

Zdzisław Chłopek
Tomasz Szczepański *

AKTUALNY STAN WIEDZY I PROWADZONE BADANIA NA TEMAT DYNAMICZNYCH STANÓW PRACY SILNIKÓW SPALINOWYCH

W porównaniu z innymi dziedzinami wiedzy, nie istnieje zbyt wiele publikacji na temat pracy silników spalinowych w warunkach dynamicznych. Po części może to być spowodowane dużymi wymaganiami odnośnie do zaplecza technicznego przy prowadzeniu badań w tym zakresie [20, 52, 74]. Wydaje się jednak, że główną przyczyną takiego stanu rzeczy jest bardzo duża złożoność problemów występujących podczas pracy silnika w stanach dynamicznych. Istnieje wiele czynników wpływających na przebieg procesów dynamicznych, kształtujących zarówno warunki pracy silnika, jak i stany jego pracy [6, 11, 13, 59, 75] – co utrudnia w znacznym stopniu usystematyzowanie zjawisk dotyczących tej dziedziny. Ponadto wyniki pomiarów są bardzo często obarczone dużą niepewnością otrzymanych wartości [14, 38, 39, 40, 42, 57], co z kolei utrudnia interpretację wyników i wyciąganie jednoznacznych wniosków z prowadzonych badań.

Pomimo występowania powyższych problemów, powstały jednak pewne publikacje dotyczące tego zagadnienia. Niektóre z nich stanowią próbę opisanie problematyki dynamiki pracy silnika w sposób bardziej lub mniej całościowy, a inne dotyczą wąskiego, konkretnego problemu należącego do tej dziedziny. Poniżej przedstawiono przegląd zagadnień, jakie zostały poruszone w istniejących publikacjach na ten temat.

* prof. nadzw. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek
Instytut Transportu Samochodowego – Zakład Badań Ekonomicznych
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, tel.: (+48 22) 43 85 126

mgr inż. Tomasz Szczepański
Instytut Transportu Samochodowego – Zakład Procesów Diagnostyczno-Obsługowych
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, tel.: (+48 22) 43 85 520

Teoretyczne podstawy pracy silników w warunkach dynamicznych

Po pierwsze, należy tutaj wymienić prace, w których dokonuje się systematyki pojęć związanych z procesami dynamicznymi pracy silników spalinowych [9, 39]. Trzeba zauważyć, że w wielu publikacjach występuje duża niejednoznaczność lub wręcz niespójność pojęć. To sprawia, że niekiedy trudno jest porównywać ze sobą poszczególne prace badawcze. Dlatego publikacje poświęcone właściwemu nazewnictwu są szczególnie istotne.

Warto wyróżnić tutaj pracę prof. Z. Chłopka: Uwagi do badań silników spalinowych w stanach dynamicznych [9]. Stanowi ona usystematyzowanie pojęć charakterystycznych dla pracy silnika w stanach dynamicznych, takich jak: warunki pracy, stan pracy, proces wielkości fizycznej. Znajduje się tam również propozycja doboru kryteriów kwalifikacji procesu jako dynamicznego lub statycznego – zarówno jako podstawy teoretyczne, jak również jako praktyczna aplikacja przyjętych kryteriów.

Podobnej systematyki dokonał dr R. Longwic w pracy: Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania [39]. Chociaż zasadnicza część pracy poświęcona jest badaniom pracy silnika w czasie swobodnego przyspieszania, (o czym będzie mowa nieco dalej), jednak rozbudowany wstęp stanowi przegląd pojęć wykorzystywanych w czasie badań w warunkach dynamicznych.

Do podstaw teoretycznych należy również zaliczyć prace dotyczące metodologii badań silników w stanach dynamicznych. Niektóre z nich opisują wymagania stanowiskowe do prowadzenia badań [20, 52, 74], inne dotyczą samego procesu badawczego [6, 11, 13, 15, 20, 59, 74, 75], a jeszcze inne poświęcone są problematyce interpretacji wyników [14, 38, 39, 42, 57].

Warto wspomnieć o pracy prof. M. Cichego: Nowe metody badawcze silników spalinowych i środki techniczne ich realizacji [20], poświęconej opracowaniu metod, przyrządów oraz programów komputerowych do badań silników metodą wybiegu i rozbiegu.

Ciekawą publikacją jest książka dr W. Voosa: Dynamic engine testing [74]. Dokonano w niej podziału metod badania silników spalinowych w warunkach dynamicznych, a wśród nich szczególnie wyróżniono badania w warunkach testów symulacyjnych. Ponadto oceniano w niej przydatność różnych rodzajów hamulców do tego typu badań.

Również dr hab. J. Mamala z prof. J. Jantosem w pracy: Stanowisko dynamiczne do badań układu pojazd – silnik techniką symulacji stanowiskowej [52] przedstawili wymagania stanowiskowe do badań silników w warunkach dynamicznych.

W kontekście metodologii badań warto wspomnieć o pracach prof. Z. Chłopka: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie [6], Analiza stanów pracy silnika w warunkach eksploatacji trakcyjnej (wraz z dr Z. Danielczykiem i prof. S. Kruczyńskim) [11], Analiza dynamiczna emisji zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym (wraz z dr M. Pawlickim i dr R. Sypowiczem) [13] oraz: Testy dynamiczne do badań emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych (wraz z dr J. Rostkowskim) [15]. W pierwszej z nich znajduje się przegląd metod badań silników w warunkach, które mają symulować rzeczywiste warunki pracy. W drugiej i trzeciej publikacji przedstawiono systematykę warunków dynamicznych pracy silnika (m.in. na podstawie badań stanowiskowych w teście EKG – regulamin 83). Ostatnia wspomniana praca omawia natomiast i porównuje wybrane testy jezdne wykonywane na hamowni podwoziowej.

Praca dr J. Nuszowskiego i dr G. Thompsona: The influence of accelerator pedal position control during transient laboratory testing on heavy duty diesel engine [59] ukazuje z kolei wpływ sposobu naciskania pedału przyspieszenia w czasie testów jezdnych na wyniki pomiarów natężenia emisji substancji toksycznych. Rzuca to pewne światło na wrażliwość silnika na warunki dynamiczne oraz na potrzebę precyzyjnego doboru metodologii badań.

Do ciekawych wniosków doszedł też dr J. Wang (wraz ze współautorami) w pracy: Studies of diesel engine particle emissions during transient operations using an engine exhaust particle sizer. [75]. Opisany został w niej wpływ zastosowanego paliwa w dynamicznych testach jezdnych. Dla niektórych paliw przyspieszenie pojazdu nie miało większego znaczenia i natężenie emisji badanych substancji w spalinach było uzależniane głównie od momentu obrotowego i od prędkości obrotowej. Dla niektórych paliw jednak przyspieszenie pojazdu miało kluczowe znaczenie przy pomiarach tego typu.

W kontekście interpretacji wyników pomiarów przy badaniu silnika w warunkach dynamicznych konieczne trzeba wspomnieć o badaniach prof. Z. Chłopka, dr M. Pawlickiego i dr R. Sypowicza przedstawionych w pracy: Analiza statystyczna natężeń emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących użytkowanie dynamiczne [14]. Udowodniono w nich, że rozkład odchyłek standardowych wartości natężenia emisji zanieczyszczeń w spalinach (w czasie testów dynamicznych) od wartości oczekiwanej nie pokrywa się z rozkładem normalnym.

Podobnymi zagadnieniami zajmował się dr R. Longwic w pracach: Cycle – to cycle variations of the parameters of the combustion process in the

conditions of free running up of the diesel engine [42] oraz: Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania [39]. Stanowią one próbę odpowiedzi na pytanie, skąd bierze się niepowtarzalność wyników wartości mierzonych podczas pracy silnika w warunkach swobodnego rozpędzania.

Również prof. G. Litak (wraz ze współautorami) w pracy: Cycle-to-cycle oscillations of heat release in a spark ignition engine [38] poruszył problem zmienności i niepowtarzalności zarejestrowanych parametrów procesu spalania oraz wtrysku w silniku.

Porównanie stanów dynamicznych i stanów statycznych

Spora część literatury poświęcona jest porównaniu parametrów pracy silnika w stanach statycznych z parametrami pracy w stanach dynamicznych [5, 8, 10, 12, 33, 34, 39, 70]. Chociaż prace te zazwyczaj różnią się stawianymi celami badań, a więc ich wyniki trudno jest porównać, można z nich wyciągnąć bardzo ważny, wspólny wniosek. Procesy zachodzące w silniku w czasie pracy statycznej i dynamicznej są w dużej mierze różne, czego konsekwencją są różne wartości mierzonych parametrów, opisujących stan pracy silnika. Powyższy wniosek jest o tyle ważny, że uzasadnia celowość prowadzenia wszelkiego rodzaju prac zmierzających do poznania zależności rządzących pracą silnika w (słabo poznanych jak dotąd) stanach dynamicznych.

Prof. Z. Chłopek podjął się tego zagadnienia w pracach: Analiza emisji zanieczyszczeń z trakcyjnego silnika spalinowego [8], Statyczne testy badawcze silników spalinowych do symulacji testów dynamicznych [10] oraz (wraz z dr D. Domańskim): Optymalizacja algorytmów sterowania silnika o zapłonie samoczynnym [12]. W pierwszej przytoczonej pracy porównano różne dynamiczne testy jezdne, a otrzymywane wartości zestawiano z wartościami odpowiadającymi pracy w warunkach statycznych. Wyniki były zasadniczo różne. Druga publikacja dotyczy tworzenia testów statycznych w oparciu o statystyki występowania poszczególnych stanów pracy silnika w testach dynamicznych. Zwrócona została tam też szczególna uwaga na wrażliwość otrzymywanych wyników na kryteria doboru parametrów. W ostatniej pracy podjęto temat optymalizacji parametrów sterowania silnikiem w warunkach dynamicznych na podstawie doboru parametrów w warunkach statycznych.

Praca dr J. Blacka i prof. P. Eastwooda: Diesel engine transient control and emissions response during a European extra-urban drive cycle (EUDC) [5] przedstawia porównanie wyników emisji zanieczyszczeń w stanach

występujących w teście EUDC oraz w podobnych stanach statycznych, gdzie kryterium podobieństwa były: zbliżone wartości momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz zużycie paliwa. Wykazano również, że optymalizacja dawkowania paliwa oraz sterowanie zaworem EGR na postawie stanów statycznych nie jest korzystna.

Dr R. Kee i dr G. Blair (Acceleration test method for a high performance two-stroke racing engine [33]) zajmowali się pracą silnika w warunkach rozpędzania zdeterminowanych przez parametry zamontowanego koła masowego. Powstałe w ten sposób warunki dynamiczne porównywano z odpowiadającymi im warunkami statycznymi. Również tutaj widoczna była wyraźna różnica w wynikach dla statycznych i dynamicznych stanów pracy silnika.

Dr J. Kropiwnicki natomiast poświęcił swoją pracę: Wykorzystanie matematycznego modelu silnika w zadaniach optymalizacji sterowania układem napędowym pojazdu [34] zagadnieniu modelowania silnika i optymalizacji procesów sterowania. Tworzył przy tym zarówno modele statyczne, jak i dynamiczne, co umożliwiło porównanie zjawisk zachodzących w silniku w tak odmiennych stanach.

Podobnego problemu dotyczy (omawiana już wcześniej) praca dr R. Longwica: Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania [39]. Wyniki pomiarów ciśnienia w cylindrze są w niej porównywane w przypadku pracy w warunkach statycznych oraz dynamicznych.

Prof. A. Ubysz natomiast skupił się w swojej pracy: Sprawność efektywna silnika ZI samochodu osobowego w dynamicznych warunkach pracy [70] na porównaniu sprawności silnika w warunkach statycznych i w warunkach dynamicznych. W tym przypadku warunki dynamiczne były reprezentowane przez przyspieszanie silnika i wykazana została różnica między pracą dynamiczną i statyczną.

Warto ponadto zauważyć, że dr R. Longwic w swojej pracy: Analiza procesu ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach nieustalonych [40] stwierdził, że praca silnika występuje głównie w warunkach nieustalonych.

Do podobnych wniosków doszedł dr C. Rakopoulos i dr E. Giakoumis w pracy: Diesel Engine Transient Operation - Principles of Operation and Simulation Analysis [67] stwierdzając, że silnik pracuje zazwyczaj w stanach dynamicznych, a wśród nich głównie w stanach nieustalonych.

Badanie silników w testach dynamicznych

Istniejące testy dynamiczne składają się z sekwencji zmiennych warunków dynamicznych, w czasie których mierzone są wybrane parametry opisujące stan pracy silnika. Następnie mierzone wielkości uśrednia się dla całego testu. Istnieje sporo prac dotyczących badań silnika w takich warunkach [1, 5, 16, 17, 59, 60, 71, 75, 78, 79, 80].

Spośród niewymienionych dotychczas publikacji warto wspomnieć o pracy pana prof. Z. Chłopka i P. Laskowskiego: Charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczone metodą Monte Carlo [80]. Na podstawie istniejących dynamicznych testów jezdnych wykonywano operacje statystyczne oparte na metodzie Monte Carlo, generującej przebiegi pseudolosowe. Dokonano w ten sposób między innymi zestawienia wartości natężenia emisji zanieczyszczeń z wartościami prędkości średnich samochodu.

Praca dr H. Ogawy (wraz ze współautorami): Cycle-to-cycle transient characteristics of exhaust gas emissions from a diesel engine with different increasing and decreasing load patterns [60] skupiała się natomiast na doborze parametrów samego testu jezdnych. W tym celu generowano różne testy o łatwo powtarzalnym charakterze (jak interwałowa oraz „schodkowa” zmiana obciążeń) i porównywano emisję poszczególnych składników w spalinach.

Prof. A. Ubysz w pracy: Optymalizacja zużycia paliwa w samochodzie osobowym w ruchu na obszarze zabudowanym [71] przedstawił problem optymalizacji parametrów pracy silnika w obrębie testów jezdnych.

Z kolei dr V. Bermudeza (wraz ze współautorami) w pracy: Transient particle emission measurement with optical techniques [79] poruszył problem pomiaru cząstek stałych w testach jezdnych. Porównano tam metodę pomiaru optycznego wykonywaną w poszczególnych chwilach trwania testu z metodą całkowającą polegającą na osadzaniu cząstek na filtrach.

Publikacja dr J. Arregle (oraz współautorów): Procedure for engine transient cycle emission testing in real time [78] dotyka natomiast zagadnienia modyfikacji metod pomiarowych w teście UDC.

Wiele badań zostało poświęconych porównaniu średnich parametrów pracy silnika w testach jezdnych przy zmianie wybranego czynnika w kolejnych testach – na przykład rodzaju paliwa [1, 16, 17].

To zagadnienie poruszają między innymi prace prof. Z. Chłopka: Analiza emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym w warunkach dynamicznych (wraz z dr J. Rostkowskim) [16] oraz: Ekologiczne skutki zasilania autobusów miejskich paliwem biogazowym [17]. Pierwsza praca mówi o wpływie zawartości siarki w zastosowanych paliwach na właściwości

emisyjne silnika o zapłonie samoczynnym w ramach testów dynamicznych. Druga natomiast pokazuje wpływ zastosowania paliw biogazowych w autobusach miejskich w przypadku testu jeźdźnego ETC.

Podobne zagadnienia można znaleźć w pracy dr O. Armasa: Diesel emissions from an emulsified fuel during engine transient operation [1], w której autor porównuje właściwości silnika w testach dynamicznych dla zwykłego paliwa oraz dla paliwa będącego emulsją wodną.

Chociaż większość tego typu testów wykonuje się na stanowisku hamownianym (ze względu na lepszą powtarzalność zadawanych warunków pracy silnika), prowadzone są też badania o podobnym charakterze w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego [18, 55].

Prof. Z. Chłopek przedstawił takie zagadnienie w pracy: Analiza zanieczyszczeń z silników autobusowych w warunkach rzeczywistego użytkowania [18]. Wówczas układ poboru spalin wraz z analizatorami składu spalin oraz urządzeniami rejestrującymi znajdował się na pokładzie autobusu. Pojazd natomiast poruszał się w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego.

Podobnym problemem zajmował się również prof. J. Merkiś w pracy: Badanie emisji spalin pojazdu zasilanego gazem ziemnym w rzeczywistych warunkach ruchu [55]. Urządzenia pomiarowe były przymocowane do poruszającego się po drodze samochodu. Dodatkowo w wymienionej pracy poruszony został problem zasilania samochodu gazem ziemnym w tak przygotowanych warunkach.

Modelowanie pracy silnika lub jego części w wybranych stanach dynamicznych

Bardzo duża część publikacji podejmuje problem modelowania silnika pracującego w warunkach dynamicznych. Często takie modelowanie odbywa się jedynie dla niektórych, wybranych stanów dynamicznych.

Można wyróżnić tutaj tworzenie modeli w postaci matematycznego opisu zależności pomiędzy parametrami traktowanymi jako sygnały wejściowe oraz parametrami traktowanymi jako sygnały wyjściowe z silnika [2, 3, 4, 7, 21, 22, 23, 34, 35, 54, 61, 76, 77].

Bardzo ciekawą pracą jest rozprawa prof. Z. Chłopka: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych [7], dotycząca modelowania procesów emisji spalin. Dokonano w niej systematyki zjawisk wpływających na proces emisji spalin, przedstawiono metodykę modelowania warunków pracy silnika oraz procesów

determinujących emisję spalin. Powyższych zabiegów dokonano w oparciu o zjawiska zachodzące w dynamicznych testach jezdnych. Opracowano również metodologię syntezy testów statycznych symulujących testy dynamiczne.

Dr Z. Bazari w pracy: Diesel exhaust emissions prediction under transient operating conditions [2] opracował program komputerowy do szukania zależności pomiędzy wielkościami opisującymi emisję spalin, a parametrami determinującymi pracę silnika. W pracy (w ramach programu komputerowego) stworzono, model procesów spalania nadający się do opisu zjawisk w warunkach dynamicznych.

Prof. M. Bernhardt w książce: Silniki Samochodowe (wraz z dr S. Dobrzyńskim i prof. E. Lothem) [3] oraz w artykule: Praca silnika w warunkach nieustalonych (z prof. S. Kruczyńskim) [4] omówił między innymi problem modelowania pracy silnika spalinowego w warunkach dynamicznych.

Prof. M. Cichy prace: Model energetyczny systemu silnik - odbiornik w stanach nieustalonych [21], Silniki o działaniu cyklicznym. Podstawy teorii i działania [22] oraz: Model silnika spalinowego w formie grafów wiązań (GW) [23] poświęcił problemowi modelowania silników spalinowych. W pierwszych dwóch publikacjach znajdują się propozycje metodologii modelowania pracy silnika odniesione do zagadnienia wykorzystania pracy silnika w warunkach nieustalonych (przyspieszania) do diagnostyki. Ostatnia praca dotyczy modelowania silnika za pomocą metody grafów wiązań.

Problematyką modelowania silnika w warunkach dynamicznych zajmował się również dr J. Kropiwnicki w pracy: Modeling of Reciprocating Engine Transient Torque [35]. Poszukiwano w niej zależności między momentem obrotowym i prędkością obrotową, a stopniem nacisku na pedał przyspieszenia przy uwzględnieniu dynamicznych procesów parametrów pracy silnika w chwilach czasu poprzedzających rozpatrywany czas pracy.

Również prof. M. Wendeker w pracy: Dynamiczny model silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim [76] przedstawił problemy modelowania pracy silnika w stanach dynamicznych oraz wykorzystania metody przyspieszeń do diagnozowania bieżącego stanu technicznego silnika.

Dr R. Wijetunge w pracy: Dynamic behavior of a high-speed, direct injection diesel engine [77] porównywał natomiast charakterystyki silnika przy dużych prędkościach jazdy samochodu, podczas realizacji typowych zadań dynamicznych silnika.

Niekiedy stosowane są do tego celu niestandardowe metody matematyczne [26, 43, 45, 51, 54, 62].

Dr J. Malama i prof. J. Jantos w pracach: Odwzorowanie charakterystyk silnika za pomocą sztucznych sieci neuronowych [51] oraz: Charakterystyki eksploatacyjne silnika Samochodowego [54] przedstawili propozycje modelowania dynamicznych charakterystyk pracy silnika za pomocą sztucznych sieci neuronowych.

Dr Y. He i dr C. Rutland natomiast przedstawili w pracy: Neural cylinder model and its transient results [26] propozycję modelowania za pomocą sieci neuronowych procesów zachodzących wewnątrz cylindra.

Dr R. Longwic zajmował się podobną tematyką w pracach: Dynamic Aspects of Work of the Diesel Engine [43], Modeling the Combustion Process in the Diesel Engine with the use of Neural Networks [44] oraz: Modelowanie przebiegu średniego ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach rozpędzania z wykorzystaniem sieci neuronowych [45]. Modelowaniu za pomocą sztucznych sieci neuronowych poddane były procesy zachodzące w cylindrze podczas pracy silnika w warunkach swobodnego rozpędzania.

Innym podejściem jest modelowanie poszczególnych procesów (m.in. termodynamicznych) zachodzących w silniku podczas pracy w zadanych warunkach – w tym także w warunkach dynamicznych [24, 25, 26, 32, 49, 57, 63, 64, 65, 66, 67, 73].

Dr E. Giakoumis w pracach: Cylinder wall insulation effects on the first and second law balances of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions [24] oraz: Parametric study of transient turbocharged diesel engine operation from the second-law perspective (wraz z dr. C. Rakopoulosem) [25] przedstawił model procesów termodynamicznych zachodzących w cylindrze silnika doładowanego o zapłonie samoczynnym.

Dr L. Jarrier (wraz ze współautorami) natomiast przedstawił w pracy: Warm-up of a D.I. diesel engine experiment and modeling [32] problem modelowania procesu nagrzewania się silnika.

Dr hab. W. Lotko, dr R. Longwic i dr K. Górski w pracy: Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo-tert butylovym [49] modelowali procesy wtryskowe w cylindrze w stanach dynamicznych.

Z kolei dr S. Nakayama (wraz ze współautorami) zajmował się w pracy: An application of a model based combustion control to transient cycle-by-cycle

diesel combustion [57] problemem modelowania zarówno procesów wtryskowych, jak i procesów termodynamicznych w silniku.

Warto również wspomnieć o licznych pracach dr C. Rakopoulosa i dr E. Giakoumisa: Availability analysis of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions [63], Review of thermodynamic diesel engine simulations under transient operating conditions [64], Simulation and analysis of a naturally aspirated IDI Diesel engine under transient conditions comprising the effect of various dynamic and thermodynamic parameters [65], Simulation and exergy analysis of transient diesel engine operation [66], które poświęcili budowaniu termodynamicznego modelu silnika spalinowego.

Wyróżnić należy także prace poświęcone modelowaniu poszczególnych elementów silnika, optymalizujące ich parametry do pracy w stanach dynamicznych [28, 34, 37, 58, 73] oraz prace modelujące procesy sterowania silnikiem [30, 36, 53].

Spośród nieprzytaczanych dotychczas publikacji warto wspomnieć o pracy dr D. Hountalasa i dr A. Kouremenosa: Development of a fast and simple simulation model for the fuel injection system of diesel engines [28]. Przedstawiono w niej problematykę modelowania wtrysku paliwa w dynamicznych stanach pracy silnika.

Podobne zagadnienie poruszył dr J. Li (wraz ze współautorami) w pracy: Individual cylinder control of diesel engines [37], modelując wtrysk paliwa.

Prof. G. Vachtsevanos i prof. E. Boukas w pracy: Modeling and control of transient engine conditions [73] poruszyli również problem modelowania silnika w warunkach dynamicznych, ale odnieśli to zagadnienie do optymalizacji parametrów wtrysku przy zimnym silniku.

Dr K. Narusawa (wraz ze współautorami) natomiast w pracy: An EGR control method for heavy-duty diesel engines under transient operations [58] podjęli się problemu modelowania zaworu recyrkulacji spalin dla dynamicznych stanach pracy silnika.

W kontekście modelowania procesów sterowania warto przytoczyć także pracę dr J. Malamy i prof. J. Jantosa: Weryfikacja algorytmów sterowania samochodowym układem napędowym z wykorzystaniem sieci neuronowych [53], w której porównywano istniejące schematy sterowania silnikiem z parametrami sterowania proponowanymi przez wytrenowaną w dynamicznych warunkach pracy silnika sztuczną sieć neuronową.

Szczegółowa analiza pracy silnika w wybranych warunkach dynamicznych

Często podejmowanym tematem jest również szczegółowy opis zjawisk występujących w silniku w czasie pracy w wybranych warunkach dynamicznych [19, 27, 29, 31, 33, 35, 39, 41, 47, 48, 50, 56, 68, 69, 70, 72, 81].

Prof. J. Jantos i dr J. Mamala w pracy: Zużycie paliwa podczas ruchu samochodu ze zmienną prędkością [31] poruszyli problem różnych wartości natężenia zużycia paliwa w stanach dynamicznych reprezentowanych przez zmienność prędkości obrotowej silnika.

Podobnym zagadnieniem zajmował się prof. A. Ubysz w pracy: Wyznaczanie kwazistacjonarnych warunków pracy silnika ZI w samochodzie [72]. Analizowano w niej sprawność silnika w różnych warunkach rozpędzania. Założono przy tym, że obciążenie będzie niezmienne w przypadku stałego ustawienia urządzenia sterującego silnikiem, a różnice pomiędzy stanami dynamicznymi będzie można rozróżnić na podstawie zmienności prędkości obrotowej silnika. Wprowadzono w tym celu wskaźnik dynamiczności w postaci średniej wartości pochodnej prędkości obrotowej.

Prof. M. Cichy natomiast w pracy: Badania silników samochodowych w stanach nieustalonych za pomocą wymuszeń sygnałem zdeterminowanym [19] przedstawił zachowanie się silnika w stanach dynamicznych realizowanych za pomocą zmienności parametru sterowania.

Również dr N. Miyamoto (wraz ze współautorami) w pracy: Time series analysis of diesel exhaust gas emissions under transient operation [56] przedstawił badania silnika w warunkach zmienności prędkości obrotowej. Tym razem jednak badania wykonywano z załączonym hamulcem, co determinowało osiągnięte przyspieszenia.

Ciekawe zagadnienie podjął dr H. Head (wraz ze współautorami) w pracy: Noise of diesel engine under transient conditions [27]. Analizowano w niej dźwięki emitowane z silnika spalinowego w stanach dynamicznych reprezentowanych przez rozpędzanie silnika.

Dr T. Resch i dr B. Klarin natomiast w pracy: Analysis of engine dynamic under transient run-up conditions [68] przedstawili problem dynamiki silnika w trakcie jego rozruchu.

Podobnym zagadnieniem zajmował się dr T. Kniaziewicz wraz z prof. L. Piasecznym i prof. R. Zadragiem w pracy: Toksyczność spalin okrętowego silnika spalinowego podczas jego rozruchu [81], przy czym problemy dynamiki w trakcie rozruchu rozpatrywał na bazie silnika okrętowego.

Bardzo często w tego typu pracach badawczych rozpatrywane są poszczególne cykle (suwy) pracy silnika na podstawie tworzonych wykresów indyktorowych [39, 40, 42, 50, 58, 69].

Trzeba w tym kontekście wspomnieć o pracy dr W. Lotko, dr R. Longwic i dr K. Górskiego: Analiza wybranych parametrów procesu spalania oleju napędowego w stanach nieustalonych pracy silnika spalinowego [50], w których badano zachowanie silnika w czasie procesu swobodnego rozpędzania, przy jednoczesnej rejestracji ciśnienia indykowanego w cylindrze. Wyniki porównywano dla zastosowania różnych paliw.

Dr J. Serrano (wraz ze współautorami) natomiast w pracy: Cycle-to-cycle diesel combustion characterization during engine transient operation [69] wykonywał rejestrację wykresów indyktorowych w stanach dynamicznych przy stałej, dużej prędkości, ale przy zmiennym obciążeniu silnika.

Niejednokrotnie w takich warunkach porównuje się różne paliwa [29, 41, 47, 48, 50].

Nie sposób w tym miejscu nie wspomnieć o najstarszej pracy z tej dziedziny (z 1933 r.) dr A. Jante: Spezifische Schnellaufzahlen [29], w której przedstawiono ocenę jakości paliw silnikowych w odniesieniu do uzyskiwanych przyspieszeń pojazdu.

Podobne zagadnienie przedstawił dr R. Longwic, w pracy: Analiza wpływu mieszanin paliwa roślinnego z olejem napędowym na efektywność pracy silnika wysokoprężnego w warunkach nieustalonych [41]. Oceniano w niej zachowanie silnika w procesie swobodnego rozpędzania przy zastosowaniu paliwa o różnych proporcjach oleju napędowego i oleju rzepakowego.

Dr W. Lotko w pracach: Dynamiczne własności pracy silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego nowymi rodzajami paliw węglowodorowych [47] oraz: Nieustalone stany pracy silnika zasilanego paliwem rzepakowym (wraz z dr R. Longwicem) [48] w podobnych warunkach badał zachowanie silnika zasilanego innymi paliwami.

Istnieją również prace wykorzystujące informacje o parametrach pracy silnika w wybranych warunkach dynamicznych do diagnozowania stanu technicznego silnika [3, 4, 21, 22, 61, 76].

Spośród nieomawianych jeszcze publikacji warto wspomnieć o pracy prof. A. Piętaka: Diagnozowanie silników o ZS na podstawie przebiegu procesu przejściowego [61], w której przedstawiono metodologię postępowania przy diagnozowaniu silników spalinowych na podstawie zarejestrowanego procesu prędkości obrotowej silnika w czasie jego swobodnego rozpędzania.

Podobny problem przedstawiono w pracy prof. M. Cichego: Model energetyczny systemu silnik - odbiornik w stanach nieustalonych [21], w której zastosowano metodę przyspieszeń w diagnostyce silników spalinowych.

Jak widać, istniejące opracowania dotyczą bardzo wielu zagadnień związanych z dynamiką pracy silnika. Większość z nich dotyczy bardzo szczegółowych tematów, badając jedynie wybrane aspekty zachowania silnika w dynamicznych warunkach. Choć są to bardzo ciekawe badania, wynikające z nich wnioski trudno uogólnić do całościowego opisu zmiennych procesów pracy silników spalinowych. Inne prace, o bardziej ogólnym charakterze, stanowią cenną podstawę do prowadzenia kolejnych prac badawczych w tej dziedzinie, jednak zdecydowanie nie wyczerpują tematu dynamiki silników.

Nie istnieją jak dotąd opracowania opisujące kompleksowo to zagadnienie, dokonujące systematycznego przeglądu warunków i stanów dynamicznych, omawiające parametry pracy silników w poszczególnych stanach, czy próbujące opisać ogólne zależności zauważalne w całościowym spojrzeniu na poszczególne stany dynamiczne.

LITERATURA

- [1] Armas O.: Diesel emissions from an emulsified fuel during engine transient operation, Paper No. 2008-01-2430, Wydawnictwo SAE 2008,
- [2] Bazari Z.: Diesel exhaust emissions prediction under transient operating conditions, Paper No. 2008-01-2430, Wydawnictwo SAE 2008,
- [3] Bernhardt M., Dobrzyński S., Loth E.: Silniki Samochodowe, WKiŁ, Warszawa, 1988,
- [4] Bernhardt M., Kruczyński S.: Praca silnika w warunkach nieustalonych, Technika Motoryzacyjna nr 4, 1982,
- [5] Black J., Eastwood P. i inni: Diesel engine transient control and emissions response during a European extra-urban drive cycle (EUDC), Paper No. 2007-01-1938, Wydawnictwo SAE 2007,
- [6] Chłopek Z.: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie, Archiwum Motoryzacji 4/2010, s. 187-210,
- [7] Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych, Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999,

- [8] Chłopek Z.: Analiza emisji zanieczyszczeń z trakcyjnego silnika spalinowego, *Mechanics and Mechanical Engineering* 1/2005. Volume 9. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2005. 43–68,
- [9] Chłopek Z.: Uwagi do badań silników spalinowych w stanach dynamicznych, *Silniki spalinowe* nr 4/2010,
- [10] Chłopek Z.: Statyczne testy badawcze silników spalinowych do symulacji testów dynamicznych, *KONES 2000*. 26 Międzynarodowa Konferencja Silników Spalinowych. Naęczów 2000,
- [11] Chłopek Z. Danilczyk W., Kruczyński S.: Analiza stanów pracy silnika w warunkach eksploatacji trakcyjnej, *23rd International Conference of Combustion Engines, Journal of KONES* 1997,
- [12] Chłopek Z., Domański D.: Optymalizacja algorytmów sterowania silnika o zapłonie samoczynnym, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów / Politechnika Warszawska*, 2007, z. 3/66, s. 69-76,
- [13] Chłopek Z., Pawlicki M., Sypowicz R.: Analiza dynamiczna emisji zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej* 3(58)/2005, s. 95–102,
- [14] Chłopek Z., Pawlicki M., Sypowicz R.: Analiza statystyczna natężeń emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego w warunkach symulujących użytkowanie dynamiczne, *Archiwum Motoryzacji, Wydawnictwo Naukowe PTNM*, 2005,
- [15] Chłopek Z., Rostkowski J.: Testy dynamiczne do badań emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych, *The Sixth International Symposium „Combustion Engines in Military Applications”*, Jurata 2003,
- [16] Chłopek Z., Rostkowski J.: Analiza emisji zanieczyszczeń z silników o zapłonie samoczynnym w warunkach dynamicznych, *Archiwum Motoryzacji* 3/2003,
- [17] Chłopek Z.: Ekologiczne skutki zasilania autobusów miejskich paliwem biogazowym, *XIX Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe Motoryzacyjne Problemy Ochrony Środowiska*, 2011,
- [18] Chłopek Z.: Analiza zanieczyszczeń z silników autobusowych w warunkach rzeczywistego użytkowania, *Journal of KONES Internal Combustion Engines* 2003, vol. 10, 34,
- [19] Cichy M.: Badania silników samochodowych w stanach nieustalonych za pomocą wymuszeń sygnałem zdeterminowanym, *ZNPG 32 Mechanika*. Gdańsk 1970,
- [20] Cichy M.: Nowe metody badawcze silników spalinowych i środki techniczne ich realizacji, grant badawczy KBN, 1995-1998,

- [21] Cichy M.: Model energetyczny systemu silnik - odbiornik w stanach nieustalonych, Symposium „Modelowanie cyfrowe w technice samochodowej”, Kazimierz Dolny, 1989,
- [22] Cichy M.: Silniki o działaniu cyklicznym. Podstawy teorii i działania, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1989,
- [23] Cichy M., Kropiwnicki J., Makowski S.: Model silnika spalinowego w formie grafów wiązań (GW), Silniki Spalinowe 2004 R. 43 nr 2 s. 40-47,
- [24] Giakoumis E.: Cylinder wall insulation effects on the first- and second law balances of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions, Energy Conversion and Management 48, Wydawnictwo Science Direct 2007,
- [25] Giakoumis E., Rakopoulos C.: Parametric study of transient turbocharged diesel engine operation from the second-law perspective, Paper No. 2004-01-1679, Wydawnictwo SAE 2004,
- [26] He Y., Rutland C.: Neural cylinder model and its transient results, Paper No. 2003-01-3232, Wydawnictwo SAE 2003,
- [27] Head H., Wake J.: Noise of diesel engine under transient conditions, Paper No. 800404, Wydawnictwo SAE 1980,
- [28] Hountalas D., Kouremenos A.: Development of a fast and simple simulation model for the fuel injection system of diesel engines, Wydawnictwo Elsevier, Advances in Engineering Software Vol. 29, No. 1, 1998,
- [29] Jante A.: Spezifische Schnellaufzahlen, ATZ 24, 1933,
- [30] Jantos J.: Zintegrowane sterowanie samochodowym, spalinowym układem napędowym o przełożeniu zmiennym w sposób ciągły, Studia i Monografie, z. 141, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2003,
- [31] Jantos J., Mamala J.: Zużycie paliwa podczas ruchu samochodu ze zmienną prędkością. Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych, PAN oddział w Krakowie, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, Kraków 1999, z.18 str.121-126, 1999,
- [32] Jarrier L., Champoussin J.: Warm-up of a D.I. diesel engine experiment and modeling, Paper No. 2000-01-0299, Wydawnictwo SAE 2000,
- [33] Kee R., Blair G.: Acceleration test method for a high performance two-stroke racing engine, Paper No. 942478, Wydawnictwo SAE 1994,
- [34] Kropiwnicki J.: Wykorzystanie matematycznego modelu silnika w zadaniach optymalizacji sterowania układem napędowym pojazdu, Materiały konf. Konferencja Naukowa MECHANIKA 2005. Gdańsk, 4 luty 2005. s. 139-145,

- [35] Kropiwnicki J.: Modeling of Reciprocating Engine Transient Torque, Materiały konf. Bałttechmasz, Kaliningrad 20-23.06.2006,
- [36] Kropiwnicki J., Makowski S.: Wyznaczanie sygnału sterowania silnikiem dla zadanych parametrów ruchu pojazdu, Materiały konf. II Konferencja Naukowo-Techniczna "Problemy jakościowe, energetyczne i eksploatacyjne w maszynach cieplnych", Bydgoszcz,
- [37] Li J., Ming Z., Xihao L.: Individual cylinder control of diesel engines, Paper No. 2002-01-0199, Wydawnictwo SAE 2002,
- [38] Litak G., Kamiński T., Czarnigowski J., Żukowski D., Wendeker M.: Cycle-to-cycle oscillations of heat release in a spark ignition engine, Wydawnictwo Springer, Meccanica 42, 2007,
- [39] Longwic R.: Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania, Politechnika Lubelska, Lublin 2011,
- [40] Longwic R.: Analiza procesu ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach nieustalonych, Monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005,
- [41] Longwic R.: Analiza wpływu mieszanin paliwa roślinnego z olejem napędowym na efektywność pracy silnika wysokoprężnego w warunkach nieustalonych, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1997,
- [42] Longwic R.: Cycle – to cycle variations of the parameters of the combustion process in the conditions of free running up of the diesel engine, Silniki Spalinowe, SC-092, 2009,
- [43] Longwic R.: Dynamic Aspects of Work of the Diesel Engine, Paper No. 2007-01-4210 , Wydawnictwo SAE 2007,
- [44] Longwic R.: Modeling the Combustion Process in the Diesel Engine with the use of Neural Networks, Paper No. 2008-01-2446, Wydawnictwo SAE 2008,
- [45] Longwic R.: Modelowanie przebiegu średniego ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach rozpędzania z wykorzystaniem sieci neuronowych, Silniki Spalinowe 2007,
- [47] Lotko W.: Dynamiczne własności pracy silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego nowymi rodzajami paliw węglowodorowych, Politechnika Radomska 2003. ISBN 83-7351-136-9,
- [48] Lotko W., Longwic R.: Nieustalone stany pracy silnika zasilanego paliwem rzepakowym, Monografia, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, Radom 1999,
- [49] Lotko W., Longwic R., Górski K.: Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo – tert butylowym, Monografia, WNT 2010,

- [50] Lotko W., Longwic R., Górski K.: Analiza wybranych parametrów procesu spalania oleju napędowego w stanach nieustalonych pracy silnika spalinowego, *Journal o KONES, Internal Combustion Engines*, Vol. 7, No 1-2, 2000,
- [51] Mamala J., Jantos J.: Odzworowanie charakterystyk silnika za pomocą sztucznych sieci neuronowych, *Zeszyt naukowy Politechniki Opolskiej, seria Mechanika*, Opole 2005 (w druku), 2005,
- [52] Mamala J., Jantos J.: Stanowisko dynamiczne do badań układu pojazd - silnik techniką symulacji stanowiskowej, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna AUTOPROGRES'98, Jachranka 1998, ss. 19-27, 1998,
- [53] Mamala J., Jantos J.: Weryfikacja algorytmów sterowania samochodowym układem napędowym z wykorzystaniem sieci neuronowych, *Badania symulacyjne w technice samochodowej*, Lublin 2005,
- [54] Mamala J., Jantos J.: Charakterystyki eksploatacyjne silnika samochodowego, *Journal of KONES Internal Combustion Engines* 2005, vol. 12, 1-2,
- [55] Merkisz J.: Badanie emisji spalin pojazdu zasilanego gazem ziemnym w rzeczywistych warunkach ruchu, *Silniki spalinowe*, 2/2010, s. 56-65,
- [56] Miyamoto N., Ogawa H., Shibuya M., Fuwa N.: Time series analysis of diesel exhaust gas emissions under transient operation, Paper No. 930976, Wydawnictwo SAE 1993,
- [57] Nakayama S., Ibuki T., Hosaki H., Tominaga H.: An application of a model based combustion control to transient cycle-by-cycle diesel combustion, Paper No. 2008-01-1311, Wydawnictwo SAE 2008,
- [58] Narusawa K. i inni: An EGR control method for heavy-duty diesel engines under transient operations, Paper No. 900444, Wydawnictwo SAE 1990,
- [59] Nuskowski J., Thompson G.: The influence of accelerator pedal position control during transient laboratory testing on heavy duty diesel engine, Paper No. 2009-01-00619, Wydawnictwo SAE 2009,
- [60] Ogawa H., Miyamoto N., Rekswardojo I.: Cycle-to-cycle transient characteristics of exhaust gas emissions from a diesel engine with different increasing and decreasing load patterns, Paper No. 970750, Wydawnictwo SAE 1997,
- [61] Pięta A.: Diagnostowanie silników o ZS na podstawie przebiegu procesu przejściowego, *Monografia*, Poznań, 1998,
- [62] Qiao J., Dent J., Garner C.: Diesel engine modeling under steady and transient conditions using a transputer based concurrent komputer, Paper No. 922226, Wydawnictwo SAE 1992,
- [63] Rakopoulos C., Giakoumis E.: Availability analysis of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions, *Wydawnictwo Elsevier, Energy* vol. 29, 2004,

- [64] Rakopoulos C., Giakoumis E.: Review of thermodynamic diesel engine simulations under transient operating conditions, Paper No. 2006-01-0884, Wydawnictwo SAE 2006,
- [65] Rakopoulos C., Giakoumis E.: Simulation and analysis of a naturally aspirated IDI Diesel engine under transient conditions comprising the effect of various dynamic and thermodynamic parameters, Wydawnictwo Pergamon, Energy Convers. Mgmt vol. 39, No. 5/6, 1998,
- [66] Rakopoulos C., Giakoumis E.: Simulation and exergy analysis of transient diesel engine operation, Wydawnictwo Pergamon, Energy vol. 22, No. 9, 1997,
- [67] Rakopoulos C., Giakoumis E.: Diesel Engine Transient Operation - Principles of Operation and Simulation Analysis, Wydawnictwo Springer 2009,
- [68] Resch T., Klarin B.: Analysis of engine dynamic under transient run-up conditions, Paper No. 2004-01-1454, Wydawnictwo SAE 2004,
- [69] Serrano J. i inni: Cycle-to-cycle diesel combustion characterization during engine transient operation, Paper No. 2001-01-3262, Wydawnictwo SAE 2001,
- [70] Ubysz A.: Sprawność efektywna silnika ZI samochodu osobowego w dynamicznych warunkach pracy, Diagnostyka, PTDT, nr 1(45)/2008,
- [71] Ubysz A.: Optymalizacja zużycia paliwa w samochodzie osobowym w ruchu na obszarze zabudowanym, IV Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej, Olsztyn 9-12.09.2008,
- [72] Ubysz A.: Wyznaczanie kwazistacjonarnych warunków pracy silnika ZI w samochodzie, Czasopismo Techniczne M, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej,
- [73] Vachtsevanos G., Boukas T.: Modeling and control of transient engine conditions, Wydawnictwo SAE, 2001-01-3231, 2001,
- [74] Voos W.: Dynamic engine testing, Paper No. 920254, Wydawnictwo SAE 1992,
- [75] Wang J., Storey J., Domingo N., Huff S., Thomas J., West B.: Studies of diesel engine particle emissions during transient operations using an engine exhaust particle sizer., Aerosol Science and Technology. Volume 40, Issue 11. November 2006,
- [76] Wendeker M.: Dynamiczny model silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 1991,
- [77] Wijetunge R.: Dynamic behavior of a high-speed, direct injection diesel engine, Paper No. 1999-01-0829, Wydawnictwo SAE 1999,
- [78] Arregle J., Bermudez V., Serrano J., Fuentes E.: Procedure for engine transient cycle emission testing in real time, Experimental Thermal And Fluid Science. 2006. Volume 30, no5. 485-496,

- [79] Bermudez V., Lucjan J., Serrano J., Pla B.: Transient particle emission measurement with optical techniques, Measurement Science and Technology 2008 - 19 065404,
- [80] Chłopek Z., Laskowski P.: Charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczone metodą Monte Carlo, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability Nr 1 (21)/2004. 3-13,
- [81] Kniaziewicz T., Piaseczny L., Zadrag R.: Toksyczność spalin okrętowego silnika spalinowego podczas jego rozruchu, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej 1999 nr 2. 51-63.

