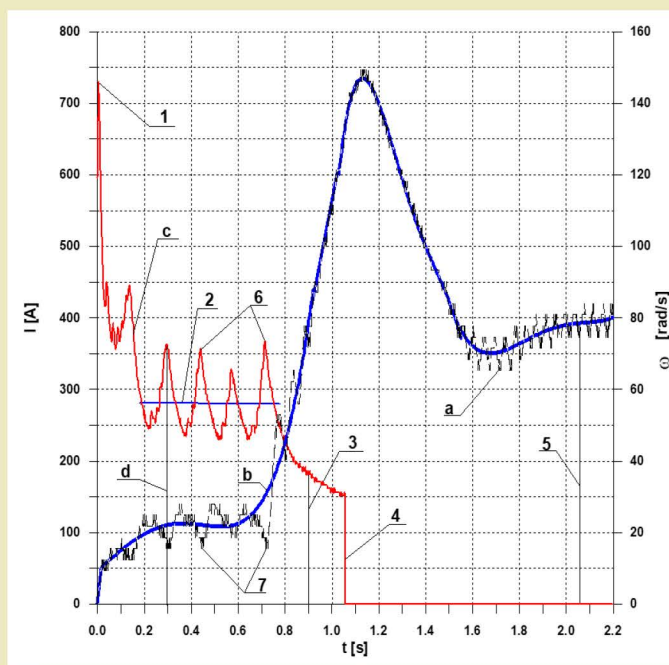


Paweł Drożdziel

Rozruch samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym



*Mojej Rodzinie:
Córce Paulinie i Żonie Aleksandrze oraz zmarłym Rodzicom*

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Paweł Drożdziel

Rozruch samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2020

Recenzent:

dr hab. inż. Piotr Folęga, profesor uczelni, Politechniki Śląskiej

dr hab. inż. Marcin Ślęzak, profesor Instytutu Transportu Samochodowego

Monografia ta powstała w ramach programu Regionalna Inicjatywa Doskonałości finansowego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie umowy nr 30/RID/2018/19 realizowanego przez Politechnikę Lubelską w Lublinie.

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-442-4

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59

Druk: DjaF – 30-092 Kraków, ul. Kmietowicza 1/1
www.djaf.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Streszczenie	7
Abstract	8
Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	9
Wstęp	11
1. Oddziaływanie transportu samochodowego na środowisko naturalne człowieka	13
1.1. Rola transportu drogowego w działalności współczesnej gospodarki	13
1.2. Zagrożenia generowane przez transport samochodowy	14
2. Emisja składników toksycznych spalin silników spalinowych	21
2.1. Przyczyny występowania emisji składników toksycznych spalin	21
2.2. Składniki toksyczne spalin	22
3. Proces rozruchu samochodowego silnika	
o zapłonie samoczynnym	29
3.1. Rozruch a działanie silnika o zapłonie samoczynnym	29
3.2. Czynniki decydujące o właściwościach rozruchowych silnika	
o zapłonie samoczynnym	31
4. Tworzenie i spalanie mieszanki palnej podczas rozruchu silnika	
o zapłonie samoczynnym	41
4.1. Tworzenie mieszanki palnej rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym ...	41
4.2. Spalanie mieszanki w czasie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym ...	43
5. Procesy tribologiczne występujące w trakcie rozruchu silnika	
o zapłonie samoczynnym	47
5.1. Opory ruchu w trakcie uruchamiania samochodowego silnika	
spalinowego	47
5.2. Tarcie i zużycie silnika spalinowego podczas jego rozruchu	49
6. Rozruch samochodowego silnika spalinowego rozrusznikiem	
elektrycznym	57
6.1. Działanie rozrusznika elektrycznego podczas rozruchu	
silnika spalinowego	57
6.2. Warunki pracy rozrusznika podczas rozruchu samochodowego	
silnika spalinowego	60

7. Rozruch silnika spalinowego podczas użytkowania samochodu.....	71
7.1. Podział temperatur rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym warunkach użytkowania samochodu.....	71
7.2. Etapy rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym.....	72
7.3 Warunki użytkowania samochodu a warunki rozruchu jego silnika spalinowego	84
7.4. Widmo rozruchu samochodowego silnika spalinowego.....	95
8. Podsumowanie	99
Literatura.....	101

Rozruch samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym

Streszczenie

W niniejszej monografii składającej się z ośmiu rozdziałów, będącej podsumowaniem wieloletnich badań naukowych prowadzonych przez autora w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistej eksploatacji samochodowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym, szczegółowo opisano złożony wieloetapowy proces rozruchu tych silników.

Stwierdzono, że podczas trwania rozruchu silnika spalinowego obserwuje się zwiększoną emisję składników toksycznych w spalinach, wzrasta intensywność zużywania się par tribologicznych silnika oraz występują nagłe przeciążenia w elektrycznym układzie rozruchowym samochodu.

Występowanie tych negatywnych zjawisk zależy od wielu parametrów, które szczegółowo omówiono w niniejszej monografii. Jednym z najważniejszych jest temperatura w momencie wystąpienia rozruchu. Przy obniżeniu jej wartości obserwuje się bowiem wydłużenie czasu trwania rozruchu silnika spalinowego. Pociąga to za sobą intensyfikację występujących negatywnych zjawisk przedstawionych powyżej. Stwierdzono, że w trakcie pierwszych dziennych rozruchów silnika o zapłonie samoczynnym obserwuje się najniższe wartości temperatur, które znacznie odbiegają od wartości rejestrowanych przy następnych rozruchach.

Wartość temperatury rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym zależy od dziennej organizacji pracy środków transportu w danym systemie przewozowym. Dlatego podkreślono, że właściwe planowanie tras przejazdu samochodów oraz prac załadunkowo-wyładunkowych jest istotne nie tylko z punktu widzenia ekonomicznej efektywności transportu, ale także przyczynia się do ograniczenia jego negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, rozruch, samochód, eksploatacja

Start-up of a Vehicle Diesel Engine

Abstract

This monograph, comprising eight chapters, constitutes a summary of multiannual scientific research conducted by the author under laboratory conditions and in the course of the actual operation of diesel engines, describing the complex multi-step start-up process of these engines.

During the start-up of an internal combustion engine, an increased emission of toxic components, increased tribological wear of engine friction pairs as well as sudden overload in the electric starting system were noted.

The occurrence of these negative phenomena depends on numerous parameters, which were thoroughly discussed in this monograph. The temperature during the engine start-up constitutes one of the most important parameters. This is because decreased temperature extends the start-up time of an internal combustion engine, which in turn intensifies the afore-mentioned negative phenomena. It was observed that the lowest temperatures occur during the first daily start-up of a diesel engine, greatly differing from the values noted in the course of subsequent start-ups.

The start-up temperature of a diesel engine depends on the daily organization of means of transport in a given transit system. Therefore, appropriate planning of vehicle routes as well as loading-unloading operations is important not only from the point of view of economic efficiency, but also contributes to the mitigation of its negative impact on the natural environment.

Keywords: diesel engine, start-up, vehicle, operation

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

CFPP	– <i>Cold Filter Plugging Point</i> (temperatura zablokowania zimnego filtra),
CO	– tlenek węgla,
CO ₂	– dwutlenek węgla,
EGR	– <i>Exhaust Gas Recirculation</i> (układ recyrkulacji spalin),
F	– test Fishera-Snedecora,
FAME	– <i>Fatty Acid Methyl Esters</i> (estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego),
GMP	– górne martwe położenie tłoka,
HC	– węglowodory,
H ₂ O	– woda,
<i>I</i>	– natężenie prądu [A],
<i>K</i>	– zawartość FAME w mieszaninie z olejem napędowym,
LC	– liczba cetanowa,
<i>L_{den}</i>	– day-evening-night noise level (wskaźnik poziomu hałasu) [dB],
<i>m</i>	– intensywność zużycia [mg/min] lub [mg/h],
NO _x	– tlenki azotu,
<i>n</i>	– prędkość obrotowa [obr/min],
<i>o</i>	– obroty wału korbowego,
°OWK	– stopnie obrotu wału korbowego [°],
<i>P</i>	– moc [W] lub [kW],
<i>p</i>	– ciśnienie [MPa],
PM	– <i>Particulate Matter</i> cząstki stałe ,
<i>q</i>	– dawka paliwa [mm ³ /wtrysk],
<i>r</i>	– współczynnik korelacji liniowej,
<i>r</i> ²	– współczynnik determinacji,
<i>S_e</i>	– błąd standardowy estymacji,
<i>s</i>	– droga przejazdu samochodu [km],
SMD	– <i>Sauter Mean Diameter</i> (średnica Sautera) [mm],
SO _x	– tlenki siarki,
<i>t</i>	– czas jako zmienna [s] lub [min],
<i>T</i>	– temperatura [°C],
TPC	– tłok–pierścienie tłokowe-cylinder,
<i>U</i>	– napięcie [V],
<i>z</i>	– zużycie [mm],
<i>l</i>	– współczynnik nadmiaru powietrza [-],
<i>φ</i>	– kąt obrotu [°],
<i>ω</i>	– prędkość kątowna [rad/s].

Wstęp

Jednym z najważniejszych stanów funkcjonowania samochodowego silnika spalinowego w czasie jego eksploatacji jest proces rozruchu. W jego wyniku silnik doprowadzany jest do samodzielnego działania na biegu jałowym.

Podczas rozruchu samochodowego silnika spalinowego zachodzi wiele złożonych negatywnych zjawisk. Po pierwsze występuje zwiększona intensywność zużywania się par tribologicznych silnika spalinowego, będąca wynikiem opóźnienia funkcjonowania układu olejenia, dużej lepkości oleju smarującego, zwłaszcza w obniżonych temperaturach oraz zbyt małej prędkości względnej przemieszczających się powierzchni jego elementów i zespołów. Po drugie podczas procesu rozruchu, ze względu na niekorzystne warunki tworzenia oraz spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej w cylindrach silnika spalinowego, występuje znaczna emisja składników toksycznych spalin. Po trzecie występują przeciążenia w układzie elektrycznym samochodu będące wynikiem wysokiego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu. Odpowiadające im spadki napięcia na zaciskach akumulatora prowadzić mogą do nieprawidłowości w działaniu układów elektronicznych samochodu.

Dlatego też na proces rozruchu samochodowego silnika spalinowego zwraca się szczególną uwagę. Wyrazem tego są prowadzone badania oraz publikowane prace naukowe. Niniejsza monografia jest próbą przybliżenia tego procesu. Przemyślenia zawarte w niniejszym opracowaniu są wynikiem ponad 25-letnich badań naukowych prowadzonych przez jej autora.

Monografia składa się z ośmiu rozdziałów oraz wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów spisu literatury. W rozdziale pierwszym monografii przedstawiono oddziaływanie transportu samochodowego na środowisko naturalne człowieka opisując zagrożenia generowane przez środki transportu. Rozdział drugi prezentuje przyczyny występowania emisji składników toksycznych spalin. W trzecim rozdziale monografii opisano proces rozruchu silnika spalinowego oraz omówiono czynniki decydujące o właściwościach rozruchowych silnika o zapłonie samoczynnym. W czwartym rozdziale przedstawiono zagadnienia dotyczące tworzenia oraz spalania mieszanki palnej podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym. W kolejnym piątym rozdziale monografii przedstawiano procesy tribologiczne występujące w trakcie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, opory ruchu w trakcie uruchamiania silnika oraz proces tarcia i zużycie silnika spalinowego podczas jego rozruchu.

Rozdział szósty zawiera wyniki badań własnych autora dotyczących rozruchu silnika spalinowego rozrusznikiem elektrycznym, działaniem oraz warunkami pracy samochodu. W siódmym rozdziale monografii zawarto wyniki badań silników spalinowych w warunkach rzeczywistego użytkowania samochodów w jednym z przedsiębiorstw świadczących usługi przewozowe. W rozdziale ósmym dokonano podsumowania przeprowadzonych badań oraz otrzymanych wyników obliczeń.

Monografia ta powstała w ramach programu *Regionalna Inicjatywa Doskonałości* finansowego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie umowy nr 30/RID/2018/19 realizowanego przez Politechnikę Lubelską w Lublinie.

Autor

1. Oddziaływanie transportu samochodowego na środowisko naturalne człowieka

1.1. Rola transportu drogowego w działalności współczesnej gospodarki

Transport możemy zdefiniować jako celowe przemieszczanie w czasie i w przestrzeni, przy wykorzystaniu odpowiednich narzędzi zwanych środkami transportu, przedmiotów transportu jakimi są: ludzie, inne organizmy żywe oraz ładunki nieożywione. Należy podkreślić, że w literaturze zagadnienia, istnieje wiele różnorodnych definicji transportu [54,80,119,137].

Przemieszczanie przedmiotów transportu wynika z różnorodnych potrzeb transportowych współczesnego człowieka. Potrzeby transportowe realizowane są przez: przedsiębiorstwa transportowe, firmy logistyczne, przedsiębiorstwa spedycyjne oraz inne jednostki obsługujące lub wspomagające przemieszczanie się przedmiotów transportu, a także w ramach transportu indywidualnego [17,80]. Potrzeby te związane są z realizacją ustalonych celów i zadań wynikających z organizacji życia społecznego dla każdej określonej grupy ludzi oraz funkcjonowania całej gospodarki narodowej.

Należy w tym miejscu stwierdzić, że gospodarka narodowa jest to całokształt działalności gospodarczej prowadzonej na terytorium danego państwa [80]. Celem każdej gospodarki narodowej, jest zaspokojenie bieżących i przyszłych potrzeb ludzi żyjących w społeczeństwie poprzez produkcję dóbr i usług oraz ich sprawiedliwy podział między członków społeczeństwa.

Przyspieszenie rozwoju gospodarczego wzmaga zapotrzebowanie na usługi transportowe, a rozwój środków i infrastruktury transportu pobudza rozwój gospodarki. Siła tych związków zależy od struktury gospodarki i charakteru głównych czynników wpływających na jej rozwój. Wraz z rozwojem gospodarki opartej na wiedzy zyskuje na znaczeniu jakościowy wymiar rozwoju transportu [44,80,119].

Usługą transportową nazywamy produkt transportu, który ma charakter nieuprzedmiotowiony, gdyż podczas jej wykonywania nie powstaje nowy produkt w sensie oraz formie fizycznej, zmienia się tylko miejsce przebywania przedmiotu transportu. Produkcja w usłudze transportowej powstaje w tym samym czasie co konsumpcja, co wskazuje na jedność miejsca i czasu. Czynności wchodzące w skład danej usługi transportowej związane są przede wszystkim z przewozem, załadunkiem, wyładunkiem oraz ewentualnie przeładunkiem przedmiotu transportu. Często występują tutaj dodatkowe usługi w postaci: spedycji, przygotowania danego przedmiotu do transportu, dokonywania odpraw celnych, składowania, pobierania opłat itd. [69,80,119,125].

Przy klasyfikacji rodzajów transportu ze względu na środowisko transport samochodowy zaliczamy do transportu lądowego [148]. Poszczególne rodzaje środków transportu przemieszczają się w obrębie swoich sieci transportowych. Przy czym przez sieć transportową rozumiemy zespół różnorodnych dróg, szlaków, węzłów i punktów transportowych na danym obszarze geograficznym. Sieci transportowe stanowią jeden z elementów całego systemu transportowego. Najważniejsze parametry charakteryzujące sieć transportową to długość sieci (długość tras przewozu dla poszczególnych rodzajów transportu) oraz liczba węzłów transportowych [17,74,119,125]. Oczywiście jest, że w wybranych węzłach lub punktach transportowych sieci te mogą się ze sobą przecinać, a w miejscach tych następuje przeładunek przedmiotów transportu pomiędzy różnymi rodzajami środków transportu.

W każdej przestrzeni gospodarczej można wyróżnić istnienie dwóch układów. Pierwszym z nich jest układ osadniczy, a drugim lokalizacja przestrzenna produkcji. Należy wyraźnie powiedzieć, że rozmieszczenie ludzi w przestrzeni jest pierwotne w stosunku do rozmieszczenia się produkcji. Jednak obydwa układy nie powstają w przestrzeni oddzielnie i niezależnie od siebie, lecz przenikają się i wzajemnie oddziałują.

Czynnikiem łączącym układ osadniczy z lokalizacją produkcji jest sieć transportowa, czyli przestrzenne rozmieszczenie szlaków różnych typów transportu w tym lądowego transportu drogowego.

1.2. Zagrożenia generowane przez transport samochodowy

Podczas wykonywania przejazdów transportowych niezbędnych do funkcjonowania współczesnej gospodarki narodowej obserwuje się występowanie wielu negatywnych oddziaływań na środowisko, a tym samym pośrednio i bezpośrednio na człowieka. Zaliczyć możemy do nich: emisję szeregu niebezpiecznych i szkodliwych związków chemicznych oraz pyłów do atmosfery ziemskiej przez drogowe środki transportu, ciągłą rozbudowę infrastruktury drogowej, hałas generowany w trakcie wykonywania przewozu oraz wypadki z udziałem człowieka [18,63,67,147,158].

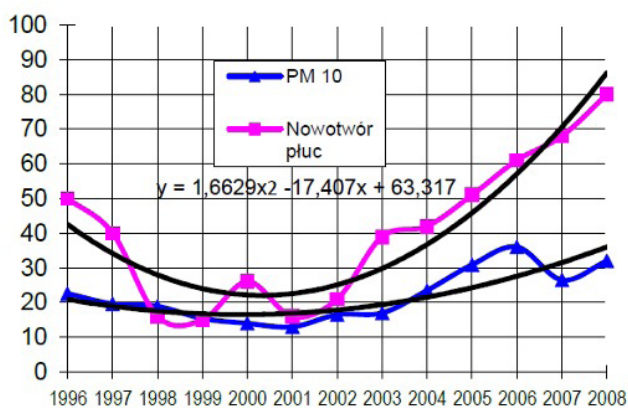
Obserwowana emisja niebezpiecznych i szkodliwych związków chemicznych pochodzi przede wszystkim ze spalania w silnikach spalinowych ropy naftowej oraz produktów naftowych powstałych w procesie jej przetwarzania. Podczas procesu spalania emitowane są do otaczającej nas atmosfery zanieczyszczenia o różnorodnym składzie chemicznym [154,158].

Podczas procesu spalania występuje emisja znacznych ilości zanieczyszczeń do powietrza atmosferycznego. Emisja ta zależy przede wszystkim od rodzaju oraz przebiegu procesu spalania paliwa w silniku spalinowym. Podczas procesu jego spalania emitowane są przede wszystkim: dwutlenek siarki (SO_2), tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), dwutlenek węgla (CO_2), cząstki stałe (PM), a także pyły zawierające metale ciężkie (np. ołów, cynk, kadm) [97].

Kolejnym zanieczyszczeniem emitowanym do atmosfery ziemskiej w trakcie transportu są różnorodne rodzaje pyłów generowane nie tylko w procesie spalania paliw (cząstki stałe PM), ale także w trakcie poszczególnych elementów procesu przewozowego. Mogą to być np. produkty zużycia infrastruktury liniowej (nawierzchnia dróg), opon samochodów czy też elementów ciernych hamulców, sprzęgieł itd., czy też pył wzbijany przez drogowe środki transportu w trakcie realizacji zadań przewozowych oraz podczas prac załadunkowo-rozładunkowych. Główne frakcje pyłu, którego zawartość w powietrzu jest określana, to pył zawieszony typu PM 2,5 i PM 10 [97,158].

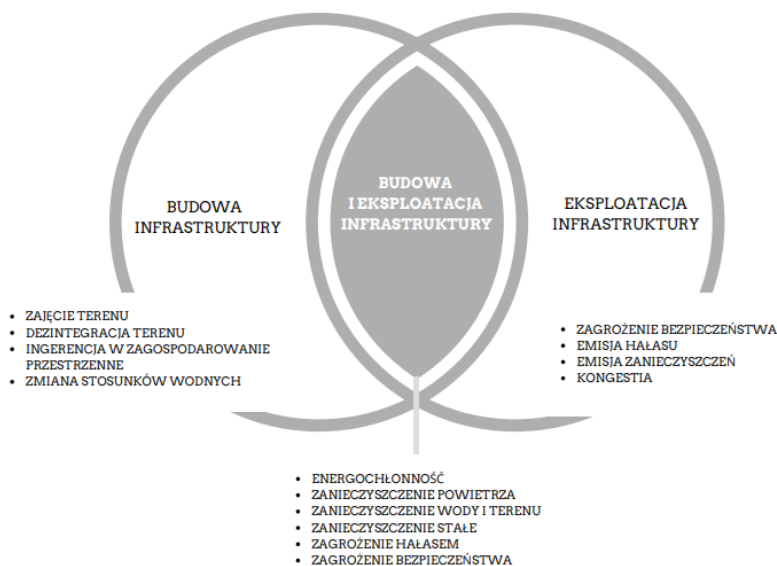
Pył typu PM 2.5 to aerozole atmosferyczne, w których średnica cząsteczek nie jest większa niż 2.5 mikrometra. Tego rodzaju pył zawieszony, jest uznawany za najgroźniejszy dla zdrowia człowieka, gdyż jest bardzo drobny i może z łatwością przedostać się pośrednio do krwiobiegu. To właśnie ten rodzaj pyłu jest odpowiedzialny za: nasilenie astmy, osłabienie czynności płuc, nowotwory płuc, gardła i krtani, zaburzenia rytmu serca, zapalenie naczyń krwionośnych, miażdżycę, czy niższą masą urodzeniową dziecka i jego problemy z oddychaniem, w przypadku, gdy było ono narażone na kontakt z tym typem pyłu w życiu płodowym.

Pył typu PM10 to mieszanina zawieszonych w powietrzu cząsteczek o średnicy nie przekraczającej 10 mikrometrów, który wpływa negatywnie na układ oddechowy człowieka. Ten rodzaj pyłu zwiększa ryzyko wystąpienia zawału serca oraz udaru mózgu, odpowiada za ataki kaszlu, świszczący oddech, nasilenie astmy czy ostre zapalenie oskrzeli. Pył typu PM 10 jest szkodliwy dla człowieka także z uwagi na zawartość takich elementów jak benzopireny - silnie rakotwórczy, furany, dioksyny (substancje rakotwórcze i metale ciężkie) [49,89,97,156]. Związek pomiędzy zawartością pyłu typu PM 10 na zachorowalność na nowotwory płuc zilustrowano na rysunku 1.1.



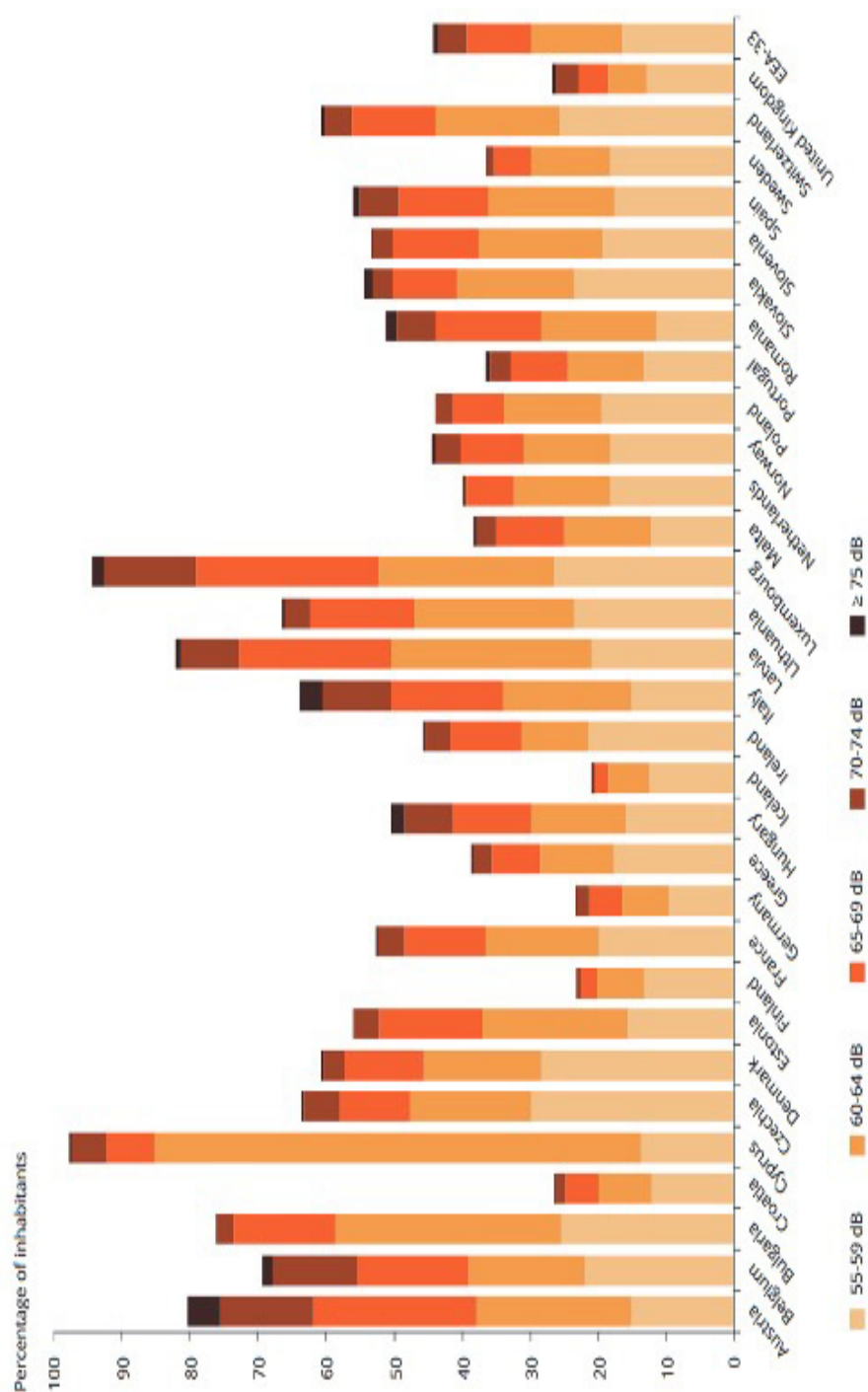
Rys. 1.1. Wpływ zawartości pyłu typu PM 10 na zachorowalność na nowotwory płuc [76]

Obserwujemy także negatywne oddziaływanie drogowej infrastruktury transportowej, podczas jej budowy i eksploatacji jej obiektów na środowisko naturalne człowieka [123,135] co zilustrowano na rysunku 1.2.



Rys. 1.2. Wpływ infrastruktury drogowej na środowisko naturalne człowieka [123]

Systematyczny rozwój liniowej i punktowej infrastruktury, szczególnie lądowych sieci transportowych, uzależniony jest przede wszystkim od dostępności terenu pod jej budowę. Budowa nowej oraz rozbudowa istniejącej infrastruktury transportowej praktycznie zawsze pociąga za sobą naruszenie środowiska naturalnego i jego nieodwracalną zmianę przez: zajęcie terenu, jego dezintegrację, trwałą ingerencję w zagospodarowanie przestrzenne oraz możliwość zakłócenia istniejących stosunków wodnych. Dodatkowo budowa i eksploatacja infrastruktury transportowej wiąże się z zanieczyszczeniem atmosfery, wody i gleby oraz emisją hałasu. Działania te przyczyniają się też do zniekształcenia naturalnej rzeźby terenu oraz dewastacji szaty roślinnej. Negatywne dla środowiska naturalnego skutki spowodowane rozwojem infrastruktury transportu są wielorakie nie tylko ze względu na ich rodzaj, ale też na czas trwania i zasięg geograficzny. Można mówić o pośrednim i bezpośrednim wpływie infrastruktury transportu na środowisko. Z pośrednim mamy do czynienia wówczas, gdy zdegradowany element środowiska wykazuje swoją niszczącą aktywność po pewnym czasie. Natomiast bezpośredni wpływ oznacza natychmiastowe zanieczyszczenie czy zniekształcenie ekosystemu. Określając efekty rozwoju infrastruktury transportu w odniesieniu do środowiska, należy wziąć pod uwagę wzajemne powiązania poszczególnych elementów środowiska oraz oddziaływanie pośrednie i wtórne, wynikające z tych powiązań. W przypadku tych efektów może również wystąpić kumulacja związana z degradacją kilku elementów środowiska jednocześnie, ponieważ otaczające nas środowisko jest systemem złożonym – z wieloma powiązaniami, wzajemnymi oddziaływaniami i sprzężeniami zwrotnymi [123,135].



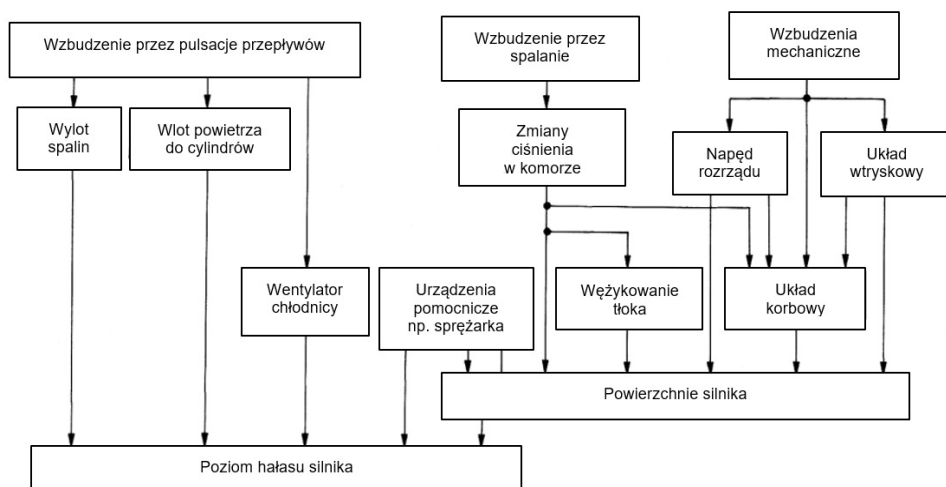
Rys. 1.3 Szacunkowy odsetek mieszkańców obszarów miejskich narażonych na hałas w roku 2017 pochodzący z transportu samochodowego [157]

Do kolejnych zagrożeń generowanych przez transport samochodowy w środowisku naturalnym człowieka należy także zaliczyć emisję hałasu [157]. Hałasem określamy wszelkie niepożądane dźwięki, które negatywnie wpływają na zdrowie oraz właściwe samopoczucie ludzi i innych organizmów żywych [152,155].

Ciągle oddziaływanie hałasu na człowieka wpływa negatywnie na jego zdrowie fizyczne i psychiczne doprowadzając do zaburzeń funkcjonowania organizmu oraz występowania chorób układu sercowo-naczyniowego, zmian metabolizmu, upośledzenia funkcji poznawczych u dzieci, a także powoduje rozdrażnienie i zaburzenia snu. Szacuje się, że długotrwałe narażenie na hałas środowiskowy jest przyczyną aż 12 000 przedwczesnych zgonów i 48 000 nowych przypadków choroby niedokrwiennej serca rocznie w samej tylko Europie [157].

Obserwuje się, że ponad 100 mln ludzi w krajach Europy jest systematycznie narażonych na nieustający hałas o nasileniu minimum 55 dB pochodzący z różnych sektorów transportu. Co istotne, „zanieczyszczenie” hałasem pochodzącym z transportu uważane jest za drugą najważniejszą środowiskową przyczynę złego stanu zdrowia mieszkańców Europy tuż po zanieczyszczeniu powietrza szkodliwymi związkami chemicznymi. Na rysunku 1.3 zaprezentowano wykresy udziału procentowego mieszkańców obszarów miejskich narażonych na hałas pochodzący z transportu drogowego. Użyto przy tym wskaźnika L_{den} . Wskaźnik L_{den} oznacza wskaźnik hałasu służący do określenia ogólnej dokuczliwości. Odnosi się on do średniego ważonego poziomu ciśnienia akustycznego [157].

W przypadku samochodowych silników spalinowych hałas generowany jest nie tylko przez procesy spalania w silnikach, ale również przez procesy towarzyszące spalaniu, co ilustruje rysunek 1.4 [136].



Rys. 1.4. Źródła generowania hałasu w silniku spalinowym [136]

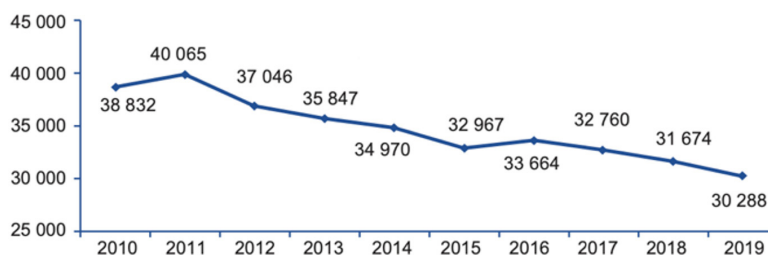
Analizując rysunek 1.4 należy stwierdzić, że głównymi źródłami hałasu generowanego przez silnik spalinowy są: proces wymiany ładunku w silniku, proces spalania (przebieg i organizacja procesu w silniku), ruch posuwisto-zwrotny tłoka w cylindrze, działanie układu rozrządu, działanie układu zasilania w paliwo (w szczególności wysokociśnieniowe układy wtryskowe silników o zapłonie samoczynnym oraz iskrowym), działanie elementów osprzętu silnika (wentylatory, przekładnie itp.).

Kolejnym zagrożeniem występującym podczas wykonywania usług transportowych są wypadki z udziałem przedmiotów transportu, a w szczególności z ludzi [18]. Przyczyny oraz skutki występowania wypadków w transporcie są ściśle powiązane i specyficzne dla poszczególnych gałęzi transportu.

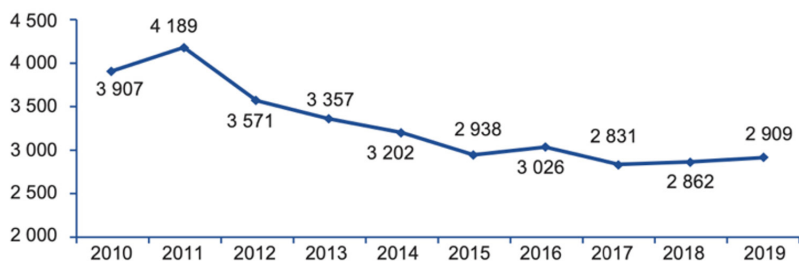
Możemy wyodrębnić czynniki wspólne wpływające na bezpieczeństwo w transporcie, do których zaliczamy: tzw. „bezpieczeństwo” środków transportu obejmujące stan techniczny i stopień ich zużycia, organizację przewozów, tzw. „czynniki ludzkie” (stopień wykształcenia, doświadczenie, stan zdrowia, czas pracy itd.), uwarunkowania prawne dotyczące bezpieczeństwa, poziom obsługi technicznej środków transportu, stan infrastruktury transportowej, czynniki atmosferyczne, możliwość ataków terrorystycznych [147].

Należy zwrócić uwagę na fakt, że prawie każde zdarzenie (wypadek) w transporcie ma większy lub mniejszy wpływ na środowisko naturalne. W trakcie tych zdarzeń najczęściej dochodzi do rozszczelnienia (pomimo stosowanych różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych) elementów układu napędowego środków transportu. Skutkuje to skażeniem gleby, wody jak również powietrza. W trakcie tych zdarzeń niejednokrotnie następuje również utrata ładunku, który w zależności od jego rodzaju może spowodować dodatkowe szkody w środowisku naturalnym [64].

Transport samochodowy w Polsce, o którym była mowa wcześniej jest najbardziej rozpowszechnionym, ale zarazem najbardziej niebezpiecznym i kosztownym społecznie rodzajem transportu [5,18,159]. Analizując dostępne statystyki wypadków drogowych w Polsce na przestrzeni ostatnich lat 2010–2019 można zauważyć znaczącą tendencję spadkową ogólnej liczby wypadków [policja]. Zilustrowano to na rysunku 1.5 i 1.6.



Rys. 1.5 Zestawienie dotyczące wypadków i zgonów w wypadkach w Polsce w latach 2010–2019 dotyczące liczby wypadków drogowych [159]



Rys. 1.6 Zestawienie dotyczące wypadków i zgonów w wypadkach w Polsce w latach 2010–2019 dotyczące liczby zgonów w wypadkach drogowych [159]

Obserwowane w ostatnich latach zmniejszenie liczby wypadków i zgonów związanych z wypadkami wynika z systematycznych nowelizacji i zmian w przepisach ruchu drogowego, modernizacji infrastruktury drogowej, zwiększającego się udziału nowoczesnych samochodów wyposażonych w wiele rozwiązań technicznych zwiększających bezpieczeństwo [21,159].

Podsumowując zagadnienia omówione w rozdziale pierwszym należy stwierdzić, że największy negatywny wpływ na środowisko naturalne oraz bezpieczeństwo w trakcie wykonywania przewozu ładunku lub ludzi, wywiera transport samochodowy. Jego wieloaspektowe oddziaływanie zostało pokrótce przedstawione w niniejszym rozdziale.

Najważniejszym jednak negatywnym czynnikiem generowanym przez ten rodzaj transportu jest emisja składników toksycznych powstałych podczas spalania paliwa w silnika spalinowych. Obecnie pomimo rozwoju napędów alternatywnych, głównym źródłem napędu wykorzystywanym w przewozach ładunków oraz komunikacji zbiorowej są samochodowe silniki o zapłonie samoczynnym. Silniki te charakteryzują się złożonym procesem tworzenia i spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Dlatego w dalszej części monografii skupiono się na analizie emisji składników toksycznych przez te silniki spalinowe szczególnie w fazie ich rozruchu. W jego trakcie obserwujemy bowiem znaczne nasilenie emisji składników toksycznych oraz innych negatywnych procesów, co zostało bardzo szeroko przedstawione w dalszej części niniejszej monografii.

2. Emisja składników toksycznych spalin silników spalinowych

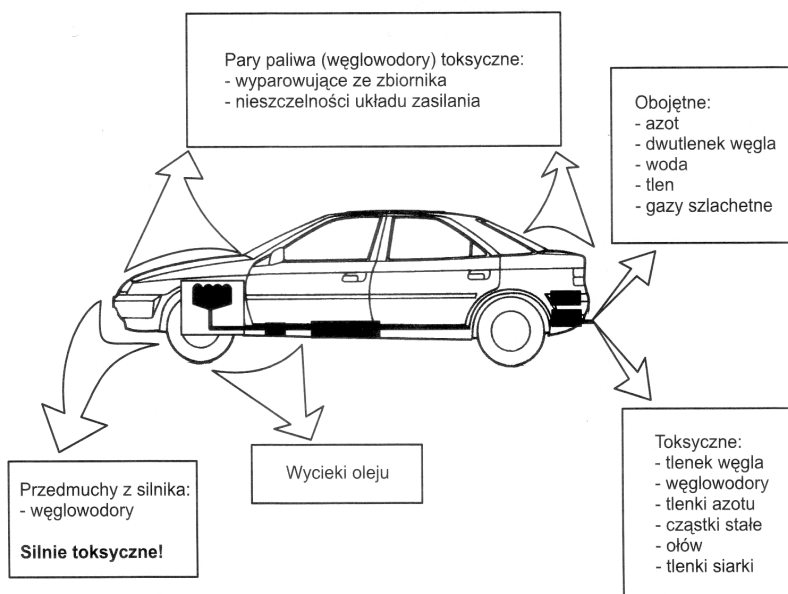
2.1. Przyczyny występowania emisji składników toksycznych spalin

Uzyskiwaniu energii w procesie spalania ropy naftowej oraz jej przetworów w silniku spalinowym zawsze towarzyszy emisja spalin. Skład chemiczny tych spalin zależy przede wszystkim od rodzaju paliwa, jego składu chemicznego oraz warunków i przebiegu procesu spalania. W przypadku spalin silników spalinowych mówimy o dwóch grupach składników jakimi są składniki nietoksyczne i toksyczne. Dopuszczalna emisja składników toksycznych jest określana w wielu aktach prawnych krajowych i międzynarodowych. Przy założeniu, że spalamy chemicznie czyste paliwo węglowodorowe oraz że jego spalanie jest całkowite i zupełne, uzyskujemy spaliny o następującym składzie: azot N_2 , tlen O_2 , dwutlenek węgla CO_2 i woda H_2O (w postaci pary wodnej). Byłby to idealny proces spalania, który w silniku spalinowym nigdy nie występuje w rzeczywistych warunkach [117].

Podczas rzeczywistego procesu spalania w silniku spalinowym oprócz wymienionych wcześniej podstawowych składników spalin (CO_2 i H_2O oraz N_2 i O_2), powstaje wiele innych substancji wynikających ze składu spalane go paliwa i powietrza. Zaliczyć do nich możemy [82,83,136,143]:

- gazy szlachetne;
- tlenek węgla (CO);
- węglowodory (HC);
- aldehydy (C_mH_nO);
- benzen (C_6H_6);
- tlenki azotu (NO_x);
- amoniak (NH_3);
- tlenki siarki (SO_x);
- sadza i cząstki stałe (PM);
- metale ciężkie, w tym ołów i ich związki;
- ozon.

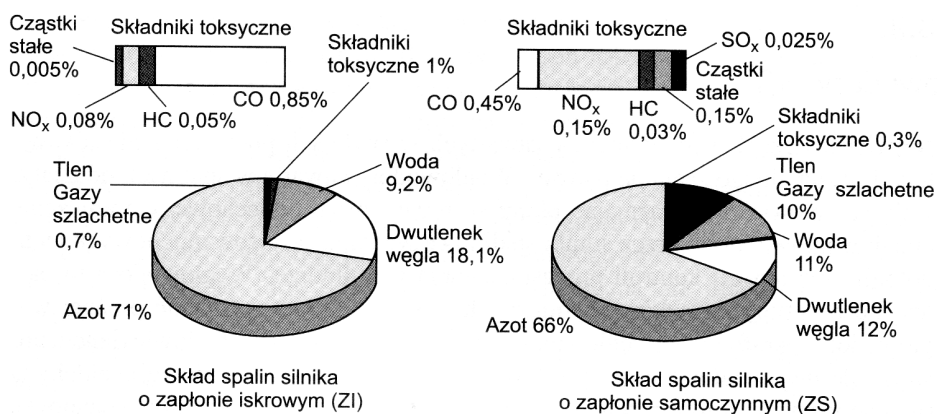
Należy zaznaczyć, że emisja tych związków zależy nie tylko od przebiegu procesu spalania w samym silniku spalinowym, ale także od zjawisk zachodzących w całym układzie wydechowym samochodu, który to odpowiada za emisję około 60% węglowodorów, ok. 98% tlenku węgla oraz 100% tlenków azotu i sadzy [136,143]. Związki toksyczne pochodzące z paliwa, a emitowane do środowiska naturalnego z innych układów samochodu, ilustruje rysunek 2.1 [15].



Rys. 2.1. Źródła zanieczyszczeń środowiska naturalnego pochodzące z paliwa oraz oleju silnikowego [15]

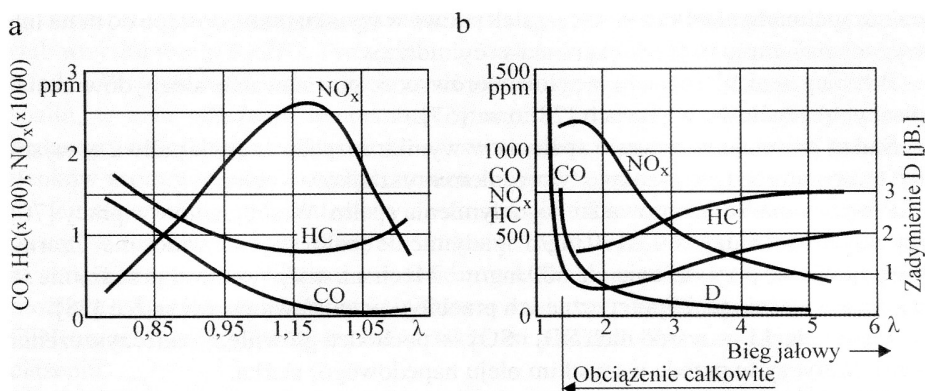
2.2. Składniki toksyczne spalin

Skład emitowanych do atmosfery spalin przez samochodowe silniki spalinowe o zapłonie iskrowym i samoczynnym jest podobny. Różnice związane są z ilością poszczególnych składników toksycznych (w szczególności CO, NO_x, cząstek stałych i tlenków siarki), jak również nietoksycznych (CO₂ i H₂O oraz N₂ i O₂), co zilustrowano na rysunku 2.2 [117,143].



Rys. 2.2. Skład emitowanych spalin z silników ZI oraz ZS [117]

Z analizy rysunku 2.2. wynika, że w składzie emitowanych spalin przeważa azot, który jest głównym składnikiem powietrza atmosferycznego. Jest to gaz obojętny, nie biorący udziału w procesie spalania. Azot, który w warunkach normalnych nie wchodzi w reakcje chemiczne z gazami atmosferycznymi, po przekroczeniu temperatury około 1100 °C staje się jednak gazem reaktywnym o dużym powinowactwie do tlenu. Reagując z tlenem, tworzy tlenki azotu NO_x , będące składnikami toksycznymi spalin [117]. Przez NO_x rozumiemy łączną emisję mieszaniny tlenków azotu: NO , NO_2 , N_2O , N_2O_5 (przy czym głównie występują NO i NO_2). W procesie spalania powstawaniu tlenków azotu sprzyja wysoka temperatura w strefie spalania oraz skład mieszaniny paliwowo-powietrznej z nadmiarem tlenu O_2 , (mieszanka lekko uboga $\lambda > 1$), co przedstawiono na rysunku 2.3 [136].



Rys. 2.3. Zależność stężenia składników toksycznych oraz zadymienia od współczynnika nadmiaru tlenu λ :
a) dla silnika ZI oraz b) dla silnika ZS [136]

Tlenki azotu w głównej mierze przyczyniają się do powstawania smogu fotochemicznego oraz kwaśnych deszczy. Dodatkowo związki te wdychane przez człowieka przedostając się do krwioobiegu zatrują organizm oraz oddziałują kancerogennie. Szczególnie szkodliwy jest dwutlenek azotu NO_2 , który jest gazem o drażniącym zapachu i czerwono-brązowym zabarwieniu. Po przedostaniu się do dróg oddechowych oddziałuje na nie drażniaco oraz łączy się z zawartą we krwi hemoglobina, co negatywnie wpływa na cały organizm człowieka. NO_x w połączeniu z wodą tworzą kwas azotowy i azotawy (odpowiednio HNO_3 i HNO_2) będące składnikami kwaśnych deszczy.

Dlatego też, w nowych limitach emisji spalin dla silników spalinowych dąży się do ograniczenia całkowitej ilości tlenków azotu NO_x oraz zmniejszenia emisji NO_2 . Spełnienie tego wymogu ma szczególną wartość dla ochrony środowiska [102,117].

Kolejnym składnikiem, o znacznym udziale procentowym w emitowanych spalinach powstałych w wyniku procesu spalania w silnikach spalinowych, jest dwutlenek węgla (CO_2). Jest on gazem nietoksycznym, występującym w atmosferze ziemskiej (ok. 0,04% objętości).

Dwutlenek węgla jest gazem niepalnym, bezbarwnym o lekko kwaśnym posmaku. Jego gęstość jest o połowę większa od gęstości powietrza. W spalinach silników spalinowych stanowi nawet do około 18% udziału (zob. rysunek 2.2) i jest produktem całkowitego i zupełnego spalania zachodzącego w cylindrze, oraz utleniania toksycznych związków zachodzącego w reaktorze katalitycznym. Największa ilość CO_2 powstaje w trakcie spalania mieszanek stechiometrycznych [102,117].

Duże stężenia dwutlenku węgla w powietrzu wdychanym prowadzi do bólów głowy, szumu w uszach i kołatania serca. Niebezpieczne dla życia są już stężenia na poziomie 8% do 12%, które powodują duszności, utratę przytomności i zatrzymanie oddechu. Stężenie CO_2 w powietrzu ponad 12% prowadzi do szybkiej śmierci człowieka. Mechanizm oddziaływania dwutlenku węgla na organizm człowieka polega na zakłóceniu naturalnych procesów regulujących oddychanie, co prowadzi do niedotlenienia i śmierci. Dwutlenek węgla normalnie nie jest uznawany za gaz toksyczny, gdyż naturalnie występuje w przyrodzie i reguluje wiele procesów życiowych w świecie roślin i zwierząt. Określone stężenie dwutlenku węgla w atmosferze (od około 0,03% do 0,04% objętości) jest niezbędne, gdyż gaz ten wykorzystywany jest przez rośliny w procesie fotosyntezy [81,117].

Gazem bardzo trującym powstającym w wyniku niezupełnego spalania paliwa w silniku spalinowym jest tlenek węgla (CO). Powstaje on zwłaszcza przy niedoborze tlenu. Jego udział procentowy w spalinach zależy od rodzaju zapłonu silnika, zilustrowano to na rysunku 2.2. W silnikach spalinowych ilość powstającego tlenku węgla zależy przede wszystkim od składu mieszaniny paliwowo-powietrznej (współczynnika nadmiaru powietrza λ – zob. rysunek 2.3), obciążenia silnika (małe obciążenie i praca na biegu luzem sprzyjają powstawaniu CO), temperatury silnika (niedogrzań silnika), nierównomiernego „wymieszania” mieszanki paliwowo-powietrznej, stopnia recyrkulacji spalin.

Tlenek węgla jest gazem bezbarwnym pozbawionym zapachu i smaku. Jego właściwości trujące dla organizmów żywych wynikają ze zdolności szybszego łączenia się z hemoglobiną we krwi niż tlen. Ogranicza to transport tlenu do tkanek i komórek, co w ekstremalnych przypadkach może prowadzić do uduszenia [81,117].

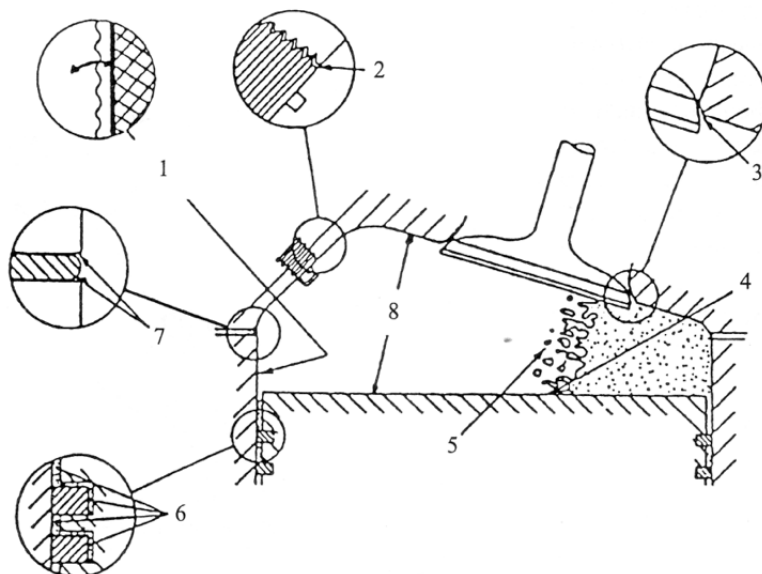
Trzecim składnikiem pod względem udziału procentowego (ok. 12% obj. – rysunek 2.2) w spalinach silników spalinowych jest para wodna (H_2O), która powstaje w wyniku reakcji utleniania się wodoru zawartego w paliwie. W niskich temperaturach otoczenia po ochłodzeniu się w układzie wydechowym pojazdu, w znacznej części skrapla się, co powoduje białe zabarwienie spalin [10,117].

Ostatnim składnikiem nietoksycznym spalin emitowanych przez silniki spalinowe jest tlen (O_2). Jest to gaz niezbędny w procesach życiowych roślin i zwierząt oraz spalania paliw kopalnych. Tlen znajduje się w spalinach silników spalinowych w szczególności, gdy te pracują na tzw. mieszankach ubogich z dużym naddatkiem powietrza. Idealnym stosunkiem masy powietrza do masy paliwa przy spalaniu w silnikach o zapłonie iskrowym jest wartość 14,8:1, co odpowiada stechiometrycznej mieszaninie paliwa z powietrzem wyrażonej $\lambda = 1$. Pozostałość tlenu (O_2) w spalinach jest przy tym ważną wielkością pomiarową, określającą jakość przebiegu spalania [117,136].

W spalinach, oprócz wymienionych oraz pokrótce omówionych wcześniej składników toksycznych (NO_x i CO), znajdujemy także węglowodory HC, czyli związki organiczne zbudowane z atomów węgla i wodoru, których jest ponad 200 różnych rodzajów a do najważniejszych z nich zaliczamy: węglowodory parafinowe (węglowodory alifatyczne, alkany o budowie łańcuchowej), olefiny, węglowodory aromatyczne (o budowie pierścieniowej), aldehydy (przede wszystkim formaldehyd) i połączenia policykliczne – wielopierścieniowe. Węglowodory zawarte w spalinach silników spalinowych oddziałują na człowieka podrażniając jego błony śluzowe i drogi oddechowe. Eksperymentalnie udowodniono także, rakotwórcze właściwości około dwudziestu wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. Węglowodory są też adsorbowane na powierzchni sadzy tworzącej cząstki stałe i ze względu na swój mały rozmiar dostają się wraz z wdychanym powietrzem do pęcherzyków płucnych. Najgroźniejsze dla zdrowia człowieka są następujące węglowodory: benzol (C_6H_6), toluol, ksylol (dimetylobenzol $C_6H_4(CH_3)_2$). Długotrwałe oddychanie powietrzem, w którym znajdują się nawet niewielkie ilości benzolu, prowadzi do zmian obrazu krwi i choroby nowotworowej krwi – białaczki [82,83,117].

Jak już wspomniałem, głównymi czynnikami powstawania węglowodorów jest proces niecałkowitego i niezupełnego spalania paliwa. Przyczynami tego są: spalanie przy dużym niedoborze tlenu (tzw. spalanie mieszanek bogatych), występowanie efektu wygaszającego płomień wynikającego ze zbyt niskiej temperatury lub zjawiska jego wygaszania w wąskich szczelinach komory spalania, wypadanie zapłonów (wynikające ze zbyt bogatej lub ubogiej mieszanki paliwowo-powietrznej), jak również uszkodzenia układu zasilania i zapłonowego silnika, duży stopień recyrkulacji spalin, duża ilość nagaru na ściankach komory spalania, przedostawanie się oleju silnikowego do komory spalania, zawartość oleju smarującego w mieszance paliwowo-powietrznej (silniki dwusuwowe), co zilustrowano dla silnika o zapłonie iskrowym na rysunku 2.4 [118].

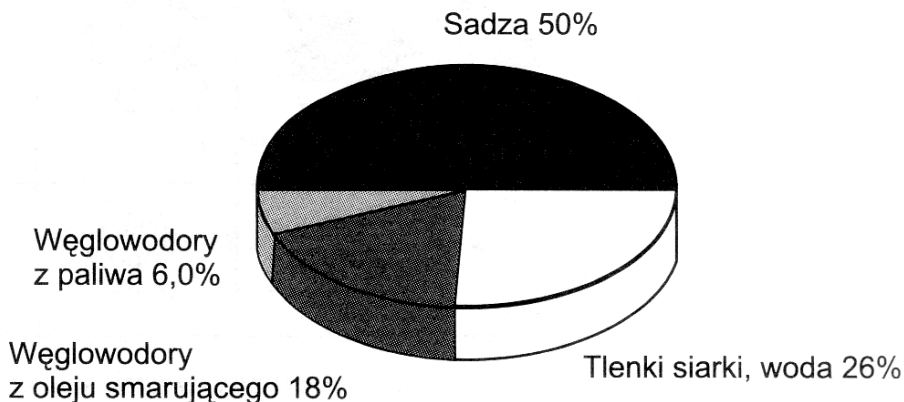
Węglowodory w dużych ilościach powstają również w przypadku spalania mieszanki bardzo zubożonej, ze względu na wypadanie zapłonów oraz przedłużony proces spalania wynikający z małej prędkości spalania takiej mieszanki. Kolejnymi źródłami emisji węglowodorów podczas użytkowania samochodu są: układy zasilania silnika ze szczególnym uwzględnieniem nieszczelności i odprowadzania par paliwa, oraz skrzynia korbowa silnika do której przedostają się węglowodory pochodzące z komory spalania silnika oraz pary oleju smarującego [81,117].



Rys. 2.4. Źródła powstawania niespalonych węglowodorów w silniku spalinowym: 1 – adsorpcja/desorpcja w/z oleju, 2 – przestrzeń przy gwincie świecy zapłonowej, 3 – przestrzeń w okolicy gniazda zaworu wylotowego, 4 – wygaszanie płomienia na ściankach, 5 – wygaszanie płomienia w strefie frontu, 6 – przestrzeń pomiędzy pierścieniami, 7 – szczelina przy uszczelce głowicy, 8 – osady [118]

W przypadku silników o zapłonie samoczynnym w emitowanych składnikach toksycznych spalin występują także dodatkowo (zob. rysunek 2.2) sadza, cząstki stałe oraz tlenki siarki SO_x . Sadza powstaje w wysokich wartościach temperatur w wyniku termicznego rozpadu cząstek paliwa, a następnie polimeryzacji produktów tego rozpadu. Cząsteczki węglowodorów o dużych rozmiarach, jak wiadomo trudno się utleniają oraz ulegają w wysokich temperaturach odwodornieniu, tworząc kryształy węgla, które łączą się w większe skupiska. Na powierzchni tych skupisk osadzają się następnie niespalone węglowodory z paliwa i oleju smarującego, skondensowana para wodna, produkty zużycia ciernego metali, związki siarki i popiół tworząc cząstki stałe PM. Strukturę chemiczną cząstki stałej przedstawiono na rysunku 2.5 [84,117].

Cząstki stałe różnią się między sobą zarówno pod względem kształtu jak i rozmiaru. Największą część emisji stanowią cząstki o wymiarze liniowym równym około 100 nanometrów (czyli 0,1 μm). Tak małe cząstki nie są zatrzymywane w górnej części dróg oddechowych człowieka i dostają się wraz z wdychanym powietrzem do płuc, gdzie mogą powodować rozwój nowotworów. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że emisja cząstek stałych przez silniki o zapłonie samoczynnym jest o trzy rzędy wielkości większa niż przez silniki o zapłonie iskrowym [15,81,117].



Rys. 2.5. Struktura chemiczna cząstki stałej – rodzaje substancji składowych [117]

Kolejnym składnikiem toksycznym spalin emitowanym głównie przez silniki o zapłonie samoczynnym są tlenki siarki SO_x . Wynika to z faktu, że silniki takie zasilane są olejem napędowym, w których dopuszcza się większą zawartość siarki ze względu na proces jego produkcji. W trakcie procesu spalania atomy siarki zawarte w paliwie łączą się z tlenem oraz parą wodną. Produktami tych reakcji chemicznych są tlenki siarki, kwas siarkowy (H_2SO_4) lub kwas siarkawy (H_2SO_3) [81,117].

Dwutlenek siarki wpływa drażniąco na śluzówkę nosa czy oczu, gardła i oskrzeli, co prowadzić może do zaczerwienienia lub powstawania obrzęków. Silne oddziaływanie tlenków siarki na drogi oddechowe wynika z tworzenia się w ich wilgotnym środowisku kwasu siarkowego z tlenków siarki zawartych we wdychanym powietrzu. Dodatkowo tlenki siarki zaadsorbowane na powierzchni sadzy tworzącej cząstki stałe (zob. rysunek 2.5) oraz aerozole kwasu siarkowego, mogą dostać się wraz z tymi cząstkami do pęcherzyków płucnych.

Należy także zwrócić uwagę na fakt, że kwasy siarkowy oraz siarkawy są główną przyczyną kwaśnych deszczy. Zmniejszenie emisji wymienionych związków siarki jest możliwe tylko przez ograniczenie zawartości siarki w paliwie [81,117].

Ostatnimi opisanymi w niniejszej monografii związkami toksycznymi występującymi w spalinach silników spalinowych, są aldehydy ($\text{C}_m\text{H}_n\text{O}$). Powstają one w wyniku niepełnego spalania paliwa w cylindrze z powodu efektu wygaszania płomienia przez chłodne ścianki komory spalania lub występowania lokalnych niedoborów tlenu w mieszance palnej. W największych ilościach występuje aldehyd mrówkowy (formaldehyd HCHO), aldehyd octowy (CH_3CHO) i akroleina ($\text{C}_2\text{H}_3\text{CHO}$). Ilości aldehydów w gazach spalinowych są niewielkie i wynoszą od 10 do 300 ppm. Działanie aldehydów w organizmie człowieka powoduje podrażnienia głównie dróg oddechowych i oczu. Należy podkreślić, że jest to zależne od ich stężenia i czasu oddziaływania [81,118].

Należy zwrócić uwagę na fakt, że w czasie procesu rozruchu samochodowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym występuje znaczne nasilenie emisji, wymienionych w niniejszym rozdziale, składników toksycznych spalin. Wynika to z występowania złożonych procesów tworzenia oraz spalania mieszaniny palnej, co zostanie omówione w kolejnych dwóch rozdziałach monografii.

3. Proces rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym

3.1. Rozruch a działanie silnika o zapłonie samoczynnym

Rozruch samochodowego silnika spalinowego jest jednym z kilku stanów (faz) jego działania (funkcjonowania). Występuje ono tylko wtedy, gdy obserwujemy obracanie się wału korbowego silnika.

Aktualną fazę działania silnika spalinowego definiują cztery parametry stanu, takie jak [8,32,50].

- ustawienie elementu sterującego zasilaniem silnika spalinowego,
- prędkość kątowna wału korbowego silnika spalinowego,
- zewnętrzny moment obciążający silnik spalinowy zredukowany na jego wał korbowy,
- temperatura silnika spalinowego.

Gdy w analizowanym przedziale czasu, obserwujemy niezmiennosc wartości wymienionych powyżej czterech parametrów stanu, można stwierdzić, że występuje wtedy stan ustalony podczas funkcjonowania silnika. Jeżeli chociaż jedna ze zmiennych stanu nie jest stała mamy do czynienia ze stanem dynamicznym podczas działania silnika.

Należy w tym miejscu podkreślić, że w przeważającej mierze, podczas funkcjonowania silnika spalinowego występują stany dynamiczne [51,126,139]. Stan ustalony, może pojawić się tylko przy całkowicie nagrzanym silniku, który występuje w momencie, gdy wartość temperatury silnika nie ulega już dalszemu zwiększaniu. Jako wartość temperatury samochodowego silnika spalinowego umownie przyjmuje się wartość temperatury cieczy chłodzącej na wyjściu z jego bloku.

Przyjmuje się, że podstawowymi parametrami stanu, które klasyfikują poszczególne fazy funkcjonowania silnika spalinowego są: zewnętrzny moment obciążający oraz położenie organu sterującego zasilaniem. Zewnętrzny moment obciążający silnik spalinowy ma wpływ na wartość pracy oddawanej poprzez koło zamachowe, przez silnik aż do układu przeniesienia napędu (od sprzęgła do kół napędowych). Układ ten, jest najważniejszym odbiornikiem energii w pojeździe. Występujące podczas funkcjonowania silnika spalinowego momenty oporu jego osprzętu, a także innych urządzeń dodatkowych (np. klimatyzatora) nie stanowią składowych tego momentu. Nazywane są one tzw. stratami pasożytniczymi.

Położenie organu sterowania zasilaniem, zwane stopniem zasilania, definiowane jest w samochodzie przez wychylenie pedału przyspiesznika. Wartość stopnia zasilania wpływa na wartość generowanego przez silnik spalinowy momentu obrotowego.

W warunkach rzeczywistego użytkowania samochodowego silnika spalinowego można wyróżnić następujące przypadki (fazy) działania [32]:

1. Rozruch, podczas którego występuje przejście ze stanu spoczynku do stanu samodzielnego obracania się wału korbowego silnika.
2. Bieg jałowy silnika, podczas którego organ sterujący zasilaniem ma położenie neutralne, moment zewnętrzny wynosi zero, a średnia prędkość kątowa wału korbowego charakteryzuje się wartością stałą.
3. Bieg luzem silnika, gdzie moment zewnętrzny jest równy zero a organ sterujący zasilaniem nie ma położenia neutralnego. Gdy obserwowana średnia prędkość kątowa wału korbowego silnika ma wartość stałą, bieg luzem jest stanem statycznym. W przeciwnych przypadkach bieg luzem jest stanem dynamicznym.
4. Rozpędzanie silnika, w którym występuje zwiększanie stopnia zasilania w celu powstania nadwyżki momentu generowanego przez silnik w stosunku do zewnętrznego momentu obciążającego.
5. Ustalony stan działania silnika występujący przy niezmiennym położeniu organu sterującego zasilaniem, stałej średniej prędkości kątowej wału korbowego i ustalonej temperaturze, w którym obserwuje się równowagę pomiędzy zewnętrznym momentem obciążającym, a momentem generowanym przez silnik.
6. Opóźnienie silnika, które można zaobserwować przy nadwyżce zewnętrznego obciążenia w relacji do momentu generowanego i położeniu organu sterującego zasilaniem innym niż neutralne.
7. Hamowanie silnikiem, występujące przy neutralnym położeniu organu sterującego zasilaniem oraz niezerowym zewnętrznym momencie obciążającym.
8. Wyłączenie silnika.

Cykliczny charakter występujących w silniku spalinowym procesów (np.: tworzenie i spalanie mieszanki, kinematyka ruchu tłoka, itd.) powoduje, że obserwowane stany statyczne 2, 3, 5 i 7 podczas jego działania występują tylko wtedy, gdy wielocyklowe wartości średnie (wyliczone z wielu cykli roboczych kolejno po sobie występujących) zmiennych stanu mają wartość stałą [32].

W wyróżnionych stanach od 2 do 7 występuje samodzielne działanie silnika spalinowego, podczas którego wytwarza on wewnętrznie (poprzez zamianę energii chemicznej zawartej w paliwie w trakcie jego spalania) energię mechaniczną, wykorzystywaną do pokonania wszystkich występujących w czasie działania oporów [47,136]. Należy podkreślić, że odbywa się to bez dostarczania z zewnątrz dodatkowej energii.

W trakcie rozruchu samochodowego silnika spalinowego musi zostać dostarczona energia z zewnątrz. W jego czasie występuje przejście ze stanu spoczynku do stanu samodzielnego obracania się wału korbowego silnika. Dlatego też, procesowi rozruchu nie można zaliczyć do faz samodzielnego działania silnika spalinowego. Jednakże rozruch silnika spalinowego jest procesem niezbędnym do zaistnienia innych wyróżnionych faz jego samodzielnego funkcjonowania.

W trakcie rozruchu zewnętrzny moment napędowy musi najpierw pokonać moment wynikający z sił tarcia spoczynkowego, a w dalszej kolejności rozruchowy moment oporowy [39,58,71]. Na rozruchowy moment oporowy składają się momenty pochodzące od oporów sprężania mieszanki palnej w komorach spalania oraz sił tarcia kinematycznego pojawiających się w zespołach ruchomych silnika spalinowego. W samochodowym silniku spalinowym zewnętrzny moment rozruchu wytwarzany jest przez rozrusznik elektryczny sprzężony z jego kołem zamachowym. Używa się także energii powietrza czy energii mięśni człowieka [20,88,132].

Należy w tym miejscu podkreślić, że w rzeczywistych warunkach użytkowania samochodowego silnika spalinowego może nie nastąpić (z wielu różnorodnych przyczyn) doprowadzenie do jego stanu samodzielnego działania. Występuje wtedy przypadek nieudanego rozruchu [32].

3.2. Czynniki decydujące o właściwościach rozruchowych silnika o zapłonie samoczynnym

Na podstawie badań własnych autora [32,35] oraz przeglądu literatury [87,104,108] należy stwierdzić, że najważniejszym czynnikiem wpływającym na właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym jest wartość temperatury silnika w chwili jego rozruchu. Obniżenie się wartości temperatury rozruchu silnika, szczególnie poniżej 0 °C, wywołuje między innymi: spadek wartości prędkości kątowej rozruchu, pogorszenie rozpylenia paliwa, zwiększenie strat cieplnych, czy oporu ruchu itd. [58,105,131], co przyczynia się do utrudnień pojawienia się samozapłonu mieszanki palnej, a tym samym wystąpienia udanego procesu rozruchu silnika.

Przez prędkość kątową rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym rozumiemy taką wartość prędkości kątowej jego wału korbowego podczas danego rozruchu, przy której występują dogodne warunki do powstawania takiej mieszanki paliwo-powietrznej, w której możemy zaobserwować ogniska jej samozapłonu, a następnie procesu jej spalania w cylindrach [33,106,109].

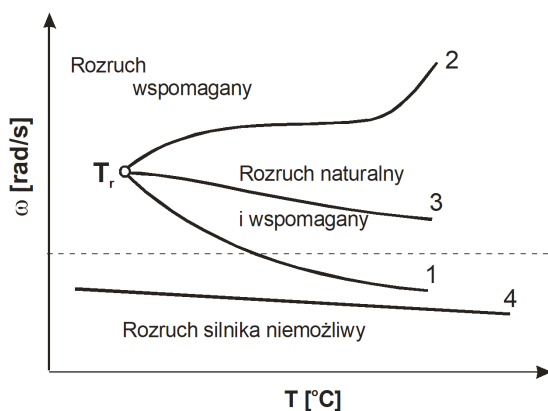
Autor publikacji [108,109] uwzględniając czas trwania rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w temperaturach poniżej 0 °C, określił cztery różne prędkości kątowe rozruchu: „minimalną”, „optymalną”, „maksymalną” oraz „graniczną” (rysunek 3.1). Ich występowanie uzasadnił wpływem wartości prędkości wału korbowego silnika na parametry (ciśnienie i temperaturę) ładunku powietrza w końcu suwu sprężania.

W trakcie rozruchu, bez użycia środków i urządzeń wspomagających (świec żarowych, płomieniowych itd.), silnika o zapłonie samoczynnym, podczas suwu sprężania, obserwuje się występowanie zjawiska pobierania ciepła przez ściany cylindra od ładunku sprężanego powietrza. Natężenie tej wymiany ciepła wzrasta w miarę przyrostu ciśnienia w cylindrze, zaś czas jej trwania zależy od wartości prędkości kątowej rozruchu i jest tym większy im mniejsza jest jej wartość. Nie może być on jednak dowolnie długi, gdyż jego wzrost powoduje nadmierny spadek temperatury ładunku powietrza pod koniec suwu sprężania [105,106].

W miarę spadku wartości prędkości kątowej rozruchu zwiększają się dodatkowo straty ciepła wskutek przedostawania się ładunku powietrza przez uszczelnienie pierścieniowe zespołu TPC (tzw. przedmuchy do skrzyni korbowej). Przy czym obserwowane straty w zakresie temperatur od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ praktycznie nie zależą od jej wartości i są ok. czterokrotnie większe niż straty powstałe z przejmowania ciepła przez ściany komory sprężania. Wzrost strat ciepła dla sprężanego ładunku pociąga za sobą spadek wartości ciśnienia i temperatury pod koniec suwu sprężania [1,9,108].

Obserwowane straty ciepłe powstające w trakcie przejmowania ciepła od sprężanego ładunku powietrza przez ścianki komory spalania oraz jego ucieczki z cylindrów silnika powodują, że poniżej „minimalnej” wartości prędkości kątowej rozruchu (przy rozruchu silnika bez wspomagania) sprężany ładunek powietrza w końcu suwu sprężania może nie uzyskać stanu termodynamicznego (zbyt niskie wartości ciśnienia i temperatury) umożliwiającego powstanie dogodnych warunków do zaistnienia samozapłonu wtryskiwanego do niego paliwa.

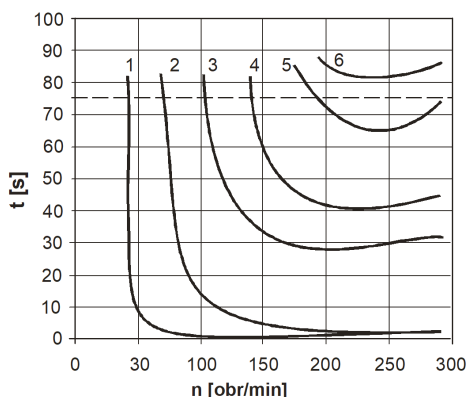
Wystąpienie ognisk samozapłonu wtryskiwanego paliwa w ładunku sprężanego powietrza, przy obniżaniu się początkowej temperatury rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, wymaga zwiększenia się wartości ciśnienia i temperatury dla tego ładunku w końcu suwu sprężania. Dlatego też obserwujemy wzrost wartości „minimalnej” prędkości kątowej rozruchu, przy spadku temperatury rozruchu silnika (rysunek 3.1).



Rys. 3.1. Prędkości kątowe ω rozruchu silnika spalinowego w ujemnych temperaturach T rozruchu: 1 – „minimalna”, 2 – „maksymalna”, 3 – „optymalna”, 4 – „graniczna”, T_r – potrójny punkt rozruchowy silnika [109]

Wzrost wartości prędkości kątowej rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w zadanej temperaturze przyczynia się nie tylko do zmniejszenia strat związanych z przejmowaniem ciepła przez ściany komory spalania od sprężanego ładunku oraz zmniejszenia przedmuchy do skrzyni korbowej, ale poprawia także, co jest bardzo istotne, przebieg procesu wtrysku paliwa skracając czas jego trwania, a także

zwiększając jakość rozpylenia paliwa ułatwia przebieg jego parowania. Zwiększenie się wartości prędkości kątowej wału korbowego podczas uruchamiania silnika o zapłonie samoczynnym powyżej „minimalnej” prędkości kątowej rozruchu oddziałuje pozytywnie na procesy przygotowania mieszaniny palnej oraz jej samozapłonu. Wynikiem tego jest skrócenie czasu trwania rozruchu (bez użycia urządzeń wspomagających) silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym [66,88,108], co przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Zależność czasu rozruchu silnika spalinowego SW680 od prędkości obrotowej jego wału korbowego dla różnych wartości temperatur: 1 – 273 K (0 °C), 2 – 268 K (-5 °C), 3 – 263 K (-10 °C), 4 – 260,5 K (-12,5 °C), 5 – 258 K (-15 °C), 6 – 255 K (-18 °C) [108]

Autorzy publikacji [88,108], stwierdzili na podstawie wyników swoich badań, że nie można jakkolwiek w ujemnych temperaturach zwiększać wartości prędkości kątowej rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym podczas jego rozruchu bez użycia środków i urządzeń wspomagających. Dla rozruchów silnika w temperaturach poniżej 0°C możemy zaobserwować występowanie „optymalnej” oraz „maksymalnej” wartości prędkości kątowej rozruchu (zob. rysunek 3.1).

Przy czym wartość „optymalna” prędkości kątowej rozruchu jest to taka wartość prędkości wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym przy której czas jego rozruchu, w określonej wartości jego temperatury, osiąga wartość minimalną.

Wartość „maksymalna” prędkości kątowej rozruchu jest to taka wartość prędkości kątowej wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym, przy określonej wartości jego temperatury, powyżej której nie jest możliwy samozapłon mieszanki paliwowo-powietrznej, a tym samym wystąpienie udanego procesu rozruchu.

W publikacjach [108,109] na podstawie wyników badań własnych autor stwierdził istnienie tzw. „punktu potrójnego rozruchu” (rysunek 3.1). Jest to taki punkt, w którym wyróżnione wartości prędkości kątowych rozruchu: „minimalna”, „maksymalna” i „optymalna” są sobie równe. Stosując założenia tego punktu, można określić najniższą z możliwych temperatur silnika podczas rozruchu bez użycia środków wspomagających, w której nastąpi udany jego rozruch.

Zaobserwowano występowanie podczas rozruchów silników o zapłonie samoczynnym, z zastosowaniem środków wspomagających [109], tzw. „granicznej” prędkości kątowej rozruchu. Jest to taka wartość prędkości kątowej wału korbowego silnika o zapłonie samoczynnym, poniżej której nie nastąpi jego udany rozruch.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że wartość temperatury rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym wpływa także na inne omówione w dalszej części tego rozdziału czynniki determinujące warunki tworzenia oraz spalania mieszanki palnej podczas rozruchu. Występuje wiele czynników, które wpływają na właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym [88,109]. Zostaną one omówione w dalszej części tego rozdziału.

Zwiększenie liczby cylindrów silnika spalinowego zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia pierwszych samozapłonów w mieszance paliwowo-powietrznej. Także rodzaj oraz kształt komory spalania wpływają na właściwości rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym. I tak, dla silników z wtryskiem do komory wirowej, gdzie występuje większe pole powierzchni ścian komory spalania (komora wirowa i przestrzeń nad tłokiem) obserwuje się wzrost strat przejmowania ciepła przez ściany komory od sprężanego ładunku powietrza. Przyczynia się to do obniżenia temperatury powietrza w końcu suwu sprężania. Występujące także straty dławienia dla przepływu gazów z komory wstępnej zmniejszają uzyskiwaną wartość maksymalnego ciśnienia sprężanego ładunku. Utrudnia to zaistnienie samozapłonu paliwa i udany rozruch silnika z wtryskiem pośrednim względem silników z wtryskiem bezpośrednim. Także stosunek pola powierzchni do objętości komory silnika ma znaczenie i wpływa na wartość przejmowania ciepła przez ścianki komory od sprężanego ładunku powietrza. Silniki o zapłonie samoczynnym dla których stosunek pola powierzchni do objętości komory charakteryzują się małą wartością wykazują lepsze właściwości rozruchowe. Potwierdzają to badania opisane w publikacjach [48,68,109,110].

Na właściwości rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym mają wpływ fazy układu rozrządu a szczególnie kąt otwarcia i zamknięcia zaworu dolotowego. Zmniejszenie kąta otwarcia zaworu dolotowego wpływa na podwyższenie wartości temperatury ładunku w końcu suwu sprężania, co jest korzystne podczas rozruchu silnika. Zwiększenie kąta zamknięcia zaworu dolotowego powoduje, że tłok przemieszczający się ku górnemu martwemu położeniu (GMP) może wypchnąć część ładunku z komory spalania. Wywołuje to spadek rzeczywistego stopnia sprężania, a tym samym pogarsza właściwości rozruchowe silnika. Stąd dla silników doładowanych, które mają zwiększoną wartość kąta opóźnienia zamknięcia zaworu dolotowego w porównaniu do silników bez doładowania obserwuje się na ogół gorsze właściwości rozruchowe. Turbosprężarka w trakcie rozruchu silnika spalinowego nie zwiększa bowiem stopnia napełnienia jego cylindrów [88,109,110].

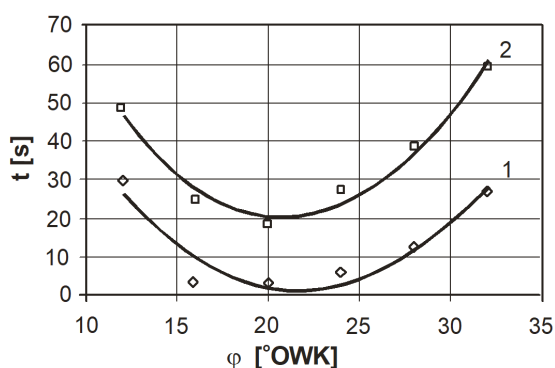
Stopień sprężania wpływa na wartość temperatury i ciśnienia ładunku w końcu suwu sprężania silnika spalinowego [2,3,13,77,95,98]. Dąży się do tego, aby temperatura sprężanego ładunku przekraczała temperaturę zapłonu paliwa

o co najmniej 200 °K [88]. Przy wzroście wartości stopnia sprężania obserwuje się przyrost wartości temperatury i ciśnienia ładunku w końcu suwu sprężania, co poprawia jego właściwości rozruchowe [110]. Zwiększanie stopnia sprężania powoduje jednak wzrost obciążeń mechanicznych łożysk wału korbowego przez siły gazowe.

Z drugiej strony obniżanie wartości stopnia sprężania we współczesnych silnikach o zapłonie samoczynnym [77,95,98] jest spowodowane dążeniem do zmniejszenia emisji związków toksycznych podczas ich działania. Należy podkreślić, że zbyt mały stopień sprężania ładunku powietrza może spowodować niedostateczny przyrost wartości temperatury i ciśnienia w końcu suwu sprężania uniemożliwiający zaistnienie samozapłonów wtryskiwanego paliwa.

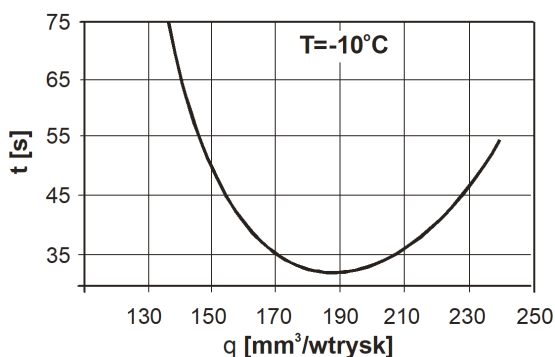
Parametrami układu wtryskowego oddziałującymi na właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym są: kąt wyprzedzenia wtrysku (rysunek 3.3), wartość dawki paliwa (rysunek 3.4) przebieg wtrysku paliwa oraz konstrukcja wtryskiwaczy paliwowych [10,88,108].

W trakcie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, ze względu na niskie wartości temperatury sprężanego powietrza, obserwuje się wydłużenie czasu trwania opóźnienia samozapłonu paliwa. Dlatego też, zwiększa się kąt wyprzedzenia wtrysku [19,46,88,116]. Zaobserwowano jednak, że zbyt duża wartość tego kąta zwiększa czas rozruchu oraz może prowadzić do wystąpienia nieudanego rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w niskich temperaturach [56,94,108]. Jest to spowodowane tym, że zbyt wczesny wtrysk paliwa może wywołać wystąpienie samozapłonu mieszanki palnej przed GMP tłoka, co przyczyni się do całkowitego „zablokowania” wału korbowego silnika. Istnieje więc optymalna wartość kąta wyprzedzenia wtrysku, dla zadanej temperatury silnika spalinyowego, przy której czas rozruchu osiąga wartość minimalną. Ilustracją tego jest rysunek 3.3.



Rys. 3.3. Zależność czasu wystąpienia pierwszego zapłonu oraz czasu rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku w temperaturze 261 K (-12 °C) podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym: 1 – czas pierwszego zapłonu, 2 – czas rozruchu; [108]

W trakcie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym występują małe prędkości katowe jego wału korbowego. Dlatego też, zwiększa się tzw. dawkę rozruchową wtryskiwanego paliwa o około 50% względem nominalnej wartości dawki eksploatacyjnej. Uzyskuje się dzięki temu bezwzględny wzrost udziału, w strudze wtryskiwanego paliwa do sprężanego ładunku powietrza w cylindrze silnika, mniejszych kropeł paliwa. Ułatwia to jego odparowanie oraz zwiększa liczbę ognisk samozapłonu. Ponadto osiadające na ściankach tulei cylindrowej paliwo uszczelnia komorę spalania, co zmniejsza straty ciepła wskutek ucieczki masy ładunku. Polepsza to warunki termodynamiczne wystąpienia samozapłonów. Autorzy w publikacjach [88,94,108] stwierdzili, że nie powinno się zbyt zwiększać wartości dawki rozruchowej. Przy wydłużonym czasie wtrysku, jej wzrost, przyczynia się do zintensyfikowania wymiany ciepła pomiędzy wtryskiwanym paliwem a sprężanym powietrzem. Obniża to temperaturę powietrza w końcu suwu sprężania, co pogarsza właściwości rozruchowe silnika. Obserwuje się więc występowanie optymalnej wartości dawki rozruchowej przy której, czas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jest minimalny, co przedstawiono na rysunku 3.4 [88].



Rys. 3.4. Wpływ dawki paliwa na czas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w temperaturze równej -10°C [88]

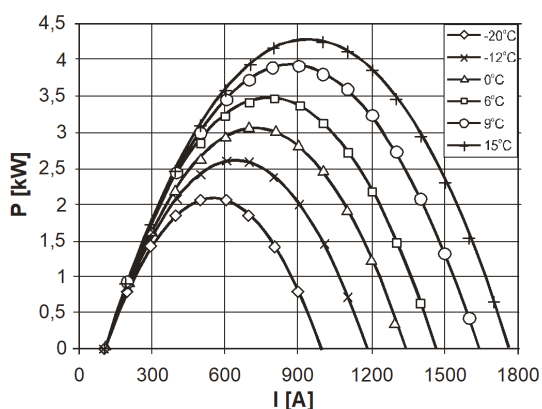
Zastosowanie w silniku o zapłonie samoczynnym wtrysku wielofazowego: na początku dawka pilotażowa (tzw. przedwtrysk), a w następnej kolejności wtrysk dawki głównej paliwa do komory spalania, zaś na końcu dotrysk dodatkowy, wpływa na poprawę jego właściwości rozruchowych. Istnienie niewielkiej dawki pilotażowej powoduje w ładunku powietrza wstępne reakcje fizyczne i chemiczne. Dzięki temu obserwuje się skrócenie czasu opóźnienia samozapłonu wtryskiwanej następnie dawki głównej paliwa [94].

Także rozpoczęcie dawkowania małej ilości paliwa po pewnym czasie od momentu rozpoczęcia rozruchu silnika, a nie w chwili ruszenia jego wału korbowego, ułatwia warunki odparowania i samozapłonu paliwa. Wykonanie kilkudziesięciu obrotów wału korbowego silnika spalinowego przed wystąpieniem pierwszego wtrysku paliwa przyczynia się do ogrzania komory spalania przez sprężane powietrze. Jest to korzystne przede wszystkim z powodu mniejszej emisji składników toksycznych spalin [11,43,84].

Kolejnym czynnikiem oddziałującym na właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym jest konstrukcja wtryskiwaczy paliwowych [110]. Zmniejszenie średnicy otworków we wtryskiwaczu oraz wzrost ich liczby, przyczynia się do szybszego rozpadu w sprężanym powietrzu strumienia wtryskiwanego paliwa. Ułatwia to parowanie i samozapłon paliwa. Polepszenie właściwości rozruchowych silników o zapłonie samoczynnym wywołuje także zwiększenie ciśnienia wtrysku paliwa. Dzięki temu następuje rozpad strugi paliwa na krople o mniejszych średnicach. Zwiększa to także energię kinetyczną wtryskiwanego paliwa, która zamieniona zostaje podczas jego gwałtownego hamowania w ośrodku powietrznym, w dużą ilość ciepła. Poprawia to proces odparowywania paliwa w ładunku powietrza, co ułatwia zainicjowanie jego samozapłonu.

Na poprawę przebiegu procesu dawkowania paliwa w trakcie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, a tym samym jego skuteczności ma zastosowanie układów wtryskowych z pompą rozdzielaczową sterowaną elektronicznie. Te układy wtryskowe, w stosunku do pomp rzędowych sterowanych mechanicznie, poprawiły precyzję dawkowania paliwa. Obecnie najczęściej stosowanym układem dawkowania paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym jest zasobnikowy system dawkowania paliwa (akumulacyjny, common rail). W układach tych objętość zasobnika powinna być tak dobrana, aby zapewnić szybki wzrost ciśnienia podczas rozruchu silnika oraz zniwelować wahania ciśnienia powstające w wyniku tłoczenia paliwa przez pompę oraz działania wtryskiwaczy. Ciśnienie wtrysku paliwa, stosowane w układach zasobnikowych, może wynosić nawet do 280 MPa [73].

Czynnikiem oddziałującym na właściwości rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym jest moc pobierana przez rozrusznik elektryczny [38,107] w trakcie napędzania wału korbowego. Moc ta jest zależna od temperatury silnika w chwili jego rozruchu. Ilustruje to rysunek 3.5.



Rys. 3.5. Charakterystyki mocy pobieranej przez rozrusznik w czasie uruchamiania dla różnych temperatur jego pracy [108]

Zmniejszenie się mocy pobieranej przez rozrusznik podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym przyczynia się do tego, że obserwujemy obniżeniu się wartości prędkości kątowej jego wału korbowego, co utrudnia uzyskanie udanego rozruchu. Stan naładowania akumulatora samochodowego decyduje także o możliwości wystąpienia rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym. Zmniejszenie stanu naładowania akumulatora do 70% skraca możliwy czas napędzania wału korbowego silnika przez rozrusznik. Jest to szczególnie istotne w obniżonych temperaturach silnika, kiedy należy dłużej obracać wałem korbowym w celu osiągnięcia właściwych warunków do zaistnienia pierwszych samozapłonów wtryskiwanego paliwa. Brak właściwego poziomu naładowania może więc spowodować nieudany rozruch silnika spalinowego [110].

Także wartość przełożenia między zębniakiem rozrusznika a wieńcem zębatym koła zamachowego wpływa na właściwości rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym. Im jest ona większa, tym większy uzyskujemy moment napędzający wał korbowego silnika oraz występuje wzrost jego prędkość obracania się. Poprawia to warunki do zaistnienia pierwszych samozapłonów wtryskiwanej dawki rozruchowej paliwa [110,111].

Stan techniczny silnika spalinowego, przede wszystkim jego zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (zespół TPC) jest także czynnikiem wpływającym na właściwości rozruchowe. Zużycie zespołu TPC prowadzi do wzrostu tzw. przedmuchów do skrzyni korbowej silnika spalinowego. Jest to negatywne zjawisko, gdyż powoduje ono straty ładunku na końcu suwu sprężania, a tym samym straty ciepła sprężanego powietrza. Obserwuje się, że te straty w zakresie temperatur od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ nie zależą od wartości temperatury. Wartości strat ciepła spowodowanych ucieczką sprężanego ładunku powierza są czterokrotnie większe od strat wynikłych z przejmowania ciepła przez ściany komory sprężania silnika o zapłonie samoczynnym [1,110]. Jest to szczególnie widoczne podczas rozruchu silnika spalinowego w niskich temperaturach otoczenia, co prowadzić może do tego, że sprężany ładunek powietrza w końcu suwu sprężania nie uzyska właściwego stanu termodynamicznego (za małe wartości ciśnienia i temperatury) pozwalającego na zaistnienie samozapłonu wtryskiwanego do komory spalania paliwa [3,88,108].

Na właściwości rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym wpływają rodzaj oraz właściwości fizyczne zastosowanego oleju napędowego (ON) takie jak: liczba cetanowa, lepkość, lotność, napięcie powierzchniowe i temperatura blokady zimnego filtra (CFPP) [108,116,149,150]. Od olejów napędowych wymaga się dużej wartości liczby cetanowej ($LC > 51$) [109]. Zwiększenie liczby cetanowej poprawia właściwości rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym. Jej wpływ jest szczególnie widoczny przy tzw. temperaturze granicznej rozruchu [88].

Ważnymi parametrami fizycznymi oleju napędowego, które mają wpływ na rozruch silnika o zapłonie samoczynnym są temperatura mętnienia oraz temperatura zablokowania zimnego filtra (CFPP). Temperatura mętnienia jest to taka wartość temperatury, w której

ochładzany olej napędowy według określonego trybu badań mętnieje wskutek wydzielania się kryształów parafin. Temperatura zablokowania zimnego filtra określa najwyższą temperaturę, w której określona objętość paliwa, chłodzona w znormalizowanych warunkach, nie przepływa w określonym czasie przez znormalizowany układ filtracyjny. Wartość temperatury zablokowania zimnego filtra dla oleju napędowego gatunku F (olej zimowy) CFPP = -20 °C. Dla letniego oleju napędowego gatunku B CFPP = 0 °C, zaś dla oleju przejściowego gatunku D temperatura zablokowania zimnego filtra wynosi CFPP = -10 °C [149,150].

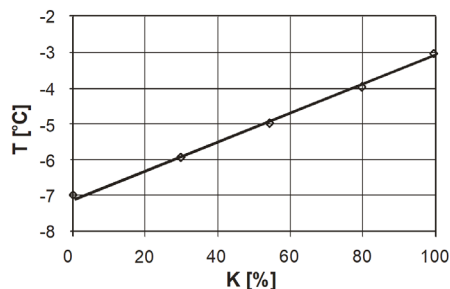
Od oleju napędowego wymaga się także, aby charakteryzował się niską wartością lepkości oraz napięcia powierzchniowego [59,150]. Parametrem oleju napędowego oddziaływującym na lotność jest tzw. wartość temperatury oddestylowania 10% oleju napędowego. Im jest mniejsza wartość tego parametru, tym olej napędowy charakteryzuje się większą lotnością oraz szybciej odparowuje [150].

Autorzy w publikacjach [4,7,16,112] wykazali, że zastosowanie paliw alternatywnych takich jak: olej rzepakowy, estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (FAME) oraz ich mieszaniny z olejem napędowym, wywołuje zmiany w przebiegu rozruchu silników o zapłonie samoczynnym. Wynika to z faktu, że w strukturze oleju rzepakowego występują podwójne wiązania olefinowe. Wiązania te charakteryzują się dużą aktywnością chemiczną. Olej rzepakowy zawiera również w swoim składzie tlen, co jest korzystne z punktu widzenia mechanizmów spalania. Dodatkowo olej rzepakowy oraz FAME mają większą lepkość oraz gęstość w porównaniu z czystym olejem napędowym. Te ich cechy fizyko-chemiczne przyczyniają się do zmniejszenia przecieków oraz zwiększenia uszczelnienia współpracujących ze sobą elementów zespołu tłoczącego i rozpylacza. Stwarza to, że podczas uruchamiania silnika o zapłonie samoczynnym obserwujemy wzrost dawki rozruchowej oraz korzystniejszą niejednorodność średnicy kropeł wtryskiwanego paliwa. Ułatwia to rozruch silnika, ale tylko w dodatnich temperaturach [128,142].

Dla niskich temperatur otoczenia, podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, zasilanych olejem rzepakowym lub FAME obserwuje się wzrost tzw. granicznej temperatury rozruchu. Jest to spowodowane wzrostem lepkości, a tym samym oporów przepływu paliw w filtrze i pompie wtryskowej oraz krystalizacją związków organicznych zawartych w tych paliwach. Dla czystego oleju wartość temperatury granicznej wynosi 6 °C, zaś dla estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego -3 °C [128].

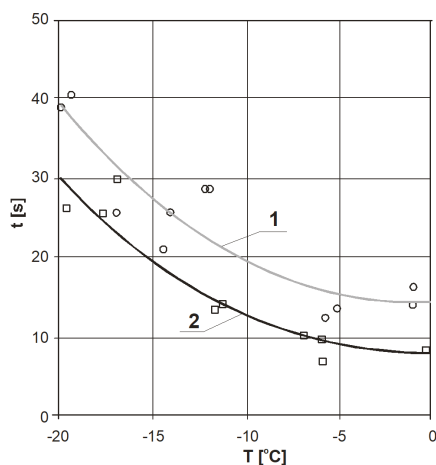
Poprawę właściwości rozruchowych silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego paliwami alternatywnymi można uzyskać stosując mieszaniny FAME z olejem napędowym. Zwiększenie zawartości oleju napędowego w mieszaninie z FAME powoduje uzyskanie niższej wartości granicznej temperatury rozruchu silnika równej 20 °C [128]. Ilustruje to rysunek 3.6.

Dodatkową poprawę właściwości rozruchowych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami rzepakowymi uzyskuje się poprzez wprowadzenie modyfikatorów procesów krystalizacji węglowodorów [60].



Rys. 3.6. Wpływ zawartości estrów metylowych oleju rzepakowego w mieszaninie z olejem napędowym na graniczną temperaturę rozruchu silnika [128]

Kolejnym czynnikiem wpływającym na właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym są cechy reologiczne oleju smarującego. Jak wiadomo obserwuje się wzrost lepkości oleju smarującego w miarę spadku temperatury rozruchu silnika. Powoduje to, że wartość momentu pochodzącego od sił tarcia kinematycznego wzrasta. Przy czym przyrost tej wartości przebiega szybciej niż występujący wzrost oporów sprężania mieszanki palnej w komorach spalania, który jest wywołany sprężaniem ładunku o większej masie (wzrost gęstości powietrza w miarę obniżania się temperatury) [55,72,88,103,131]. Od oleju smarującego wymaga się także odpowiedniej smarności i lepkości strukturalnej w niskich temperaturach. Wykazano, że oleje syntetyczne posiadają lepszą charakterystykę lepkości w niższych temperaturach względem olejów mineralnych, co obniża moment sił tarcia kinematycznego w czasie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [72,115,129,151]. Ilustruje to wykres z rysunku 3.7.



Rys. 3.7. Czas osiągnięcia założonego ciśnienia oleju dla silnika Cummins NTC-400 w zależności od temperatury otoczenia dla dwóch olejów o różnej lepkości: 1 – olej o mniejszej lepkości w niższych temperaturach, 2 – olej o większej lepkości w niższych temperaturach [115]

4. Tworzenie i spalanie mieszanki palnej podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym

4.1. Tworzenie mieszanki palnej rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym

Jak opisano wcześniej w trakcie przebiegu procesu rozruchu silnika spalinowego wytwarzana jest paliwowo-powietrzna mieszanka palna oraz dochodzi do inicjowania jej spalania w poszczególnych cylindrach silnika. Warunkiem koniecznym udanego rozruchu jest uzyskanie takiej wartości prędkości kątowej rozruchu silnika spalinowego przy której w mieszance palnej wystąpią dogodne warunki umożliwiające zainicjowanie jej samozapłonów. Warunkiem wystarczającym rozruchu jest wystąpienie samozapłonów mieszanki paliwowo-powietrznej. Dla silników o zapłonie samoczynnym wymusza to utworzenie w komorze spalania takich warunków termicznych, przy których temperatura sprężanego ładunku powietrza osiągnie wartość wyższą od efektywnej wartości temperatury samozapłonu wtryskiwanego paliwa [87,127]. Przyjmuje się, że wymagane wartości prędkości kątowej rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym powinny znajdować się w przedziale $9\div 21$ rad/s (ok. $60\div 200$ obr/min) [32,88]. Na wartość prędkości kątowej rozruchu wpływa wiele czynników, a zagadnienia te zostały omówione szczegółowo w rozdziale 3 monografii.

Zasadniczą metodą wytworzenia właściwej mieszanki palnej w silnikach o zapłonie samoczynnym jest wysokociśnieniowy wtrysk paliwa z otworów wtryskiwacza do komory spalania lub komory wstępnej wypełnionej sprężonym powietrzem. W wyniku rozbicia wtryskiwanego strumienia paliwa na wiele drobnych kropli następuje zwiększenie pola powierzchni jego styku z powietrzem, co przyspiesza odparowanie i poprawia jego wymieszanie z powietrzem oraz przyczynia się do równomiernego rozprowadzenia paliwa w komorze spalania.

Obserwowane, podczas rozruchu, niewielkie prędkości kątowe wału korbowego silnika spalinowego wpływają negatywnie, pomimo znacznych prędkości wypływu paliwa z wtryskiwacza, na proces rozpylania paliwa oraz jego wymieszanie z powietrzem. Dodatkowe utrudnienia w procesie tworzenia i rozpylenia strugi paliwa w cylindrze wynikają także z: cykliczności pracy silnika i związanej z tym okresowością wtrysku paliwa, zmian prędkości tłoczenia przez pompę wtryskową, zjawisk falowych występujących w przewodzie wtryskowym, drgań iglicy wtryskiwacza powodujących wahania ciśnienia paliwa przed otworem wylotowym, a tym samym wahań prędkości wypływu strugi paliwa oraz zjawisk powodowanych ściśliwością paliwa. W sposób szczególnie niekorzystny na rozpylenie strugi paliwa wpływa wartość temperatury otaczającego powietrza. Wraz z jej spadkiem pogarsza się proces rozpadu wtryskiwanego paliwa do komory spalania. Utrudnia to powstanie ognisk samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej [32,43].

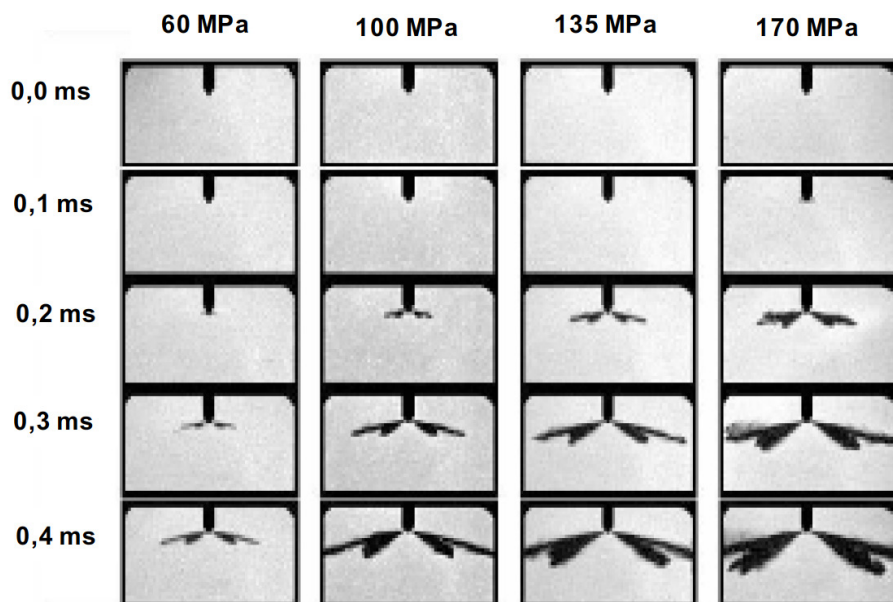
Jakość rozpylenia strugi wtryskiwanego paliwa do sprężanego powietrza ocenia się na podstawie dokładności rozpylania i jednorodności kropeł. Dokładność rozpylania jest określana miarą wielkości kropeł powstałych podczas rozpylania. Jednorodność rozpylenia kropeł definiowana jest poprzez określenie rozkładu kropeł o jednakowej średnicy [136]. Na jakość rozpylenia strugi wtryskiwanego paliwa wpływa wiele czynników [15,32] związanych z:

- konstrukcją układu zasilania i układu dolotowego silnika (rodzaj i średnicą otworów wylotowych rozpylacza, wzniosem iglicy rozpylacza, kształtem geometrycznym kanałów dolotowych powietrza i komory spalania itd.),
- parametrami eksploatacyjnymi (ciśnienie, prędkość i sposób zawirowania powietrza w komorze spalania, ciśnienie wtrysku paliwa, prędkość wypływu paliwa),
- właściwościami fizycznymi paliwa (jego gęstość, lepkość, napięcie powierzchniowe),
- parametrami otaczającego powietrza (ciśnienie, temperatura).

Liczba oraz średnica otworów wylotowych rozpylacza, obok ciśnienia wtrysku, mają decydujący wpływ na jakość rozpylenia wtryskiwanego paliwa. Wynika to z faktu, że prędkość wypływu paliwa z otworków rozpylacza jest zależna od wartości ciśnienia wtrysku oraz ich średnicy. Dodatkowo wraz ze zwiększeniem liczby otworów przy równoczesnym zmniejszeniu ich średnicy rozpad strumienia zaczyna się w mniejszej odległości od rozpylacza oraz obserwuje się wystąpienie krótszego czasu wytwarzania pierwszych ognisk samozapłonów w mieszance palnej. Dla dużych prędkości wypływu paliwa z otworów rozpylacza stawiany mu opór powietrza jest znaczny. Powoduje to, że przy zderzeniu paliwa z cząstkami powietrza ulega ono natychmiastowemu rozdrobnieniu. Zwiększenie się wartości ciśnienia oraz gęstości powietrza w komorze spalania przyczynia się do powiększenia oporów aerodynamicznych, które musi pokonać strumień rozpylanego paliwa. Przyspiesza to dodatkowo jego rozpad. W miarę trwania wtrysku paliwa jego strumień przybiera kształt stożka o zwiększającym się kącie wierzchołkowym przy równoczesnym zmniejszaniu się prędkości czoła strumienia.

Obserwuje się wpływ lepkości paliwa na jakość jego rozpylenia. Przy wzroście lepkości rozpad strumienia wtrysniętego paliwa jest trudniejszy, gdyż występują znaczne siły międzycząsteczkowe. Kształt geometryczny strumienia rozpylonego paliwa jest powiązany z zasięgiem strugi oraz daje ogłód na dokładność rozpylania. Drobniejsze krople paliwa w ośrodku powietrznym szybciej tracą swą prędkość ze względu na mniejszą masę i wynikającą z tego mniejszą energię kinetyczną. Dodatkowo oddalają się one ku brzegowi strumienia, co powoduje wzrost kąta rozwarcia stożka wtryskiwanego paliwa [14,87].

Zwiększenie wartości ciśnienia wtrysku przyczynia się do przyspieszenia jego wypływu, jednorodności rozpylenia i ilości drobnych kropeł w strudze. Wykazano, że przy wzroście wartości ciśnienia wtrysku z 70 MPa do 130 MPa średnica Sautera (SMD) kropeł ulega zmniejszeniu rzędu około 45%. Wzrost wartości ciśnienia wtrysku powoduje także równomierniejszy rozkład pola prędkości oraz struktury strugi paliwa w komorze spalania. Zaobserwowano, że zmiana wartości ciśnienia wtrysku z 60 MPa do 170 MPa wywołuje około dwukrotny wzrost prędkości strugi. Wzrost ciśnienia wtrysku przyczynia się do zwiększenia zasięgu strugi paliwa, jej lepszej homogenizacji oraz zwiększania objętości rozpylenia, co zilustrowano na rysunku 4.1 [14].



Rys. 4.1. Widok strugi paliwa w płaszczyźnie osi wtryskiwacza przy różnych ciśnieniach [14]

Poprawa homogenizacji procesu, nierównomierny rozkład prędkości oraz wzrost objętości rozpylenia przyczyniają się do poprawy warunków tworzenia palnej mieszanki paliwowo-powietrznej [14].

4.2. Spalanie mieszanki w czasie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym

Podczas procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym obserwuje się występowanie innego przebiegu procesu spalania mieszanki palnej niż podczas jego samodzielnego działania. W trakcie procesu rozruchu, ze względu na długi okres opóźnienia samozapłonu oraz znaczną dawkę rozruchową, do komory spalania silnika doprowadzana jest większa ilość paliwa. A to powoduje, że w wybuchowym

(kinetycznym) okresie spalania następuje znaczący przyrost wartości ciśnienia w cylindrze. Wartość maksymalna tego ciśnienia przekracza wartości maksymalne, jakie mogą wystąpić podczas normalnego funkcjonowania silnika spalinowego [22]. Dla tej fazy spalania w warstwie płomienia ubogiego w paliwo obserwuje się powstanie węglowodorów, a w strefie popłomiennej tlenków azotu. W wyniku gwałtownego i „długiego” przebiegu okresu spalania kinetycznego kolejne fazy spalania (spalanie dyfuzyjne i dopalanie) są bardzo krótkie [11,45,94]. Skrócony czas ostatniej fazy spalania przyczynia się do tego, że występuje słabe dopalanie się węglowodorów, tlenu węgla oraz sadzy powstałej w fazie spalania dyfuzyjnego w strefach bogatych w paliwo. Ze względu na niską temperaturę powierzchni ścianek komory spalania oraz znaczne luzy w złożeniu TPC (zimny silnik), występuje także intensywne oddawanie ciepła przez mieszankę palną oraz obserwuje się lokalne wygaszanie płomienia. Przyczynia się to do wystąpienia niezupełnego i niecałkowitego spalania paliwa podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [43,66,113,120].

W silniku o zapłonie samoczynnym podczas procesu jego rozruchu, szczególnie w ujemnych temperaturach, zaobserwowano cykliczne wypadanie samozapłonów mieszanki palnej w cylindrze (cylindrach). Zjawisko to nazwano tzw. „pracą w ósmiotakcie lub dwunastotakcie” [46,107]. Według autorów na występowanie tego zjawiska ma wpływ osiadające na ściankach komory spalania paliwo, które powoduje dodatkowe uszczelnienie komory spalania, a tym samym wzrost stopnia sprężania ładunku powietrza podczas rozruchu. Ułatwia to zaistnienie samozapłonu mieszanki palnej znajdującej się w cylindrze. W wyniku wystąpienia tego spalania następuje wypalenie osiadłego na ścianie paliwa, co jednocześnie powoduje ponowne zmniejszenie się uszczelnienia komory spalania. Dodatkowo pozostające w cylindrze w znacznej ilości spaliny (słabe przepłukanie z powodu małej prędkości kątowej wału korbowego podczas procesu rozruchu) ograniczają poważnie współczynnik jego napełnienia nowym, świeżym ładunkiem powietrza. Wywołuje to brak samozapłonu mieszanki palnej w kolejnym cyklu pracy silnika spalinowego.

W rezultacie początkowego całkowitego braku wystąpienia samozapłonów mieszanki palnej w cylindrach, a następnie w związku z ich cyklicznym wypadaniem a także niekorzystnym przebiegiem spalania bogatej mieszanki palnej, podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, szczególnie w niskich temperaturach, można zaobserwować występowanie kilkakrotnie większej emisji składników toksycznych spalin (węglowodory, tlenek węgla, aldehydy) niż w warunkach normalnego jego działania. Do komory spalania, ze względu na znaczne luzy w złożeniu TPC, dostaje się także olej smarujący, który dodatkowo jest spalany oraz uczestniczy, wraz z niespalonymi węglowodorami i sadzą, w tworzeniu znacznej ilości cząstek stałych [6,100,113,120].

Wynikiem zwiększonej emisji cząstek stałych w spalinach jest ich zadymienie. Podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym można to zaobserwować w postaci niebieskiego lub czarnego koloru spalin wydobywających się z układu wydechowego samochodu. Występowanie spalin w kolorze niebieskim jest związane z rozruchem zimnego silnika spalinowego. W jego trakcie występuje bowiem wymieszanie się skroplonej pary wodnej oraz odparowanego, ale niespalonego paliwa. Czarny kolor spalin można zaobserwować podczas ciepłych rozruchów silników o zapłonie samoczynnym w wyniku spalania znacznej dawki rozruchowej [84,94]. Dopiero po upływie czasu rzędu 3 minut (co odpowiada w warunkach rzeczywistych przejazdowi pojazdu na odcinku drogi około 3 km) występuje spadek stężenia związków szkodliwych. Stwierdzono doświadczalnie, że wraz ze spadkiem temperatury rozruchu wzrasta poziom emisji składników toksycznych spalin [10,12,84,99].

Oprócz zwiększonej emisji składników toksycznych, podczas trwania procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, występują inne negatywne procesy i zjawiska. Możemy do nich zaliczyć zwiększoną intensywność zużywania się par tribologicznych silnika spalinowego oraz przeciążenia występujące w układzie elektrycznym samochodu. Zostaną one szczegółowo opisane w dwóch kolejnych rozdziałach niniejszej monografii.

5. Procesy tribologiczne występujące w trakcie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym

5.1. Opory ruchu w trakcie uruchamiania samochodowego silnika spalinowego

Na początku każdego rozruchu silnika spalinowego obserwujemy przejście ze stanu spoczynku do stanu ruchu jego elementów i zespołów. Wymaga to dostarczenia z zewnętrzną energią mechaniczną koniecznej do pokonania sił tarcia statycznego, które przeciwdziałają się ruchowi względnemu elementów będących w spoczynku. W chwili przyłożenia sił zewnętrznych występuje, bez poślizgu w skali makroskopowej, przesunięcie (mikropoślizg) w obrębie styku współpracujących ze sobą powierzchni. Towarzyszą temu sprężysto-plastyczne odkształcenia warstw wierzchnich elementów. Dopiero w chwili osiągnięcia przez zewnętrzne siły napędowe stosowniej wartości, która uzależniona jest od wielu różnorodnych czynników, może wystąpić ruch względny zespołów silnika spalinowego podczas jego rozruchu [72].

Stwierdza się, że największa wartość momentu oporu (obliczany względem osi obrotu wału korbowego silnika) pochodzącego od sił tarcia spoczynkowego wstępuje, kiedy ramię tego wału oraz korbowód tworzą w przybliżeniu kąt prosty [108]. Oczywiście jest, że w miarę czasu trwania postoju samochodu z wyłączonym silnikiem wzrasta wartość współczynnika tarcia spoczynkowego. Wynika to z faktu zaniku warstwy granicznej oleju smarującego, ale także wzrostu liczby stykowych mikropołączeń adhezyjnych obserwowanych pomiędzy warstwami wierzchnimi powierzchni elementów silnika spalinowego [61,72].

Wartość współczynnika tarcia spoczynkowego w poszczególnych węzłach tribologicznych silnika spalinowego zależy od wielu czynników takich jak [53,72,103,131]: rodzaj materiału, konstrukcja, technologia wykonania i montaż tych węzłów, techniki smarowania i jakość stosowanych środków smarowych, dokładność systemu filtracji zanieczyszczeń oraz stan techniczny silnika, warunki eksploatacji danego samochodu, itd.

Obserwowane na początku rozruchu silnika spalinowego przejście ze stanu spoczynku do stanu ruchu przyczynia się do tego, że wartość rozruchowego momentu oporowego obniża się w stosunku do początkowej wartości momentu oporu pochodzącego od sił tarcia statycznego [121,122]. Systematyczne zwiększanie wartości prędkości kątowej wału korbowego silnika powoduje, że maleje wartość rozruchowego momentu oporowego silnika spalinowego. W trakcie rozruchu, podczas napędzania wału korbowego samym tylko rozrusznikiem (etap nr 2 rozruchu), obserwowana wartość rozruchowego momentu oporowego jest prawie $2\div 2,5$ -krotnie mniejsza w stosunku do wartości maksymalnej, występującej na początku ruchu [121,140].

Niezaprzeczalne jest, że rozruchowy moment oporowy silnika ulega wahaniom będącym wynikiem ruchu posuwisto-zwrotnego tłoków oraz zmieniającej się wartości ciśnienia podczas sprężania i rozprężania ładunku powietrza w cylindrach. Przy czym wartość rozruchowego momentu oporowego silnika osiąga maksima lokalne w zwrotnych położeniach tłoków [30,88,104].

Wyniki badań przedstawionych w wielu publikacjach krajowych i zagranicznych [57,91,103,140] dowiodły, że rozruchowy moment oporowy wynika w głównej mierze z momentu sił tarcia kinematycznego (stanowiącego od 70% do 90% całkowitej wartości momentu oporowego). Moment ten w głównej mierze obserwowany jest w głównych węzłach tribologicznych silnika spalinowego takich jak: zespół TPC, łożyska główne i korbowe wału korbowego oraz układ rozrządu. Pozostałą część rozruchowego momentu oporowego silnika spalinowego stanowi moment oporu sił pochodzący od napędu osprzętu i sprężania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach. Przy czym w miarę wzrostu wartości stopnia sprężania silnika spalinowego występuje zwiększenie się wartości momentu oporu wywołanego procesem sprężania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach [88,136].

Stwierdzono, że w przeważającej mierze (od 50% do 70%) wartość sumaryczna momentów sił tarcia kinematycznego w silniku spalinowym pochodzi z procesów tarcia zachodzących w zespole TPC [58,75,87,103]. Obserwuje się, że w miarę spadku temperatury rozruchu silnika spalinowego, wzrasta udział procentowy momentu sił tarcia kinematycznego występującego w łożyskach ślizgowych z powodu wzrostu lepkości oleju silnikowego [52,57,70,130].

Wartość momentu sił tarcia kinematycznego, jaka można zaobserwować w trakcie rozruchu silnika spalinowego, zależy od wielu czynników związanych z konstrukcją, technologią wykonania i montażu zespołu TPC [140], ale przede wszystkim od warunków występujących podczas użytkowania samochodu.

Uzyskanie odpowiedniego ukształtowania geometrii w elementach zespołu TPC silnika (w tym: owalizacja, baryłkowatość i stożkowatość tłoka oraz luz montażowy) powoduje zmniejszenie się wartości momentu sił tarcia kinematycznego [27,52,103]. Wykazano także, że mniejsza wysokość pierścieni tłokowych przyczynia się do spadku grubości filmu olejowego, a przy tym obniża siłę tarcia kinematycznego. Dodatkowo zwiększenie liczby pierścieni tłokowych zwiększa siły tarcia kinematycznego występujące w zespole TPC. Także wzrost stosunku skoku tłoka do jego średnicy powoduje przyrost wartości siły tarcia kinematycznego w zespole TPC podczas rozruchu silnika spalinowego [121,140].

Najważniejszym czynnikiem eksploatacyjnym oddziałującym na wartość rozruchowego momentu oporowego silnika spalinowego podczas rozruchu jest jego stan cieplny. W miarę spadku wartości temperatury silnika obserwujemy wzrost lepkości oleju smarującego [72,88,131,145]. Przyczynia się to do wzrostu wartości momentu sił tarcia kinematycznego występującego w silniku spalinowym podczas jego rozruchu. Wzrost ten przebiega szybciej niż występujący przyrost oporów sprężania

wywołany sprężaniem ładunku powietrza o większej masie (wzrost gęstości powietrza przy obniżaniu się jego temperatury). Z tych powodów obserwuje się wzrost udziału względnego momentu sił tarcia kinematycznego we wzrastającym, w miarę spadku temperatury całkowitym rozruchowym momencie oporowym silnika [58,88,136].

Olej smarujący który mamy zastosować w silniku spalinowym musi charakteryzować się odpowiednimi właściwościami reologicznymi w niskich temperaturach takimi jak: smarność oraz lepkość strukturalna [115,146]. Zastosowanie oleju syntetycznego, który charakteryzuje się lepszymi własnościami lepkościowymi w niższych temperaturach względem oleju mineralnego, może zmniejszyć wartość siły tarcia występującego w zespole TPC silnika [52,70].

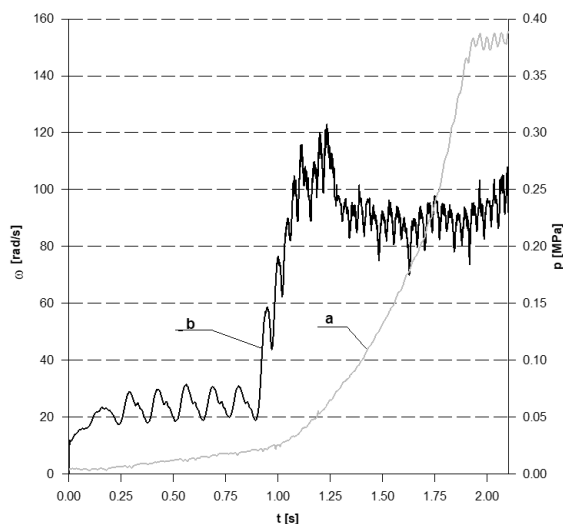
Kolejnym czynnikiem wpływającym na rozruchowy moment oporowy silnika spalinowego jest prędkość kątowna wału korbowego podczas rozruchu. Zwiększenie tej prędkości powoduje, że w oleju smarującym oraz w sprężanym ładunku powietrza w komorze spalania dochodzi do wzrostu wartości tarcia wewnątrzcząsteczkowego. Wywołuje to przyrost rozruchowego momentu oporowego silnika spalinowego. Wartość składowej momentu oporowego silnika pochodzącej od momentu sił tarcia kinematycznego wzrasta szybciej niż składowa pochodząca od momentu oporów sprężania ładunku [52,88,121].

5.2. Tarcie i zużycie silnika spalinowego podczas jego rozruchu

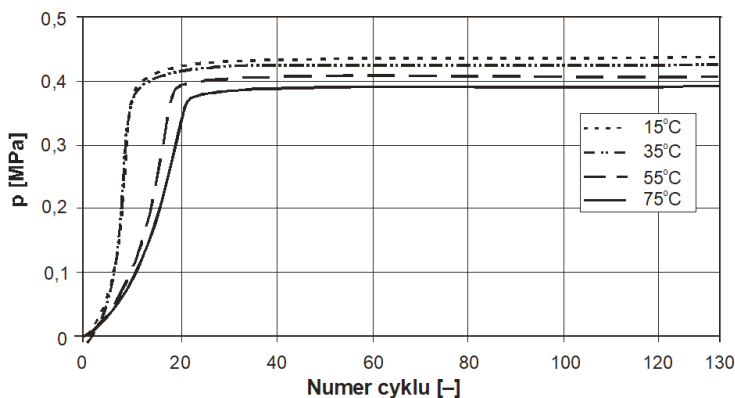
Ze względu na niedostateczną ilość oleju silnikowego występującą pomiędzy powierzchniami par tribologicznych silnika spalinowego oraz na zbyt małą ich prędkość względną obserwuje się występowanie tarcia granicznego na początku rozruchu. Ten rodzaj tarcia charakteryzuje się tym, że warstewka środka smarnego o grubości kilku do kilkudziesięciu molekuł pokrywa powierzchnie współpracujących ze sobą elementów [23,25,72,103,131].

Niedostateczna ilość oleju silnikowego w węzłach tribologicznych silnika spalinowego w trakcie jego rozruchu wynika przede wszystkim z bezwładności jego układu olejenia. Dla przykładu na rysunku 5.1. zaprezentowano przebieg zmian wartości ciśnienia oleju silnikowego mierzonego w głównej magistrali olejowej podczas rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym w temperaturze 15 °C.

Analizując przedstawiony na rysunku 5.1 przebieg zmian wartości ciśnienia oleju w głównej magistrali olejowej silnika spalinowego podczas jego rozruchu można zauważyć, że nim wartość ciśnienia oleju osiągnęła „stabilny” poziom silnik funkcjonował już samodzielnie na biegu jałowym. Dla rozruchów silnika spalinowego w temperaturze powyżej 0 °C, przy zwiększaniu się czasu trwania przerw w jego działaniu (niższe temperatury rozruchu), obserwuje się występowanie szybszego narastania oraz większą wartość „stabilnego” poziomu ciśnienia oleju smarującego. Ilustruje to rysunek 5.2, na którym przedstawiono przebieg ciśnienia oleju w głównej magistrali olejowej w trakcie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym dla dodatnich temperatur rozruchu [32].



Rys. 5.1. Przebieg zmian wartości ciśnienia oleju smarującego oraz prędkości kątowej wału korbowego podczas rozruchu silnika 4CT90 samochodu LUBLIN III w temperaturze 15 °C: a – ciśnienie oleju smarującego, b – prędkość kątowa wału korbowego [32]



Rys. 5.2. Przebieg zmian wartości ciśnienia oleju smarującego w funkcji kolejnych cykli pracy silnika o zapłonie samoczynnym w różnych temperaturach rozruchu [32]

Obserwowane różne przebiegi zmiany wartości ciśnienia oleju smarującego w zależności od wartości temperatury silnika spalinowego wynikają ze wzrostu oporów tłoczenia wywołanych wzrostem lepkości oleju w miarę spadku temperatury rozruchu [72,115,140].

Dla rozruchów silnika spalinowego w temperaturze poniżej 0 °C czas osiągnięcia „stabilnego” poziomu wartości ciśnienia oleju smarującego w głównej magistrali olejowej rośnie w miarę spadku wartości temperatury, co przedstawiono na rysunku 3.7 [115].

Wynika to ze znacznie wyższej wartości lepkości oleju w niskich temperaturach oraz z wytrącania się osadu w misce olejowej silnika (efekt oddziaływania wody zawartej w oleju), który zatykając przewody olejowe silnika zwiększa dodatkowo opory przepływu. Woda zgromadzona w misce olejowej wywołuje także koagulację i hydrolizę zawartych w oleju smarującym inhibitorów korozji pogarszając jego właściwości smarne [75].

Występujące zwiększone opory przepływu, szczególnie w niskich temperaturach otoczenia, przyczyniają się do wydłużenia się czasu dotarcia oleju do górnych części cylindrów silnika spalinowego. Na przykład w temperaturze -15°C czas potrzebny na dotarcie oleju do górnej części cylindrów wynosi 180 s, a przy -20°C wzrasta prawie do 230 s [75,114]. Obserwowane w trakcie rozruchu silnika spalinowego przebiegi zmian wartości ciśnienia oleju smarującego wynikają w głównej mierze z zależności jakie występują pomiędzy jego lepkością a wartościami temperaturą oraz ciśnieniem [72].

Obserwuje się, że podczas długich przerw w działaniu silnika spalinowego występuje systematyczny zanik warstewki granicznej oleju silnikowego na powierzchniach elementów par kinematycznych. Stwierdzono doświadczalnie [61], że trwała warstewka graniczna oleju silnikowego na gładzi tulei cylindrowej silnika utrzymuje się około 48 godzin od chwili jego zatrzymania. Zanik tej warstewki granicznej w połączeniu z brakiem dostatecznej ilości oleju smarującego, przyczynia się do możliwości pojawienia się na początku rozruchu tarcia suchego, a tym samym do wzrostu rozruchowego momentu oporowego silnika.

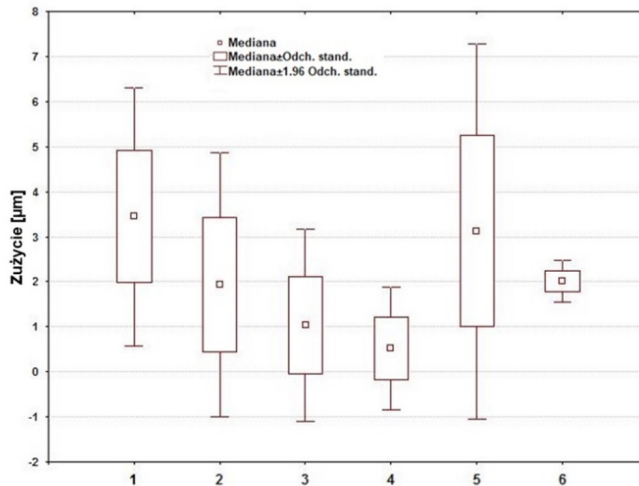
Podczas trwania rozruchu silnika spalinowego, w miarę jak olej silnikowy dociera do par tribologicznych, tarcie graniczne przechodzi w tarcie mieszane. Powoduje to spadek wartości rozruchowego momentu oporowego. Dopiero jednak osiągnięcie dostatecznej wartości prędkości względnej, przy odpowiedniej ilości oleju smarującego, pomiędzy przemieszczającymi się powierzchniami węzłów kinematycznych powoduje, że pojawiają się właściwe warunki do wystąpienia w nich tarcia płynnego [42,72,131,140].

Należy zaznaczyć, że w łożyskach ślizgowych wału korbowego, ze względu na ich smarowanie pod ciśnieniem, tarcie płynne pojawia się w znacznie szybciej niż w parach tribologicznych zespołu TPC, który jest smarowany rozbryzgowo. Podczas samodzielnego działania silnika spalinowego w punktach zwrotnych tłoka, przy zerowej prędkości względnej przemieszczania się elementów zespołu TPC, obserwuje się występowanie tarcia mieszanego [72,122,131].

Przedstawione powyżej przejścia występujące podczas rozruchu silnika spalinowego z tarcia statycznego, poprzez tarcie graniczne (w skrajnych przypadkach tarcie suche) do tarcia mieszanego o małym udziale procentowym tarcia płynnego powodują, że w węzłach tribologicznych zaobserwować możemy występowanie zużycia adhezyjnego, ściernego, a w zespole TPC dodatkowo także zużycia korozyjnego. Powoduje to, że wartość zużycia elementów zespołu TPC podczas rozruchu silnika spalinowego jest kilkakrotnie większa niż podczas rzeczywistego działania w samochodzie lub w trakcie badań stanowiskowych [28,62,65,86,88,91,122]. Można przyjąć, że w przypadku temperatury rozruchu rzędu 0°C wartość zużycia gładzi tulei cylindrowych podczas

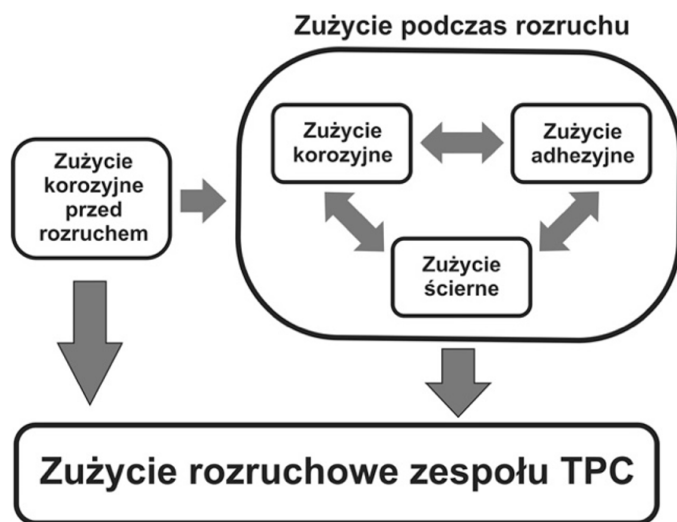
jednego rozruchu silnika spalinowego odpowiada wartości ich zużycia na przebiegu kilometrowym samochodu rzędu 80 km. W przypadku obniżenia temperatury do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ odpowiadająca wartości zużycia podczas rozruchu silnika równoważna jest przebiegowi kilometrowemu samochodu rzędu 150 km. Natomiast w temperaturze $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ekwiwalentny przebieg kilometrowy to już około 210 km [93]. Przy przeliczaniu zużycia rozruchowego na czas pracy silnika podczas stanowiskowej próby hamownianej ekwiwalentne zużycie przy rozruchu silnika w temperaturze $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ jest równe zużyciu w trakcie 10 godzin pracy przy pełnym obciążeniu. Można więc przyjąć, że zużycie rozruchowe gładzi tulei cylindrowej podczas jednego rozruchu silnika spalinowego stanowi od 15% do 75% jej ogólnego zużycia eksploatacyjnego.

Na podstawie badań stanowiskowych oraz w warunkach rzeczywistej eksploatacji samochodu, prowadzonych przez wiele lat przez autora niniejszej monografii, opracowano rysunek 5.3 który przedstawia zużycie gładzi tulei cylindrowej silnika spalinowego 4CT90 o zapłonie samoczynnym (jako przyrost jej wewnętrznej średnicy). Analizując rysunek 5.3 należy stwierdzić, że ekwiwalentne średnie zużycie rozruchowe tulei cylindrowej po 1000 uruchomień silnika w temperaturze 18°C odpowiada jej średniemu zużyciu po 200 godzinach pracy silnika na hamowni. Zaś średnie zużycie rozruchowe tulei po 1000 rozruchów silnika w temperaturze $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ odpowiada jej średniemu zużyciu po przebiegu pojazdu rzędu 10 tys. km.



Rys. 5.3. Skategoryzowany wykresy zużycia tulei silnika spalinowego w zależności od rodzaju badań:
 1 – seria 1000 rozruchów w $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – seria 1000 rozruchów w $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 – seria 1000 rozruchów w $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 4 – seria 1000 rozruchów w $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5 – 200 godzinna praca silnika na hamowni, 6 – 10 tys. km przebiegu
 pojazdu [35]

Należy stwierdzić, że zużycie rozruchowe tulei cylindrowej w zespole TPC silnika o zapłonie samoczynnym jest sumą następujących po sobie dwóch procesów zużywania, co przedstawiono na schemacie z rysunku 5.4 [32,101].



Rys. 5.4. Schemat zużycia rozruchowego zespołu TPC silnika spalinowego [32]

Występowanie pierwszego procesu odbywa się podczas postoju samochodu z wyłączonym silnikiem. Proces ten związany jest ze zużyciem korozyjnym. Zużycie to jest spowodowane faktem, że podczas trwania przerwy w działaniu silnika spalinowego, przy systematycznym słabnięciu ochrony jaką daje warstewka graniczna oleju smarującego, występują coraz dogodniejsze warunki do zaistnienia korozji, najpierw przypowierzchniowej, a następnie podpowierzchniowej w nierównościach powierzchni gładzi tulei cylindrowej [62,75,134].

Drugi proces zużycia występuje w zespole TPC w trakcie samego rozruchu silnika spalinowego. Proces ten jest konglomeratem trzech różnych rodzajów zużycia: korozyjnego, adhezyjnego oraz ściernego. Zużycie korozyjne zespołu TPC [62,90,134] w trakcie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym występuje szczególnie wyraźnie w niskich temperaturach otoczenia. Wynika ono z występowania dogodnych warunków do kondensacji pary wodnej na zimnych powierzchniach komory spalania w wyniku wzrostu wartości temperatury podczas procesu sprężania ładunku powietrza w trakcie rozruchu silnika spalinowego.

Z drugiej strony w oleju napędowym, pomimo ich usuwania, znajdują się w niewielkiej ilości związki siarki. W wyniku niepełnego i niecałkowitego spalania mieszanki paliwowo-powietrznej na początku rozruchu powstaje dwutlenek siarki, który jest absorbowany przez cienką warstewkę oleju smarującego znajdującą się na ściankach cylindrów.

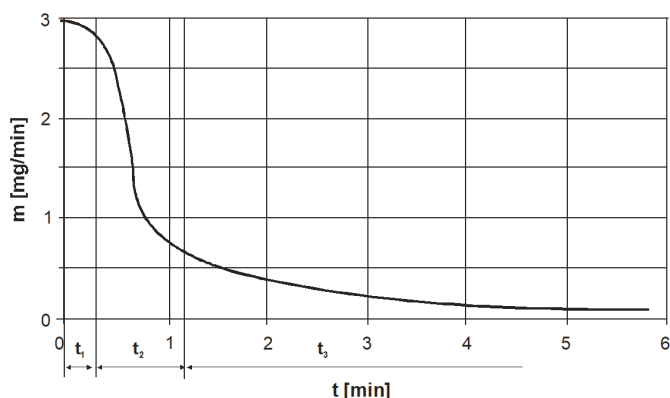
W wyniku połączenia się dwutlenku siarki oraz skroplonej pary wodnej powstaje kwas siarkowy, który będąc dobrym elektrolitem powoduje korozję elektrochemiczną powierzchni cylindrów. Dodatkowo nieodparowane paliwo osiada na ściankach

cyldrów i zmywa z nich cienką warstwę oleju silnikowego odsłaniając powierzchnię metalu. Zastosowanie układu EGR w silniku o zapłonie samoczynnym zwiększa koncentrację dwutlenku siarki w warstewce oleju. Wzrost koncentracji dwutlenku siarki w oleju obserwuje się także przy mniejszych prędkościach kątowych wału korbowego silnika spalinowego. Wywołuje to większe zużycie korozyjne gładzi tulei cylindrowej podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [85,86,90,96,116,134].

Kolejnym rodzajem zużycia występującym w zespole TPC na początku rozruchu silnika spalinowego, jest zużycie adhezyjne. Ten rodzaj zużycia wynika ze zrywania istniejących mikropołączeń stykowych warstw wierzchnich w chwili rozpoczęcia ruchu względnego powierzchni współpracujących ze sobą. Zużycie adhezyjne może wystąpić także w dalszej części rozruchu silnika spalinowego w przypadku zbyt małej wartości prędkości kątowej wału korbowego oraz przy dużych naciskach powierzchniowych w warunkach niedostatecznego smarowania olejem elementów zespołu TPC. Duże naciski wywołują przerwanie warstewki środka smarnego i ponowne szczepianie się nierówności współpracujących powierzchni [42,72].

Podczas rozruchu silnika spalinowego możemy także zaobserwować zużycie ściernie, które występuje przy zbyt cienkim filmie olejowym rzędu $1\div 1,5\text{ }\mu\text{m}$ [6,25,79]. Zużycie to wywołane jest bezpośrednim kontaktem pomiędzy współpracującymi powierzchniami elementów zespołu TPC przy obecności luźnych cząstek ściernych. Cząstki te są produktami, opisanego wcześniej, postojowego zużycia korozyjnego, początkowego zużycia adhezyjnego, a także zanieczyszczeniami dostającymi się do komory spalania silnika wraz z niedostatecznie filtrowanym powietrzem [72]. W miarę wzrostu wartości prędkości kątowej wału korbowego silnika oraz temperatury w komorze spalania następuje poprawa warunków smarowania, co powoduje pojawienie się tarcia płynnego w zespole TPC.

Występująca na początku znaczna intensywność zużycia elementów zespołu TPC maleje i ustala się na poziomie zależnym od warunków pracy silnika spalinowego [92]. Intensywność zużywania stabilizuje się po usunięciu mikrochropowatości współpracujących powierzchni. Proces zmian prędkości zużywania się elementów zespołu TPC nazywamy docieraniem porozruchowym silnika [62,72]. W procesie tym można wyróżnić trzy występujące po sobie fazy [138]: fazę intensywnego zużycia, fazę szybkiego obniżania się prędkości zużycia oraz fazę łagodnego zmniejszania się tej prędkości zużycia w miarę nagrzewania silnika, co przedstawiono na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Zmiana intensywności zużycia podczas rozruchu: t_1 – okres intensywnego zużycia, t_2 – okres zmniejszania się intensywności zużycia, t_3 – czas stabilizacji procesu zużycia [28]

Jak widać na rysunku 5.5 docieranie porozruchowe może trwać kilka minut. Zależy to od prędkości nagrzewania się silnika spalinowego. Wzrost wartości prędkości nagrzewania się silnika skraca czas trwania procesu docierania porozruchowego. Należy podkreślić, że zbyt krótki czas działania silnika spalinowego spowodować może niedokończenie się tego procesu. Spowoduje to zwiększoną prędkość zużywania się powierzchni elementów zespołu TPC przy następnym rozruchu silnika spalinowego.

Czynniki oddziałujące na wartość zużycia rozruchowego silnika o zapłonie samoczynnym można podzielić na trzy grupy [32].

Pierwszą grupę stanowią cechy konstrukcyjne silnika spalinowego;

- konstrukcja układu rozruchowego;
- konstrukcja układu smarowania;
- właściwości materiałów użytych do budowy silnika.

Drugą grupę tworzą właściwości oleju smarującego oraz paliwa silnikowego:

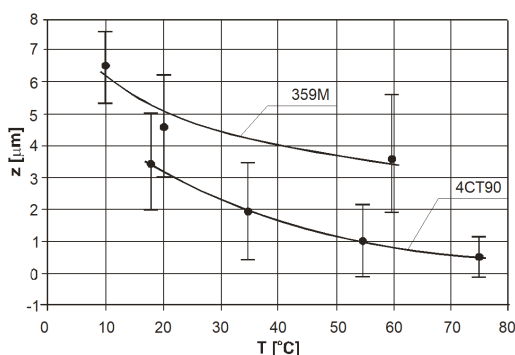
- właściwości fizykochemiczne oleju smarującego;
- rodzaj paliwa (w tym skład frakcyjny i grupowy);
- zawartość siarki w paliwie.

Do trzeciej grupy należą warunki użytkowania samochodowego silnika spalinowego:

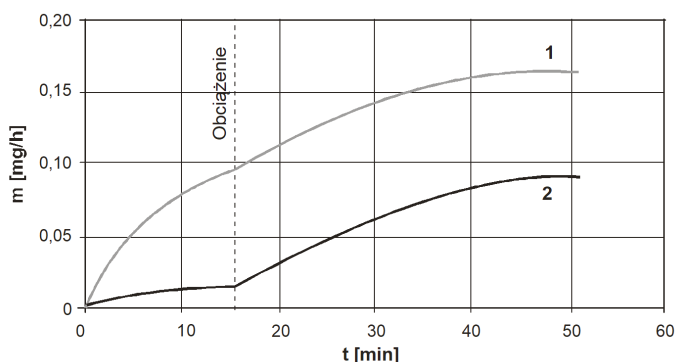
- przerwy w działaniu silnika;
- stan cieplny silnika podczas rozruchu;
- grubość i wytrzymałość warstwy oleju przed rozruchem;
- stan techniczny silnika.

Najważniejszym z wymienionych czynników, opisanym wielokrotnie w tej monografii i oddziałującym na zużycie tulei cylindrowej jest stan cieplny silnika spalinowego scharakteryzowany jego wartością temperatury. Zmniejszenie temperatury rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym powoduje bowiem zwiększenie wartości rozruchowego zużycia gładzi tulei cylindrowej. Widać to wyraźnie na rysunku 5.6, który powstał na podstawie badań własnych autora [28,32].

Na intensywność zużywania się gładzi tulei cylindrowej w czasie rozruchu silnika spalinowego istotny wpływ ma również czas trwania przerw w jego działaniu. Wzrost wartości zużycia występujący podczas trwania postoju silnika spowodowany jest opisanym wcześniej procesem korozji elektrochemicznej zachodzącym na powierzchni gładzi tulei cylindrowej, wzrostem oporów tarcia statycznego w wyniku zaniku warstewki granicznej oleju silnikowego, jak również wydłużeniem się czasu potrzebnego do uzyskania tarcia płynnego w zespole TPC. Ilustruje to rysunek 5.7.



Rys. 5.6. Wartość średnia oraz odchylenie standardowe zużycia tulei cylindrowych silników 359M samochodów grupy pierwszej i 4CT90 samochodów grupy drugiej (zob. rozdział 7.3) w funkcji temperatury jego rozruchu po 1000 rozruchach [32]



Rys. 5.7. Wpływ czasu postoju pomiędzy rozruchami na intensywność zużycia tulei cylindrowej silnika: 1 – postój 18 godzin, 2 – postój 2 godziny [28]

Podsumowując niniejszy rozdział należy stwierdzić, że podczas rozruchu silnika spalinowego obserwujemy przejście z tarcia statycznego do tarcia kinematycznego. Z tego względu a także z powodu występowania niekorzystnych warunków smarowania, szczególnie w silnikach o zapłonie samoczynnym, w czasie ich rozruchu obserwujemy wiele negatywnych procesów tribologicznych. Powodują one nagłe, skokowe zużycie układów tribologicznych, znacznie przekraczające ich wartości zużycia podczas normalnego działania silnika spalinowego.

6. Rozruch samochodowego silnika spalinowego rozrusznikiem elektrycznym

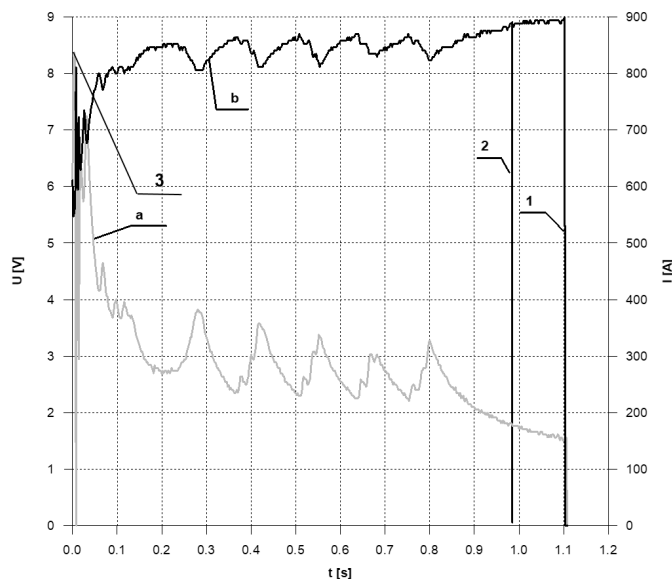
6.1. Działanie rozrusznika elektrycznego podczas rozruchu silnika spalinowego

Niezbędną energię mechaniczną potrzebną do zainicjowania samodzielnego działania samochodowego silnika spalinowego przekazuje się najczęściej poprzez napędzanie jego wału korbowego za pomocą rozrusznika elektrycznego zasilanego z akumulatora. Rozrusznik podczas rozruchu wprawia w ruch elementy i zespoły silnika spalinowego oraz ma za zadanie nadać wałowi korbowemu ruch obrotowy z prędkością kątową rozruchu. Musi przy tym pokonać rozruchowy moment oporowy silnika i moment pochodzący od sił bezwładności jego elementów wirujących [88, 108, 111].

Obecnie samochodowe rozruszniki elektryczne zbudowane są z silnika prądu stałego, mechanizmu sprzęgającego oraz zębniaka. Rozruszniki o mniejszej mocy są włączane jednostopniowo, zaś o większej dwustopniowo. Dzięki zastosowaniu dwustopniowego sposobu włączania otrzymuje się korzystniejszy przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Ze względu na obserwowane podczas rozruchu silnika spalinowego zmiany wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, używa się w nich szeregowych lub szeregowo-bocznikowych silników prądu stałego. Elektryczne silniki szeregowe charakteryzują się dużym momentem rozruchowym. Zaś silniki szeregowo-bocznikowe prądu stałego ze względu na posiadanie dodatkowego uzwojenia bocznikowego mogą pracować przy małych obciążeniach występujących na ich biegu jałowym. To uzwojenie umożliwia znaczne zmniejszenie wartości prędkości kątowej wirnika, a tym samym zwiększenie trwałości samego rozrusznika. Kiedy podczas rozruchu silnika spalinowego prędkość kątowa jego wału korbowego osiągnie określoną wartość (zadaną konstrukcyjnie) występuje, poprzez sprzęgło jednokierunkowe, odłączenie rozrusznika elektrycznego. Zabezpiecza to rozrusznik przed uzyskaniem znacznych prędkości obrotowych rzędu 30 000 obr/min, a tym samym przed zniszczeniem [33].

Rozruch silnika spalinowego rozpoczyna się w momencie, kiedy operator (kierowca) zamknie obwód elektryczny układu rozruchowego samochodu. Występuje wtedy zażębie zębniaka rozrusznika, poprzez mechanizm sprzęgający, z uzębionym wieńcem koła zamachowego wału korbowego silnika spalinowego. W następstwie tego sprzęgnięcia wał korbowy zaczyna się obracać. Przejście ze stanu spoczynku do stanu ruchu elementów i zespołów silnika spalinowego podczas jego uruchamiania wymaga pokonania znacznego momentu oporu sił tarcia statycznego. Miarą tego momentu oporu jest wartość maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik

na początku rozruchu. Zilustrowano to na rysunku 6.1., na którym zaprezentowano przebieg dwóch parametrów działania rozrusznika elektrycznego podczas zarejestrowany rozruchu samochodowego silnika spalinowego tj.: natężenia prądu oraz napięcia [32].



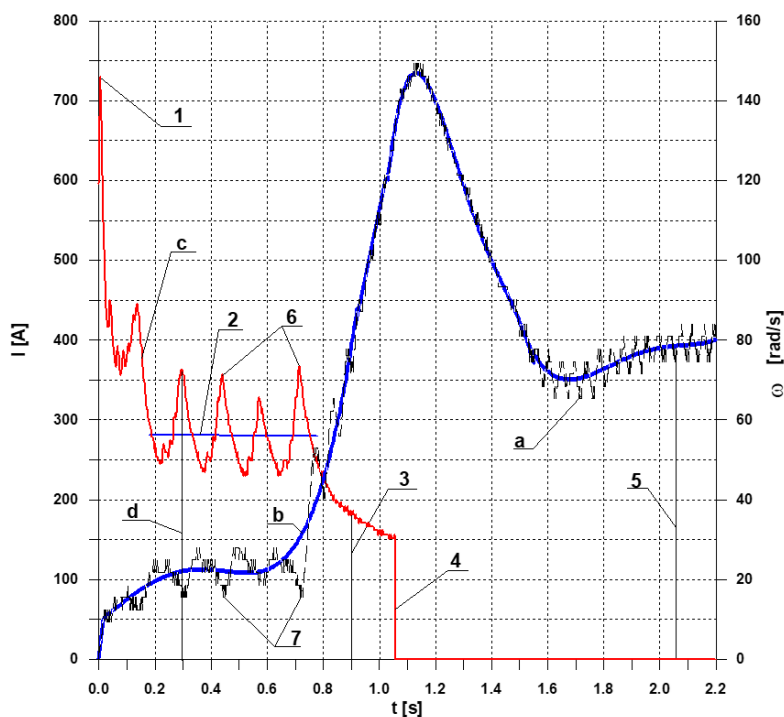
Rys. 6.1. Przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik oraz napięcia przyłożonego na zaciskach rozrusznika podczas działania rozrusznika w trakcie rozruchu silnika 4CT90: a – natężenie, b – napięcie, 1 – czas przyłożenia napięcia, 2 – czas pracy rozrusznika pod obciążeniem, 3 – maksymalne natężenie prądu pobranego przez rozrusznik na początku rozruchu [32]

Analizując rysunek 6.1 należy zauważyć istnienie następującej prawidłowości. W momencie, kiedy obserwujemy występowanie lokalnych maksim natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, wartość napięcia przyłożonego do zacisków rozrusznika osiąga minimum lokalne. Ta prawidłowość wynika z faktu osiągnięcia największej wartości ciśnienia przez mieszaninę palną sprężaną w cylindrze przez tłok w jego górnym zwrotnym położeniu. Powoduje to wzrost natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Następnie wartość natężenia prądu obserwowanego w suwie rozprężania systematycznie maleje. Cykliczność tego zjawiska wynika oczywiście z zasady funkcjonowania silnika spalinowego. Opisane powyżej wahania wartości napięcia przyłożonego do zacisków rozrusznika nie są korzystne dla układów elektronicznych współczesnych samochodów oraz ich silników spalinowych.

Należy w tym miejscu podkreślić, że w momencie, występowania lokalnych maksimów natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik obserwuje się minima lokalne chwilowej prędkości kątowej wału korbowego silnika spalinowego. Przedstawiono to na rysunku 6.2.

Można wyróżnić wiele parametrów elektrycznych opisujących działanie rozrusznika podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [32,33,107] (zob. rysunek 6.1) do których zaliczyć możemy między innymi:

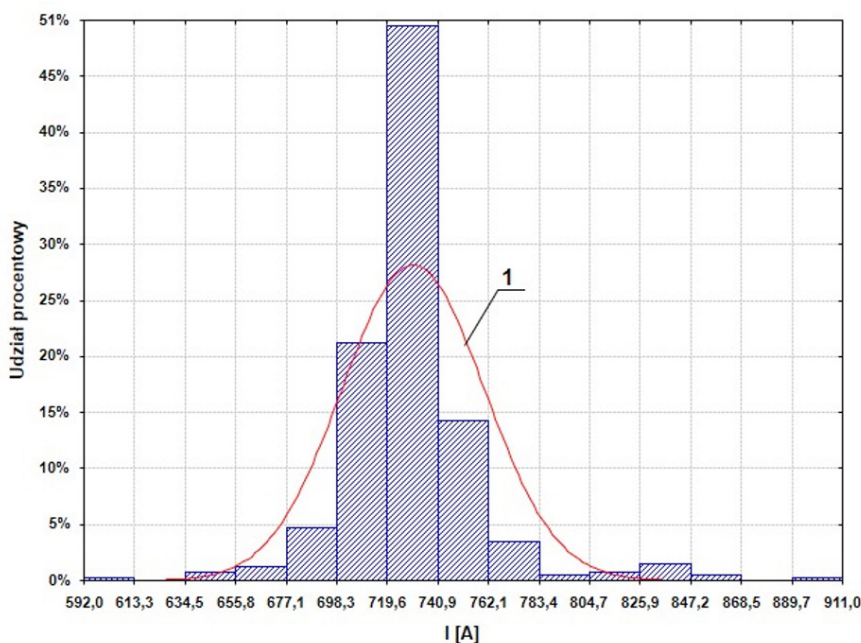
- maksymalne natężenie prądu pobranego przez rozrusznik w chwili rozpoczęcia rozruchu,
- moc pobierana przez rozrusznik w chwili wystąpienia wartości maksymalnego natężenia prądu w chwili rozpoczęcia rozruchu,
- średnie natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego podczas jego rozruchu,
- czas trwania pracy rozrusznika pod obciążeniem,
- czas poboru prądu przez rozrusznik tożsamy z czasem przyłożenia napięcia na zaciskach rozrusznika.



Rys. 6.2. Przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik oraz prędkości kątowej wału korbowego podczas rozruchu silnika 4CT90 samochodu LUBLIN: a – chwilowa prędkość kątowa wału korbowego, b – uśredniona prędkość kątowa wału korbowego, c – chwilowe natężenie prądu, d – porównawcza linia pionowa, 1 – maksymalne natężenie prądu pobranego przez rozrusznik na początku rozruchu, 2 – średnie natężenie prądu podczas rozruchu, 3 – czas pracy rozrusznika pod obciążeniem, 4 – czas poboru prądu przez rozrusznik, 5 – czas rozruchu silnika, 6 – maksima lokalne natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, 7 – minima lokalne chwilowej prędkości kątowej wału korbowego [35]

6.2. Warunki pracy rozrusznika podczas rozruchu samochodowego silnika spalinowego

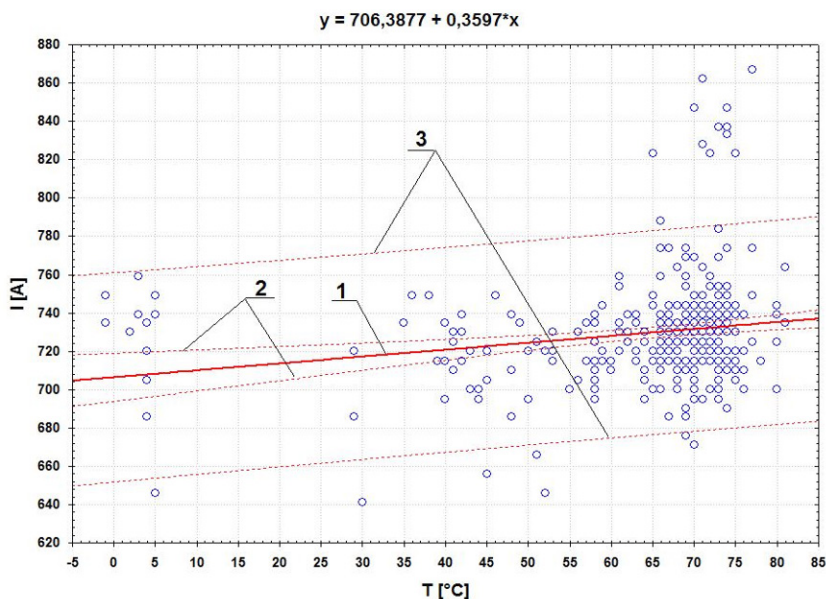
Na podstawie badań własnych autora opisanych we wcześniejszych publikacjach [32,35] opracowano histogram maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu samochodowego silnika spalinowego, co zilustrowano na rysunku 6.3.



Rys. 6.3. Histogram maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik MAGNETON na początku rozruchu silnika 4CT90 samochodu LUBLIN: 1 – funkcja gęstości rozkładu normalnego dopasowana do danych empirycznych [35]

Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu normalnego na rysunku 6.2 wynosi $p \leq 0,05$. Analizując ten rysunek należy stwierdzić, że prawie w połowie zarejestrowanych przypadków wartość natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu zawiera się w przedziale od 719,6 A do 740,9 A. Świadczy to o nieznacznym rozproszeniu tych wyników wokół wartości średniej wynoszącej 729,73 A [35].

Stwierdza się także [32,35], że wartość maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu nie zależy od stanu cieplnego samochodowego silnika spalinowego. Potwierdzeniem tego jest wykres rozrzutu wartości maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu oraz temperatury silnika (temperatury płynu chłodzącego na wyjściu z bloku) w chwili jego rozruchu, co zaprezentowano na rysunku 6.4.

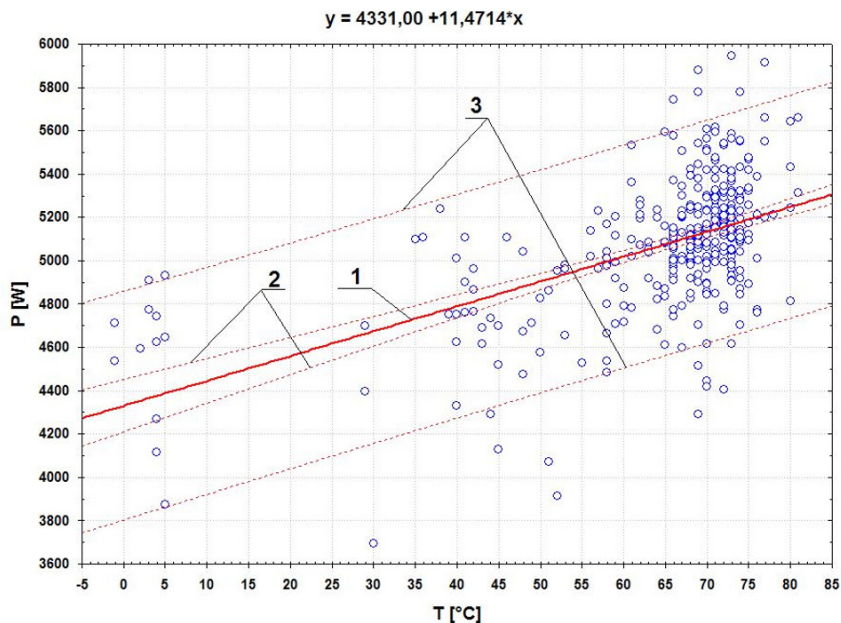


Rys. 6.4. Wykres rozrzutu i prosta regresji dla wartości maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu oraz temperatury silnika 4CT90: 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji (przedział predykcji) [35]

Przedziały ufności z rysunku 6.4, dla prognozowanej średniej obserwacji i predykcji, są obliczone przy założeniu zgodności z rozkładem normalnym na poziomie ufności 95%. Wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy temperaturą silnika a maksymalnym natężeniem prądu wynosi tylko $r = 0,189$ (poziom istotności tego współczynnika wynosi $p = 0,0002$), co potwierdza niską zależność maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik od temperatury rozruchu [35].

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 6.3 charakteryzuje się średnim błędem szacunku równym 26,7% (dla poziomu istotności $p < 0,0001$). Wyraz wolny dla tej prostej posiada średni błąd szacunku równy 0,9% (poziom istotności $p = 0,0002$). Wartość współczynnika determinacji dla modelu liniowego z rysunku 2.6 wynosi $r^2 = 0,0332$ (poziom istotności $p = 0,0002$). Błąd standardowy estymacji wynosi $S_e = 27,030$, zaś wartość testu F Fishera-Snedecora równa się 14,024 (poziom istotności $p < 0,00021$) [35].

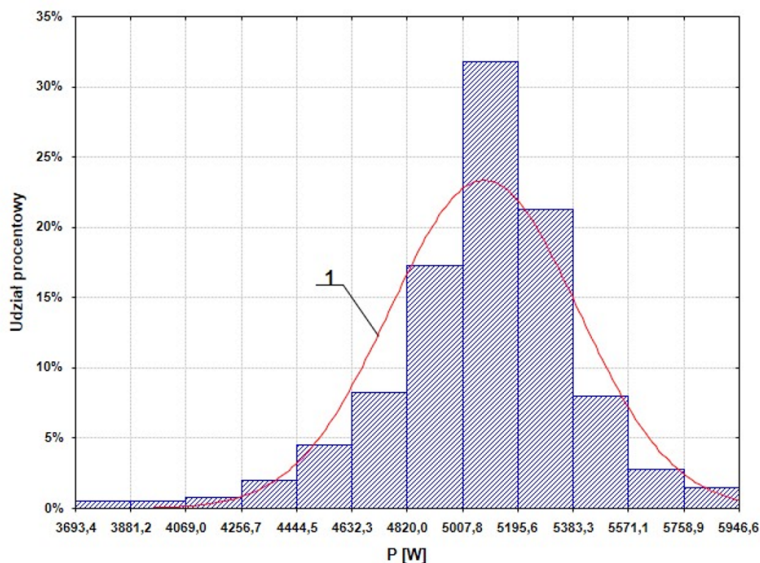
W przeciwieństwie do braku zależności maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik od temperatury silnika spalinowego w chwili rozpoczęcia rozruchu obserwuje się, że moc pobierana przez rozrusznik w chwili wystąpienia wartości maksymalnego natężenia prądu zależy od stanu cieplnego. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy temperaturą silnika a mocą pobieraną przez rozrusznik która wynosi $r = 0,5364$ (poziom istotności tego współczynnika wynosi $p = 0,0001$) oraz wykres rozrzutu przedstawiony na rysunku 6.5 [35].



Rys. 6.5. Wykres rozrzutu i prosta regresji dla wartości mocy pobieranej przez rozrusznik w chwili wystąpienia maksymalnego natężenia prądu na początku rozruchu oraz temperatury silnika 4CT90: 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji (przedział predykcji) [35]

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 6.5 charakteryzuje się średnim błędem szacunku równym 8% (dla poziomu istotności $p < 0,0001$). Wyraz wolny dla tej prostej posiada średni błąd szacunku równy 1,42% (poziom istotności $p = 0,000$), Wartość współczynnika determinacji dla modelu liniowego z rysunku 2.6 wynosi $r^2 = 0,2858$ (poziom istotności $p < 0,0001$). Błąd standardowy estymacji jest równy $S_e = 261,255$, zaś wartość testu F Fishera-Snedecora wynosi 152,70 (poziom istotności $p < 0,0001$) [35].

Na rysunku 6.6 zaprezentowano histogram mocy pobieranej przez rozrusznik firmy MOTORPAL w chwili wystąpienia maksymalnego natężenie prądu na początku rozruchu silnika 4CT90 samochodu LUBLIN. Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu normalnego wynosi $p \leq 0,05$. Analizując rysunek 6.6 należy powiedzieć, że w prawie 32% zarejestrowanych przypadków wartość mocy pobieranej przez rozrusznik na początku rozruchu zawiera się w przedziale od 5007,8 W do 5195,6 W. Zaś 70% zaobserwowanych przypadków znajduje w przedziale 4820,0–5338,3 W. Wartość średnia wynosi 7073,8 W [35].



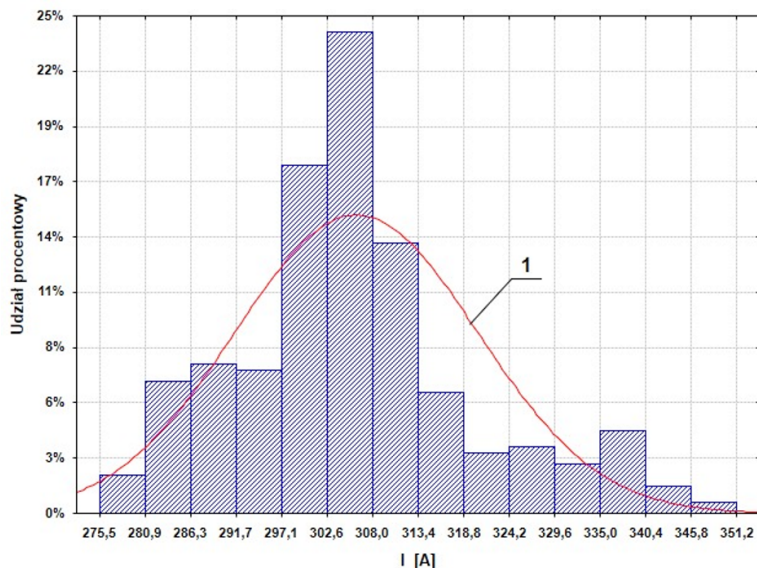
Rys. 6.6. Histogram poboru mocy przez rozrusznik w chwili wystąpienia maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika 4CT90: 1 – funkcja gęstości rozkładu normalnego dopasowana do danych empirycznych [35]

Obserwowany wzrost mocy pobieranej przez rozrusznik w chwili wystąpienia wartości maksymalnej natężenia prądu na początku rozruchu w miarę wzrostu temperatury jest spowodowany rozszerzalnością cieplną materiałów w zespołach ruchomych silnika spalinowego, która prowadzi do zmniejszenia się występujących w nich luzów. Dotyczy to szczególnie elementów zespołu TPC oraz łożyskowania wału korbowego. Zmniejszenie się wartości luzów powoduje zwiększenie się pola powierzchni styku nieruchomych elementów. Przyczynia się to do wzrostu liczby stykowych mikropołączeń adhezyjnych. W celu zerwania tych mikrozwartości, podczas przejścia ze stanu tarcia spoczynkowego do stanu tarcia kinetycznego, wymagane jest dostarczenie większej energii zewnętrznej. Wyrazem tego jest wzrost mocy pobieranej przez rozrusznik obserwowany w chwili wystąpienia wartości maksymalnej natężenia prądu na początku rozruchu.

Po wprawieniu, przez rozrusznik elektryczny, elementów i zespołów silnika spalinowego w stan ruchu wartość rozruchowego momentu oporowego w stosunku do wartości maksymalnej występującej na samym początku rozruchu spada 2÷2,5-krotnie [107,121]. Występuje wtedy wzrost prędkości kątowej wału korbowego silnika (zob. rysunek 6.2).

W trakcie napędzania wału korbowego silnika samym rozrusznikiem można określić średnią wartość natężenia pobieranego prądu (zob. rysunek 6.2). Parametr ten nazywany jest w literaturze zagadnienia „prądem rozruchu” [88,108].

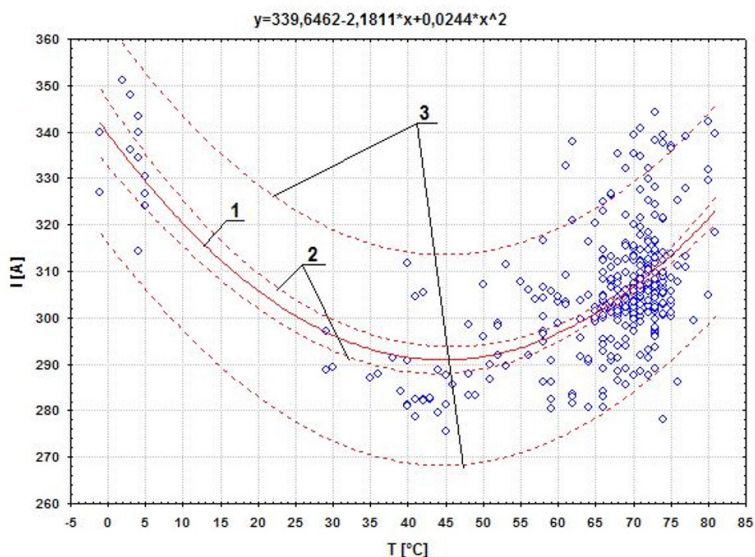
Na podstawie przeprowadzonych badań własnych [35] opracowano histogram (rysunek 6.7) wartości średniej natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego silnika spalinowego. Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu normalnego wynosi $p \leq 0,05$ [35].



Rys. 6.7. Histogram średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego silnika spalinowego 4CT90: 1 – funkcja gęstości rozkładu normalnego dopasowana do danych empirycznych [35]

Wartość oczekiwana średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego silnika spalinowego wynosi 305,85 A i jest 2,38 razy mniejsza od wartości średniej natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu (729,73 A – zob. rysunek 6.3). Omawiając rysunek 6.7 należy stwierdzić, że ponad w 24% zarejestrowanych przypadków średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego silnika spalinowego zawiera się w przedziale od 302,55 A do 307,95 A [35].

Analiza wyników badań opisanych we wcześniejszych publikacjach autora [32,33,35] wykazała, że występuje zależność pomiędzy stanem cieplnym silnika w chwili rozpoczęcia rozruchu, a wartością średnią natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego silnika spalinowego. Potwierdzeniem tego jest wykres rozrzutu z rysunku 6.8, na którym przedstawiono krzywą regresji wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji dla wartości temperatury silnika w chwili rozruchu oraz średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego silnika spalinowego 4CT90 [35].



Rys. 6.8. Wykres rozrzutu temperatury silnika w chwili rozruchu oraz średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego silnika: 1 – krzywa regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji [35]

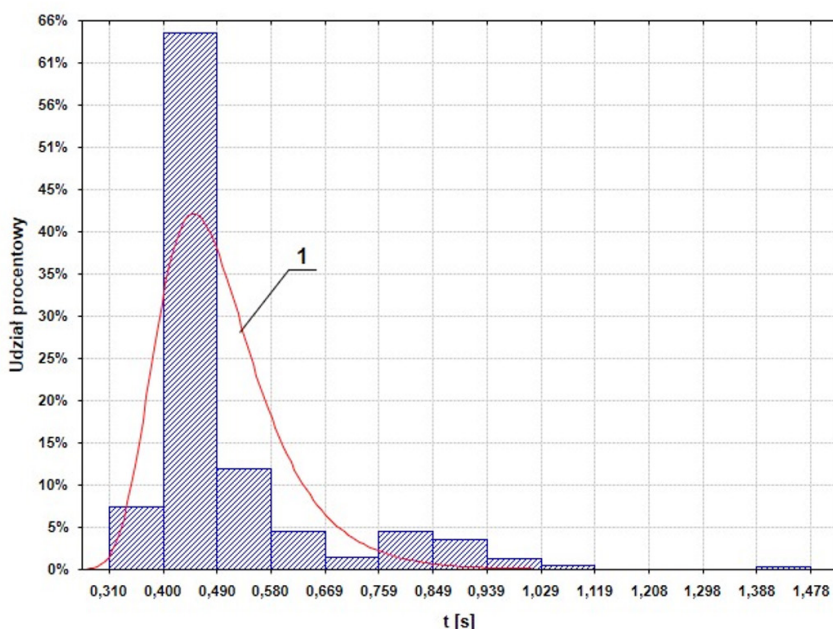
Wyraz wolny funkcji regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia zaprezentowany na rysunku 6.8 posiada błąd standardowy równy 3,6008. Błąd standardowy parametru występującego przy pierwszej potęgze wynosi 0,1604. Wartość błędu standardowego parametru związanego z drugą potęgą to 0,0017. Poziom istotności dla zaprezentowanych współczynników wynosi $p < 0,001$. Udział wariancji wyjaśnianej przyjętym modelem regresji wynosi 0,6004 [35].

Przebieg funkcji regresji opisującej zależność średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego od temperatury rozruchu silnika spalinowego wynika z wpływu stanu cieplnego na lepkość oleju silnikowego oraz szczelność komory spalania. Jak wiadomo w miarę spadku temperatury wzrasta wartość lepkości oleju, co pociąga za sobą wzrost oporów tarcia kinematycznego. Powoduje to obserwowany (zob. rysunek 6.8) przyrost średniej wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w niskich temperaturach. Z drugiej strony, kiedy temperatura rośnie maleją luzy w układzie TPC silnika. Wywołuje to zwiększenie szczelności komory spalania, a tym samym wzrost oporów sprężania mieszaniny paliwowo-powietrznej i ponowny przyrost średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego silnika spalinowego.

Kolejnym istotnym parametrem działania rozrusznika elektrycznego w czasie rozruchu silnika spalinowego jest czas jego pracy pod obciążeniem. Czas ten ustala się poprzez pomiar czasu jaki upłynął od chwili włączenia rozrusznika do chwili, kiedy jego dwa parametry elektryczne napięcie i natężenie prądu osiągną wartości odpowiadające jego działaniu bez obciążenia. Ilustruje to rysunek 6.2 (oznaczenie nr 3) [35].

Na podstawie analizy wyników wcześniejszych badań przebiegu prędkości kątowej wału korbowego oraz natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik [32,35] stwierdzono, że długość czasu pracy rozrusznika pod obciążeniem jest porównywalna z czasem zazębiania się zębniaka rozrusznika z uzębionym wieńcem koła zamachowego wału korbowego.

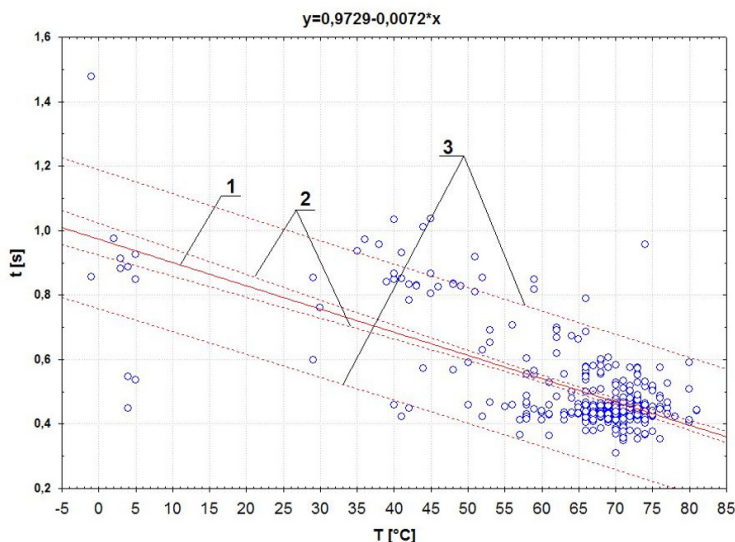
Na rysunku 6.9 przedstawiono histogram czasu pracy rozrusznika pod obciążeniem. Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu wartości ekstremalnych wynosi $p \leq 0,05$.



Rys. 6.9. Histogram czasu pracy rozrusznik pod obciążeniem w trakcie rozruchu silnika 4CT90: 1 – funkcja gęstości rozkładu wartości ekstremalnych dopasowana do danych empirycznych o parametrach: położenia = 0,4498 i skali = 0,0776 [35]

Stwierdza się, że (zob. rysunek 6.9) w prawie 65% zarejestrowanych przypadków czas pracy rozrusznika pod obciążeniem w trakcie trwania rozruchu silnika zawiera się w przedziale od 0,4 s do 0,49 s. W 84% zaobserwowanych przypadków nie przekraczał on 0,6 s. Wartość średnia tego czasu wynosi 0,449 s [35].

Długość czasu pracy rozrusznika pod obciążeniem zależy od stanu cieplnego silnika. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy temperaturą silnika a czasem pracy rozrusznika pod obciążeniem która wynosi $r = -0,6994$ (poziom istotności wynosi $p = 0,0001$) oraz wykres rozrzutu na rysunku 6.10. Na wykresie tym poprowadzono prostą regresji wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.



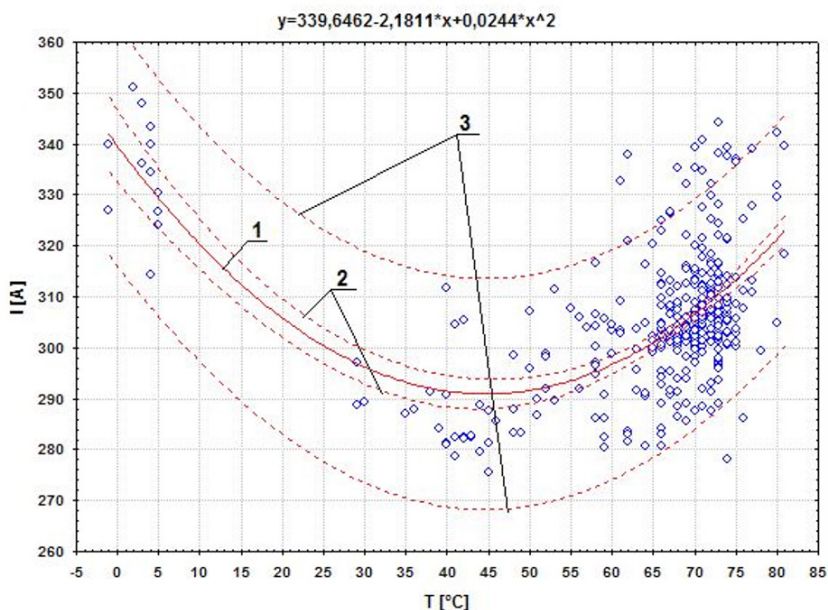
Rys. 6.10. Wykres rozrzutu dla temperatury silnika 4CT90 oraz czasu pracy pod obciążeniem rozrusznika w trakcie rozruchu silnika: 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji [35]

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 6.10 charakteryzuje się średnim błędem szacunku równym 4,16% (dla poziomu istotności $p < 0,0001$). Wyraz wolny dla tej prostej posiada średni błąd szacunku równy 2,58% (poziom istotności $p < 0,0001$). Wartość współczynnika determinacji dla modelu liniowego z rysunku 2.18 wynosi $r^2 = 0,4893$ (poziom istotności $p < 0,0001$). Błąd standardowy estymacji jest równy $S_e = 0,1066$, zaś wartość testu F Fishera-Snedecora wynosi 362,09 (poziom istotności $p < 0,0001$) [35].

Wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy czasem pracy rozrusznika pod obciążeniem a temperaturą silnika w chwili rozruchu potwierdza zależność, że w miarę spadku temperatury wzrasta czas trwania poboru prądu. Obniża to poziom naładowania akumulatora. W celu ponownego osiągnięcia przez akumulator pojazdu (szczególnie w niskich temperaturach otoczenia) pełnej zdolności do oddawania energii w trakcie kolejnego rozruchu należy odpowiednio wydłużyć czas samodzielnej pracy silnika spalinowego.

Ostatnim omawianym parametrem działania rozrusznika podczas rozruchu silnika spalinowego jest czas przyłożenia napięcia na zaciskach rozrusznika (czas poboru prądu przez rozrusznik) [35]. Czas ten odpowiada czasowi, w którym operator samochodu (kierowca) zwiera jego obwód elektryczny (zob. rysunek 6.2).

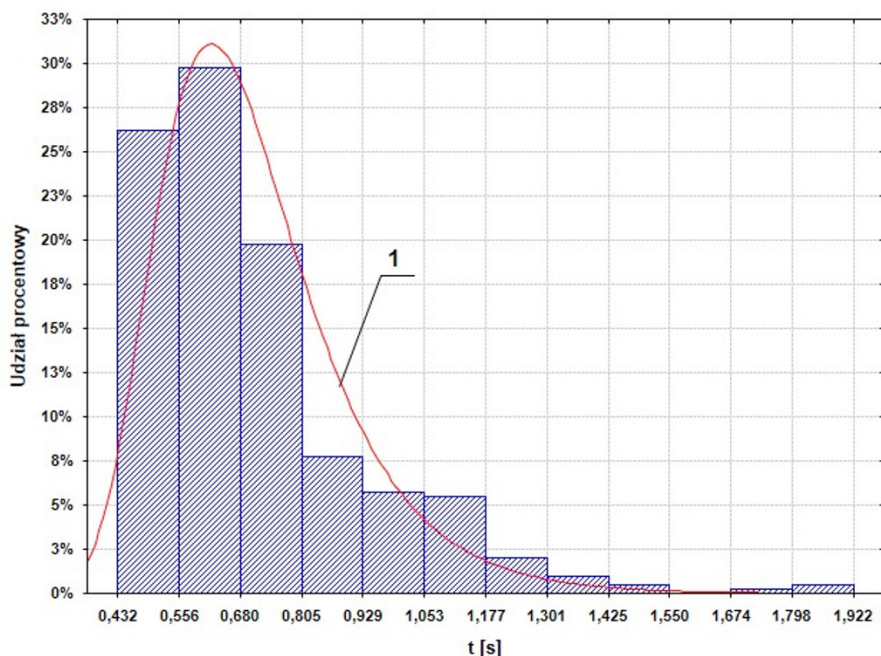
Oczywiste jest, że czas poboru prądu, ze względu na „bezwładność” reakcji operatora samochodu jest dłuższy od czasu pracy rozrusznika pod obciążeniem, co wyraźnie widać na rysunku 6.2 oraz że istnieje związek pomiędzy tymi obydwojoma parametrami. Na rysunku 6.11 zaprezentowano wykres rozrzutu tych zmiennych oraz poprowadzono prostą regresji wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.



Rys. 6.11. Wykres rozrzutu dla: czasu przyłożenia napięcia na zaciski oraz czasu pracy rozrusznika pod obciążeniem w trakcie rozruchu silnika: 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji [35]

Wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy czasem przyłożenia napięcia na zaciski a czasem pracy rozrusznika pod obciążeniem wynosi $r = 0,7945$ (poziom istotności tego współczynnika jest równy $p = 0,0001$). Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 6.11 charakteryzuje się średnim błędem szacunku równym 3,85% (dla poziomu istotności $p < 0,0001$). Wyraz wolny dla tej prostej posiada średni błąd szacunku równy 25,28% (poziom istotności $p < 0,0001$). Wartość współczynnika determinacji dla modelu liniowego z rysunku 2.18 wynosi $r^2 = 0,6312$ (poziom istotności $p < 0,0001$). Błąd standardowy estymacji wynosi $S_e = 0,1384$, zaś wartość testu F Fishera-Snedecora równa 674,38 (poziom istotności $p < 0,0001$) [35].

Histogram czasu przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika przedstawiono na rysunku 6.12. Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu wartości ekstremalnych wynosi $p \leq 0,05$.



Rys. 6.12. Histogram czasu przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika w trakcie rozruchu silnika 4CT90:
 1 – funkcja gęstości rozkładu wartości ekstremalnych dopasowana do danych empirycznych
 o parametrach: położenia = 0,6201 i skali = 0,1454 [35]

Wartość średnia czasu przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika jest równa 0,714 s. Ponad 56,5% zarejestrowanych przypadków tego czasu osiąga wartość 0,7 s, zaś 84% nie przekracza 1 s. Średnia wartość jest dłuższa o 0,265 s od czasu pracy rozrusznika pod obciążeniem w trakcie rozruchu silnika spalinowego [35].

Należy w tym miejscu powiedzieć, że we współczesnych silnikach występują systemy zabezpieczające rozrusznik przed długotrwałą pracą, które go automatycznie rozłączają po upływie określonego czasu działania.

Podsumowując dotychczasowe rozważania związane z rozruchem silnika o zapłonie samoczynnym należy zauważyć, że decydujący wpływ na występujące w jego trakcie negatywne procesy i zjawiska ma wartość temperatury w chwili jego zaistnienia. Jej wartość zależy zaś od sposobu organizacji przejazdów danym samochodem, co zostało zaprezentowane w kolejnym rozdziale monografii.

7. Rozruch silnika spalinowego podczas użytkowania samochodu

7.1. Podział temperatur rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym warunkach użytkowania samochodu

W serii publikacji [31,32,33,35] na podstawie badań własnych autora zaproponowano definicję tzw. rozruchu zimnego oraz rozruchu gorącego silnika spalinowego. Związane jest to z wartością temperatury silnika (temperatury cieczy chłodzącej na wyjściu z jego bloku) w chwili jego rozruchu. Rozruch gorący silnika o zapłonie samoczynnym występuje wtedy, gdy przed jego rozpoczęciem nie ma konieczności użycia urządzenia ułatwiającego rozruch (świeca żarowa, płomieniowa itd.). Wartość temperatury silnika jest wówczas powyżej 60 °C [33]. W przypadku temperatur o niższej wartości mamy do czynienia z zimnym rozruchem silnika spalinowego. O włączeniu zespołu wspomagającego rozruch silnika o zapłonie samoczynnym decyduje subiektywnie, w pojazdach starszego typu, ich operator lub w nowszych rozwiązaniach automatycznie układ sterujący wtryskiem paliwa. Dla silników o zapłonie iskrowym rozruch gorący wymaga wytworzenia przez układ sterowania zasilaniem nieco tylko wzbogaconej mieszanki paliwowo-powietrznej. O wielkości współczynnika nadmiaru powietrza w chwili rozruchu takiego silnika decyduje jego elektroniczny układ sterowania [33].

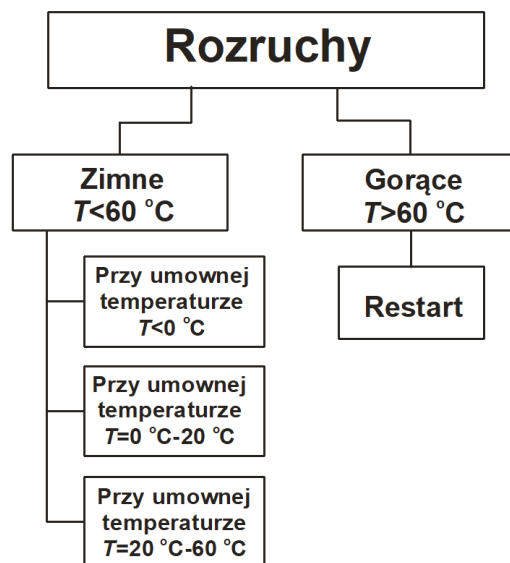
Przy rozruchach gorących można wyróżnia się tzw. restart silnika, czyli rozruch silnika występujący po krótkotrwałej przerwie w jego działaniu. W trakcie restartu silnika nie obserwuje się wzbogacenia mieszanki palnej. Długość przerwy w funkcjonowaniu silnika, po której dochodzi do jego restartu zależy od algorytmów sterujących zasilaniem w paliwo.

Dla zimnych rozruchów silnika spalinowego wyodrębnia się [32,33,35]:

- rozruchy przy temperaturze silnika spalinowego mniejszej niż 0 °C,
- rozruchy przy temperaturze silnika spalinowego będącej w granicach (0÷20) °C
- rozruchy przy temperaturze silnika spalinowego będącej w granicach (20÷60) °C.

Zaproponowany podział rozruchów silnika spalinowego wynika z oddziaływania podczas postoju pojazdu z unieruchomionym silnikiem warunków atmosferycznych na wartość jego temperatury w chwili rozruchu. Rozruchy przy temperaturze silnika spalinowego mniejszej niż 0 °C, można zaobserwować po dłuższych postojach głównie w okresie zimowym. Rozruchy przy temperaturze silnika zawierającej się w granicach (0÷20) °C, są także wynikiem długich postojów samochodu z wyłączonym silnikiem. Ostatnią kategorię zimnych rozruchów tworzą rozruchy przy temperaturze silnika zawierającej się w granicach (20÷60) °C.

Na rysunku 7.1 zaprezentowano proponowany podział rozruchów ze względu na wartość temperatury silnika spalinowego w chwili jego rozruchu.



Rys. 7.1. Podział temperatur rozruchu silnika spalinowego w warunkach użytkowania pojazdu [32]

W literaturze zagadnienia wyróżnia się dodatkowo graniczną temperaturę rozruchu oraz temperaturę natychmiastowego rozruchu silnika. Przy czym przez graniczną temperaturę rozruchu rozumiemy najniższą temperaturę otoczenia, przy której (zgodnie założonymi warunkami badań stanowiskowych) można, dla ustabilizowanego termicznie silnika, dokonać udanego jego rozruchu. Temperatura rozruchu natychmiastowego to temperatura silnika, przy której doprowadzony jest on do samodzielnego funkcjonowania na biegu jałowym w czasie krótszym niż 3 s od chwili rozpoczęcia rozruchu [88].

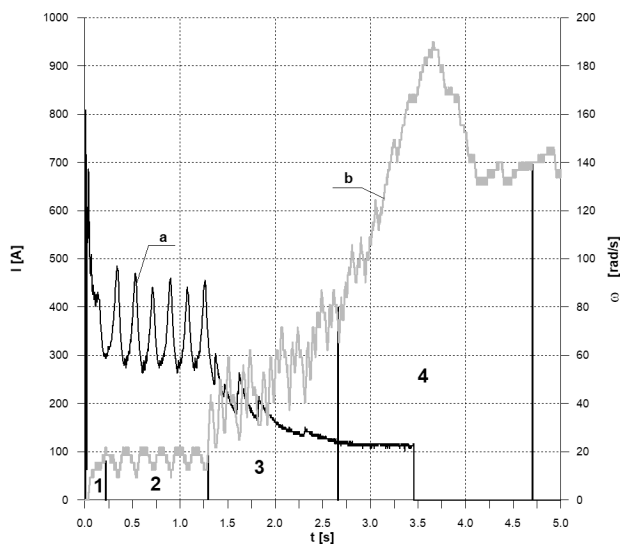
Podczas rzeczywistych warunków użytkowania pojazdu, wyróżnia się tzw. pierwszy dzienny rozruch silnika spalinowego, który występuje po trwającym minimum 8 godzin postoju pojazdu na otwartej przestrzeni lub w pomieszczeniu garażowym. Temperatura pierwszego dziennego rozruchu silnika spalinowego jest równa temperaturze powietrza otaczającego samochód [31,34,35].

7.2. Etapy rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym

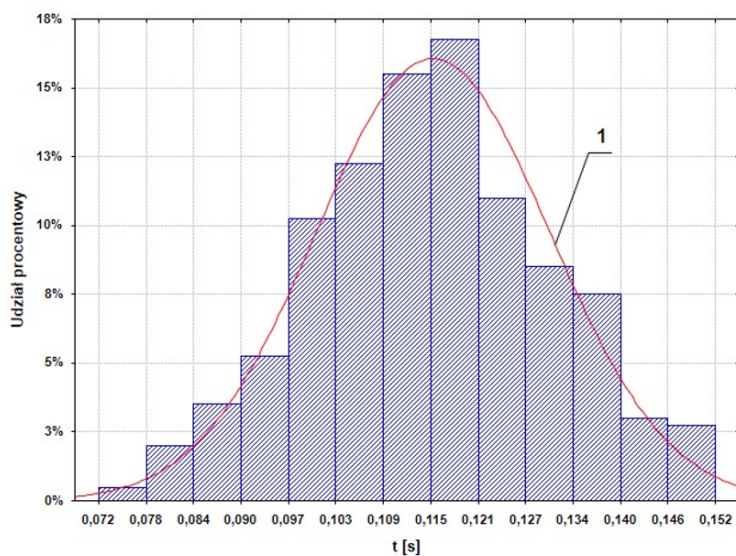
Na podstawie badań własnych prowadzonych w rzeczywistych warunkach użytkowania pojazdów, które zostały szczegółowo opisane w monografiach [33,35], zaproponowano podział procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym na cztery etapy. Podstawą tego podziału jest przebieg zmian prędkości kątowej wału korbowego oraz natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas rozruchu silnika samochodowego o zapłonie samoczynnym. Wyróżniono cztery etapy rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym.

Pierwszy etap rozruchu rozpoczyna się od chwili, kiedy zębnik rozrusznika elektrycznego sprzęgnie się z kołem zębatym umieszczonym na kole zamachowym wału korbowego silnika. Wywołuje to ruszanie z miejsca zespołów ruchomych w silniku. W wyniku napędzania wału korbowego silnika samym rozrusznikiem następuje systematyczny wzrost jego prędkości kątowej. Zilustrowano to na rysunku 7.2, gdzie zaprezentowano przebieg prędkości kątowej wału korbowego oraz natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas „modelowego” rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym. Na początku przedstawionego rozruchu wyraźnie widać narastanie prędkości kątowej wału korbowego od zera (jest to omawiany etap nr 1). Przebieg krzywej $\omega(t)$ podczas etapu nr 1 zależy przede wszystkim od bezwładności mechanizmu korbowego [33].

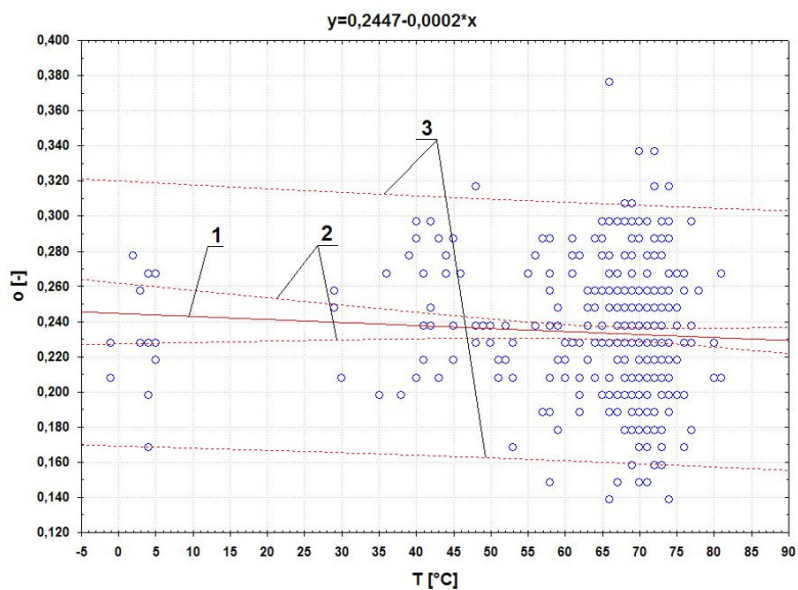
Na rysunku 7.3 zaprezentowano histogram rozkładu statystycznego dla czasu trwania etapu nr 1 rozruchu silnika 4CT90 o zapłonie samoczynnym samochodu LUBLIN III. Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu normalnego wynosi $p \leq 0,05$. Analizując rysunek 7.3 należy stwierdzić, że w 32,7% zarejestrowanych przypadków czas trwania etapu nr 1 rozruchu zawiera się w przedziale od 0,108 s do 0,121 s. Tylko 5,8% zaobserwowanych przypadków było większych niż 0,14 s. Średni czas trwania etapu nr 1 rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym wynosi 0,115 s. W czasie trwania etapu nr 1 wał korbowy silnika wykonuje średnio 0,243 obrotu [35].



Rys. 7.2. Przebieg zmian prędkości kątowej wału korbowego oraz zmian natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik z wyróżnionymi czterema etapami rozruchu podczas „modelowego” uruchamiania silnika 4CT90 o zapłonie samoczynnym: a – natężenie prądu, b – prędkość kątowa wału korbowego, 1 – etap nr 1 rozruchu, 2 – etap nr 2 rozruchu, 3 – etap nr 3 rozruchu, 4 – etap nr 4 rozruchu [33]



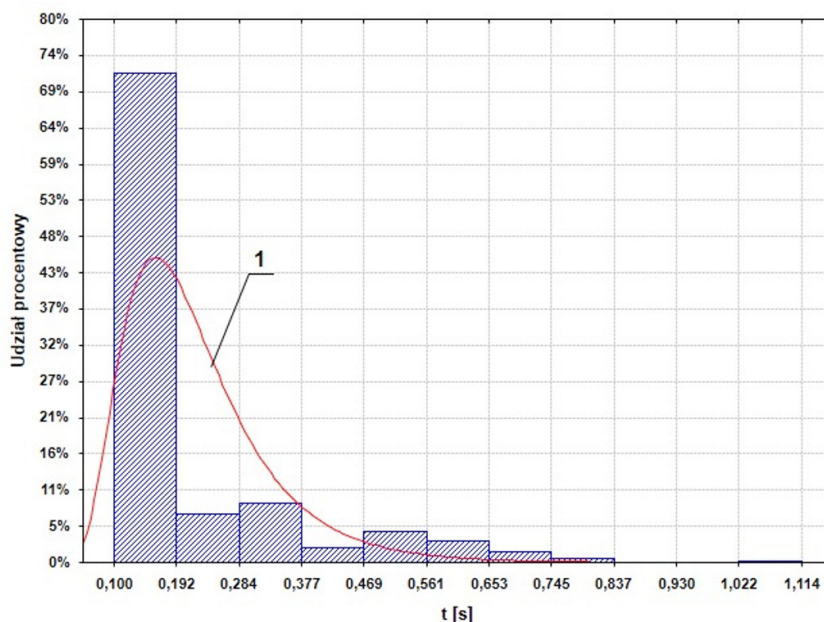
Rys. 7.3. Histogram rozkładu czasu trwania etapu nr 1 rozruchu silnika 4CT90: dopasowanie rozkładem normalnym: 1 – funkcja gęstości rozkładu normalnego dopasowana do danych empirycznych [35]



Rys. 7.4. Wykres rozrzutu i prosta regresji dla liczby obrotów wału korbowego wykonanych w trakcie etapu nr 1 i temperatury silnika 4CT90 w chwili rozruchu: 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji (przedział predykcji) [35]

Stwierdzono doświadczalnie, że liczba obrotów wału korbowego wykonana podczas etapu nr 1 oraz czas jego trwania nie zależą od temperatury silnika w chwili rozruchu. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy liczbą obrotów zarejestrowaną podczas trwania etapu nr 1 a temperaturą silnika, która wynosi $r = -0,0662$ (poziom istotności współczynnika wynosi $p < 0,1975$). Na wykresie rozrzutu z rysunku 7.4 zaprezentowano analizowane zmienne oraz zaznaczono przedziały ufności, dla prognozowanej średniej obserwacji i predykcji, które są obliczone przy założeniu zgodności z rozkładem normalnym na poziomie ufności 95% [35].

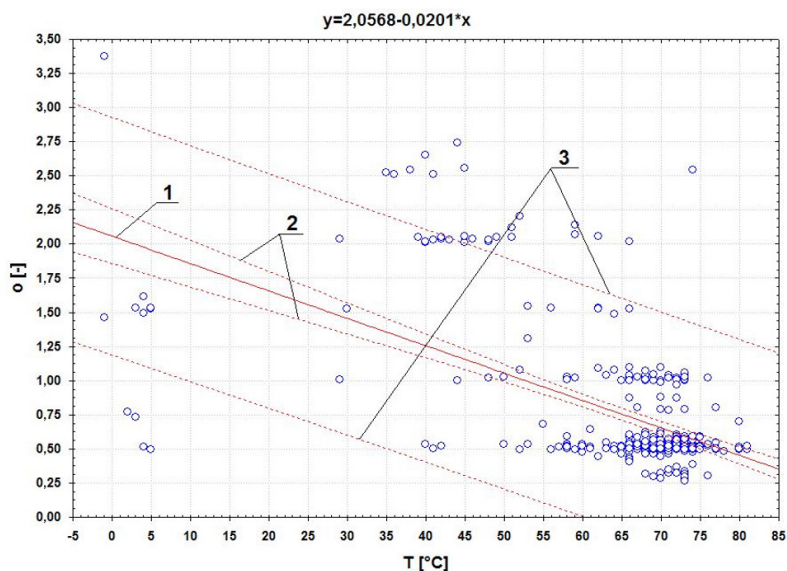
Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 7.4 charakteryzuje się średnim błędem szacunku równym 76,47% (dla poziomu istotności $p < 0,1975$). Wyraz wolny dla tej prostej posiada średni błąd szacunku równy 3,59% (poziom istotności $p < 0,0001$). Wartość współczynnika determinacji dla modelu liniowego z rysunku 7.4 równa się $r^2 = 0,0127$ (poziom istotności $p < 0,1975$). Błąd standardowy estymacji wynosi $S_e = 0,0373$, zaś wartość testu F Fishera-Snedecora równa się 1,666 (poziom istotności $p < 0,1975$). Na podstawie wyników badań własnych można także stwierdzić, że zjawiska zachodzące podczas trwania etapu nr 1 rozruchu nie zależą od oporów statycznych występujących w silniku spalinowym oraz nie oddziałują na jego własności rozruchowe [35].



Rys. 7.5. Histogram rozkładu czasu trwania etapu nr 2 rozruchu silnika 4CT90: 1 – funkcja gęstości rozkładu log-normalnego dopasowana do danych empirycznych o parametrach: $\text{progu} = 0,000$, $\text{skali} = -1,6180$, $\text{kształtu} = 0,4601$ [35]

W kolejnym wyróżnionym etapie nr 2 rozruchu obserwuje się obracanie, przez rozrusznik elektryczny, wału korbowego silnika „z prawie stałą” prędkością kątową, której wartość zależy od stanu naładowania akumulatorów [33,35]. Ten etap rozruchu trwa do momentu zaistnienia pierwszych samozapłonów mieszanki palnej w cylindrach silnika. Etap nr 2 przedstawiono na rysunku 7.2. Zaobserwowano, że średni czas trwania etapu nr 2 rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, podczas którego wał korbowy jest napędzany samym tylko rozrusznikiem, wynosi 0,225 s. Na rysunku 7.5 zaprezentowano histogram rozkładu statystycznego dla czasu trwania etapu nr 2 rozruchu. Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu log-normalnego wynosi $p \leq 0,05$.

Analizując rysunek 7.5 należy stwierdzić, że w 67,3% zarejestrowanych przypadków czas trwania etapu nr 2 rozruchu nie przekraczał 0,178 s. W przeważającej mierze (99,7%) etap nr 2 trwał do 1 s. W trakcie trwania etapu nr 2 rozruchu wał korbowy silnika 4CT90 wykonuje średnio 0,761 obrotu [35].



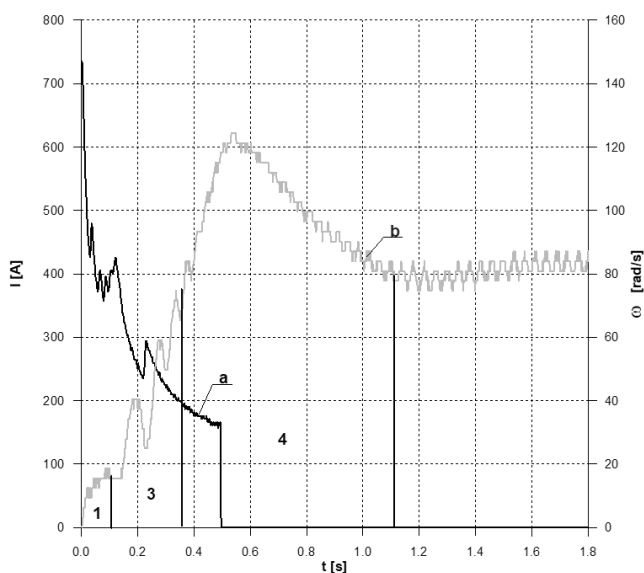
Rys. 7.6. Wykres rozrzutu dla liczby obrotów wału korbowego podczas trwania etapu nr 2 rozruchu oraz temperatury silnika 4CT90 w chwili rozruchu: 1 – prosta regresji, 2 – przebieg ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji (przedział predykcji) [35]

Zaobserwowano, że wraz ze spadkiem wartości temperatury rozruchu silnika 4CT90 wydłuża się czas trwania etapu nr 2 [35], a tym samym wzrasta liczba obrotów wykonanych przez wał korbowy w jego trakcie. Spowodowane jest to niekorzystnymi warunkami tworzenia i spalania mieszanki palnej oraz wzrostem oporów ruchu w niskich temperaturach silnika. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji

liniowej pomiędzy liczbą obrotów wału korbowego w trakcie trwania etapu nr 2 a temperaturą silnika 4CT90 w chwili jego rozruchu, która wynosi $r = -0,5644$. Poziom istotności tego współczynnika korelacji liniowej wynosi $p \leq 0,001$. Wyrazem tego jest wykres rozrzutu z rysunku 7.6 pomiędzy analizowanymi zmiennymi, na których zaznaczono przedziały ufności, dla prognozowanej średniej obserwacji i predykcji obliczone przy założeniu zgodności z rozkładem normalnym na poziomie ufności 95% [35].

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 7.6 charakteryzuje się średnim błędem szacunku równym 7,48% (dla poziomu istotności $p < 0,0001$). Wyraz wolny dla tej prostej posiada średni błąd szacunku równy 4,95% (poziom istotności $p < 0,0001$). Wartość współczynnika determinacji dla modelu liniowego z rysunku 7.6 wynosi $r^2 = 0,3185$ (poziom istotności $p < 0,0001$). Wartość $S_e = 0,4306$, zaś wartość testu F równa się 170,13 (poziom istotności $p < 0,0001$) [35].

Należy także zwrócić uwagę (zob. rysunek 7.6), że w warunkach rzeczywistej eksploatacji silnika o zapłonie samoczynnym podczas etapu nr 2 wał korbowy wykonał najczęściej pół lub jeden obrót. Fakt ten jest związany z występowaniem cyklu pracy w 4-suwowym czterocyldrowym silniku spalinowym. Cykl ten występuje co pół obrotu wału korbowego. Dodatkowo badania własne wykazały, że decydujący wpływ na procesy zachodzące podczas etapu nr 2 mają przede wszystkim opory ruchu (zależne od stanu cieplnego silnika) występujące podczas rozruchu silnika [35].

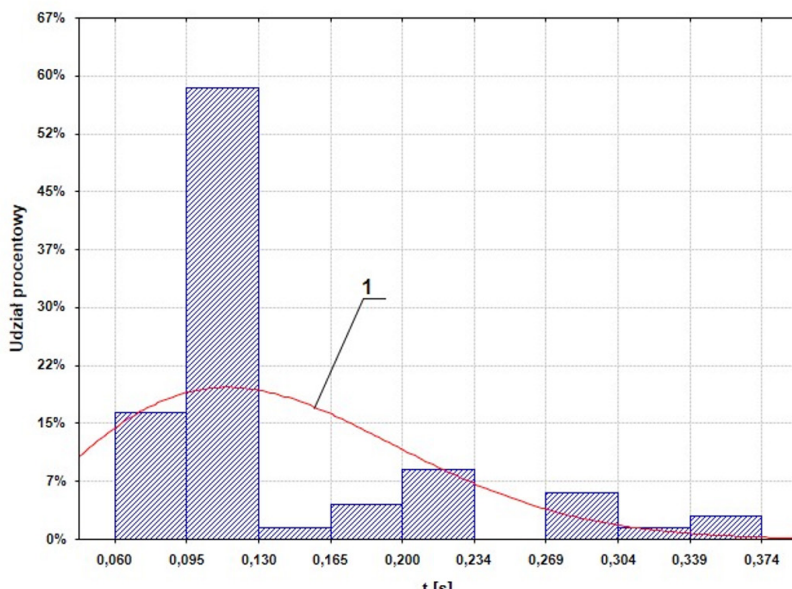


Rys. 7.7. Przebieg prędkości kątownej wału korbowego oraz natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas rozruchu silnika 4CT90 bez wyraźnego występowania etapu nr 2: a – natężenie prądu, b – prędkość kątowna wału korbowego, 1 – etap nr 1 rozruchu, 3 – etap nr 3 rozruchu, 4 – etap nr 4 rozruchu [32]

W warunkach rzeczywistych można zaobserwować występowanie także rozruchów bez etapu nr 2 [32,35]. Przykład takiego rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym zilustrowano na rysunku 7.7.

Jeżeli w etapie nr 2 wał korbowy napędzany samym tylko rozrusznikiem elektrycznym, osiągnięte tzw. prędkość kątową rozruchu wystąpią dogodne warunki do pojawienia się pierwszych zapłonów mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach silnika. Rozpoczyna się wtedy etap nr 3 rozruchu silnika spalinowego. W tym etapie obserwuje się obracanie się wału korbowego przy nieregularnym spalaniu mieszanki w cylindrach silnika oraz przerywaną pracę rozrusznika. W trakcie trwania tego etapu w momencie, kiedy prędkość kątowa wału korbowego przekroczy (wyniku zaistnienia samozapłonu mieszanki palnej) określoną graniczną wartość występuje odłączenie napędzającego go rozrusznika poprzez sprzęgło jednokierunkowe. Jednak chwilowy spadek prędkości kątowej wału korbowego poniżej tej wartości granicznej, spowodowany wypadnięciem zapłonu mieszanki, powoduje ponowne „krótkie” sprzęgnięcie wału korbowego i jego ponowne napędzanie rozrusznikiem. Na rysunkach 7.2 oraz 7.7 przedstawiono rozruch silnika 4CT90 z widocznym etapem nr 3.

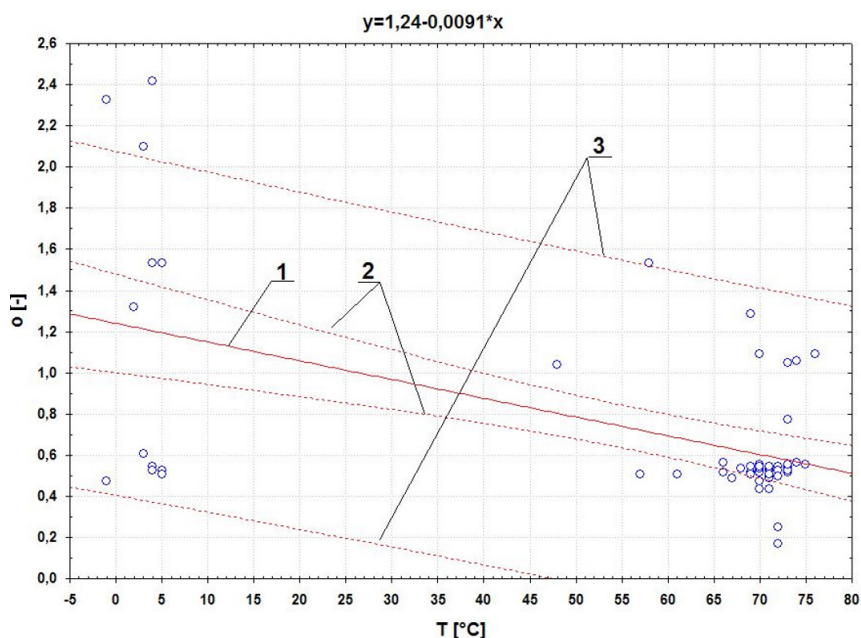
Zarejestrowany podczas badań [35] średni czas trwania etapu nr 3 rozruchu wynosi 0,225 s. Na rysunku 7.8 zaprezentowano histogram rozkładu statystycznego dla czasu trwania etapu nr 3 rozruchu. Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu Rayleigha wynosi $p \leq 0,05$. Analizując rysunek 7.8 należy stwierdzić, że w 58,2% zarejestrowanych przypadków czas trwania etapu nr 3 rozruchu znajdował się w przedziale od 0,095 s. do 0,13 s [35].



Rys. 7.8. Histogram rozkładu czasu trwania etapu nr 3 rozruchu silnika 4CT90: 1 – funkcja gęstości rozkładu Rayleigh dopasowana do danych empirycznych o parametrach: $\text{prgu} = 0,000$, $\text{skali} = 0,1097$ [35]

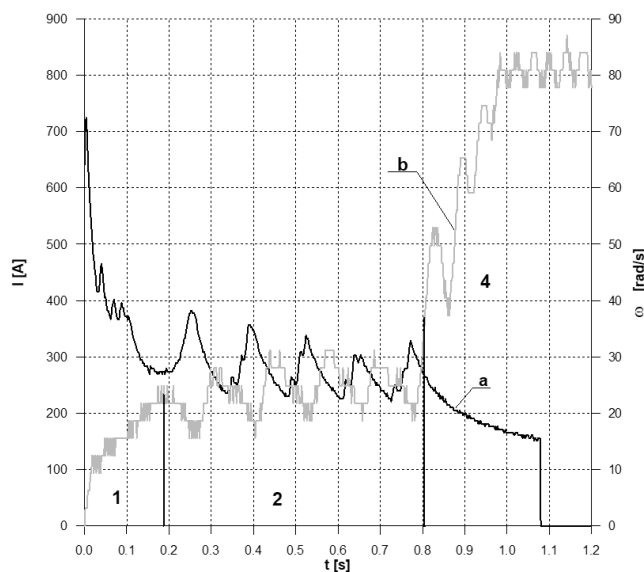
Stwierdzono, że liczba obrotów wału korbowego w trakcie trwania etapu nr 3 wzrasta w miarę spadku temperatury silnika w chwili jego rozruchu. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy tymi parametrami. Dla temperatury silnika i liczby obrotów podczas trwania etapu nr 3 współczynnik ten równa się $r = -0,5312$ (poziom istotności $p < 0,0001$).

Świadczy to o wpływie stanu cieplnego silnika na warunki tworzenia i spalania mieszanki paliwowo-powietrznej podczas rozruchu silnika. Potwierdzeniem tego jest wykres rozrzutu z rysunku 7.9 pomiędzy analizowanymi zmiennymi, na który zaznaczono przedziały ufności, dla prognozowanej średniej obserwacji i predykcji obliczone przy założeniu zgodności z rozkładem normalnym na poziomie ufności 95%.

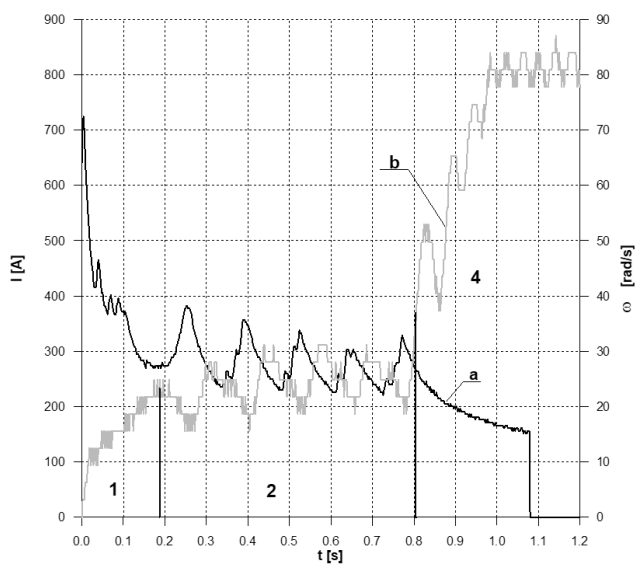


Rys. 7.9. Wykres rozrzutu dla liczby obrotów wału korbowego podczas trwania etapu nr 3 oraz temperatury silnika 4CT90 w chwili rozruchu: 1 – prosta regresji, 2 – przebieg ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji (przedział predykcji) [35]

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 7.9 charakteryzuje się średnim błędem szacunku równym 20,87% (dla poziomu istotności $p < 0,0001$). Wyraz wolny dla tej prostej posiada średni błąd szacunku równy 9,62% (poziom istotności $p < 0,0001$). Wartość współczynnika determinacji dla modelu liniowego z rysunku 7.9 równa się $r^2 = 0,2822$ (poziom istotności $p < 0,0001$). Błąd standardowy estymacji równa $S_e = 0,3999$, zaś wartość testu F wynosi $F = 22,804$ (poziom istotności $p < 0,0001$) [35].



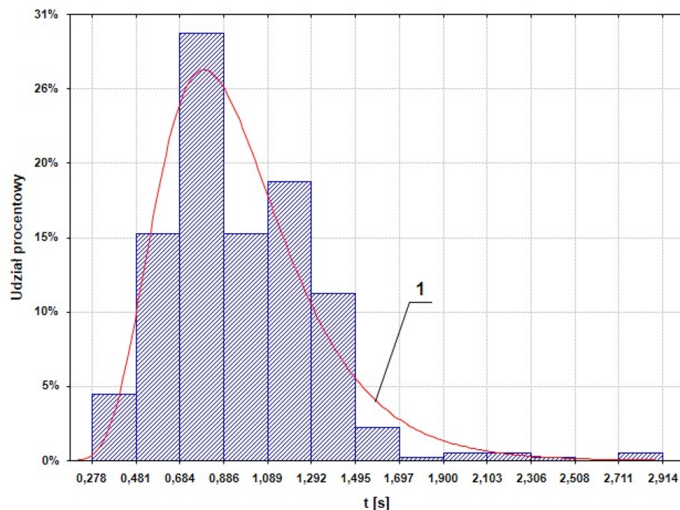
Rys. 7.10. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego oraz natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas rozruchu silnika 4CT90 bez wystąpienia etapu nr 3: a – natężenie prądu, b – prędkość kątowa wału korbowego, 1 – etap nr 1 rozruchu, 2 – etap nr 2 rozruchu, 4 – etap nr 4 rozruchu [32]



Rys. 7.11. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego oraz natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas rozruchu silnika 4CT90 z wystąpieniem etapu nr 2 po zaistnieniu etapu nr 3: a – natężenie prądu, b – prędkość kątowa wału korbowego, 1 – etap nr 1 rozruchu, 2 – etap nr 2 rozruchu, 3 – etap nr 3 rozruchu, 4 – etap nr 4 rozruchu [32]

Na podstawie badań własnych autora [35] stwierdzono, że w przeważającej mierze podczas rzeczywistego użytkowania samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym występują rozruchy nie zawierające etapu nr 3, co prezentuje rysunek 7.10. Występują także rozruchy (ok. 1%), w których po zaistnieniu etapu nr 3 następuje ponowne napędzanie wału korbowego silnika samym rozrusznikiem, czyli powrót do etapu nr 2. Przedstawiono to na rysunku 7.11.

Ostatnim wyróżnionym etapem rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jest etap nr 4. W etapie tym występują już tylko same zapłony mieszanki paliwowo-powietrznej. Podczas trwania tego etapu prędkość kątowna wału korbowego silnika spalinowego spada po szybkim wzroście oraz osiągnięciu maksimum lokalnego. Następnie obserwuje się jej stabilizację w zakresie wartości prędkości kątowej odpowiadającej biegowi jałowemu lub biegowi luzem silnika spalinowego. Decyduje o tym operator silnika, który może ustawić organ sterujący jego zasilaniem w położeniu innym niż neutralne po zaistnieniu udanego rozruchu. Powodem tego jest chęć utrzymania samodzielnego działania silnika o zapłonie samoczynnym. Obserwowana prędkość kątowna wału korbowego (szczególnie w obniżonych temperaturach), po zakończeniu rozruchu, charakteryzuje się dużą zmiennością. Wynika to faktu z występowania niestabilnego spalania w poszczególnych cylindrach silnika. Przykład opisanych zmian prędkości kątowej wału korbowego podczas etapu nr 4 zaprezentowano na rysunku 7.11. Należy stwierdzić, że istnieją także rozruchy, w których podczas etapu nr 4 nie występuje maksimum lokalne prędkości kątowej wału korbowego silnika, co zaprezentowano na rysunku 7.10. W etapie nr 4 następuje także całkowite rozłączenie zębniaka rozrusznika elektrycznego z kołem zamachowym wału korbowego silnika [35].

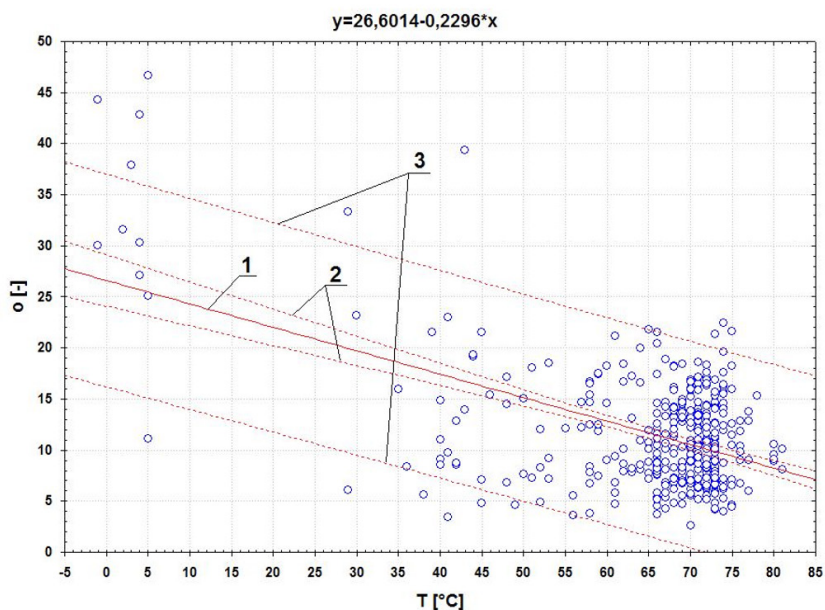


Rys. 7.12. Histogram rozkładu czasu trwania etapu nr 4 rozruchu silnika 4CT90: 1 – funkcja gęstości rozkładu log-normalnego dopasowana do danych empirycznych o parametrach: $\text{progu} = 0,000$, $\text{skali} = -0,1053$, $\text{kształt} = 0,3574$ [35]

Rysunek 7.12 prezentuje histogram rozkładu statystycznego czasu trwania etapu nr 4 rozruchu. Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu log-normalnego wynosi $p \leq 0,05$.

Analizując rysunek 7.12 należy stwierdzić, że w 29,3% zarejestrowanych przypadków czas trwania etapu nr 4 rozruchu znajdował się w przedziale od 0,683 s do 0,886 s. Rozruchów z czasem trwania etapu nr 4 do 1 s było aż 65,1%. Średni czas trwania etapu nr 4 wynosił 0,958 s [35].

Tak jak dla innych etapów rozruchu zaobserwowano, że liczba obrotów wału korbowego w trakcie trwania etapu nr 4 wzrasta w miarę spadku temperatury silnika w chwili jego rozruchu. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy tymi parametrami. Dla temperatury silnika i liczby obrotów podczas trwania etapu nr 4 współczynnik ten wynosi $r = -0,5256$ (poziom istotności $p < 0,0001$). Wskazuje to na wpływ warunków cieplnych na proces tworzenia oraz spalania mieszanki paliwowo-powietrznej podczas rozruchu silnika. Zilustrowano to na rysunku 7.13. gdzie przedstawiono wykres rozrzutu pomiędzy analizowanymi zmiennymi, wraz z przedziałami ufności, dla prognozowanej średniej obserwacji i predykcji obliczone przy założeniu zgodności z rozkładem normalnym na poziomie ufności 95%.

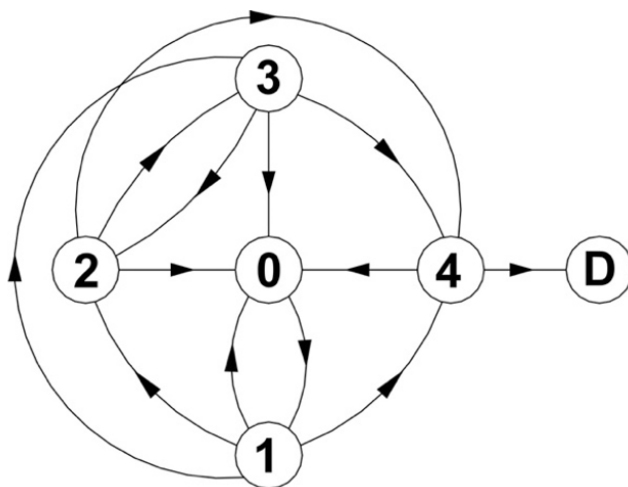


Rys. 7.13. Wykres rozrzutu dla liczby obrotów wału korbowego podczas trwania etapu nr 4 oraz temperatury silnika 4CT90 w chwili rozruchu: 1 – prosta regresji, 2 – przebieg ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji (przedział predykcji) [35]

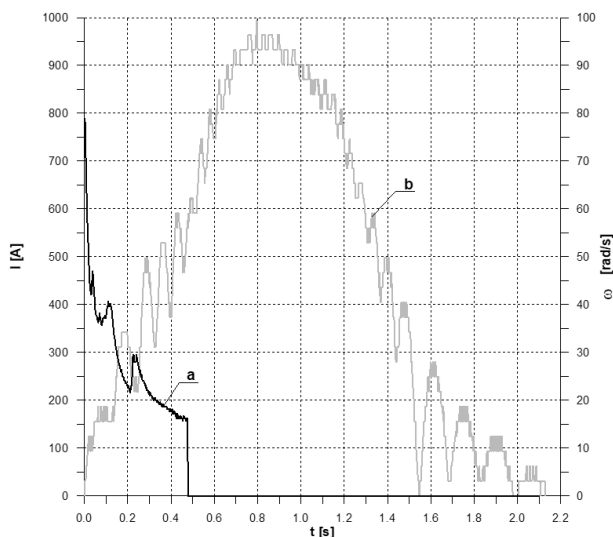
Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 7.13 charakteryzuje się średnim błędem szacunku równym 8,36% (dla poziomu istotności $p < 0,0001$). Wyraz wolny dla tej prostej posiada średni błąd szacunku równy 4,80% (poziom istotności $p < 0,0001$). Wartość współczynnika determinacji dla modelu liniowego z rysunku 7.13 wynosi $r^2 = 0,2763$ (poziom istotności $p < 0,0001$). Błąd standardowy estymacji równa się $S_e = 5,1385$, zaś wartość testu F Fishera-Snedecora wynosi 142,77 (poziom istotności $p < 0,0001$) [35].

Analiza występowania poszczególnych etapów rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym pozwoliła na opracowanie możliwych przejść pomiędzy opisanymi czterema etapami rozruchu w postaci grafu skierowanego procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, który zaprezentowano na rysunku 7.14 [33].

Omawiając proces rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym przedstawiony na rysunku 7.14 należy zwrócić uwagę na możliwe przejścia ze wszystkich wyróżnionych czterech etapów rozruchu do stanu spoczynku. Występuje wtedy przypadek nieudanego rozruchu silnika, co zilustrowano na rysunku 7.15. Przyczyn nieudanego rozruchu jest wiele. Na przykład niedostateczny stopień naładowania akumulatorów powoduje, że wał korbowy silnika nie osiągnie wymaganej (w danej temperaturze) kątowej prędkości rozruchowej, niezbędnej do uzyskania odpowiednich warunków do wystąpienia samozapłonów mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku. Niewłaściwy stan techniczny innych układów wpływających na proces tworzenia oraz spalania w cylindrach (np.: układ wtryskowy) może być także powodem zaistnienia nieudanego rozruchu [33].



Rys. 7.14. Graf skierowany rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym z czterema etapami wraz z możliwymi przejściami pomiędzy nimi: 0 – stan spoczynku silnika, 1 – etap nr 1 rozruchu, 2 – etap nr 2, 3 – etap nr 3, 4 – etap nr 4 rozruchu, D – stan samodzielnego działania silnika spalinowego [33]



Rys. 7.15. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego oraz natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas nieudanego rozruchu silnika 4CT90: a – natężenie prądu, b – prędkość kątowa wału korbowego [32]

Zastosowanie analizy etapów rozruchu do oceny przebiegu pierwszych dziennych rozruchów silnika spalinowego jako jednorodnego dyskretnego procesu Markowa z czasem ciągłym, zaprezentowano we wcześniejszej monografii autora [33].

7.3 Warunki użytkowania samochodu a warunki rozruchu jego silnika spalinowego

Na podstawie przedstawionej we wcześniejszych rozdziałach niniejszej monografii analizy stanu zagadnienia związanego z oddziaływaniem procesu rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym na środowisko naturalne należy stwierdzić, że najważniejszym parametrem rozruchu jest temperatura silnika w chwili jego zaistnienia. W miarę spadku jej wartości obserwuje się pogarszanie warunków tworzenia i spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Przyczynia się to do wzrostu oporów ruchu, a tym samym czasu trwania rozruchu silnika spalinowego, a także co jest bardzo istotne, do zwiększenia emisji składników toksycznych spalin. Wielu autorów w publikacjach naukowych wskazuje na związek pomiędzy warunkami użytkowania samochodu a parametrami rozruchu jego silnika spalinowego oraz występującą w jego trakcie emisję składników toksycznych spalin. Przy czym publikacje te możemy podzielić na dwie grupy. W pierwszej grupie publikacji, do której na przykład zaliczyć możemy pozycje [41,81,85,89,96,113,114] określa się dla różnych warunków użytkowania samochodów: parametry rozruchu, poziom emisji składników toksycznych podczas rozruchu silników spalinowych oraz poszukuje się rozwiązań technicznych ograniczających tą emisję.

W drugiej grupie opracowań naukowych, dla przykładu [26,40,78,124,133,141,144], zajmującej się na zagadnieniami optymalizacji przewozów samochodowych, uwzględnia się w projektowaniu oraz doborze nowych tras i warunków przejazdów emisję składników toksycznych spalin podczas rozruchu silników spalinowych. Także badania prowadzone przez autora niniejszej monografii podczas rzeczywistego użytkowania [29,32,33,35,36,37] samochodów dla wybranego przedsiębiorstwa transportowego, jakim była Poczta Polska oddział w Lublinie, obejmowały zagadnienia poruszane w obydwu grupach publikacji.

Na przestrzeni wielu lat badaniami drogowymi objęto kilkadziesiąt samochodów. Były to samochody ciężarowe o ładowności skrzyni do 8,5 tony oraz samochody dostawcze o ładowności do 3,5 tony. Silniki tych samochodów stanowiły jednostki napędowe o zapłonie samoczynnym. Samochody należące do pierwszej grupy wykonywały przejazdy pomiędzy węzłami i centrami logistycznymi poczty, zaś samochody drugiej grupy przewoziły przesyłki pocztowe pomiędzy lokalnymi urzędami pocztowymi a wybranymi węzłami logistycznymi [29,32,33].

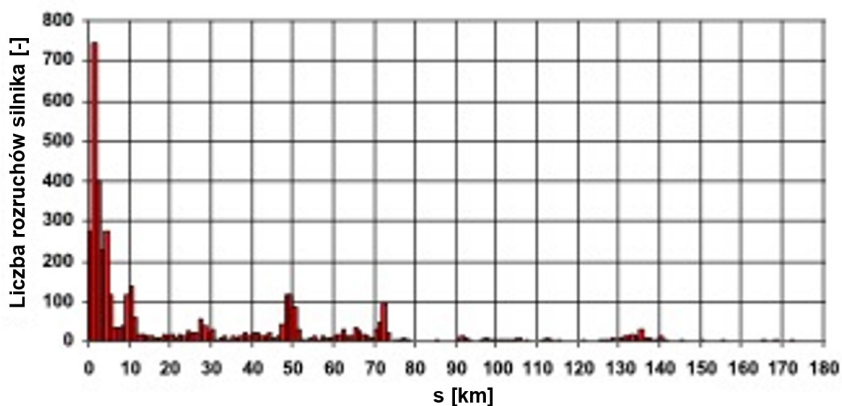
Każdy dzień pracy badanych samochodów, w których dokonywano przewozu przesyłek pocztowych wyglądał podobnie. W godzinach rannych kierowca dokonywał rozruchu silnika spalinowego w miejscu parkowania samochodów. Następnie wykonywano przejazd do centrum logistycznego na terenie miasta Lublin, gdzie załadowywano przesyłki pocztowe. W dalszej kolejności samochód z grupy pierwszej dokonywał, na stałej trasie, przewozu przesyłek pocztowych pomiędzy wybranymi węzłami poczty, gdzie je zostawiano i pobierano. Przewóz kończył się w centrum logistycznym znajdującym się w stolicy kraju Warszawie. Tam następował, zgodnie z przepisami [153], odpoczynek kierowcy, podczas którego wyładowywano dowiezione przesyłki, a następnie załadowywano nowe.

Po zakończeniu odpoczynku kierowca wyjeżdżał z centrum logistycznego w Warszawie. Pojazd wracał tą samą trasą i zatrzymywał się w tych samych węzłach co wcześniej. Po dojechaniu do centrum logistycznego w Lublinie i wyładowaniu przesyłek pocztowych samochód wracał, pod koniec dnia roboczego, na miejsce garażowania, w którym kierowca wykonywał czynności związanych z jego myciem i tankowaniem. Inny samochód dokonywał takiego samego przewozu, który rozpoczął się w środku dnia roboczego, a kończył nad ranem dnia następnego. Uwzględniał on także nocny odpoczynek kierowcy.

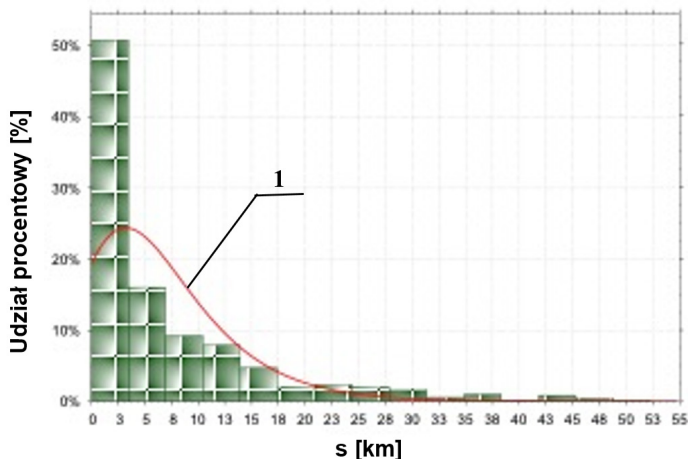
Samochody należące do grupy drugiej po załadowaniu przesyłek pocztowych w centrum logistycznym Poczty w Lublinie, odbywały przejazdy pomiędzy wybranymi lokalnymi urzędami oraz węzłami poczty. Koniec tych kursów występował w centrum logistycznym w Lublinie. Tam wyładowywano przesyłki pocztowe. Następnie odbywały się te same działania jak dla pierwszej grupy samochodów. W trakcie dnia roboczego występował wymagany przepisami [153] odpoczynek kierowcy.

Należy stwierdzić, że w każdym lokalnym urzędzie pocztowym, węźle oraz w centrum logistycznym kierowca był zobowiązany do wyłączenia silnika spalinowego. Było to zgodne z zaleceniami opisanymi w publikacji [41], w której autor stwierdzał, że sensownie jest wyłączanie silnika podczas krótkich postojów w celu zminimalizowania zużycia paliwa i emisji CO_2 . Czas postoju samochodu zależał od liczby wyładowywanych i pobieranych przesyłek w wyróżnionym punkcie przewozu [29,33]. Dla tak zorganizowanego systemu transportowego analizowanego przedsiębiorstwa transportowego można było zauważyć, że długość drogi przejechanej przez samochód pomiędzy kolejnymi rozruchami jego silnika spalinowego zależy w głównej mierze od odległości pomiędzy kolejnymi punktami przewozu [29,33]. Ilustruje to rysunek 7.16.

a)



b)

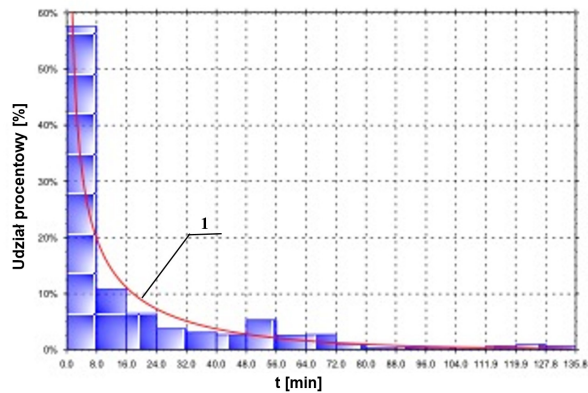


Rys. 7.16. Rozkład drogi wykonanej przez samochody analizowanego przedsiębiorstwa transportowego pomiędzy dwoma kolejnymi rozruchami ich silników: a) samochód grupy pierwszej, b) samochód grupy drugiej; 1 – funkcja gęstości rozkładu gamma dopasowana do danych empirycznych o parametrach: $\text{progu} = 0,000$, $\text{skali} = 4,4577$, $\text{kształtu} = 0,5507$ [29]

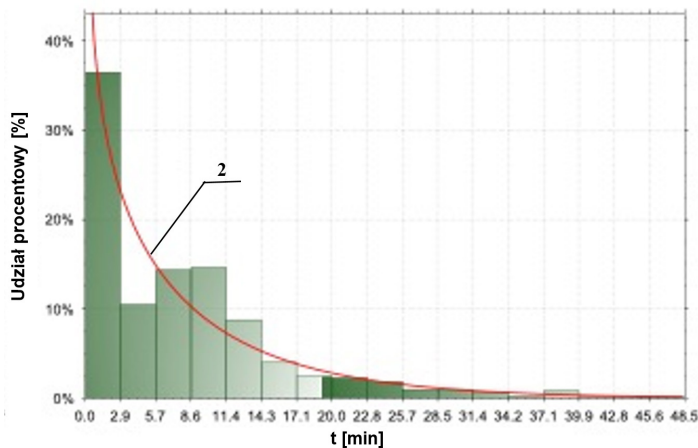
Poziom istotności dopasowania danych empirycznych do rozkładu gamma wynosi $p \leq 0,05$. Obserwowane maksima lokalne na rysunku 7.16a związane są z odległością pomiędzy dwoma punktami przewozu [29].

Analizując dane z wykresów na rysunku 7.16 należy stwierdzić, że dla obydwu grup samochodów obserwuje się najczęstsze występowanie rozruchów w przedziale, przebiegu drogi wykonanej pomiędzy dwoma kolejnymi rozruchami ich silników spalinowych, do 10 km. Taki udział wynika z pracy manewrowej samochodów w punktach załadunkowo-wyładunkowych oraz w miejscu garażowania.

a)

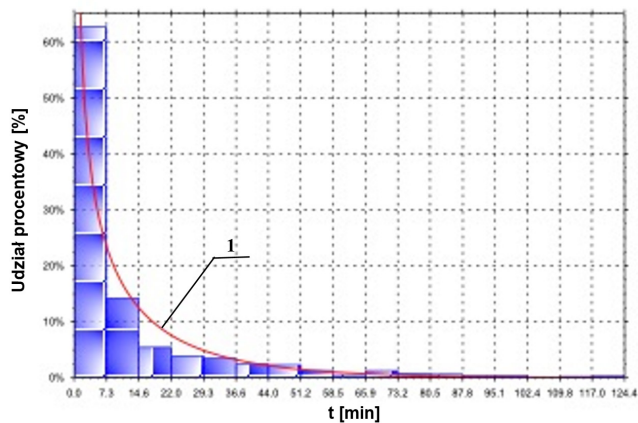


b)

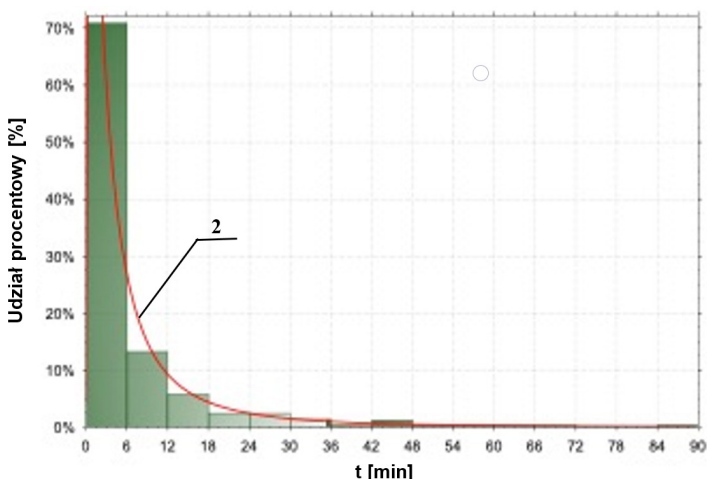


Rys. 7.17. Rozkład czasu działania silników spalinowych samochodów analizowanego przedsiębiorstwa transportowego pomiędzy dwoma kolejnymi ich rozruchami: a) samochód grupy pierwszej, b) samochód grupy drugiej: 1 – funkcja gęstości rozkładu gamma dopasowana do danych empirycznych o parametrach: progu = 0,528, skali = 40,999, kształtu = 0,439; 2 – funkcja gęstości rozkładu gamma dopasowana do danych empirycznych o parametrach: progu = 0,00, skali = 10,627, kształtu = 0,7459 [29]

a)



b)



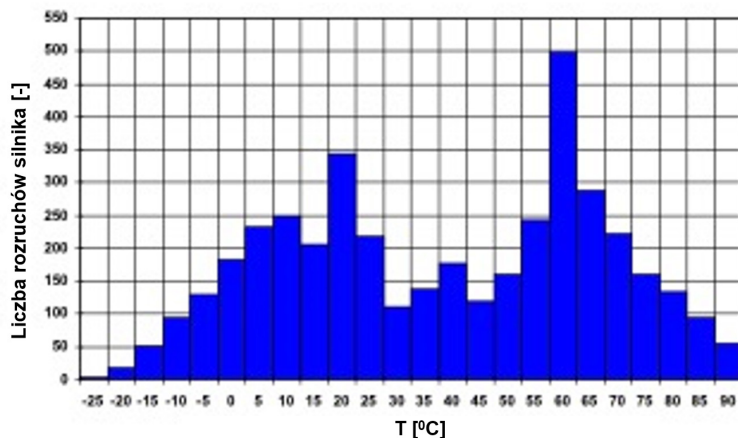
Rys. 7.18. Rozkład czasu przerw w działaniu silników spalinowych samochodów analizowanego przedsiębiorstwa transportowego pomiędzy dwoma kolejnymi ich rozruchami: a) samochód grupy pierwszej, b) samochód grupy drugiej 1 – funkcja gęstości rozkładu gamma dopasowana do danych empirycznych o parametrach: progu = 0,134, skali = 23,159, kształtu = 0,734, 2 – funkcja gęstości rozkładu gamma dopasowana do danych empirycznych o parametrach: progu = 0,671, skali = 17,321, kształtu = 0,5285 [29]

Wartość średnia drogi przejechanej przez samochód grupy pierwszej wynosiła 29,5 km, zaś dla pojazdu z grupy drugiej tylko 6,9 km. Różnice w wartościach średnich wynikają oczywiście z organizacji dnia pracy poszczególnych grup pojazdów. Dla założonego systemu organizacji przejazdów w ciągu dnia pracy samochodów analizowanego przedsiębiorstwa transportowego stwierdza się, że przeważają czasy działania silników spalinowych pomiędzy dwoma kolejnymi ich rozruchami nie przekraczające dla samochodów grupy pierwszej 8 min (57,5%) oraz 5,7 min (46,9%) dla grupy drugiej, co ilustruje rysunek 7.17.

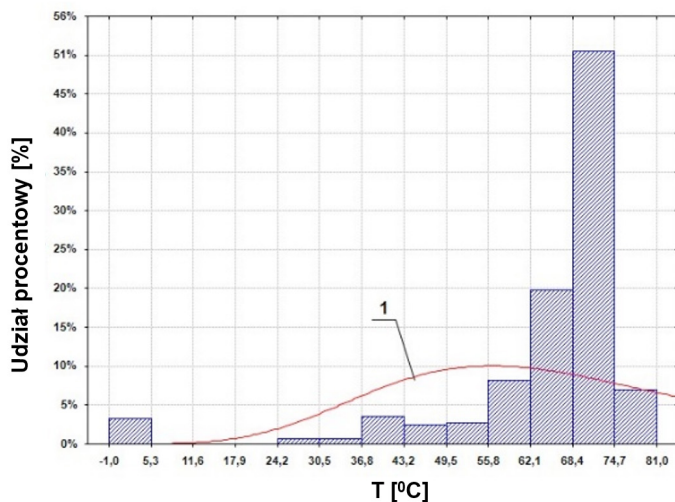
Wartość średnia czasu nieprzerwanego działania silnika spalinowego samochodów grupy pierwszej wynosi 19,2 min, zaś dla pojazdów grupy drugiej 7,9 minuty [29].

Przedstawiona powyżej organizacja przejazdów pojazdów oraz działań w punktach załadunkowo-wyładunkowych w ciągu pojedynczego dnia pracy w systemie transportowym Poczty Polskiej w Lublinie powoduje, że można zaobserwować występowanie gorących rozruchów silników spalinowych. Ilustruje to rysunek 7.19 przygotowany na podstawie monografii [29].

a)



b)



Rys. 7.19. Rozkład temperatur rozruchu silników spalinowych samochodów analizowanego przedsiębiorstwa transportowego: a) samochód grupy pierwszej, b) samochód grupy drugiej; 1 – funkcja gęstości rozkładu wartości ekstremalnych dopasowana do danych empirycznych o parametrach: położenia = 55,9307 i skali = 22,8529 [29,35]

Analizując rysunek 7.19 należy stwierdzić, że dla pojazdów pierwszej grupy rozruchy ich silników spalinowych przy umownej temperaturze mniejszej niż 0 °C stanowią 7,2% zaobserwowanych przypadków. Wynika to z faktu, że pojazdy te ze względu na swoją wielkość były garażowane na wolnym powietrzu. Rozruchy przy temperaturze silnika spalinowego będącej w granicach (0÷20) °C dla tych samochodów wynoszą 27,4%, zaś rozruchy gorące stanowią ponad 40% przypadków [29].

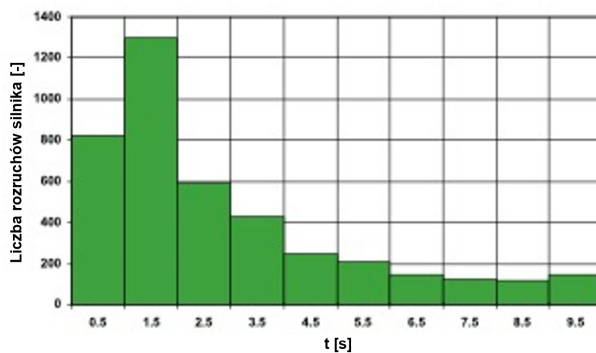
W analizowanym systemie przewozu zauważono także, że w trakcie pojedynczego dnia pracy przeważają czasy postoju z wyłączonym silnikiem spalinowym nie przekraczające 7,3 minuty (62,1%) dla samochodów należących do grupy pierwszej. Dla pojazdów z grupy drugiej przestoje z wyłączonym silnikiem spalinowym trwające do 6 min wynoszą 70,8%. Ilustracją rozkładu czasu trwania postojów samochodu z wyłączonym silnikiem jest rysunek 7.18. Wartość średnia czasu postoju samochodów z wyłączonym silnikiem spalinowym dla grupy pierwszej wynosi 19,2 min, zaś dla pojazdów grupy drugiej 7,9 min [29].

Dla samochodów grupy drugiej (zob. rysunek 7.19b) ze względu na to, że w okresie niskich temperatur były one garażowane w pomieszczeniu zamkniętym, wartości temperatur rozruchu ich silników spalinowych w granicach (0÷20) °C stanowiły niecałe 4%. Tzw. rozruchy gorące silników stanowiły ponad 78% zarejestrowanych przypadków. Brak temperatur powyżej 85 °C należy wytłumaczyć faktem prowadzenia badań w okresie wiosennym. W tym czasie obserwuje się niższe wartości dla temperatury silnika i temperatury oleju silnikowego w chwili rozruchu [35].

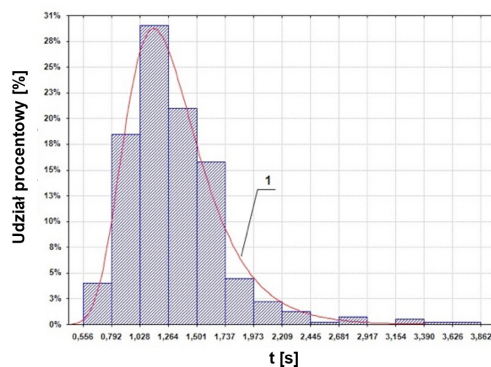
Znaczny udział gorących rozruchów silników spalinowych samochodów analizowanego przedsiębiorstwa transportowego powoduje, że obserwuje się występowanie krótkich czasów ich trwania. Zaprezentowano to na rysunku 7.20. Analizując przedmiotowy rysunek należy stwierdzić, że w 31,5% przypadków rozruchów silników spalinowych pojazdów grupy pierwszej czas ich trwania ich rozruchów znajdował się w przedziale od 1 do 2 s. Dla samochodów grupy drugiej (zob. rysunek 7.20b) średni czas rozruchu silnika wynosił 1,139 s. Prawie 29% zarejestrowanych przypadków tego dla czasu nie przekraczało wartość 1 s, zaś 73,8% – 1,5 s. [29,35].

Rozruchy silników spalinowych dłuższe niż 4,5 s dla pierwszej grupy samochodów oraz dłuższe niż 1,5 s w drugiej grupie samochodów (zobacz rysunek 7.20) są związane z tzw. pierwszymi dziennymi uruchomieniami [34,29,32]. Czyli są to rozruchy przy temperaturach silników spalinowych których wartość jest równa temperaturze otoczenia. Rozruchy takie występują po przestoju samochodu z wyłączonym silnikiem spalinowym trwającym ponad 8 godzin. Dla pierwszego dziennego rozruchu temperatura płynu chłodzącego silnik spalinowy oraz oleju silnikowego jest równa temperaturze otoczenia. Ilustruje to wykres z rysunku 7.21 [35].

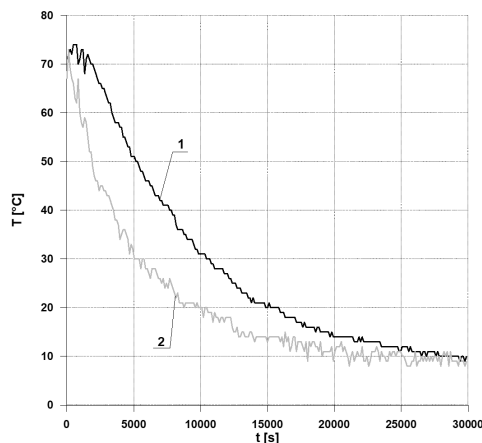
a)



b)

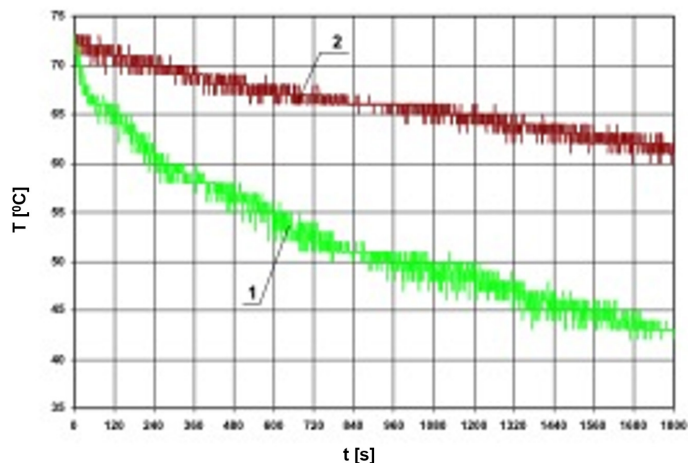


Rys. 7.20. Rozkład czasu trwania rozruchu silników spalinowych samochodów analizowanego przedsiębiorstwa transportowego: a) samochód grupy pierwszej, b) samochód grupy drugiej; 1 – funkcja gęstości rozkładu wartości ekstremalnych dopasowana do danych empirycznych o parametrach: położenia = 1,1391 i skali = 0,2971 [29,35]

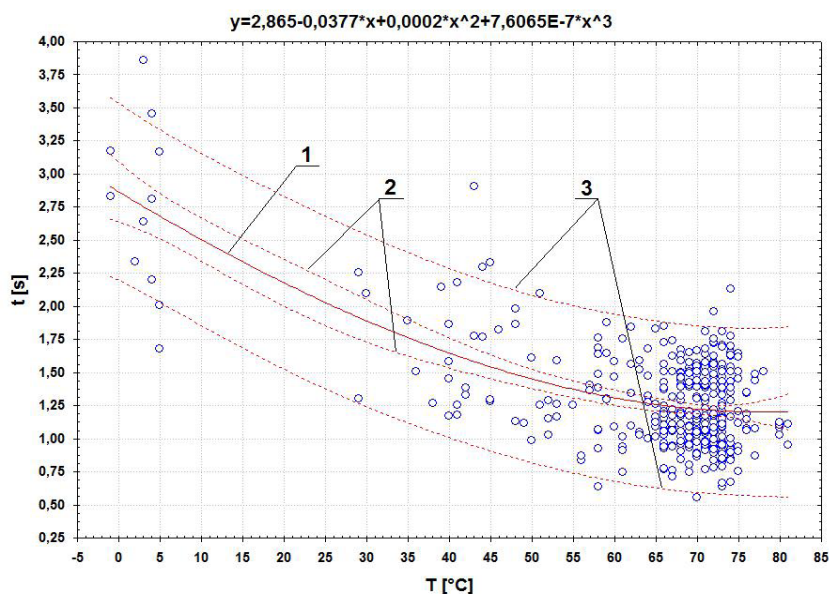


Rys. 7.21. Przebieg zmian temperatury w funkcji czasu postoju samochodu z wyłączonym silnikiem: 1 – temperatura płynu chłodzącego silnika spalinowego, 2 – temperatura oleju silnikowego [35]

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że prędkość spadku wartości temperatury zależy od panujących w czasie postoju samochodu warunków atmosferycznych. W okresie występowania niższych temperatur otoczenia obserwuje się szybsze zmiany temperatury silnika spalinowego. Przedstawia to wykres na rysunku 7.22.



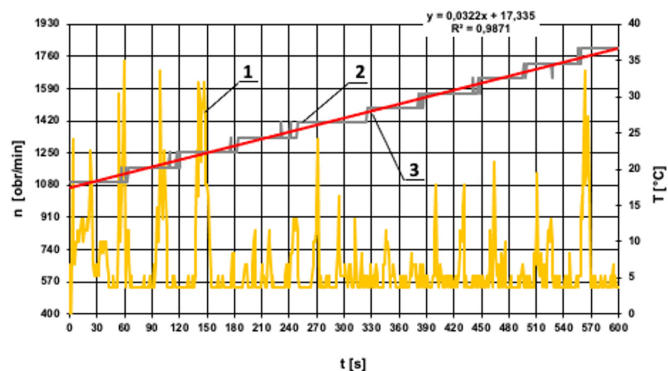
Rys. 7.22. Przebieg zmian temperatury płynu chłodzącego w funkcji czasu postoju samochodu z wyłączonym silnikiem: 1 – dzień zimowy, 2 – dzień letni [33]



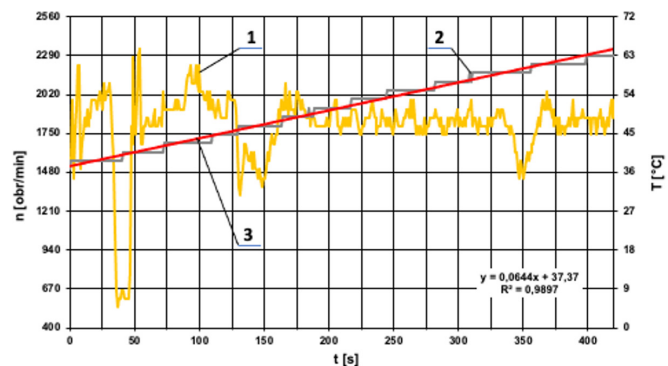
Rys. 7.23. Wykres rozrzutu temperatury silnika w chwili rozpoczęcia rozruchu oraz czasu rozruchu silnika 4CT90: 1 – krzywa regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

Oczywiste jest, że istnieje zależność pomiędzy czasem rozruchu silnika a temperaturą silnika. Potwierdza to wykres rozrzutu z rysunków 7.23 na których przedstawiono krzywą regresji wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji dla analizowanych parametrów rozruchu silnika spalinowego. Przy czym im mniejsza jest wartość temperatury tym dłuższy jest czas trwania rozruchu silnika spalinowego. Spowodowane to jest tym, że w niskich temperaturach utrudnione są warunki zaistnienia samozapłonów mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach. Na rysunku 7.23 wyraz wolny funkcji regresji w postaci wielomianu trzeciego stopnia ma błąd standardowy równy 0,1159. Błąd standardowy parametru występującego przy pierwszej potęgce wynosi 0,0131. Wartość błędu standardowego parametru związanego z drugą potęgą wynosi 0,0003, zaś błąd standardowy przy trzeciej potęgce wynosi 0,00001. Poziom istotności dla zaprezentowanych współczynników wynosi $p < 0,001$. Udział wariancji wyjaśnianej przyjętym modelem regresji wynosi 0,4296 [35].

a)

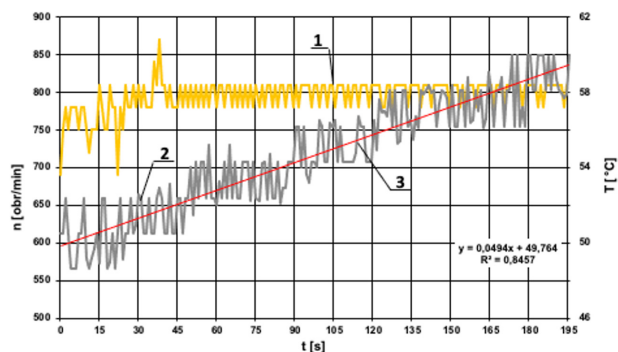


b)

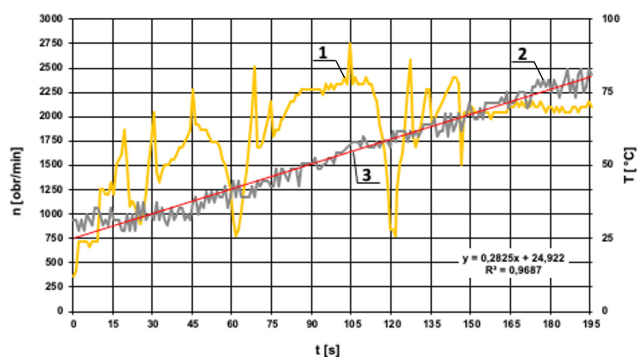


Rys. 7.24. Zmiana wartości temperatury silnika spalinowego samochodu grupy pierwszej: 1 – przebieg zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika spalinowego, 2 – przebieg zmian temperatury silnika spalinowego, 3 – linia trendu zmian temperatury silnika spalinowego, a) podczas pracy na biegu jałowym, b) podczas przejazdu pojazdu [29]

a)



b)



Rys. 7.25. Zmiana wartości temperatury silnika spalinowego samochodu grupy drugiej: 1 – przebieg zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika spalinowego, 2 – przebieg zmian temperatury silnika spalinowego, 3 – linia trendu zmian temperatury silnika spalinowego, a) podczas pracy na biegu jałowym, b) podczas przejazdu pojazdu [29]

Jak zwrócił uwagę autor publikacji [41] wartości emisji NO_x oraz węglowodorów podczas pierwszych dziennych rozruchów są o rząd większe niż podczas rozruchów gorących. Autor ten wykazał także, że działanie silnika spalinowego na biegu jałowym przez ponad 10 sekund zużywa więcej paliwa oraz emituje więcej CO_2 niż ponowne jego uruchomienie. Jednak najważniejszym spostrzeżeniem autora publikacji [41] było to, że silnik spalinowy rozgrzewa się szybciej podczas jazdy samochodem niż podczas działania na biegu jałowym. Potwierdzeniem tego faktu są wyniki własnych badań autora niniejszej monografii. Na rysunkach 7.24 oraz 7.25 zaprezentowano wartości zmian temperatury silnika spalinowego samochodów należących do grupy pierwszej i drugiej podczas działania silnika na biegu jałowym oraz w warunkach przejazdu pojazdem [29].

Analizując współczynniki kierunkowe linii trendu z rysunków 7.24 i 7.25 należy stwierdzić, że dla pojazdów grupy pierwszej przyrost wartości temperatury silnika spalinowego podczas ich przejazdu jest dwa razy większy niż podczas działania silnika na biegu jałowym. Dla grupy drugiej obserwuje się przyrost trzy razy szybszy. Ta różnica w prędkości zmian wartości temperatur silników wynika z różnicy wielkości w obydwu rodzajach silników. Silniki samochodów grupy pierwszej były dwa razy większe od silników samochodów grupy drugiej.

Przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki długotrwałych badań w warunkach rzeczywistego użytkowania samochodów analizowanego przedsiębiorstwa transportowego potwierdziły, że istnieją związki pomiędzy organizacją ich przejazdów dla danego systemu transportowego a obserwowanymi warunkami oraz parametrami rozruchów ich silników o zapłonie samoczynnym. Dlatego też istotne jest właściwe planowanie tras przewozu ładunków transportowych [29,40,78,124,133,141,144] nie tylko po to, aby ograniczyć długości tras przewozu oraz koszty transportu, ale także w celu zmniejszenia liczby występujących rozruchów silników spalinowych drogowych środków przewozu. Dlatego też autor niniejszej monografii podjął się w publikacjach [36,37] oceny tras przewozu przesyłek pocztowych dla wybranego fragmentu systemu transportowego Poczty Polskiej. W publikacjach tych wykazano, poprzez analizę optymalizacyjną, że można zmniejszyć liczbę samochodów oraz ilość i długość tras ich przejazdów pomiędzy poszczególnymi punktami przewozu umieszczając w innym miejscu lokalny węzeł pocztowy. Przyczynia się to do zmniejszenia liczby uruchomień silników spalinowych, a tym samym ograniczenia emisji składników toksycznych spalin emitowanych podczas wystąpienia rozruchów ich silników.

7.4. Widmo rozruchu samochodowego silnika spalinowego

Związki pomiędzy organizacją przewozów w danym systemie transportowym a warunkami oraz parametrami rozruchów samochodowych silników o zapłonie samoczynnym pozwoliły autorowi monografii na zaproponowanie w serii publikacji [30,33] nowego pojęcia jakim jest „widmo rozruchu” samochodowego silnika spalinowego. Przy czym przez „widmo rozruchu” rozumiemy wielowymiarowy wektor losowy, którego składowe charakteryzują rozproszenie wartości wybranych parametrów rozruchu oraz wskaźników działania silnika i pojazdu.

W monografii [33] wskazano metodykę wykorzystania tak zdefiniowanego wektora do przeprowadzenia eksperckiej charakterystyki oceny systemu transportowego. W tym celu niezbędne jest dokonanie następujących kroków:

- krok nr 1 – wskazanie wybranych parametrów rozruchu oraz wskaźników działania silnika i pojazdu tworzących „widmo rozruchu”, które najlepiej opisujących oceniany system transportowy;
- krok nr 2 – ustalenie przedziałów wartości dla wybranych wielkości;
- krok nr 3 – wykonanie badań przebiegowych dla grupy lub pojedynczego samochodu reprezentującego oceniany system w których mierzymy wartości wyróżnionych parametrów „widma rozruchu”;
- krok nr 4 – przeprowadzenie analizy statystycznej dla zebranych informacji z badań przebiegowych;
- krok nr 5 – porównanie uzyskanych wyników obliczeń statystycznych z założonymi przedziałami wartości.

W kroku nr 1 ustala się jakie parametry „widma rozruchu” będą brane pod uwagę przy ocenie danego systemu transportu. W serii publikacji autorskich [32,33,35] opisano wiele takich parametrów, które możemy podzielić na następujące trzy grupy:

W grupie pierwszej znajdują się parametry związane z pracą rozrusznika elektrycznego podczas rozruchu silnika spalinowego (zob. rysunki 6.1 i 6.2):

- maksymalne natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu wyrażone w amperach;
- średnie natężenie prądu pobierane przez rozrusznik w czasie rozruchu (w amperach) zwane także w literaturze zagadnienia „prądem rozruchu” [88,108];
- czas przyłożenia napięcia na zaciskach rozrusznika wyrażony w sekundach;
- czas trwania pracy rozrusznika pod obciążeniem (w sekundach).

Drugą grupę tworzą parametry związane z działaniem silnika spalinowego w trakcie rozruchu (zob. rysunek 7.25):

- średnia prędkość kątowna wału korbowego silnika spalinowego podczas rozruchu zwana także prędkością kątowną rozruchu wyrażona w radianach na sekundę [88,108];
- czas trwania rozruchu silnika spalinowego (w sekundach).

Trzecią grupę tworzą wskaźniki działania samochodu, które bardzo dokładnie omówiono w rozdziale 7.3., są to między innymi:

- czas działania silnika spalinowego (wyrażony w minutach) liczony od momentu rozpoczęcia rozruchu do chwili zatrzymania się jego wału korbowego;
- czas postoju samochodu z wyłączonym silnikiem (w minutach) trwający od chwili unieruchomienia się wału korbowego do momentu rozpoczęcia się kolejnego rozruchu silnika spalinowego;
- droga przejechana przez pojazd pomiędzy dwoma rozruchami silnika spalinowego wyrażona w kilometrach.

Ostatnim wyróżnionym parametrem rozruchu jest temperatura silnika w chwili rozpoczęcia rozruchu. Wpływa ona, co podkreślono we wcześniejszych rozdziałach niniejszej monografii, na inne wymienione parametry „widma rozruchu”.

W kroku nr 2 następuje ustalenie przedziałów wartości dla wybranych wielkości. W tabeli nr 7.1 zaproponowano przedziały wartości dla wybranych pięciu najważniejszych parametrów „widma rozruchu”, które omówiono w publikacjach [32,33]. Ustalono także słowne równoważniki dla zaproponowanych przedziałów.

Z kolei w kroku nr 3 należy przeprowadzić badania przebiegowe dla grupy lub pojedynczego samochodu reprezentującego oceniany system. Należy w tym miejscu, że autor monografii w publikacji [24] zaproponował podział badania przebiegowe samochodu na dwie kategorie. W pierwszej kategorii, podczas realizacji badań, nie ingeruje się w żaden sposób w warunki użytkowania samochodu. O trasach przejazdu, czasie postoju z wyłączonym silnikiem i innych wskaźnikach pracy danego środka transportu decyduje tylko jego użytkownik.

W ich trakcie eksperymentator jest biernym obserwatorem. Badania takie nazwano badaniami w warunkach „naturalnego” lub „długotrwałego” użytkowania samochodu [24].

Podczas drugiej kategorii badań przebiegowych, nazywanych badaniami w warunkach „nadzorowanego” lub „kontrolowanego” użytkowania samochodów, przy współpracy z użytkownikiem samochodu i w określonym przedziale czasie w pewnych okresach czasu, badacz może określić warunki pracy samochodu. W pozostałym czasie badane samochody są użytkowane zgodnie z intencjami jego właściciela [24].

W kroku nr 4, podczas przeprowadzania eksperckiej charakterystyki oceny systemu transportowego dokonuje się, z wykorzystaniem różnorodnych programów komputerowych, analizy statystycznej zebranych wyników badań przebiegowych.

W ostatnim kroku nr 5 następuje porównanie uzyskanych wyniki obliczeń statystycznych z wartościami granicznymi przedziałów, ustalonymi w tabeli nr 7.1. dla wybranych parametrów „widma rozruchu” samochodowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym.

Tabela 7.1. Przedziały wartości dla parametrów oraz ich równoważniki słowne

Wyróżniony parametr	Przedział wartości i określenie słowne			
Czas działania silnika	Poniżej 10 min	10–20 min	20–30 min	Powyżej 30 min
	Niedługi czas	Przeciętny czas	Średni czas	Długotrwały czas
Czas postoju pojazdu z wyłączonym silnika	Poniżej 10 min	10–20 min	20–30 min	Powyżej 30 min
	Niedługi czas	Przeciętny czas	Średni czas	Długotrwały czas
Droga przejechana przez pojazd	Poniżej 10 km	10–30 km	30–50 km	Powyżej 50 km
	Krótko-dystansowe trasy	Przeciętnej długości trasy	Znacznej długości trasy	Długo-dystansowe trasy
Temperatura silnika w chwili rozruchu	Poniżej 0 °C	0–20 °C	20–60 °C	Powyżej 60 °C
	Rozruchy w niskich temperaturach	Chłodne rozruchy	Ciepłe rozruchy	Gorące rozruchy
Czas trwania rozruchu	Poniżej 2 sek.	2–3 sek.	Powyżej 3 sek.	
	Natychmiastowy rozruch	Przeciętny czas rozruch	Długotrwały rozruch	

Przy zastosowaniu, opisanej w tym rozdziale, eksperckiej charakterystyki oceny systemu transportowego, bazującej na wielowymiarowym wektorze losowym jakim jest „widmo rozruchu” stwierdzono dla samochodów należących do Poczty Polskiej zaliczonych do pierwszej grupy, że:

1. W analizowanym systemie transportu założona organizacja w ciągu pojedynczego dnia pracy samochodu powoduje, że można zaobserwować przeciętne czasy działania jego silnika spalinowego.
2. Występujący przeciętny czas postoju samochodu z wyłączonym silnikiem oznacza niedopracowany dla tej grupy pojazdów system załadunkowo-wyładunkowy;
3. Określona organizacja przejazdów pomiędzy węzłami i centrami logistycznymi poczty oraz ich wzajemne położenie przyczyniają się do wykonywania przeciętnej długości tras przez samochody grupy pierwszej.
4. Podczas pojedynczego dnia pracy samochodów występują w przeważającej mierze „gorące rozruchy” silników spalinowych.
5. Obserwuje się występowanie przeciętnych czasów trwania rozruchu silnika spalinowego.

Dla samochodów Poczty Polskiej należących do drugiej grupy, stwierdza się, że:

1. W analizowanym systemie transportu założona organizacja w ciągu pojedynczego dnia pracy samochodu powoduje, że można zaobserwować niedługie czasy działania jego silnika spalinowego.
2. Występujący niedługi czas przestoju samochodu z wyłączonym silnikiem wskazuje na dopracowany dla tej grupy pojazdów system załadunkowo-wyładunkowy;
3. Określona organizacja przejazdów pomiędzy lokalnymi urzędami pocztowymi a wybranymi węzłami logistycznymi poczty oraz ich wzajemne położenie przyczyniają się do wykonywania krótkodystansowych tras przez samochody grup drugiej.
4. Podczas pojedynczego dnia pracy samochodów występują w przeważającej mierze „gorące rozruchy” silników spalinowych.
5. Obserwuje się występowanie natychmiastowych rozruchów silnika spalinowego.

Tak sformułowane konkluzje, dla dwóch grup samochodów, dotyczące warunków ich użytkowania pozwalają na stwierdzenie, że analizowany system transportu Poczty Polskiej jest ukierunkowany na minimalizację występowania negatywnych czynników, związanych z emisją składników toksycznych z silników o zapłonie samoczynnym, oddziałujących na środowisko naturalne.

8. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszej monografii rozważania są podsumowaniem wieloletnich badań naukowych prowadzonych przez autora zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i rzeczywistej eksploatacji samochodowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że rozruch ww. silników jest złożonym wieloetapowym procesem zależnym od wielu parametrów. Podczas jego trwania obserwuje się występowanie negatywnych procesów, do których zaliczamy: zwiększoną emisję składników toksycznych w spalinach, wzrost intensywności zużywania się par tribologicznych silnika spalinowego oraz nagłe przeciążenia w elektrycznym układzie rozruchowym samochodu.

Należy stwierdzić, że najważniejszym z parametrów rozruchu silnika spalinowego jest jego temperatura. Przy obniżaniu się jej wartości obserwuje się wydłużenie czasu trwania rozruchu silnika spalinowego, co pociąga za sobą intensyfikację, wymienionych powyżej negatywnych procesów. Wartość temperatury rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym zależy przede wszystkim od dziennej organizacji pracy środka przewozu w danym systemie transportowym. Zaplanowanie długiego pierwszego przejazdu samochodu w danym dniu pracy powoduje, że jego silnik spalinowy osiąga wysoką wartość temperatury, co ułatwia kolejne rozruchy i prowadzi do ograniczenia skali występowania przedstawionych wcześniej procesów. Z kolei w miarę wydłużania się czasu postoju samochodu z wyłączonym silnikiem spalinowym obniża się wartość temperatury jego rozruchu. Jednocześnie prędkość spadku wartości temperatury zależy od warunków atmosferycznych. Z tego powodu właściwa organizacja prac załadunkowo-wyładunkowych, skutkująca krótkim czasem postoju samochodu, przyczynia się do ograniczenia negatywnych procesów pojawiających się podczas rozruchu silnika spalinowego. Oczywiście jest więc, że odpowiednie zaplanowanie poszczególnych dni pracy samochodu w przedsiębiorstwie transportowym przyczynia się do ograniczenia negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne.

Poza temperaturą proces rozruchu silnika spalinowego opisują następujące parametry: maksymalne natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu, średnie natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik w czasie rozruchu zwane także „prądem rozruchu”, czas przyłożenia napięcia na zaciskach rozrusznika, czas trwania pracy rozrusznika pod obciążeniem oraz czas rozruchu silnika spalinowego. Zastosowanie eksperckiej charakterystyki, bazującej na wielowymiarowym wektorze losowym jakim jest „widmo rozruchu”, którego składowymi są wskaźniki działania samochodu i silnika spalinowego oraz wybrane parametry procesu rozruchu, pozwala na porównywanie i ocenę różnych samochodowych systemów przewozu. Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia ekonomicznej efektywności tego rodzaju transportu.

Podsumowując należy stwierdzić, że konieczne są dalsze szczegółowe badania procesu rozruchu samochodowych silników spalinowych w warunkach rzeczywistego ich użytkowania. Uzyskane wyniki pozwolą na dokładniejsze sterowanie przebiegiem tego procesu, co zminimalizuje jego negatywne oddziaływanie na środowisko naturalne. Pomimo dużej pracochłonności i wysokich kosztów autor niniejszej monografii planuje kontynuowanie takich badań.

Literatura

- [1] Abramek K. F.: *Ocena stanu zużycia układu TPC na podstawie pomiarów przedmuchów dla prędkości rozruchu. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 6, Problemy rozruchu silników spalinowych. 2002, s. 7–12.*
- [2] Abramek K. F.: *Zmiana stopnia sprężania i jej wpływ na właściwości rozruchowe silników z zapłonem samoczynnym. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie. Nr 10(82), 2006, s. 11–19.*
- [3] Abramek K. F.: *Change of a compression ratio and its influence on the gas scavenge effect. „Archiwum Motoryzacji”. Nr 2, 2008, s. 103–110.*
- [4] Ambrozik A., Ambrozik T., Łagowski P.: *Fuel impact on emissions of harmful components of the exhaust gas from the CI engine during cold start-up. „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”. Vol. 17, no. 1, 2015, s. 95–99.*
- [5] Antonowicz M., Majewski J.: *O bezpieczeństwie w transporcie lądowym – zarys problematyki, „Logistyka”. Nr 2, 2014, s. 5109–5119.*
- [6] Ariga S.: *Observation of transient oil consumption with in-cylinder variables. „SAE Technical Paper Series.” No. 961910, 1996, s. 21–32.*
- [7] Armas O., García-Contreras R., Ramos Á.: *Pollutant emissions from engine starting with ethanol and butanol diesel blends. Fuel Processing Technology. Vol. 100, 2012, s. 63–72.*
- [8] Bera P.: *Development of Engine Efficiency Characteristic in Dynamic Working States. „Energies”. 12(15):2906, 2019.*
- [9] Bernardo A. and others: *Camelina oil as a fuel for diesel transport engines. „An International Journal Industrial Crops and Products”. No. 17(2003), s. 191–197.*
- [10] Bielaczyc P., Merksiz J., Pielecha J.: *Stan cieplny silnika spalinowego a emisja związków szkodliwych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2001.*
- [11] Bielaczyc P., Pajdowski P.: *Investigation of cold start emissions from passenger car with DI Diesel engine using the modal analysis method. „Journal of KONES”. Vol. 8, No. 1–2, 2001, s. 100–109.*
- [12] Blackwood A., Tidmarsh D., Willcock M.: *The effect of an oxidation catalyst on cold start diesel emissions in the first 120 seconds of running. „SAE Technical Paper Series.” No. 980193, 1998, s. 71–79.*
- [13] Blanc M., Geiger S., Houben H., Hovestadt T., Toedter O.: *Second generation ISS diesel cold start technology with pre-heated intake air. MTZ worldwide. Vol. 67, No. 5, 2006, s. 10–13.*
- [14] Bocheński C.: *Wpływ ciśnienia wtrysku i lepkości oleju napędowego na proces rozpylenia paliwa w silnikach z ZS. „Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa”. T. 6, Lublin 2004, s. 5–14.*
- [15] Bocheński C. i inni: *Badania kontrolne samochodów. WKiŁ. Warszawa, 2000.*
- [16] Broatch A., Tormos B., Olmeda P., Novella R.: *Impact of biodiesel fuel on cold starting of automotive direct injection diesel engines. „Energy”. No. 73, 2014, s. 653–660.*

- [17] Burnewicz J.: *Ekonomika transportu. Skrypt*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego. Gdańsk, 1986.
- [18] Caban J., Drożdź P.: *Stan ruchu drogowego w Polsce i na Słowacji w latach 2002–2013*. „Logistyka”. Nr 5. Poznań, 2014, s. 204–210.
- [19] Caban J.: *Wpływ parametrów wtrysku paliwa na przebieg procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska. Lublin, 2018.
- [20] Cichocki W., Garbacik A.: *Warunki stosowania pomocniczych urządzeń do rozruchu silników spalinowych* zs. Materiały seminaryjne – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1995, s. 29–35.
- [21] Cieślakowski, S. J.: *Zagadnienia bezpieczeństwa transportu kolejowego*. TTS „Technika Transportu Szynowego”. Nr 5–6, 2014.
- [22] Cisek J., Szlachta Z.: *Correlation between autoignition delay and cetane number of rape fuels at varied diesel engine work conditions*. „Journal of KONES.” Vol. 8, No. 1–2, 2001, s. 110–115.
- [23] Cho S-W., Choi S-M., Bae Ch-S.: *Frictional modes of barrel shaped piston rings under flooded lubrication*. „Tribology International”. No. 33, 2000, s. 545–551.
- [24] Czarnigowski J., Drożdź P.: *Rodzaje badań obiektów technicznych w trakcie ich eksploatacji*. Folia Societatis Scientiarum Lublinensis, Technika. Vol. 10, 2001, s. 25–28.
- [25] Datto A., Fox M.F.: *An initial investigation of the lubricant condition in the automotive ring zone under cold start conditions*. [W:] *Tribological research and design for engineering systems*, ed. Dowson D. and others. Tribological research and design for engineering systems. Tribology series 41, Elsevier, 2003. s. 517–523.
- [26] Demir E., Bektas T., Laporte G.: *A review of recent research on green road freight transportation*. „European Journal of Operational Research”. Vol. 237, issue 3, 2014, s. 775–793.
- [27] Dowson D.: *Piston assemblies; background and lubrication analysis*. [W:] *Engine Tribology*. ed. C. M. Taylor. Tribology Series, 26. Elsevier. Amsterdam 1993, s. 213–240.
- [28] Drożdź P.: *Metoda oceny eksploatacyjnej trwałości tłokowego silnika spalinowego z uwzględnieniem przebiegu rozruchu*. Rozprawa Doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin, 1998.
- [29] Drożdź P., Liščák Š.: *The chosen problems of commercial truck maintenance* EDIS- Žilina University publisher. Žilina, 2005.
- [30] Drożdź P.: *The chosen parameters of the ic engine work and start-up as the elements of the vehicle transport system evaluation criterion*. „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”. No. 4(32), 2006, s. 6–10.
- [31] Drożdź P.: *Start-up of a diesel engine*. „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”. No. 2(34), 2007, s. 51–59.
- [32] Drożdź P. i inni: *Wybrane zagadnienia rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym*. PNTTE. Warszawa, 2007.

- [33] Drożdziel P.: *Widmo rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jako kryterium oceny warunków użytkowania samochodu*. PNTTE. Warszawa, 2009.
- [34] Drożdziel P., Krzywonos L.: *The estimation of the reliability of the first daily diesel engine start-up during its operation in the vehicle*. „Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”. No 1 (41), 2009, s. 4–10.
- [35] Drożdziel P., Krzywonos L., Liščák Š.: *Selected aspects of diesel engines start-ups*. Wydawnictwo-Drukarnia Liber Duo. Lublin, 2013.
- [36] Drożdziel P., Wińska M., Madleňák R., Szumski P.: *Optimization of the post logistics network and location of the local distribution center in selected area of the Lublin province*. „Procedia Engineering”. Vol. 192, 2017, s. 130–135.
- [37] Drożdziel P., Wińska M., Madleňák R., Szumski P.: *Optimization of the position of the local distribution center of the regional post logistics network*. „Transport Problems”. Vol. 12, issue 3, 2017, s. 42–50.
- [38] Dudzikowski I., Salamon J., Gierak D.: *Dynamic and stationary operating states of motor-car starters excited by permanent magnets*. 6th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical System UEES'04, 24–26.09.2004, Ukraine 2004, s. 59–70.
- [39] Dyga G., Pszczółkowski J.: *Analiza sygnałów rozruchu silnika spalinowego*. Autobusy. 12, 2017, s. 837–843.
- [40] Erdoğan S., Miller-Hooks E.: *A Green Vehicle Routing Problem*. Transportation Research Part E: „Logistics and Transportation Review”. Vol. 48, issue 1, 2012, s.100–114
- [41] Gains L., Rask E., Keller G.: *Which is greener: idle, or stop and Restart? Comparing fuel use and emissions for short passenger-car stops*. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy; 2012, s. 1–2.
- [42] Galligan J., Torrance A.A., Liraut G.: *A scuffing test for piston ring/bore combinations. Part I. Stearic acid lubrication*. WEAR. No. 236, 1999, s. 199–209.
- [43] Gustavsson T., Cederberg H.: *Unique cold start method used on Volvo's new 12L unit injector diesel engine*. SAE Technical Paper Series. No. 940109, 1994, s. 255–262.
- [44] Grzywacz W., Burniewicz J.: *Ekonomika Transportu*. WKiŁ. Warszawa, 1989.
- [45] Hebb N. V., Forss A. M., Saxer Ch. J. Wilhelm P.: *Methane, benzene and alkyl benzene cold start emission data of gasoline-driven passenger cars representing the vehicle technology of the last two decades*. „Atmospheric Environment”. No. 37(2003), s. 5185–5195.
- [46] Henein N. A., Zahdeh A. R., Yassine M. K., Bryzik W.: *Diesel engine cold starting: combustion instability*. SAE Technical Paper Series. No. 920005, 1992, s. 33–48.
- [47] Heywood J. B.: *Internal combustion engine fundamentals 2E*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [48] Hładun J.: *Badania rozruchowe silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim do samochodu ciężarowego*. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej. Nr 359. Szczecin, 1988, s. 5–14.

- [49] Idzior M., Czapliński E., Bor M.: *Wpływ transportu samochodowego na zanieczyszczenie powietrza pyłem zawieszonym PM10 i PM2,5. „Autobusy”*. No 6, 2017.
- [50] Isermann R.: *Engine modeling and control. Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines*. Springer, 2014.
- [51] Isermann R.: *Combustion Engine Diagnosis: Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components*. Springer, 2017.
- [52] Iskra A.: *Opory tarcia tłok-cylinder w temperaturze rozruchu silnika*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 2000, s. 47–53.
- [53] Jensen M. F., Bottiger J., Reitz H. H., Benzon M. E.: *Simulation of wear characteristics of engine cylinder*. WEAR. No. 253, 2002, s. 1044–1056.
- [54] Jaśkiewicz M., Liscak S.: *Wprowadzenie do systemów transportowych*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej Kielce, 2013.
- [55] Joshi D. S., Shah A. V., Gosai D. C.: *Importance of Tribology in Internal Combustion Engine: A Review*. „International Research Journal of Engineering and Technology”. Vol. 2, issue. 7, 2015, s. 803–809.
- [56] Kałdoński T., Koliński K., Pszczółkowski J.: *Sterowanie procesem zapłonu paliwa w warunkach rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym*. „Journal of KONES”. Vol. 10, No. 1–2, 2003, s. 83–90.
- [57] Kikuchi T., Ito S., Nakayama Y.: *Piston friction analysis using a direct-injection single-cylinder gasoline engine*. „JSEA Review”. No. 24, 2003, s. 53–58.
- [58] Kilar H., Uzdowski M.: *Wpływ niskich temperatur na opory wewnętrzne zespołów spalinowego silnika tłokowego*. Doctoral thesis, WAT. Warszawa, 1986.
- [59] Kilar H., Uzdowski M.: *Niskotemperaturowe właściwości paliw do silników ZS*. Materiały Sympozjum – Rozruch silników Spalinowych. Szczecin, 1996, s. 67–73.
- [60] Kilar H.: *Paliwa alternatywne, wpływ różnych dodatków na ich właściwości*. Materiały Sympozjum – Rozruch silników Spalinowych. Szczecin, 1998, s. 77–82.
- [61] Koliński K., Pszczółkowski J.: *Aspekty wpływu oleju silnikowego na rozruch silnika o zapłonie samoczynnym*. Materiały Sympozjum Dodatek – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1996, s. 5–10.
- [62] Koliński K., Pszczółkowski J.: *Zużycie cylindrów silnika AD4.236 w warunkach rozruchu*. Eksploatacja silników spalinowych. Problemy rozruchu silników spalinowych. Z. 6, 2002, s. 81–86.
- [63] Komsta H., Drożdżel P., Caban J.: *Transport drogowy w gospodarce Polski*. Logistyka. Nr 6, 2014, s. 5610–5615.
- [64] Kopczewski R., Nowacki G.: *Analiza zabezpieczenia przewozu drogowego towarów niebezpiecznych w Polsce oraz UE*. Autobusy. Nr 4, 2018.
- [65] Kordos P.: *Stanowiskowa próba niezawodności samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym*. Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska, Lublin, 2005.
- [66] Korin E., Reshef R., Tshernichovsky D., Sher E.: *Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of catalytic converter embedded in a phase-*

- change material*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, „Journal of Automobile Engineering”. Vol. 213, 1999, s. 575–583.
- [67] Kotowska E., Pyza D., Sivets O.: *Regulacje prawne w zakresie wpływu transportu na środowisko*. Logistyka. Nr 4, 2014, s. 2033–2039.
- [68] Kowalewicz A.: *Podstawy procesów spalania*. WNT. Warszawa, 2000.
- [69] Kozłak A.: *Ekonomika transportu. Teoria i praktyka gospodarcza*. WUG-Uniwersytet Gdański. Gdańsk, 2008.
- [70] Krzemień A., Krzemień P.: *Wpływ rodzaju oleju na straty tarcia pierścieni tłokowych w czterosuwowym silniku samochodowym w warunkach rozruchu*. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 6, Problemy rozruchu silników spalinowych. 2002, s. 87–90.
- [71] Lai M-C., Henein N. A., Xie X., Cheu T-H., Itho Y., Bryzik W.: *Diesel cold-starting study using optically accessible engines*. „SAE Technical Paper Series.” No. 952366, 1995, s. 1–20.
- [72] Lawrowski Z.: *Tribologia: tarcie, zużycie i smarowanie*. PWN. Warszawa, 1993.
- [73] Lejda K.: *Systemy wtryskowe szybkoobrotowych silników wysokoprężnych i tendencje ich dalszego rozwoju*. „Silniki spalinowe”. Nr 4, 2005, s. 19–30.
- [74] Leszczyński J.: *Modelowanie systemów i procesów transportowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
- [75] Lewicki J.: *Opyry tarcia i zużycie silników z zapłonem samoczynnym przy rozruchu w niskich temperaturach*. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej. Nr 353. Szczecin, 1988.
- [76] Łazowska H., Mysłowski J.: *Wpływ skażenia powietrza na wybrane wskaźniki zdrowia populacji aglomeracji miejskiej*. [W:] *Ekologiczne aspekty stosowania nowych technologii w transporcie*, red. Kukielfka L. Wydział Mechaniczny Politechnika Koszalińska. Koszalin, 2012, s. 11–34.
- [77] MacMillan D., la Rocca A., Shayler P. J., Murphy M., Pegg I. G.: *The effect of reducing compression ratio on the work output and heat release characteristics of a DI diesel under cold start conditions*. „SAE Technical Paper.” 2008–01–1306.
- [78] Marrekchi E., Besbes W., Dhouib D.: *A new taxonomy for the Green Vehicle Routing Problem*. Proceedings of The 6th International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing, META'2016, s. 516–526.
- [79] Mattsson C.: *Measurement of oil film thickness between the cylinder liner and the piston rings in a heavy duty directly injected diesel engine*. „SAE Technical Paper Series.” No. 952469, 1995, s. 21–28.
- [80] Mendyk E.: *Ekonomika transport*. Wyższa Szkoła Logistyki. Poznań, 2009
- [81] Merksiz J.: *Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1994.
- [82] Merksiz J.: *Ekologiczne problemy silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Tom 1. Poznań, 1998.

- [83] Merkisz J.: *Ekologiczne problemy silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Tom 2. Poznań, 1999.
- [84] Merkisz J., Pielecha J.: *Zagadnienia emisji cząstek stałych podczas rozruchu silnika ZS*. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 6, Problemy rozruchu silników spalinowych. 2002, s. 81–86.
- [85] Mosburger M., Fuschetto J., Assanis D., Filipi Z.: *Impact of high sulfur military jp-8 fuel on heavy duty diesel engine EGR cooler condensate*. SAE International Journal of Commercial Vehicles. „SAE Technical Paper” 2008–01–1081.
- [86] Murakami Y.: *Analysis of corrosive wear of diesel engines: relationship to sulfate ion concentrations in blowby and crankcase oil*. „JSAE Review.” No. 16, 1995, s. 43–48.
- [87] Mysłowski J., Uzdowski M., Kilar H., Kołtun J.: *Rozruch silników z zapłonem samoczynnym w niskich temperaturach otoczenia*. Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej. Nr 450. Szczecin, 1992.
- [88] Mysłowski J.: *Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym*. WNT. Warszawa, 1996.
- [89] Mysłowski J., Mysłowski K., Mysłowski J.: *Poziom zanieczyszczeń powietrza w wyniku transportu samochodowego*. „Autobusy” Nr 7–8, 2017, s. 82–86.
- [90] Nagaki H., Korematsu K.: *Effect of sulfur dioxide in recirculated exhaust gas on wear within diesel engines*. „JSME International Journal.” Series B. Vol. 38, No. 3, 1995, s. 465–474.
- [91] Naylor M., Kadali P., Wang J.: *Diesel engine tribology*. Automotive Tribology. Modern Tribology Handbook. Chapter 33. Vol. I & II. CRC Press LCC, 2001.
- [92] Niewczas A.: *Trwałość zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego*. WNT. Warszawa 1998.
- [93] Niewczas A., Czerniec M., Ignaciuk P.: *Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarciowo*. IZT. Lublin, 2000.
- [94] Osuka I., Nishimura M., Tanaka Y., Miyaki M.: *Benefits of new injection system technology on cold startability of diesel engines – improvement of cold startability and white smoke reduction by means of multi injection with common rail fuel system (ECD-U2)*. „SAE Technical Paper”, Series. No. 949586, 1994, s. 7–17.
- [95] Pacaud P., Perrin H., Laget O.: *Cold start on diesel engine: is low compression ratio compatible with cold start requirements?* „SAE Technical Paper”. 2008–01–1310.
- [96] Pandey A., Nandgaonkar M.: *Comparison and Evaluation of Wear, Performance and Emission of Diesel, Karanja Oil Biodiesel and JP-8 in a Military 585 kW CIDI Engine*. „SAE Technical Paper.” 2013–01–2658, 2013.
- [97] Pawłowski L. i inni: *Zanieczyszczenie powietrza w Polsce: stan, przyczyny, skutki*. Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Komitet Inżynierii Środowiska. Lublin, 2019
- [98] Payri F., Broatch A., Salavert J.M., Martín J.: *Investigation of Diesel combustion using multiple injection strategies for idling after cold start of passenger-car engines*. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol. 34, is. 7, 2010, s. 857–865.

- [99] Piekarski W., Kuranc A.: *Zadymienie spalin silnika z ZS w warunkach zimnego rozruchu przy wykorzystaniu różnych paliw*. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. PAN O/Lublin. Lublin, 2001, s. 218–223.
- [100] Pielecha J., Dobrzyński M., Andrych-Zalewska M.: *Wpływ katalizatora wewnętrznego na emisję związków szkodliwych podczas rozruchu silnika spalinowego*. „Autobusy”. Nr 12, 2017, s. 359–363.
- [101] Plomer A., Benda R.: *Modern heavy duty diesel engine cold start wear study*. Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 52, No. 6, 2000, s. 277–285.
- [102] Postrzednik S., Żmudka Z.: *Termodynamiczne oraz ekologiczne uwarunkowania eksploatacji tłokowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2007.
- [103] Priest M., Taylor C. M.: *Automobile engine tribology – approaching the surface*. WEAR. No. 241, 2000, s. 193–203.
- [104] Pszczółkowski J.: *Rozruch tłokowych silników spalinowych w niskiej temperaturze*. Rozprawa Doktorska. WAT. Warszawa, 1990.
- [105] Pszczółkowski J.: *Prędkość obrotowa wału korbowego jako główne kryterium możliwości rozruchu silników spalinowych*. Materiały Sympozjum Dodatek – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1996, s.11–16.
- [106] Pszczółkowski J.: *Metodyka badań rozruchowych silnika o zapłonie samoczynnym*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 2000, s. 161–166.
- [107] Pszczółkowski J.: *Analityczny opis charakterystyk rozrusznika elektrycznego*. Conference Proceedings: 26TH International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 2000. Instytut Lotnictwa w Warszawie i Politechnika Lubelska. Nałęczów, 2000, s. 262–271.
- [108] Pszczółkowski J.: *Charakterystyki rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym*. Wydawnictwo SEPP „Cogito”. Zbąszynek, 2004.
- [109] Pszczółkowski J., Koliński K.: *Cechy prędkości obrotowej wału korbowego i jej wpływ na rozruch silnika o zapłonie samoczynnym*. Materiały IX Międzynarodowego Sympozjum IPMiT. Rynia 22–24 06 2005. Wyd. BEL Studio Sp. z o.o.. Warszawa, 2005, s. 615–624.
- [110] Pszczółkowski J.: *Analiza i modelowanie procesu rozruchu silników o zapłonie samoczynnym*. Redakcja Wydawnictw WAT. Warszawa, 2009.
- [111] Pszczółkowski J.: *Badanie charakterystyk rozrusznika elektrycznego*. „Autobusy”. Nr 6, 2019, s. 240–247.
- [112] Randazzo M. L., Sodre J. R.: *Cold start and fuel consumption of a vehicle fueled with blends of diesel oil-soybean biodiesel-ethanol*. Fuel. Vol. 90, is. 11, 2011, s. 3291–3294.
- [113] Reiter M. S., Kockelman K. M.: *The problems of cold starts: A closer look at mobile source emissions levels*. Transportation Research Part D „Transport and Environment”. Vol. 43, March 2016, s. 123–132.

- [114] Roberts A., Brooks R., Shipway P.: *Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of problem, causes and potential solutions*. „Energy Conversion and Management”. No 82, 2014, s. 327–350.
- [115] Riga A. T., Roby S. H.: *Low-temperature properties of crankcase motor oils: a fundamental approach to pumpability phenomena*. „Lubrication Engineering”. Vol. 50, 1994, s. 411–417.
- [116] Rofail R., Henein N.: *Simulation of the effect of recirculated gases on ignition delay during cold starting of a direct injection diesel engine*. „SAE Technical Paper.” 2011–01–0838.
- [117] Rokosch U.: *Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów*. WKiŁ, Warszawa, 2007.
- [118] Rychter T., Teodoryczy A.: *Teoria silników spalinowych*. WKiŁ, Warszawa, 2006.
- [119] Rydzikowski W., Wojewódzka-Król K i inni: *Transport*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Wyd. 5 zmienione. Warszawa, 2010.
- [120] Sakunthalai R. A., Xu H., Liu D., Tian J.: *Reducing Cold Start Emissions from Automotive Diesel Engine at Cold Ambient Temperatures*. „Aerosol and Air Quality Research”. No. 16, 2016, s. 3330–3337.
- [121] Serdecki W.: *Badanie współpracy elementów układu tłokowo-cylindrowego silnika spalinowego*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań, 2002.
- [122] Sroka Z.: *Układy tribologiczne w systemach funkcjonalnych silnika spalinowego*. „Problemy Maszyn Roboczych.” Z. 22, 2003, s. 85–96.
- [123] Strulak – Wójcikiewicz R., Łatuszyńska M.: *Komputerowe wspomaganie oceny wpływu rozwoju infrastruktury transportu na środowisko*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. Nr 733. Studia Informatica. Nr 30. Szczecin, 2012.
- [124] Suzuki Y.: *A new truck-routing approach for reducing fuel consumption and pollutants emission*. Transportation Research Part D: „Transport and Environment”. Vol. 16, issue 1, January 2011, s. 73–77.
- [125] Szczepaniak T. i inni: *Transport i spedycja międzynarodowa*. PWE. Warszaw, 1985.
- [126] Szczepański T.: *Metoda oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych*. Praca doktorska. Politechnika Warszawska, 2015.
- [127] Szlachta Z.: *Graniczna temperatura rozruchu silnika wysokoprężnego zasilanego olejem rzepakowym i jego mieszaninami z olejem napędowym*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1996, s. 121–126.
- [128] Szlachta Z.: *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi*. WKiŁ. Warszawa, 2002.
- [129] Tanveer S., Umesh Chandra Sharma U. C., Prasad R.: *Rheology of multigrade engine oils*. „Indian journal of Chemical Technology.” Vol. 13, pp 180–184.
- [130] Tarkowski P., Fijałkowski S.: *Wybrane aspekty rozruchu silnika spalinowego w niskich temperaturach*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1998, s. 217–220.

- [131] Taylor C. M.: *Fluid-film lubrication in the internal combustion engine: an invited review*. Journal of Physics. Part D: Apply Physics. No. 25, 1992. s. A91–A99.
- [132] Telatyński R.: *Wspomaganie rozruchu silników spalinowych przez wykorzystanie ciepła zakumulowanego podczas poprzedniej pracy*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1996, s.127–131.
- [133] Toro E., Escobar A., Antonio H., Granada M.: *Literature review on the vehicle routing problem in the green transportation context*. Revista Luna Azul. No 42, 2016, s. 362–387.
- [134] Tran T. A.: *Some methods to prevent the wear of piston-cylinder when using low sulphur fuel oil (LSFO) for all ships sailing on emission control areas (ECAs)*. Diesel and Gasoline Engines, 2020.
- [135] Urbanyi-Popiołek I. i inni: *Ekonomiczne i organizacyjne aspekty transportu*. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Gospodarki w Bydgoszcz. By 2013.
- [136] Wajand J. A., Wajand J. T.: *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*. WNT. Warszawa, 2005.
- [137] Wasiak M., Jacyna-Golda I.: *Transport drogowy w łańcuchach dostaw. Wyznaczanie kosztów*. PWN. Warszawa, 2016.
- [138] Wąchocki M.: *Zużycie rozruchowe tłokowych silników spalinowych*. „Wojskowy Przegląd Techniczny i Logistyczny.” Nr 3, 1994, s. 12–13.
- [139] Wendeker M., Jakliński P., Czarnigowski J.: *Badania strategii sterowania wtryskiem benzyny*. „Journal of KONES.” Vol. 8, no. 3–4, 2001, s. 206–215.
- [140] Włodarski J. K.: *Eksploatacja maszyn okrętowych. Tarcie i zużycie*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni. Gdynia, 1998.
- [141] Vidal T., Laporte G., Matl P.: *A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants*. „European Journal of Operational Research.” Vol. 286, issue 2, 2020, s. 401–416.
- [142] Zając G., Piekarski W.: „Ocena poziomu zużycia paliwa przez silnik o zapłonie samoczynnym przy zasilaniu FAME i FAEE. Inżynieria Rolnicza. Nr 8(117), 2009, s. 281–288.
- [143] Andrych-Zalewska M.: *Wpływ katalizatora wewnętrznego na emisję spalin w stanach pracy silnika o zapłonie samoczynnym odpowiadających jego użytkowaniu trakcyjnemu*. Doctoral thesis, Politechnika Poznańska. Poznań, 2018.
- [144] Zulvia F.E., Kuo R.J., Nugroho D.Y.: *A many-objective gradient evolution algorithm for solving a green vehicle outing problem with time windows and time dependency for perishable products*. Journal of Cleaner Production. No. 242, 2020, s. 1–15.
- [145] Zweiri Y. H., Whidborne J. K., Seneviratne L. D.: *Instantaneous friction components model for transient engine operation*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, „Journal of Automobile Engineering”. Vol. 214, 2000, s. 809–824.
- [146] Zwierzycki W.: *Problemy prognozowania trwałości par ślizgowych*. „Tribologia”. Nr 2, 1996, s. 149–171.
- [147] Minister Infrastruktury: *Strategia Zrównoważonego Rozwoju transportu do 2030 roku*. Przyjęta przez Radę Ministrów. Warszawa, 24.09.2019.

- [148] Główny Urząd Statystyczny: *Przewozy ładunków i pasażerów w 2019 r.* Informacje sygnalne. GUS, Warszawa, 20.05.2020.
- [149] PN-EN 116:2001 *Przetwory naftowe – Oznaczenie temperatury zablokowania zimnego filtra.*
- [150] PN-EN 590:2013 *Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań.*
- [151] PN-C-04510:2004 *Przetwory naftowe – Oznaczanie lepkości strukturalnej olejów w niskich temperaturach symulatorem zimnego rozruchu (CCS).*
- [152] PN-92/S-04051 *Pojazdy samochodowe i motorowery. Dopuszczalny poziom hałasu zewnętrznego. Wymagania i badania.*
- [153] Ustawa o czasie pracy kierowcy. Dz. U. 2019, poz. 1412.
- [154] *Rola energetyki i transportu w zanieczyszczaniu powietrza atmosferycznego.* http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/1__Zanieczyszczenia_powietrza/_Spalanie_paliw_12y.html. (01.09.2020)
- [155] *Kolejny knebel Unii na fanów motoryzacji.* <https://auto.wprost.pl/aktualnosci/10240066/kolejny-knebel-unii-na-fanow-motoryzacji.html>. (01.09.2020)
- [156] *Pył zawieszony: czym jest PM10, a czym PM2.5? Aerozole atmosferyczne.* <https://airly.org/pl/pyl-zawieszony-czym-jest-pm10-a-czym-pm2-5-aerozole-atmosferyczne/>. (01.09.2020)
- [157] *Environmental noise in Europe — 2020.* Report European Environment Agency. No 22, Luxembourg, 2019. https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe?utm_source=EEASubscriptions&utm_medium=RSSFeeds&utm_campaign=Generic. (01.09.2020)
- [158] *Diesel Engines Exhausts: Myths and Realities.* United Nations Economic Commission for Europe, 2014. <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=1503&menu=1515>. (01.09.2020)
- [159] *Wypadki drogowe w Polsce w 2019 roku.* <https://statystyka.policja.pl/st/ruch-drogowy/76562,Wypadki-drogowe-raporty-roczne.html>. (01.09.2020)