zjawisk jak przebiegi: tworzenia mieszanki palnej, ruchu ładunku wewnątrz komory spalania, spalania (samozapłon, rozwój płomienia). Do tych metod należą, najczęściej obecnie stosowane, stereografia i endoskopia video.

Zastosowanie metod endoskopowych umożliwiło pełną i ciągłą wizualizację zjawisk zachodzących wewnątrz silnika. Połączenie endoskopii z techniką video pozwoliło na obserwację i rejestrację procesów cyklicznych w czasie rzeczywistym, co stanowi nową jakość w procesie badania silników spalinowych. Metoda ta pozwala obserwować zjawiska w silniku wykorzystując ich cykliczność, zdjęcia są wykonywane w określonych położeniach wału korbowego silnika w kilku kolejnych cyklach.

W połowie lat osiemdziesiątych pojawiły się pierwsze doniesienia o zastosowaniu technik światłowodowych do badań silników spalinowych. Pomiar natężenia światła, który jest stosowany w tych metodach, jest najłatwiejszym sposobem uzyskania analogowego sygnału elektrycznego, jednakże jest on podatny na zakłócenia wynikające ze zmian temperatury i spowodowane przez zanieczyszczenia. Pomiar zmiany długości fali jest skomplikowany i wymaga wyposażenia toru pomiarowego w dodatkowe elementy optyczne. Pomiar częstotliwości zapewnia jednak bardzo dokładny i stabilny sygnał niosący informację o procesie spalania. Dzięki specyficznym właściwościom włókien światłowodowych jest możliwe także zastosowanie ich do pomiaru ciśnień szybkozmiennych w komorze spalania silnika. Wykorzystuje się w tym celu zmiany natężenia światła odbitego, które jest transmitowane światłowodami lub bezpośrednią modulację fazy sygnału wewnątrz włókna poddanego działaniu ciśnienia. Zastosowanie czujników z włóknem optycznym eliminuje wady, które posiadają czujniki piezoelektryczne, tzn. niewielką żywotność, wrażliwość na interferencje elektromagnetyczne. Wśród zalet czujników z włóknem optycznym należy wymienić też brak konieczności wykonania kalibracji i wysoki stopień liniowości odpowiedzi czujnika na zmiany ciśnienia w cylindrze silnika.

10. PODSUMOWANIE

Przedstawione metody wykrywania zjawiska wypadania zapłonów różnią się trudnością implementacji i kosztami zastosowania w spalinowej trakcji szynowej. Metoda bazująca na pomiarze chwilowej wartości prędkości obrotowej jest metodą relatywnie najtańszą, ponieważ nie wymaga instalowania dodatkowego osprzętu pomiarowego

na silniku. Jest ona powszechnie stosowana w obecnie produkowanych pojazdach samochodowych wyposażonych w system OBD II. Jest ona jednak podatna na zakłócenia i jest trudno o 100-procentową skuteczność w całym polu pracy silnika spalinowego. Podobnymi wadami są obarczone metody działające w oparciu o pomiar momentu obrotowego na wale silnika. Metody optyczne są wykorzystywane głównie w badaniach laboratoryjnych, ich uproszczone i dopracowane implementacje mogą znaleźć praktyczne zastosowania w przyszłości. Jedynie zastosowanie czujników z włóknem optycznym umożliwia obecnie zastosowanie ich do oceny wypadania zapłonów w silnikach o zapłonie samoczynnym dla praktycznych zastosowań, np. do diagnostyki pokładowej zjawiska wypadania zapłonów w lokomotywach spalinowych. Metoda oparta na pomiarze prądu jonizacji jest metodą nową i wydaje się podejściem dość perspektywicznym.

Ciekawa i obiecująca wydaje się też metoda pomiaru ciśnienia w kolektorze wylotowym, jednak wymagałaby ona montowania dodatkowych czujników ciśnienia, przez co jej upowszechnienie na szeroką skalę wydaje się mało prawdopodobne. Ilość metod dostępnych dla celów diagnostyki procesu spalania jest szeroka, wydaje się więc, że zarówno producenci pojazdów samochodowych, jak i spalinowych pojazdów stosowanych w trakcji szynowej nie powinni napotkać problemów ze spełnianiem nowych, bardziej wymagających przepisów prawa w tym zakresie.

Oznaczenia i skróty

CO tlenek węgla

DFT *Discrete Fourier Transform* – dyskretna transformacja Fouriera

ECM *Electronic Control Module* – elektroniczny moduł sterujący pracą silnika

EOBD *European On-board Diagnostics* – europejski pokładowy system diagnozowania pojazdów

η_o sprawność ogólna

GMP górny martwy punkt tłoka

HC *Hydrocarbons* – węglowodory

HDV *Heavy Duty Vehicle* – ciężki pojazd samochodowy

LDV *Light Duty Vehicle* – lekki pojazd samochodowy

M1 samochody osobowe o liczbie miejsc nie większej niż 9

N1 samochody ciężarowe o maksymalnej masie całkowitej nie większej niż 3500 kg
Klasa I – pojazdy o masie całkowitej nie większej niż 1250 kg, klasa II – pojazdy o masie całkowitej zawartej w przedziale $1250 < m \leq 1700$ kg, klasa III – pojazdy o masie całkowitej powyżej 1700 kg

NO_x tlenki azotu

OBD *On-Board Diagnostics* – pojazdowa diagnostyka pokładowa
Zespół programowo i sprzętowo realizowanych procedur i testów umożliwiających na bieżąco wykrywanie w czasie ruchu niesprawności poszczególnych systemów pojazdu

OBD II *On-Board Diagnostics II* – pokładowy system diagnozowania drugiej generacji
Norma zastosowana w USA przez EPA mająca na celu wykrywanie emisyjnie krytycznych uszkodzeń pojazdów we wczesnym stadium ich rozwoju

PM *Particulate Matter* – cząstki stałe

ZI silnik o zapłonie iskrowym

ZS silnik o zapłonie samoczynnym

Literatura

[1] *Birnbaum R., Truglia G.J.: Getting to Know OBDII. ISBN 0-9706711-0-5, USA 2000.*

[2] *Forster J., Lohmann A., Mezger M., Ries-Mueller K.: Advanced Engine Misfire Detection for SI-Engines. SAE Technical Paper 970855.*

[3] *Glavmo M., Spadafora P., Bosch R.: Closed Loop Start of Combustion Control Utilizing Ionization Sensing in a Diesel Engine. SAE Technical Paper 1999-01-0549.*

[4] *Gronowicz J.: Ochrona środowiska w transporcie lądowym. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1996.*

[5] *Gronowicz J., Kasprzak B.: Lokomotywy spalinowe. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1989.*

[6] *Mahieu V., Duponcheele P., Leduc B.: Misfire Detection on S.I. Engines, by Instantaneous Torque Analysis. SAE Technical Paper 2000-01-0367.*

[7] *Materiały firm AVL, PKP.*

[8] *Merkisz J.: System OBD II jako narzędzie umożliwiające spełnienie norm toksyczności spalin podczas eksploatacji. V Konferencja Naukowo-Techniczna na temat : Diagnostyka Pojazdów Samochodowych 2000. Katowice 2000.*

[9] *Merkisz J., Pielecha I.: Przepisy dopuszczalnej emisji związków toksycznych przez silniki spalinowe pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe, 01.1998.*

[10] *Merkisz J, Pielecha I.: Przepisy toksyczności spalin pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe, 03.2001.*

[11] *Piernikarski D.: Studium teoretyczno-eksperymentalne zastosowania metod optoelektronicznych do badań procesu spalania w silniku o zapłonie iskrowym. Rozprawa doktorska, Lublin 1996.*

[12] *Toshikanazu I., Hideki O., Takashi S.: Lean Limit A/F Control System by Using Speed Variation. SAE Technical Paper 86043.*

[13] *Wendeker M.: Sterowanie zapłonem w silniku samochodowym. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1999.*

[14] *Willimowski M., Isermann R.: A time Domain Based Diagnostic System for Misfire Detection in Spark-Ignition Engines by Exhaust-Gas Pressure Analysis. SAE Technical Papers 2000-01-0366.*