



# **Widmo rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jako kryterium oceny warunków użytkowania samochodu**

**Paweł Drożdziel**

**Polskie Naukowo-Techniczne  
Towarzystwo Eksploatacyjne**

**Warszawa 2009**

Opiniodawcy:

**Vladimír Hlavňa**  
**Krzysztof Olejnik**  
**Stanisław Radkowski**

Redaktor techniczny

**Leszek Krzywonos**

Skład i łamanie komputerowe

**Cezary Sarnowski**

© Copyright by Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne  
Warszawa 2009

**ISBN 978-83-911726-6-7**

Polskie Naukowo-Techniczne  
Towarzystwo Eksploatacyjne,  
ul. Jagiellońska 80, pawilon PBWiE,  
03-301 Warszawa.  
tel. (+48 22) 811 32 31 w. 515 lub 303,  
email: d.kowalik@pollub.pl  
<http://eksploatacja.waw.pl>

Druk: Wydawnictwo-Drukarnia Liber Duo s.c.  
ul. Długa 5  
20-346 Lublin  
[liberduo@o2.pl](mailto:liberduo@o2.pl)

## SPIS TREŚCI

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Wprowadzenie                                                                                                                                         |    |
| 1.1 Wstęp .....                                                                                                                                         | 7  |
| 1.2. Pojęcia i definicje stosowane w pracy.....                                                                                                         | 8  |
| 2. Rozruch jako początek działania samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym.....                                                                    | 15 |
| 2.1. Tworzenie i spalanie mieszanki palnej w czasie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym .....                                                       | 15 |
| 2.2. Rozruch silnika spalinowego przy pomocy rozrusznika elektrycznego..                                                                                | 21 |
| 2.3. Procesy tarcia i zużycia podczas rozruchu silnika spalinowego.....                                                                                 | 25 |
| 2.4. Rozruch silnika spalinowego jako problem badawczy .....                                                                                            | 31 |
| 3. „Widmo rozruchu” silnika o zapłonie samoczynnym jako kryterium oceny warunków użytkowania pojazdu .....                                              | 35 |
| 4. Identyfikacja wybranych parametrów „widma rozruchu” samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym.....                                                | 39 |
| 4.1. Obiekty badań .....                                                                                                                                | 39 |
| 4.2. Badane parametry „widma rozruchu”.....                                                                                                             | 40 |
| 4.3. Wpływ warunków użytkowania samochodu na parametry „widma rozruchu” silnika o zapłonie samoczynnym stosowane podczas oceny systemu transportu.....  | 42 |
| 4.4. Wpływ stanu cieplnego silnika o zapłonie samoczynnym na parametry „widma rozruchu” charakteryzujące działanie jego rozrusznika elektrycznego ..... | 60 |
| 4.5. Złożone analizy wyników badań parametrów „widma rozruchu” silnika o zapłonie samoczynnym .....                                                     | 68 |
| 4.5.1. Analiza kanoniczna .....                                                                                                                         | 68 |
| 4.5.2. Analiza statystyczna z wykorzystaniem sieci neuronowych.....                                                                                     | 71 |

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5. Proces rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym .....                                                       | 79  |
| 5.1. Podział rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym na etapy .....                                                         | 79  |
| 5.2. Badania etapów rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym.....                                                            | 83  |
| 5.3. Jednorodny dyskretny proces Markowa jako model przebiegu procesu<br>startu silnika spalinowego .....                   | 89  |
| 5.3.1. Założenia przyjęte podczas budowy modelu.....                                                                        | 89  |
| 5.3.2. Wyznaczanie rozkładów brzegowych procesu.....                                                                        | 91  |
| 5.3.3. Wyznaczanie elementów macierzy intensywności.....                                                                    | 97  |
| 6. Wykorzystanie zaproponowanego kryterium oceny warunków użytkowania<br>pojazdu w systemie transportu Poczty Polskiej..... | 101 |
| 7. Wnioski końcowe.....                                                                                                     | 105 |
| Literatura .....                                                                                                            | 109 |

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Załącznik 1: Tabele wskaźników statystycznych parametrów<br>„widma rozruchu” silników 4CT90 poddanych badaniom<br>przebiegowym w warunkach „naturalnego”<br>i „kontrolowanego” użytkowania pojazdów LUBLIN ..... | 119 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Załącznik 2: Wykresy statystyczne parametrów „widma rozruchu” silników<br>4CT90 poddanych badaniom przebiegowym w warunkach<br>„kontrolowanego” użytkowania pojazdów LUBLIN ..... | 125 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Załącznik 3: Macierze wartości współczynników korelacji liniowej<br>parametrów „widma rozruchu” silnika 4CT90 poddanych<br>badaniom przebiegowy w warunkach „naturalnego”<br>i „kontrolowanego” użytkowania pojazdów LUBLIN ..... | 137 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Załącznik 4: Tabele wyników analizy kanonicznej oraz analizy<br>z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych parametrów<br>„widma rozruchu” silników 4CT90 poddanych badaniom<br>przebiegowym w warunkach „naturalnego” i „kontrolowanego”<br>użytkowania pojazdów LUBLIN ..... | 143 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Załącznik 5: Tabele wskaźników statystycznych oraz macierze korelacyjne<br>etapów rozruchu silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN ..... | 151 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## OD AUTORA

Oddając do rąk czytelników niniejszą monografię chciałbym powiedzieć, że powstała ona na podstawie pracy habilitacyjnej pod tym samym tytułem obronionej w dniu 13.06.2008 r. na Wydziale Eksploatacji i Ekonomiki Transportu i Komunikacji Uniwersytetu w Żilinie na Słowacji kierowanym przez Panią prof. Tatianę Čorejovą, będącej owocem trwającej już ponad 14 lat międzynarodowej współpracy naukowej.

Monografia ta stanowi podsumowanie wieloletnich badań naukowych prowadzonych przez autora i obejmujących zagadnienia eksploatacji, ekonomiki, tribologii, diagnostyki oraz niezawodności w pojazdach samochodowych ze szczególnym uwzględnieniem rozruchów ich silników spalinowych.

Pozwolę sobie w tym miejscu na złożenie podziękowań moim Nauczycielom, którzy wspierali mnie na dotychczasowej drodze naukowej. Aby nikogo nie urazić wymienię Ich w kolejności alfabetycznej.

Dziękuję Panu prof. Vladimírowi Hlavňie z Uniwersytetu w Żilinie, Panu prof. Andrzejowi Niewczasowi z Politechniki Lubelskiej, Panu prof. Stanisławowi Piaseckiemu z Instytutu Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie oraz Panu prof. Stanisławowi Radkowskiemu z Politechniki Warszawskiej.

Składam także podziękowania Rektorom Politechniki Lubelskiej Panu prof. Józefowi Kuczmazewskiemu oraz Panu prof. Markowi Opielakowi a także Panu Dziekanowi Wydziału Mechanicznego prof. Henrykowi Komście za udzieloną mi pomoc organizacyjną w trakcie końcowych prac związanych z pracą habilitacyjną.

Kierownikom Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn, w której pracuję od 1992 roku, pierwszemu Panu prof. Krzysztofowi Wituszyńskiemu oraz obecnemu Panu prof. Józefowi Jonakowi dziękuję zaś za wspieranie mojej działalności naukowej.

Jestem również wdzięczny moim Kolegom dr Krzysztofowi Olejnikowi z Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie, dr Pawłowi Kordosowi, dr Leszkowi Krzywonosowi, mgr Krzysztofowi Toborkowi oraz mgr Piotrowi Pieczywkowi z Politechniki Lubelskiej za udzieloną pomoc w realizowanych przeze mnie badaniach naukowych w ostatnich kilku latach.

Na koniec chciałbym złożyć serdeczne podziękowania mojemu przyjacielowi Panu prof. Štefanowi Liščákowi oraz Jego małżonce za udzielaną mi przez lata wielokrotną pomoc.

Monografię zaś dedykuję mojej najbliższej Rodzinie: Mamie i Tacie oraz moim Dwóm Dziewczynom Córce Paulinie i Żonie Aleksandrze. Dziękuję Wam za wszystko.

***Autor***

## **1. WPROWADZENIE**

### **1.1. Wstęp**

Jednym z najważniejszych stanów funkcjonowania samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym w trakcie jego użytkowania jest rozruch. Podczas rozruchu silnika zachodzi wiele różnorodnych negatywnych zjawisk i procesów, które oddziałują zarówno na silnik, jak i na jego otoczenie. W czasie rozruchu silnika spalinowego z powodu niedostatecznego smarowania, spowodowanego bezwładnością układu olejenia, dużej lepkości oleju smarującego (szczególnie w obniżonych temperaturach) oraz zbyt małej prędkości względnej przemieszczających się elementów, następuje wzrost intensywności zużywania się jego par tribologicznych. Ponadto podczas rozruchu silnika obserwuje się także zbyt słabe rozpylenie i odparowanie pierwszych dawek paliwa, co wywołuje wypadanie samozapłonów oraz niecałkowite i niepełne spalanie bogatej w paliwo mieszanki palnej w cylindrach. Z tego względu można zaobserwować zwiększoną emisję składników toksycznych w spalinach. Znaczne opory ruchu występujące w trakcie rozruchu silnika spalinowego powodują pojawienie się w krótkim czasie dużych wartości natężeń prądu pobieranego przez rozrusznik, co powoduje nagłe przeciążenia w układzie elektrycznym pojazdu. Dodatkowo, odpowiadające im spadki napięcia na zaciskach akumulatora mogą być przyczyną nieprawidłowości w działaniu innych elektrycznych układów pojazdu.

Z podanych powodów rozruch silnika spalinowego niezmiennie stanowi przedmiot dociekań naukowych. Niniejsza monografia prezentuje rezultaty wieloletnich badań autora dotyczących zjawisk towarzyszących procesowi rozruchu samochodowego silnika spalinowego. Jej wynikiem jest kompleksowy model opisu warunków użytkowania pojazdu (nazywany „widmem rozruchu”), służący do analizy porównawczej sposobów organizacji przewozów w systemach transportu samochodowego.

Monografia składa się z wprowadzenia (rozdział 1), pięciu rozdziałów zasadniczych (rozdziały 2–6), wniosków końcowych (rozdział 7) oraz spisu literatury. W rozdziale drugim omówiono zagadnienie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jako procesu przejściowego. W rozdziale trzecim przedstawiono podstawy koncepcji kryterium oceny warunków użytkowania pojazdu wykorzystującego analizę rozruchów jego silnika spalinowego. W rozdziale czwartym omówiono metodykę oraz analizę statystyczną wyników badań przebiegowych pojazdów i ich silników związanych z identyfikacją parametrów „widma rozruchu”. Piąty rozdział monografii przedstawia autorską klasyfikację rozruchów silnika o zapłonie samoczynnym. Rozdział szósty prezentuje wykorzystanie zaproponowanego kryterium oceny warunków użytkowania samochodów w usługach przewozowych. Monografia zakończona jest wnioskami dydaktycznymi, naukowymi i utylitarnymi.

## 1.2. Pojęcia i definicje stosowane w pracy

Zajmując się problematyką związaną z rozruchem samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym, należy podać definicję rozruchu i określić jego rolę podczas działania (funkcjonowania) silnika.

***Rozruch** samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym należy zdefiniować jako proces, w którym poprzez dostarczenie energii z zewnątrz i wymuszenie realizacji procesów roboczych następuje doprowadzenie silnika ze stanu spoczynku do stanu samodzielnego działania.*

O działaniu silnika spalinowego można mówić tylko wtedy, gdy obraca się jego wał korbowy. **Samodzielne działanie** silnika spalinowego występuje wówczas, gdy wytwarza on wewnętrznie (poprzez zamianę w trakcie spalania energii chemicznej zawartej w paliwie) energię mechaniczną, wykorzystywaną do pokonania wszystkich występujących w czasie działania oporów, bez dostarczania z zewnątrz dodatkowej energii [45, 114]. Podczas rozruchu silnika zewnętrzne momenty napędowe pokonują w pierwszej kolejności moment pochodzący od siły tarcia statycznego, a następnie rozruchowy moment oporowy. **Rozruchowy moment oporowy** jest sumą momentu oporów sprężania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach oraz momentu sił tarcia kinematycznego występujących w układach ruchomych podczas rozruchu silnika [57, 69]. W samochodowym silniku spalinowym energia zewnętrzna, potrzebna do rozruchu, najczęściej dostarczana jest przy pomocy rozrusznika



elektrycznego. Oprócz użycia rozrusznika elektrycznego rozruchu silnika możemy dokonać za pomocą energii sprężonego powietrza lub ręcznie, przy wykorzystaniu energii człowieka [80].

Rozruch silnika spalinowego jest stanem nieustalonym oraz, co należy podkreślić, stanem koniecznym do zaistnienia samodzielnego funkcjonowania silnika. Podczas próby rozruchu samochodowego silnika spalinowego może nie nastąpić (z różnych przyczyn) doprowadzenie do stanu samodzielnego funkcjonowania. Jest to przypadek **nieudanego rozruchu**.

Dodatkowo proponuje się rozróżniać rozruch silnika oraz jego uruchamianie. Przez **uruchamianie** silnika spalinowego rozumie się proces napędzania jego wału korbowego przy wykorzystaniu tylko zewnętrznego napędu, przed rozpoczęciem przez silnik samodzielnego funkcjonowania. Uruchamianie jest więc składową procesu rozruchu.

**Procesem startu** samochodowego silnika spalinowego nazywa się proces, który tworzą rozruch oraz poprzedzające go czynności przygotowawcze (np.: włączenie układów podgrzewających silnik przed rozruchem, świec żarowych itd.)

Po zakończeniu rozruchu silnik spalinowy działając już samodzielnie wytwarza niezbędną energię mechaniczną służącą do pokonania jego oporów własnych i oporów ruchu pojazdu oraz umożliwiającą funkcjonowanie innych urządzeń zamontowanych w samochodzie. O tym, w jaki sposób zostanie wykorzystana energia mechaniczna silnika podczas jego użytkowania decyduje podmiot nazywany **użytkownikiem** (operator, kierowca).

**Użytkowanie** pojazdu jest to proces jego wykorzystywania w celu transportowania osób i ładunków. Użytkowanie oraz działania związane z obsługiwaniem tworzą **proces eksploatacji**. **Obsługiwanie** jest to całokształt działań organizacyjno-technicznych mających na celu przygotowanie pojazdu do użytkowania [44, 75, 112, 117].

W trakcie użytkowania samochodu na jego silnik spalinowy oddziałują różne czynniki wymuszające. Czynniki te dzielą się na robocze i zewnętrzne. **Czynniki robocze** wynikają bezpośrednio z działania silnika. Można do nich zaliczyć: skład mieszanki paliwowo-powietrznej, rodzaj oleju smarującego, ciśnienie w cylindrze, temperaturę oleju smarującego itd. **Czynniki zewnętrzne** reprezentują oddziaływanie, jakie wywierają na silnik zespoły pojazdu oraz jego otoczenie (środowisko). Należą do nich: opory ruchu, stan techniczny układu przeniesienia napędu, czynniki atmosferyczne, rodzaj dróg itp. Charakterystyki

zmian wartości czynników zewnętrznych i roboczych tworzą zbiór tzw. **warunków użytkowania** samochodowego silnika spalinowego [101].

W celu identyfikacji warunków użytkowania przeprowadza się **trakcyjne (przebiegowe) badania** pojazdów. W monografii zaproponowano podział badań przebiegowych pojazdów na dwa rodzaje. W pierwszym rodzaju badań nie ingeruje się w żaden sposób w warunki użytkowania pojazdu. O trasach przejazdu danego środka transportu decyduje jego użytkownik. W ich trakcie eksperymentator jest tylko biernym obserwatorem. Badania takie nazwano badaniami w warunkach „**naturalnego**” lub „**długotrwałego**” użytkowania samochodu [15].

Podczas drugiego rodzaju badań przebiegowych, nazywanych badaniami w warunkach „**nadzorowanego**” lub „**kontrolowanego**” użytkowania samochodów, w pewnych okresach czasu, ale po uzgodnieniu z użytkownikiem, określa się warunki przejazdu pojazdów. W pozostałym czasie badane samochody są użytkowane zgodnie z intencjami jego właściciela [15].

Oczywiste jest, że warunki użytkowania samochodu wpływają bezpośrednio i pośrednio na rozruch jego silnika spalinowego. Odzwierciedleniem tego oddziaływania jest tzw. „**widmo rozruchu**” samochodowego silnika spalinowego [21].

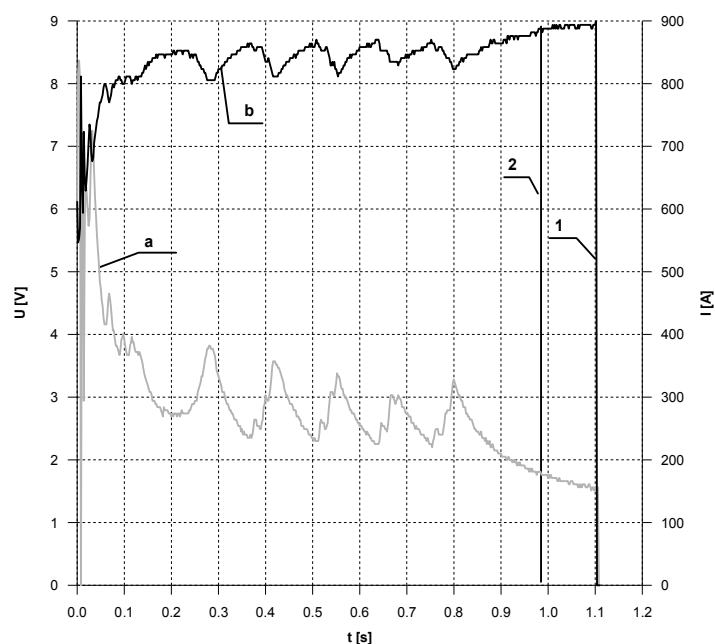
*„**Widmo rozruchu**” samochodowego silnika spalinowego jest to wielowymiarowy wektor losowy  $X$ , którego składowe charakteryzują rozproszenie wartości parametrów rozruchu oraz wskaźniki działania silnika i pojazdu:*

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_m),$$

*gdzie  $m$  jest liczbą wyróżnionych parametrów rozruchu oraz wskaźników działania silnika i pojazdu.*

Wskaźnikami działania silnika i pojazdu charakteryzującymi sposób użytkowania są [38]: **czas działania silnika** spalinowego (wyrażony w minutach), który wyznacza czas od momentu rozpoczęcia rozruchu do chwili zatrzymania się wału korbowego, **czas postoju samochodu** z wyłączonym silnikiem (w minutach), który oznacza czas od chwili zatrzymania się wału korbowego do momentu rozpoczęcia się kolejnego rozruchu silnika spalinowego [29], **droga pojazdu**, wyrażona w kilometrach, przebyta pomiędzy dwoma rozruchami silnika spalinowego, **droga tłoka**, którą definiuje się jako długość drogi (wyrażonej w kilometrach) wykonanej przez pojedynczy tłok pomiędzy rozruchami silnika [23].

Pierwszym wyróżnionym parametrem „widma rozruchu”, związanym z samym rozruchem, jest **czas trwania pracy rozrusznika pod obciążeniem**. Określa się go od chwili włączenia rozrusznika do chwili gdy jego parametry elektryczne (napięcie i natężenie prądu) osiągną wartości odpowiadające działaniu bez obciążenia, co przedstawiono na rysunku 1.1.

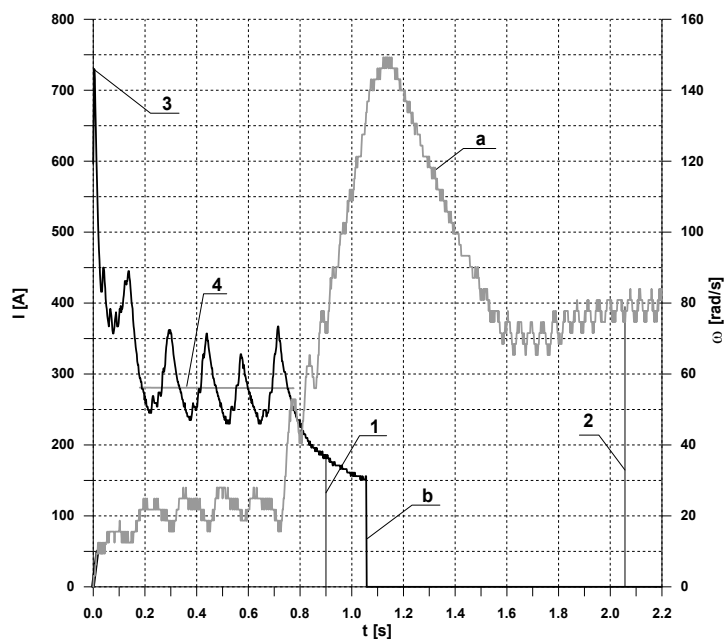


Rys. 1.1. Przebieg natężenia prądu  $I$  pobieranego przez rozrusznik oraz napięcia  $U$  przyłożonego na zaciskach rozrusznika podczas działania rozrusznika przy rozruchu silnika 4CT90; a – natężenie, b – napięcie, 1 – czas przyłożenia napięcia, 2 – czas pracy rozrusznika pod obciążeniem [38]

Następnym wyróżnionym parametrem rozruchu jest **czas przyłożenia napięcia na zaciskach rozrusznika**. Jest to czas w jakim operator pojazdu zwiera jego obwód elektryczny (zob. rys. 1.1).

Należy w tym miejscu zauważyć, że czas trwania pracy rozrusznika pod obciążeniem wg norm [123, 124] jest utożsamiany z czasem rozruchu. W niniejszej rozprawie, ze względu na przyjętą definicję rozruchu, jako **czas rozruchu** należy traktować czas, jaki upłynął od chwili ruszenia wału korbowego do chwili osiągnięcia przez niego ustabilizowanej prędkości kątowej podczas samodzielnego działania silnika [38].

Różnicę pomiędzy czasem pracy rozrusznika pod obciążeniem a rzeczywistym czasem rozruchu silnika ilustruje rysunek 1.2. W omawianym przypadku czas rozruchu silnika jest dłuższy o 1,15 s względem czasu pracy rozrusznika pod obciążeniem.



Rys. 1.2. Przebieg natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik oraz prędkości kątowej  $\omega$  wału korbowego podczas rozruchu silnika 4CT90; a – prędkość kątowa wału korbowego, b – natężenie prądu, 1 – czas pracy rozrusznika pod obciążeniem, 2 – czas rozruchu wg zaproponowanej w rozprawie definicji rozruchu; 3 – maksymalne natężenie prądu pobranego przez rozrusznik na początku rozruchu, 4 – średnie natężenie prądu podczas uruchamiania [38]

Kolejnym parametrem „widma rozruchu” jest **średnie natężenie prądu** podczas uruchamiania silnika, które określa się w trakcie napędzania wału korbowego silnika samym tylko rozrusznikiem (rys. 1.2). Parametr ten nazywany jest w literaturze „**prądem rozruchu**” [80, 93]. Średnie natężenie prądu podczas uruchamiania silnika wykorzystuje się do określenia wartości rozruchowego momentu oporowego silnika spalinowego.

Wyróżnia się także **maksymalne natężenie prądu** pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu, które występuje w chwili ruszania wału korbowego silnika (rys. 1.2) [31, 32]. Parametr ten charakteryzuje opory pochodzące od sił tarcia spoczynkowego, które występują w zespołach ruchomych silnika.

Najważniejszymi parametrami „widma rozruchu” są temperatura silnika i oleju smarującego w chwili rozruchu. W trakcie funkcjonowania samochodowego silnika spalinowego z chłodzeniem pośrednim jako **temperaturę silnika** przyjmuje się umownie wartość temperatury cieczy chłodzącej na wyjściu z bloku. **Temperaturę oleju smarującego** określa się na podstawie pomiaru jej wartości w misce olejowej silnika spalinowego.

W miarę spadku wartości wymienionych temperatur obserwuje się pogorszenie energetycznych własności **układu rozruchowego silnika** (akumulator i rozrusznik). Wzrasta rozruchowy moment oporowy oraz czas rozruchu silnika, co wywołuje zwiększone zużycie jego zespołów. Spadek wartości temperatur powoduje pogorszenie także warunków tworzenia i spalania się paliwa. Prowadzi to do wzrostu emisji szkodliwych składników w spalinach.

Ze względu na wartość temperatury silnika w chwili rozruchu proponuje się wyróżnić rozruch zimny lub gorący silnika spalinowego [36]. Rozruch silnika o zapłonie samoczynnym nazywamy **gorącym** wtedy, gdy przed przyłożeniem napięcia na zaciski rozrusznika nie występuje konieczność użycia urządzenia ułatwiającego rozruch (świeca żarowa, płomieniowa itd.). Najczęściej temperatura silnika wynosi wtedy powyżej 60 °C. W przeciwnym przypadku występuje **zimny** rozruch silnika. O wykorzystaniu urządzenia wspomagającego rozruch silników o zapłonie samoczynnym decyduje subiektywnie operator pojazdu lub automatycznie układ sterujący wtryskiem paliwa (dotyczy to nowoczesnych silników). W silnikach o zapłonie iskrowym rozruch gorący wymaga wytworzenia przez układ sterowania zasilaniem nieznacznie tylko wzbogaconej mieszanki paliwowo-powietrznej. O wielkości współczynnika nadmiaru powietrza w chwili rozruchu decyduje elektroniczny układ sterowania silnika o zapłonie iskrowym.

W grupie rozruchów gorących wyróżnia się tzw. **restart silnika**. Jest to rozruch silnika odbywający się po krótkotrwałej przerwie w jego działaniu. Podczas restartu silnika nie występuje wzbogacenie mieszanki paliwowo-powietrznej. Długość przerwy w działaniu silnika, po której zachodzi restart zależy od zastosowanego algorytmów sterujących zasilaniem w paliwo.

W grupie zimnych rozruchów można wyodrębnić: rozruchy przy umownej temperaturze silnika mniejszej niż 0 °C, rozruchy przy umownej temperaturze silnika zawierającej się w granicach (0 ÷ 20) °C oraz rozruchy przy umownej temperaturze silnika zawierającej się w granicach (20 ÷ 60) °C. Rozruchy przy umownej temperaturze silnika mniejszej niż 0 °C, występują przy długich

czasach postoju – przeważnie w okresie zimowym. Rozruchy przy umownej temperaturze silnika zawierającej się w granicach  $(0 \div 20) ^\circ\text{C}$ , są także wynikiem długich postojów pojazdu [36].

W literaturze rozróżnia się także graniczną temperaturę rozruchu oraz temperaturę natychmiastowego rozruchu silnika. **Graniczna temperatura rozruchu** jest to najniższa temperatura otoczenia, przy której (zgodnie ze stałymi warunkami badań stanowiskowych) można doprowadzić ustabilizowany termicznie silnik do stanu samodzielnego działania. **Temperatura rozruchu natychmiastowego** określona jest przez temperaturę silnika, przy której doprowadzony jest on do samodzielnego funkcjonowania na biegu jałowym w czasie krótszym niż 3 s od chwili przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika [123, 124].

Podczas użytkowania samochodu, można także wyróżnić tzw. **pierwszy dzienny rozruch** silnika spalinowego. Występuje on po trwającym minimum 8 h postoju pojazdu na otwartej przestrzeni lub w pomieszczeniu garażowym. Temperatura pierwszego dziennego rozruchu silnika spalinowego jest równa temperaturze powietrza otaczającego pojazd [26]. Parametrem rozruchu związanym ze stanem termicznym silnika jest **prędkość kątowna rozruchu**. Jest to taka prędkość kątowna wału korbowego podczas rozruchu silnika, przy której występują warunki do wytworzenia właściwej mieszanki paliwowo-powietrznej, a następnie do jej spalenia w cylindrach. Wartość prędkości kątowej rozruchu uzależniona jest od temperatury rozruchu silnika i wzrasta w miarę jej spadku [92, 94].

## **2. ROZRUCH JAKO POCZĄTEK DZIAŁANIA SAMOCHODOWEGO SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM**

### **2.1. Tworzenie i spalanie mieszanki palnej w czasie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym**

W trakcie rozruchu silnika spalinowego dochodzi do zapoczątkowania tworzenia paliwowo-powietrznej mieszanki palnej oraz zainicjowania jej spalania w poszczególnych cylindrach silnika. W silnikach o zapłonie samoczynnym wymaga to stworzenia w komorze spalania takich warunków cieplnych, dla których temperatura sprężanego powietrza podczas suwu sprężania byłaby wyższa od efektywnej temperatury samozapłonu wtryskiwanego paliwa. Najczęściej stosowanym sposobem tworzenia mieszanki palnej w silnikach o zapłonie samoczynnym jest wtrysk paliwa pod wysokim ciśnieniem do sprężonego w cylindrze lub komorze wstępnej powietrza. Podczas rozruchu silnika odbywa się to przy niewielkich prędkościach kątowych wału korbowego (rzędu  $60\div 200$  obr/min), co wpływa negatywnie na proces rozpylania strugi paliwa oraz jego wymieszanie z powietrzem [49].

Z tych powodów podczas uruchamiania silnika o zapłonie samoczynnym zwiększa się dawkę podawanego paliwa. Dzięki temu uzyskuje się bezwzględny wzrost udziału mniejszych kropeł w strudze paliwa wtryskiwanego do sprężanego ładunku powietrza w cylindrze silnika. Ułatwia to jego odparowanie i uzyskanie przez mieszankę paliwowo-powietrzną składu umożliwiającego jej samozapłon. Dodatkowo paliwo osiadające na ściankach tulei cylindrowej uszczelnia komorę spalania, co zmniejsza straty ciepła wskutek ucieczki masy ładunku i polepsza warunki termodynamiczne uzyskania jej samozapłonu. Stwierdzono jednak, że nie należy nadmiernie zwiększać dawki rozruchowej. Wzrost jej wartości powoduje wydłużenie czasu wtrysku, co przyczynia się do zintensyfikowania wymiany ciepła pomiędzy paliwem a powietrzem. W wyniku

tego obniża się temperatura mieszaniny palnej w komorze spalania, co pogarsza właściwości rozruchowe silnika. Istnieje więc wartość optymalna dawki rozruchowej paliwa, dla której czas rozruchu silnika osiąga wartość minimalną. Pamiętać należy, że zwiększona dawka paliwa prowadzi także do wzrostu emisji składników toksycznych w spalinach podczas rozruchu silnika [10, 73].

Utrudnienia podczas procesu rozpylenia strugi paliwa w cylindrze wynikają również z cykliczności pracy silnika oraz związaną z nią okresowością wtrysku paliwa, zmian prędkości tłoczenia przez pompę wtryskową, zakłóceń wywołanych ściśliwością paliwa, zjawisk falowych występujących w przewodach wtryskowych oraz drgań iglicy wtryskiwacza powodujących wahania ciśnienia przed otworem wylotowym a tym samym wahania prędkości wypływu strugi paliwa [63, 64].

Oprócz utrudnień procesu rozpylania paliwa w czasie uruchamiania silnika o zapłonie samoczynnym, podczas suwu sprężania występują straty ciepłe wynikłe z przejmowania ciepła przez ścianki komory spalania oraz z ucieczki ładunku w cylindrach. Natężenie wymiany ciepła pomiędzy ścianami komory sprężania a ładunkiem sprężanego powietrza wzrasta w miarę przyrostu ciśnienia w cylindrze. Czas tej wymiany nie może być dowolnie długi, gdyż jego wzrost powoduje nadmierny spadek temperatury ładunku na końcu suwu sprężania.

Straty ciepła będące wynikiem przedostawania się ładunku przez uszczelnienie pierścieniowe (tzw. przedmuchy do skrzyni korbowej) zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (zwanego dalej zespołem TPC) w zakresie od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  nie zależą praktycznie od temperatury i są około czterokrotnie większe niż straty wynikłe z przejmowania ciepła przez ściany komory sprężania. Zwiększenie strat sprężanego ładunku pociąga za sobą spadek wartości ciśnienia i temperatury w końcu suwu sprężania [1, 46].

Zjawiska związane z występowaniem strat ciepła są szczególnie widoczne podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w niskich temperaturach powietrza. Mogą one spowodować, że sprężany ładunek powietrza w komorze spalania w końcu suwu sprężania nie uzyska stanu termodynamicznego (zbyt niskie wartości ciśnienia i temperatury) umożliwiającego zaistnienie samozapłonu wtryskiwanego do niego paliwa [80, 93].

Podczas trwania rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym występuje także inny przebieg procesu spalania mieszanki niż podczas jego samodzielnego działania. W trakcie rozruchu silnika, ze względu na długi okres opóźnienia



zaistnienia samozapłonu i znaczną dawkę rozruchową, do komory spalania dostaje się więcej paliwa. Przyczynia się to do tego, że w wybuchowym (kinetycznym) okresie spalania występuje znaczący przyrost ciśnienia w cylindrze, zaś jego wartość maksymalna przekracza wartości maksymalne występujące podczas działania silnika. W tej fazie spalania w warstwie płomienia uboższego w paliwo obserwuje się powstanie węglowodorów, a w strefie popłomiennej tlenków azotu [49, 63].

Z powodu gwałtownego i „długiego” czasu trwania okresu spalania kinetycznego kolejne fazy spalania (spalanie dyfuzyjne i dopalanie) są minimalnie krótkie. Ten krótki czas ostatniej fazy spalania powoduje słabe dopalanie się węglowodorów, tlenku węgla oraz sadzy powstałej w fazie spalania dyfuzyjnego w strefach bogatych w paliwo. Dodatkowo, ze względu na niską temperaturę powierzchni ścianek komory spalania oraz znaczne luzy w zespole TPC, występuje intensywne oddawanie ciepła przez mieszkankę palną i lokalne wygaszanie płomienia. Powoduje to niezupełne i niecałkowite spalanie paliwa podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [49, 63, 110].

W silniku o zapłonie samoczynnym podczas jego rozruchu, szczególnie w ujemnych temperaturach otoczenia, można obserwować cykliczne wypadanie zapłonów w cylindrze (cylindrach). Zjawisko to nazwano „pracą w ośmiotakcie lub dwunastotakcie”. Występowanie tego zjawiska wynika z wpływu jaki wywiera podczas rozruchu silnika paliwo osiadające na ściankach komory spalania. Paliwo to dodatkowo uszczelnia komorę spalania, co zmniejsza straty ładunku i ułatwia zaistnienie samozapłonu w znajdującej się w cylindrze mieszance palnej. Jednakże w wyniku zaistniałego spalania następuje wypalenie osiadłego na ściance paliwa, co w kolejnym cyklu pracy silnika zmniejsza uszczelnienie komory spalania. Spaliny pozostające w znacznej ilości w cylindrze (słabe przepłukanie z powodu małej prędkości kątowej wału korbowego) dodatkowo znacznie ograniczają współczynnik jego napełnienia świeżym ładunkiem powietrza. Powoduje to niewystąpienie w kolejnym cyklu pracy samozapłonu wtryskiwanego paliwa podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [93].

Początkowy całkowity brak zapłonów bogatej mieszanki palnej w cylindrach, a następnie ich cykliczne wypadanie wraz z niekorzystnym przebiegiem jej spalania podczas rozruchu silnika, szczególnie w niskich temperaturach, powoduje występowanie kilkakrotnie większej emisji składników toksycznych

spalin (węglowodory, tlenek węgla, tlenki azotu, aldehydy) niż w warunkach normalnego działania silnika. W wyniku znacznych luzów w zespole TPC do komory spalania dostaje się także olej smarujący, który jest spalany oraz bierze udział wraz z niespalonymi węglowodorami i sadzą w tworzeniu znacznej ilości cząstek stałych [6, 54, 60, 71, 76, 89, 111].

Widocznym efektem emisji cząstek stałych podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jest zadymienie spalin, które objawia się w postaci „niebieskiego” lub „czarnego” dymu. Występowanie „niebieskiego” dymu obserwuje się podczas rozruchu zimnego silnika o zapłonie samoczynnym. Jest on wynikiem wymieszania się skroplonej pary wodnej oraz odparowanego, ale niespalonego paliwa. „Czarny” dym powstaje podczas ciepłych rozruchów w wyniku spalania znacznej dawki rozruchowej [77, 115, 120]. Dopiero po upływie czasu rzędu 3 minut (odpowiada to w warunkach użytkowania pojazdu drodze około 3 kilometrów) obserwuje się występowanie spadku emisji związków szkodliwych [39, 102]. W celu ograniczenia tej emisji stosuje się różnorodne metody i środki [78, 113, 119]. Zaliczyć możemy do nich: katalizatory Oxicat (utleniające HC, CO i aldehydy) katalizatory Denox (redukujące  $\text{NO}_x$  wraz z utlenianiem CO i HC), katalizatory czterofunkcyjne (łącznie w sobie funkcje dwóch wcześniej wymienionych) oraz filtry cząstek stałych. Jednak ich skuteczność podczas rozruchu w niskich temperaturach jest niezadowalająca.

Najważniejszymi czynnikami decydującymi o parametrach związanych z działaniem rozrusznika, czasie trwania rozruchu i rozruchowej prędkości kątowej silnika o zapłonie samoczynnym są temperatura silnika oraz temperatura oleju w chwili rozruchu. Obniżenie wartości tych temperatur wywołuje spadek wartości prędkości kątowej wału korbowego, pogorszenie rozpylenia paliwa, zwiększa straty ciepłe itd. Utrudnia to uzyskanie samozapłonu mieszanki palnej. Wraz ze wzrostem wartości prędkości kątowej rozruchu maleje czas trwania pobierania ciepła oraz zmniejszają się przedmuchy do skrzyni korbowej. Następuje także poprawa przebiegu wtrysku, skraca się jego czas trwania oraz zwiększa się jakość rozpylenia paliwa. Są to zjawiska pozytywne, które ułatwiają tworzenie i spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [93, 109].

Innymi czynnikami decydującymi o działaniu rozrusznika, czasie trwania rozruchu oraz kątowej prędkości rozruchowej są: liczba cylindrów, rodzaj i kształt komory spalania, stopień sprężania, fazy rozrządu, doładowanie silnika,

położenie między zębniakiem rozrusznika a kołem zamachowym, parametry układu wtryskowego czy właściwości fizyczne paliw [80, 93].

Rodzaj i kształt komory spalania decyduje o jakości rozpylenia paliwa. Silniki o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim mają lepsze właściwości rozruchowe od silników z wtryskiem do komory wstępnej. Zwiększenie powierzchni ścian komory spalania powoduje bowiem wzrost strat przejmowania ciepła od sprężanego ładunku powietrza, co obniża temperaturę końca suwu sprężania. Występujące dodatkowo straty dławienia przepływu gazów z komory wstępnej zmniejszają uzyskiwaną wartość maksymalnego ciśnienia sprężanego ładunku utrudniając zaistnienie samozapłonu paliwa [80, 93].

Na wartości parametrów działania rozrusznika, czasu trwania rozruchu oraz rozruchowej prędkości kątowej silnika o zapłonie samoczynnym mają wpływ fazy układu rozrządu, a szczególnie kąt otwarcia i zamknięcia zaworu dolotowego. Zbyt późne zamknięcie zaworu dolotowego po zwrocie korbowym podczas uruchamiania silnika powoduje, że tłok przemieszczający się w położeniu zwrotnym zewnętrznym wypycha część ładunku z komory spalania i następuje spadek rzeczywistego stopnia sprężania. Opóźnienie kąta otwarcia zaworu dolotowego wpływa na podwyższenie temperatury ładunku w końcu suwu sprężania. Także stopień sprężania ładunku ma wpływ na parametry temperatury i ciśnienia w końcu suwu sprężania. Zbyt niski stopień sprężania może spowodować niedostateczny przyrost temperatury i ciśnienia [80, 93].

O wartościach parametrów działania rozrusznika oraz czasu trwania rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym decydują także: kąt wyprzedzenia wtrysku, przebieg i ciśnienie wtrysku oraz konstrukcja wtryskiwacza. Ze względu na niskie wartości temperatury sprężanego ładunku powietrza podczas rozruchu wydłuża się czas trwania reakcji fizycznych i chemicznych poprzedzających zimne płomienie (czyli czas opóźnienia samozapłonu). Z tego powodu należy podczas rozruchu silnika zwiększyć kąt wyprzedzenia wtrysku. Wykazano, że podczas uruchamiania silnika w ujemnych temperaturach istnieje optymalna wartość kąta wyprzedzenia wtrysku, przy której czas wystąpienia pierwszego zapłonu mieszanki palnej osiąga wartość minimalną [80, 93].

Zastosowanie wtrysku wielofazowego – najpierw dawka pilotażowa (przedwtrysk), a następnie wtrysk dawki głównej i dotrysk dodatkowy – ułatwia rozruch silnika o zapłonie samoczynnym. Wtrysk niewielkiej dawki pilotażowej wywołuje bowiem w ładunku powietrza wstępne reakcje fizyczne i chemiczne.

W wyniku tego uzyskuje się skrócenie czasu opóźnienia samozapłonu głównej dawki paliwa, co ułatwia rozruch silnika.

Konstrukcja zastosowanych wtryskiwaczy wpływa na czas trwania rozruchu o zapłonie samoczynnym. Wzrost liczby otworów oraz zmniejszenie ich średnicy powodują szybszy rozpad strumienia wtryskiwanego paliwa, co ułatwia jego parowanie i jego samozapłon. Zwiększenie ciśnienia wtrysku ułatwia rozruch silnika. Zwiększona energia kinetyczna wtryskiwanego paliwa zamieniona jest w wyniku jego gwałtownego hamowania w dużą ilość ciepła. Poprawia to proces odparowania paliwa i inicjowania jego samozapłonu. W ostatnich latach można zauważyć więc tendencję do powiększania ciśnienia wtrysku, nawet do wartości 160 MPa, przy jednoczesnym zmniejszeniu średnicy otworków rozpylaczy [80, 109].

Rodzaj i własności fizyczne stosowanych paliw wpływają także na czas trwania rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym. Od oleju napędowego wymaga się dużej wartości liczby cetanowej oraz aby posiadał on niską wartość lepkości i napięcia powierzchniowego [58, 127]. Kolejnym parametrem oleju napędowego jest wartość tzw. temperatury oddestylowania 10% oleju napędowego. Im jest ona mniejsza tym olej ma większą lotność i szybciej odparowuje. Innymi parametrami fizycznymi oleju napędowego, które mają wpływ na właściwości rozruchowe silnika, są temperatura mętnienia oraz temperatura zablokowania zimnego filtra (CFPP). Temperatura mętnienia jest to najwyższa temperatura, w której badany olej napędowy ochładzany według określonej procedury mętnieje wskutek wydzielania się drobnych kryształów odrębnej fazy. 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 [125].

Stosowanie paliw alternatywnych [2, 5, 13, 55, 59, 89, 105] takich jak: olej rzepakowy, estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (FAME) oraz ich mieszaniny z olejem napędowym, przyczyniają się do zmiany właściwości rozruchowych silników o zapłonie samoczynnym. Wynika to ze struktury chemicznej oleju rzepakowego, w której występują podwójne wiązania olefinowe charakteryzujące się dużą aktywnością chemiczną. Olej rzepakowy zawiera również w swoim składzie tlen, co dodatkowo jest korzystne z punktu widzenia mechanizmów spalania. Olej rzepakowy oraz FAME posiadają także

większą lepkość oraz gęstość w porównaniu z olejem napędowym. Zmniejsza to przecieki oraz zwiększa uszczelnienie współpracujących elementów zespołu tłoczącego i rozpylacza. Powoduje to wzrost dawki rozruchowej w trakcie uruchamiania silnika o zapłonie samoczynnym oraz korzystniejszą niejednorodność średnicy kropeł wtryskiwanego paliwa. Ułatwia to rozruch silnika, ale tylko w dodatnich temperaturach. W niskich temperaturach, ze względu na wzrost oporów przepływu paliwa w filtrze i pompie wtryskowej spowodowany wzrostem lepkości oraz krystalizację związków organicznych oleju rzepakowego i FAME, obserwuje się niekorzystny wzrost wartości granicznej temperatury rozruchu. Dla oleju rzepakowego wynosi ona tylko 6 °C. Dla FAME wartość granicznej temperatury rozruchu spada, ale nieznacznie i wynosi -3 °C [105].

W celu poprawy właściwości rozruchowych silnika o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami alternatywnymi stosuje się mieszaniny FAME z olejem napędowym. Zwiększenie zawartości oleju napędowego w mieszaninie z FAME powoduje uzyskanie niższej wartości granicznej temperatury rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym. Dodatkową poprawę właściwości rozruchowych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami rzepakowymi uzyskuje się poprzez wprowadzenie modyfikatorów procesów krystalizacji węglowodorów, czy też jego wstępne podgrzanie [105].

Aby ułatwić rozruch silników o zapłonie samoczynnym w niskich temperaturach stosuje się, między innymi, świece płomieniowe i nagrzewnice elektryczne podgrzewające ładunek powietrza. Stosuje się także płyny rozruchowe, pogrzewacze rozruchowe silnika, niezależne układy ogrzewania strefowego i urządzenia wykorzystujące zgromadzone ciepło z poprzedniego cyklu działania silnika. Rozruch silnika wspomaga się także energią sprężonego powietrza, czy innymi specjalnymi silnikami hydrostatycznymi [80].

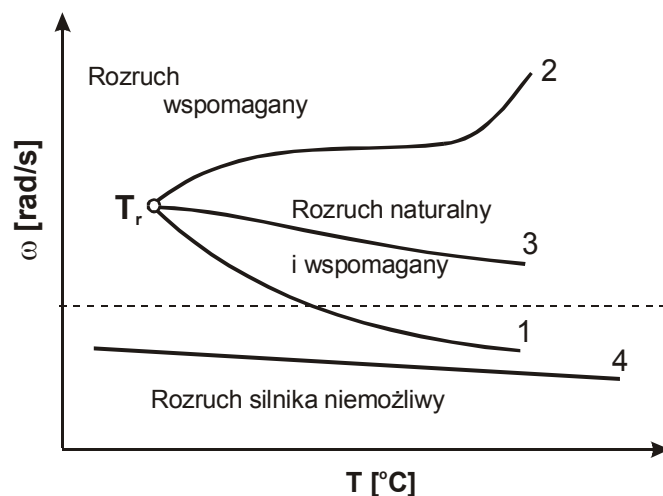
## **2.2. Rozruch silnika spalinowego przy pomocy rozrusznika elektrycznego**

We współczesnych samochodowych silnikach spalinowych niezbędną energię mechaniczną potrzebną do zainicjowania ich samodzielnego działania przekazuje się najczęściej poprzez napędzanie wału korbowego za pomocą rozrusznika elektrycznego zasilanego z akumulatora. Zadaniem rozrusznika jest wprowadzenie w ruch zespołów silnika, pokonanie rozruchowego momentu

oporowego i momentu sił bezwładności mas wirujących oraz nadanie wałowi korbowemu wymaganej prędkości kątowej rozruchu [93, 95].

Współczesne rozruszniki składają się z silnika prądu stałego, mechanizmu sprzęgającego oraz zębniaka. Rozruszniki o mniejszej mocy są włączane jednostopniowo, zaś o większej dwustopniowo. Dzięki zastosowaniu włączania dwustopniowego uzyskuje się korzystniejszy przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Ze względu na występujące podczas rozruchu silnika zmiany wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, stosuje się w nich szeregowo lub szeregowo-bocznikowe silniki prądu stałego. Silniki szeregowo charakteryzują się dużym momentem rozruchowym. Silniki szeregowo-bocznikowe prądu stałego ze względu na zastosowanie w nich dodatkowego uzwojenia bocznikowego mogą pracować przy małych obciążeniach występujących na ich biegu jałowym. Uzwojenie to pozwala na znaczne zmniejszenie wartości prędkości kątowej wirnika, a tym samym zwiększenie trwałości rozrusznika. Kiedy podczas uruchamiania silnika spalinowego prędkość kątowa wału korbowego osiągnie określoną wartość następuje, poprzez sprzęgło jednokierunkowe, odłączenie rozrusznika elektrycznego. Zabezpiecza to rozrusznik przed uzyskaniem znacznych prędkości obrotowych rzędu 30000 obr/min, a tym samym przed zniszczeniem.

W typowych warunkach użytkowania silniki o zapłonie samoczynnym charakteryzują się rozruchową prędkością kątową w zakresie  $6 \div 21$  rad/s ( $60 \div 200$  obr/min). Na jej wartość wpływa wiele czynników: przede wszystkim temperatura silnika i zależne od niej opory ruchu, parametry rozrusznika, stan źródła zasilania prądem elektrycznym, przełożenie między zębniakiem rozrusznika a kołem zamachowym silnika. Ze względu na czas trwania rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w temperaturach poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  można rozróżnić cztery prędkości kątowe rozruchu: „minimalną”, „optymalną”, „maksymalną” oraz „graniczną”, które zależą od temperatury rozruchu silnika [92, 94]. Przykładowy przebieg zmian wartości wymienionych prędkości kątowych rozruchu zilustrowano na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Prędkości kątowe  $\omega$  rozruchu silnika spalinowego w ujemnych temperaturach  $T$  rozruchu;  
 1 – „minimalna”, 2 – „maksymalna”, 3 – „optymalna”, 4 – „graniczna”,  $T_r$  – potrójny punkt rozruchowy silnika [92]

„Minimalna” prędkość kątowa rozruchu jest to taka wartość prędkości kątowej wału korbowego (podczas rozruchu bez wspomagania, czyli np.: stosowania podgrzewania silnika przed rozruchem, włączenia świec żarowych) poniżej której występujące straty ciepłe wynikłe z przejmowania ciepła przez ścianki komory spalania oraz z ucieczki ładunku w cylindrach spowodują, że sprężany ładunek powietrza w końcu suwu sprężania nie uzyska stanu termodynamicznego umożliwiającego zaistnienie samozapłonu paliwa [93].

Zaistnienie samozapłonu wtryskiwanego paliwa, przy obniżaniu się początkowej temperatury rozruchu silnika, wymaga coraz większego przyrostu wartości ciśnienia i temperatury ładunku powietrza w końcu suwu sprężania. Występuje więc wzrost „minimalnej” wartości prędkości kątowej rozruchu w miarę spadku temperatury rozruchu silnika (rys. 2.1).

Zwiększenie się wartości prędkości kątowej wału korbowego podczas uruchamiania silnika o zapłonie samoczynnym (w ustalonej temperaturze rozruchu) powyżej „minimalnej” prędkości kątowej rozruchu oddziałuje pozytywnie na procesy przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej oraz jej samozapłonu. Wynikiem tego jest skrócenie czasu trwania rozruchu. Zaobserwowano, że nie można dowolnie zwiększać wartości prędkości kątowej rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym bez użycia środków i urządzeń

wspomagających w ujemnych temperaturach. Obserwuje się występowanie „optymalnej” prędkości kątowej rozruchu dla której czas rozruchu osiąga wartość minimalną oraz „maksymalnej” prędkości kątowej rozruchu. Powyżej „maksymalnej” prędkości kątowej rozruchu, ze względu na zbyt krótki czas procesu odparowywania paliwa, nie możliwe jest zaistnienie zapłonu mieszanki palnej. Prowadzi to do nieudanego rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [93].

Stwierdzono istnienie tzw. punktu potrójnego rozruchu (rys. 2.1), w którym kątowe prędkości rozruchowe: „minimalna”, „maksymalna” i „optymalna” są równe. Punkt ten wyznacza najniższą z możliwych temperaturę, w której nastąpi udany rozruch silnika bez użycia środków wspomagających. Dla rozruchów silników o zapłonie samoczynnym z zastosowaniem środków wspomagających istnieje wartość „graniczna” prędkości kątowej rozruchu, poniżej której nigdy nie nastąpi udany rozruch [92, 94].

Rozpoczęcie rozruchu silnika spalinowego zaczyna się w chwili, kiedy operator zewrze obwód elektryczny układu rozruchowego pojazdu. Następuje wtedy poprzez mechanizm sprzęgający zazębienie zębника rozrusznika z uzębionym wieńcem koła zamachowego wału korbowego silnika. W następstwie tego sprzęgnięcia wał korbowy zaczyna się obracać. To przejście ze stanu spoczynku do stanu ruchu elementów i zespołów silnika podczas jego uruchamiania wymaga pokonania znacznego momentu oporu sił tarcia statycznego. Miarą tego momentu oporu jest, jak wiadomo, wartość maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu (zob. rys. 1.2). Należy stwierdzić, że wartość maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu nie zależy od temperatury silnika czy temperatury oleju smarującego [58].

Po ruszeniu z miejsca zespołów silnika spalinowego występujący następnie rozruchowy moment oporowy spada i posiada mniejszą wartość. Charakteryzuje się też dużą zmiennością wynikającą z kinematyki ruchu posuwisto-zwrotnego tłoków oraz zmieniającego się podczas sprężania i rozprężania ładunku ciśnienia w cylindrach. Należy podkreślić, że rozruchowy moment oporowy silnika spalinowego podczas jego uruchamiania (w przeciwieństwie do momentów oporów tarcia statycznego) zależy w głównej mierze od temperatury i wzrasta w miarę jej spadku. Odzwierciedleniem tego jest wzrost wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas uruchamiania silnika w miarę spadku temperatury rozruchu [38].



### 2.3. Procesy tarcia i zużycia podczas rozruchu silnika spalinowego

Wprawienie w ruch elementów silnika spalinowego podczas jego rozruchu wymaga pokonania przez zewnętrzne siły napędowe sił tarcia statycznego. Siły te przeciwdziałają przemieszczaniu się powierzchni elementów znajdujących się względem siebie w spoczynku. Po przyłożeniu zewnętrznych sił napędowych następuje wstępne przesunięcie (mikropoślizg) w obrębie styku elementów, czemu towarzyszy sprężysto-plastyczne odkształcenie ich warstw wierzchnich. Ruch względny elementów silnika występuje dopiero po osiągnięciu odpowiedniej, zależnej od wielu czynników, wartości przez zewnętrzne siły napędowe [38].

Wykazano, że największa wartość momentu oporów (obliczanego względem osi obrotu wału korbowego silnika) pochodzących od sił tarcia spoczynkowego występuje, gdy ramię wału korbowego oraz korbowód tworzą w przybliżeniu kąt prosty [69]. Wartość momentu oporów sił tarcia statycznego zależy od wartości współczynnika tarcia spoczynkowego, natomiast nie zależy od temperatury rozruchu silnika, przy czym wartość współczynnika tarcia spoczynkowego wzrasta w miarę trwania postoju samochodu z wyłączonym silnikiem. Wynika to z zaniku warstwy granicznej oleju smarującego silnika oraz wzrostu liczby stykowych mikropołączeń adhezyjnych występujących pomiędzy warstwami wierzchnimi powierzchni jego elementów [67].

Po przejściu ze stanu spoczynku do ruchu elementów i zespołów silnika spalinowego obserwuje się, że wartość rozruchowego momentu oporowego znacznie spada względem momentu oporów sił tarcia statycznego. Wzrost wartości prędkości kątowej wału korbowego silnika powoduje zmniejszenie się wartości rozruchowego momentu oporowego. W trakcie „ustabilizowanej” fazy uruchamiania silnika, występującej przy stałej średniej prędkości kątowej jego wału korbowego, wartość rozruchowego momentu oporowego jest mniejsza  $2 \div 2,5$ -krotnie w stosunku do wartości maksymalnej występującej na samym początku ruchu [47]. Ze względu na kinematykę ruchu posuwisto-zwrotnego tłoków oraz zmieniającego się podczas sprężania i rozprężania ładunku ciśnienia w cylindrach, oporowy moment rozruchowy silnika spalinowego podlega wahaniom. Jego lokalne maksima występują w zwrotnych położeniach tłoków [38, 57, 121].

Rozruchowy moment oporowy podczas uruchamiania silnika spalinowego jest w głównej mierze wynikiem momentu sił tarcia kinematycznego (stanowiącego 70-90% całkowitej wartości momentu oporowego) pojawiającego się w podstawowych węzłach tribologicznych silnika takich jak: zespół TPC, łożyska główne i korbowe wału korbowego oraz układ rozrządu.

Moment oporu pochodzący od napędu osprzętu oraz sprężania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach silnika stanowi pozostałą część rozruchowego momentu oporowego, przy czym w miarę wzrostu stopnia sprężania silnika wzrasta moment oporów pochodzący od sprężania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach [47, 57].

Wiadomo, że od 50% do 70% wartości wszystkich momentów sił tarcia kinematycznego w silniku wynika z procesów tarcia zachodzących w zespole TPC [81, 83, 90, 98], przy czym wraz ze spadkiem temperatury rozruchu silnika (z powodu wzrostu lepkości oleju silnikowego) rośnie udział procentowy momentu sił tarcia kinematycznego występującego w łożyskach ślizgowych. Wartość momentu sił tarcia kinematycznego występującego podczas rozruchu silnika spalinowego zależy od czynników związanych z konstrukcją, technologią wykonania i montażem zespołu TPC, ale przede wszystkim od temperatury oleju silnikowego w chwili jego rozruchu.

W miarę spadku temperatury wartość lepkości oleju silnikowego wzrasta, co przyczynia się do przyrostu wartości momentu sił tarcia kinematycznego [8, 100]. Przyrost ten następuje szybciej niż wzrost oporów sprężania wywołanych sprężaniem ładunku o większej masie (wzrost gęstości powietrza w miarę obniżania się temperatury). Obserwuje się więc wzrost udziału względnego momentu sił tarcia kinematycznego we wzrastającym w miarę spadku temperatury całkowitym rozruchowym momencie oporowym silnika [57]. Zastosowanie oleju syntetycznego, posiadającego lepszą charakterystykę lepkościową w niższych temperaturach niż olej mineralny, zmniejsza siłę tarcia występującego pomiędzy pierścieniami tłokowymi a tłokiem podczas rozruchu silnika.

Ze względu na brak dostatecznej ilości oleju silnikowego oraz zbyt małą prędkość względną przemieszczających się powierzchni par tribologicznych na początku rozruchu można zaobserwować występowanie tzw. tarcia granicznego. Brak dostatecznej ilości oleju silnikowego wynika z bezwładności układu olejowania silnika oraz wpływu temperatury na lepkość oleju silnikowego [8, 52, 100]. W miarę spadku wartości temperatury rośnie wartość lepkości oleju oraz

następuje wytrącanie się osadu w misce olejowej silnika (efekt oddziaływania wody zawartej w oleju), który zatyka przewody olejowe silnika. Zwiększa to opory przepływu, co wydłuża czas dotarcia oleju do górnej części cylindrów. Woda zgromadzona w misce olejowej wywołuje także koagulację i hydrolizę zawartych w oleju smarującym inhibitorów pogarszając jego właściwości smarne.

Podczas przerw w działaniu silnika spalinowego występuje także zanik warstewki granicznej oleju silnikowego na powierzchniach elementów par kinematycznych. Jej zanik w połączeniu z brakiem dostatecznej ilości oleju smarującego może być przyczyną wystąpienia tarcia suchego w początkowej fazie rozruchu, a tym samym wzrostu rozruchowego momentu oporowego silnika [69].

Podczas trwania rozruchu, w miarę dopływu oleju silnikowego do węzłów tribologicznych silnika spalinowego, tarcie graniczne przechodzi w tarcie mieszane, co powoduje spadek wartości rozruchowego momentu oporowego [97]. Dogodne warunki do wystąpienia tarcia płynnego pomiędzy przemieszczającymi się powierzchniami par kinematycznych występują w chwili osiągnięcia przez nie dostatecznej prędkości względnej oraz odpowiedniej ilości oleju smarującego. Ze względu na smarowanie pod ciśnieniem łożysk ślizgowych wału korbowego tarcie płynne pojawia się w nich znacznie szybciej niż w zespole TPC, który jest smarowany rozbryzgowo. Wiadomo także, że podczas samodzielnego działania silnika spalinowego w punktach zwrotnych tłoka, przy zerowej prędkości względnej przemieszczania się elementów zespołu TPC, może wystąpić tylko tarcie mieszane [84, 85].

Przejście z tarcia granicznego (w skrajnych przypadkach z tarcia suchego) do tarcia mieszanego o małym udziale procentowym tarcia płynnego powoduje, że w węzłach tribologicznych podczas rozruchu silnika obserwujemy występowanie konglomeratu zużyć: adhezyjnego, ściernego a w zespole TPC dodatkowo także zużycia korozyjnego, co przedstawiono na rysunku 2.2 [3, 118].

Zużycie korozyjne zespołu TPC szczególnie wyraźnie występuje w trakcie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w niskich temperaturach otoczenia. Występują wtedy dogodne warunki do kondensacji pary wodnej na zimnych powierzchniach komory spalania. Jest to spowodowane wzrostem jej temperatury oraz nasycenia nią spalin. W wyniku występowania niepełnego i niecałkowitego spalania mieszanki paliwowo-powietrznej na początku rozruchu ze związków siarki znajdujących się w oleju napędowym powstaje

dwutlenek siarki. Jest on absorbowany przez cienką warstwę oleju znajdującą się na ściankach cylindrów. Połączenie się dwutlenku siarki oraz skroplonej pary wodnej (szczególnie w niskich temperaturach rozruchu) przyczynia się do powstania kwasu siarkowego, który jest dobrym elektrolitem. Paliwo osiadające zaś na ściankach cylindrów zmywa z nich cienką warstwę olejową, co odsłania powierzchnię metalu i powoduje korozję elektrochemiczną powierzchni cylindrów [69].



Rys. 2.2. Schemat zużycia rozruchowego zespołu TPC silnika [38]

Należy stwierdzić, że obserwowane tzw. „zużycie rozruchowe” zespołu TPC silnika o zapłonie samoczynnym stanowi sumę dwóch następujących po sobie procesów zużywania (rys. 2.2). Pierwszym procesem jest zużycie korozyjne w trakcie postoju silnika po jego zatrzymaniu, drugim – zużycie podczas rozruchu. Zużycie korozyjne przed rozruchem wynika z występowania podczas przerw w działaniu silnika w nierównościach powierzchni gładzi tulei cylindrowej najpierw przypowierzchniowej, a następnie podpowierzchniowej korozji elektrochemicznej [67].

Na początku rozruchu silnika spalinowego w parach tribologicznych zespołu TPC obserwuje się występowanie zużycia adhezyjnego, które wynika ze zrywania istniejących mikropołączeń stykowych warstw wierzchnich w chwili

rozpoczęcia ruchu względnego. Zużycie adhezyjne może wystąpić także w dalszej części rozruchu w przypadku małej prędkości kątowej wału korbowego oraz przy dużych naciskach powierzchniowych w warunkach niedostatecznego smarowania elementów zespołu TPC. Znaczne naciski powodują bowiem przerwanie warstewki środka smarnego i ponowne szepianie się nierówności współpracujących powierzchni [50, 67].

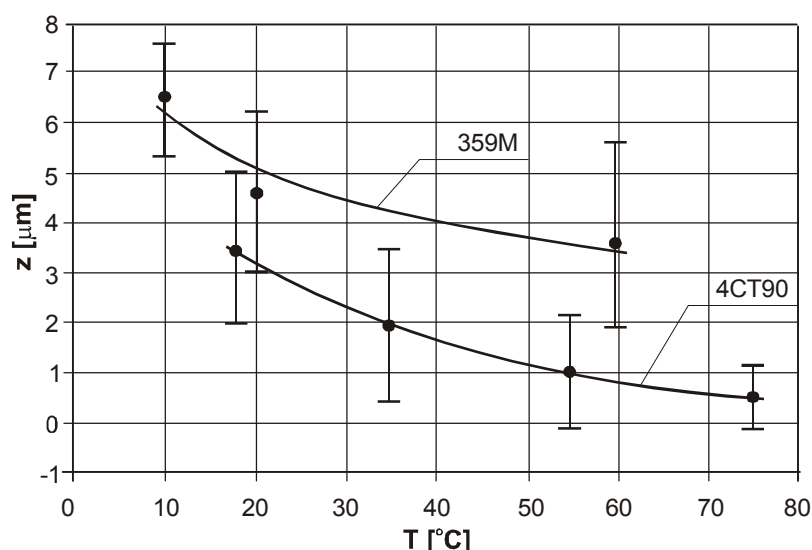
Zużycie ściernie podczas rozruchu silnika wywołane jest bezpośrednim kontaktem pomiędzy współpracującymi powierzchniami elementów zespołu TPC, a także obecnością luźnych cząstek ściernych. Występuje ono, ze względu na brak wystarczającej ilości oleju, przy cienkim filmie olejowym rzędu  $1 \div 1,5 \mu\text{m}$  [74]. Cząstki ściernie to produkty wcześniejszego (postojowego) zużycia korozyjnego, początkowego zużycia adhezyjnego oraz inne zanieczyszczenia dostające się do komory spalania wraz z niedostatecznie filtrowanym powietrzem.

Przy wzroście prędkości kątowej wału korbowego silnika oraz temperatury w komorze spalania następuje poprawa warunków smarowania i w zespole TPC pojawia się tarcie płynne. Intensywność zużycia elementów zespołu TPC silnika systematycznie maleje i po usunięciu mikrochropowatości współpracujących powierzchni ustala się na poziomie zależnym od warunków pracy silnika. Proces zmian prędkości zużywania się zespołu TPC nazywamy docieraniem porozruchowym silnika. Czas docierania porozruchowego może wynosić kilka minut i jest zależny od prędkości nagrzewania się silnika. Wzrost prędkości nagrzewania się silnika skraca czas docierania porozruchowego. Zbyt krótkie działanie silnika po jego rozruchu uniemożliwia zakończenie procesu docierania rozruchowego. Powoduje to, że przy następnym rozruchu wystąpi zwiększona prędkość zużywania się powierzchni elementów zespołu TPC silnika.

Najważniejszym czynnikiem wpływającym na wartość zużycia rozruchowego zespołu TPC silnika o zapłonie samoczynnym jest jego stan cieplny. Obniżenie temperatury rozruchu silnika powoduje widoczny wzrost wartości rozruchowego zużycia gładzi tulei cylindrowej. Ilustruje to rysunek 2.3, na którym przedstawiono zależność wartości zużycia rozruchowego gładzi tulei cylindrowej (określanego jako przyrost jej wewnętrznej średnicy) dwóch silników o zapłonie samoczynnym podczas ich rozruchów w funkcji temperatury.

Na intensywność zużywania się gładzi tulei cylindrowej w czasie rozruchu ma również istotny wpływ czas przerwy w działaniu silnika. Obserwuje się wzrost wartości zużycia przy zwiększeniu czasu postoju silnika. Spowodowane

jest to procesem korozji elektrochemicznej zachodzącej na powierzchni gładzi tulei cylindrowej, jak również wydłużeniem się czasu potrzebnego do uzyskania tarcia płynnego w zespole TPC [69].



Rys. 2.3. Wartość średnia oraz odchylenie standardowe zużycia z gładzi tulei cylindrowych silników 4CT90 oraz 359M w funkcji temperatury  $T$  jego rozruchu po 1000 rozruchach [38]

Podsumowując, podczas rozruchu silnika spalinowego występuje przejście z tarcia statycznego do tarcia kinematycznego. Dodatkowo ze względu na niekorzystne warunki smarowania, szczególnie w silnikach o zapłonie samoczynnym, występują negatywne procesy tribologiczne. Powodują one nagłe, skokowe zużycie układów tribologicznych, znacznie przekraczające wartości zużycia podczas normalnego działania silnika.

Z badań opisanych w literaturze [14, 22, 27, 61, 82] wynika, że sumaryczne zużycie rozruchowe gładzi tulei cylindrowej silnika spalinowego spowodowane wszystkimi jego rozruchami stanowi od 15% do 75% jej ogólnego zużycia.

Wartość obserwowanego zużycia rozruchowego gładzi tulei cylindrowej porównuje się z jej zużyciem występującym podczas działania silnika w warunkach jego użytkowania w pojeździe lub podczas badań stanowiskowych. Uzyskuje się dzięki temu ekwiwalentną wartość jej zużycia występującego na określonym przebiegu kilometrowym pojazdu lub podczas określonej liczby godzin działania silnika na stanowisku.

W przypadku temperatury rozruchu rzędu 0 °C wartość zużycia gładzi tulei cylindrowej podczas jednego rozruchu odpowiada wartości jej ekwiwalentnego zużycia na przebiegu pojazdu rzędu 80 kilometrów. W przypadku temperatury rozruchu –10 °C odpowiada to wartości ekwiwalentnego zużycia na przebiegu samochodu rzędu 150 kilometrów.

Przy temperaturze rozruchu silnika równej –20 °C wartość zużycia ekwiwalentnego gładzi tulei cylindrowej odpowiada już około 210 kilometrom przebiegu pojazdu. Przy przeliczaniu zużycia rozruchowego na czas pracy silnika podczas stanowiskowej próby hamownianej ekwiwalentne zużycie przy rozruchu silnika w temperaturze –20 °C jest równe zużyciu po  $2 \div 10$  godzinach pracy pod pełnym obciążeniem [62].

Spotyka się również wartości zużycia odbiegające od podanych powyżej. Wynika to z braku unifikacji procedur badawczych. Wartości ekwiwalentnego zużycia rozruchowego wahają się od kilku do kilkuset kilometrów przebiegu samochodu lub od kilku do kilkunastu godzin pracy silnika na hamowni silnikowej.

## **2.4. Rozruch silnika spalinowego jako problem badawczy**

Zagadnienia związane z problematyką rozruchu samochodowego silnika spalinowego stanowią ważny problem naukowy i użytkowy. Analizując dostępną krajową i światową literaturę należy stwierdzić, że badania rozruchów silników spalinowych w przeważającej mierze wykonywane są w warunkach doświadczeń na stanowiskach. Jest to podyktowane przede wszystkim możliwością skutecznego zainstalowania w silniku na stanowisku badawczym wielu różnych czujników i urządzeń pomiarowych oraz sterowania wieloma czynnikami i parametrami jego rozruchu.

Badania stanowiskowe rozruchu silnika spalinowego można podzielić na kilka wiążących się ze sobą grup problemowych. W pierwszej grupie występują doświadczenia poświęcone badaniom właściwości rozruchowych silników spalinowych [93, 122, 123, 124]. Druga grupa obejmuje badania procesu roboczego silnika podczas jego rozruchu ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień emisji składników toksycznych spalin oraz hałasu [2, 6, 55, 120]. W trzeciej grupie badania stanowiskowe ukierunkowane są na analizę obciążeń, procesów tarcia i zużywania zachodzących węzłach kinematycznych oraz w układzie elektrycznym silnika spalinowego podczas rozruchu [1, 22, 25]. Kolejną

grupę stanowią badania parametrów rozruchu wykorzystywanych jako sygnały diagnostyczne służące do oceny stanu technicznego silnika spalinowego [44, 93].

W eksperymentach stanowiskowych poświęconych badaniom właściwości rozruchowych samochodowych silników spalinowych określone są przede wszystkim takie parametry rozruchu jak: czas rozruchu, temperatura graniczna rozruchu oraz prędkość kątowna rozruchu. Wyniki tych eksperymentów wskazują, że w miarę spadku temperatury rozruchu obniża się wartość prędkości kątowej rozruchu oraz wzrasta czas jego trwania [80, 93].

W badaniach stanowiskowych procesu roboczego silnika analizuje się wpływ wielu czynników takich jak: temperatura rozruchu, rodzaj paliwa, konstrukcja układów rozruchowych, zasilania czy wspomagających rozruch silnika, skład mieszanki palnej, jakość rozpylenia paliwa, lotność paliwa, czas odparowania paliwa, temperatura ścianek komory spalania, temperatura końca suwu sprężania, nieszczelności zespołu TPC itd. na przebieg tworzenia i spalania mieszanki palnej oraz emisję składników toksycznych spalin i poziom hałasu podczas rozruchu silnika [2, 4, 39, 71, 80, 93] oraz na zużycie w czasie rozruchu ruchomych elementów silnika [27, 61, 69].

Wyniki badań stanowiskowych potwierdzają, że zbyt duża lepkość oleju smarującego w niskich temperaturach powoduje wydłużenie czasu osiągnięcia odpowiedniego ciśnienia oraz zwiększa opory ruchu. Powoduje to wzrost wartości obciążeń elektrycznych w układach rozruchowych i utrudnia uzyskanie udanego rozruchu silnika spalinowego [80, 93].

Pomiary zmian wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas uruchamiania silnika spalinowego wykorzystuje się powszechnie do oceny szczelności jego komór spalania oraz stanu technicznego samego rozrusznika. Analizę natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego można także wykorzystać do oceny procesów zachodzących w jego komorach roboczych [44, 75].

Odrębną grupę eksperymentów poświęconych rozruchom samochodowych silników spalinowych stanowią badania eksploatacyjne prowadzone w ramach dużych międzynarodowych projektów badawczych. W badaniach tych wykorzystuje się specjalne zbudowane elektroniczne urządzenia rejestrujące dodatkowo wspomagane systemami nawigacji satelitarnej GPS oraz danymi geograficznymi GIS. Wyniki tych badań, w połączeniu z informacjami dotyczącymi stanu warunków atmosferycznych, służą do oceny emisji składników



toksycznych spalin emitowanych przez silniki podczas rozruchów oraz natężenia ruchu samochodów w różnych warunkach drogowych [4, 53, 68, 96, 99].

Ostatnią grupę stanowią badania modelowe i symulacyjne procesów zachodzących podczas rozruchu silnika. Mają one na celu ocenę własności rozruchowych silnika w aspekcie niezawodności, ale przede wszystkim służą modelowaniu emisji składników toksycznych podczas rozruchów i przejazdów pojazdów [40, 50, 98]. Ich wyniki potwierdziły znaczną wartość emisji składników toksycznych spalin podczas rozruchu silników spalinowych.

Badania z wykorzystaniem symulacji komputerowych służą także do oceny wpływu konstrukcji zespołu TPC, prędkości kątowej wału korbowego oraz temperatury na parametry filmu olejowego oraz przebieg siły tarcia w jego parach tribologicznych podczas rozruchu silnika spalinowego [47, 98].



### **3. „WIDMO ROZRUCHU” SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM JAKO KRYTERIUM OCENY WARUNKÓW UŻYTKOWANIA POJAZDU**

Przy ocenach porównawczych samochodowych systemów transportu stosuje się różnorodne kryteria oceny oraz związane z nimi wskaźniki i miary efektywności. Kryteria oceny można podzielić zasadniczo na trzy kategorie.

Pierwszą kategorię tworzą kryteria uwzględniające przede wszystkim mechanizmy gospodarcze oraz kształtujące je uwarunkowania ekonomiczno-prawne. Najczęściej uwarunkowania te są określone i narzucone systemowi transportu przez jego otoczenie i nie mogą być zmodyfikowane [16, 17, 18]. Stosowanymi wskaźnikami oceny są najczęściej: wielkość dochodu z prowadzonej działalności transportowej, wielkość kosztów funkcjonowania przedsiębiorstwa itd. [11, 12, 20, 88].

Drugą kategorię tworzą kryteria związane z zagadnieniami bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz problematyką ekologiczną. Kryteria oraz ich wskaźniki muszą także uwzględniać przepisy prawa o ruchu drogowym [41, 42, 43, 48]. Dodatkowo wynikają one z międzynarodowych, czy też krajowych norm i przepisów kształtujących wielkość dopuszczalnych poziomów emisji do atmosfery związków i składników szkodliwych przez silniki spalinowe oraz norm określających dopuszczalny poziom emisji hałasu.

Trzecią kategorię tworzą kryteria eksploatacyjno-techniczne. Uwzględniają one wskaźniki związane z: rodzajem i niezawodnością stosowanych środków transportu [51], długością tras przejazdu, warunkami przejazdów samochodów [58, 56, 103] przyjętymi rozwiązaniami logistycznymi [106, 107], organizacją prac załadunkowo-wyładunkowych [87], częstotliwością obsługi i napraw [70, 91, 104] itp. Wartości tych wskaźników można świadomie kształtować w danym systemie transportu.

W przypadku dysponowania podobnymi pojazdami oraz przy istnieniu porównywalnych warunków ekonomicznych o przewadze danego systemu transportu decydują czynniki zależne od warunków eksploatacji samochodów. Istnieje więc praktyczna potrzeba rozwijania i udoskonalania kryteriów, które są bezpośrednio związane z warunkami użytkowania pojazdu. Wydaje się bowiem, że na podstawie szczegółowej analizy parametrów określających pracę pojazdu oraz działanie i rozruch jego silnika spalinowego możliwe jest dokonywanie porównań warunków użytkowania, a tym samym ocenę różnorodnych samochodowych systemów transportu.

Niezależnie jednak od rodzajów kategorii rozpatrywanych kryteriów, w celu przeprowadzenia oceny danego systemu transportowego wymaga się zdefiniowania odpowiednich jego charakterystyk oraz opracowania praktycznych i łatwych do stosowania metod identyfikacji ich wskaźników. Dlatego też w niniejszej rozprawie habilitacyjnej zaproponowano, aby wykorzystać „widmo rozruchu” jako ekspercką charakterystykę [32, 35] oceny systemu transportowego.

Aby zaimplementować „widmo rozruchu” silnika samochodowego do oceny systemu transportowego należy:

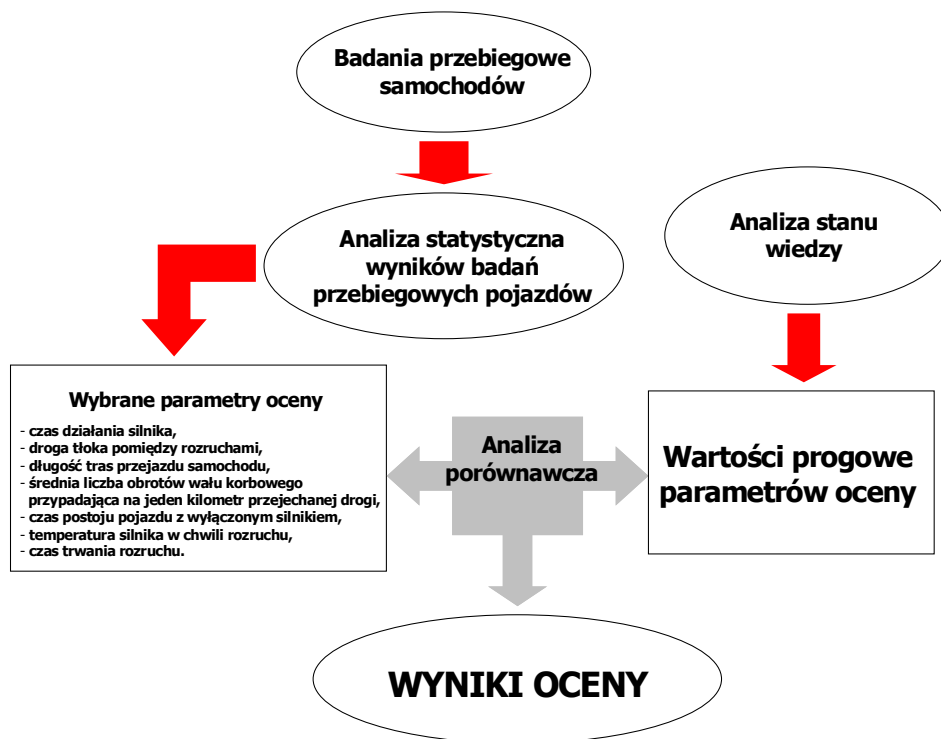
- dokonać wyboru wielkości najlepiej opisujących badany system (wielkości charakterystycznych) z grupy parametrów „widma rozruchu”,
- zdefiniować wartości „progowe” dla wybranych wielkości,
- przeprowadzić badania przebiegowe samochodów lub pojedynczego pojazdu reprezentujących badany system w celu rejestracji parametrów „widma rozruchu”,
- przeprowadzić analizę statystyczną zarejestrowanych danych,
- wykonać analizę porównawczą.

Podczas przeprowadzanej analizy porównawczej konfrontuje się wartości parametrów „widma rozruchu” silnika spalinowego z założonymi a priori wartościami „progowymi”. Schemat proponowanego w rozprawie habilitacyjnej sposobu oceny systemu transportu samochodowego zaprezentowano na rysunku 3.1.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury zagadnienia oraz wyników wieloletnich badań własnych autora zaproponowano, aby przy ocenie wykorzystywać pięć następujących parametrów „widma rozruchu” [35]:

- czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem przed rozruchem w czasie dnia pracy,

- czas nieprzerwanego działania silnika,
- długość trasy przebytej przez samochód pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika,
- temperaturę silnika w chwili rozruchu,
- czas trwania rozruchu.



Rys. 3.1 Schemat oceny systemu transportu samochodowego [35]

Ustalając wartości „progowe” i definiując słowne odpowiedniki zakresów tych wartości (tabela 3.1) otrzymuje się narzędzie pozwalające na formułowanie ostatecznych konkluzji na temat warunków użytkowania pojazdów w systemie transportowym.

Tabela 3.1. Wartości „progowe” wielkości charakterystycznych oraz ich określenia słowne [35]

| Wyróżniony parametr                       | Wartość „progowa” i określenie słowne |                  |                 |                 |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Czas działania silnika                    | Poniżej 10 min                        | 10 min – 20 min  | Powyżej 20 min  |                 |
|                                           | Krótki                                | Średni           | Długi           |                 |
| Czas postoju pojazdu z wyłączonym silnika | Do 10 min                             | 10 min – 20 min  | Powyżej 20 min  |                 |
|                                           | Krótki                                | Przecięty        | Długi           |                 |
| Długość trasy przejazdu pojazdu           | Poniżej 10 km                         | 10 km – 30 km    | Powyżej 30 km   |                 |
|                                           | Krótkie trasy                         | Średnie trasy    | Długie trasy    |                 |
| Temperatura silnika w chwili rozruchu     | Poniżej 0 °C                          | 0 °C – 20 °C     | 20 °C – 60 °C   | Powyżej 60 °C   |
|                                           | Rozruchy w niskich temperaturach      | Chłodne rozruchy | Ciepłe rozruchy | Gorące rozruchy |
| Czas trwania rozruchu                     | Poniżej 3 sek.                        | Powyżej 3 sek.   |                 |                 |
|                                           | Natychmiastowy                        | Długotrwały      |                 |                 |

## **4. IDENTYFIKACJA WYBRANYCH PARAMETRÓW „WIDMA ROZRUCHU” SAMOCHODOWEGO SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM**

### **4.1. Obiekty badań**

W celu zastosowania „widma rozruchu” jako charakterystyki eksperckiej oceniającej system transportu samochodowego przeprowadzono, we współpracy z Poczta Polska w Lublinie, przebiegowe badania w warunkach „długotrwałego” oraz „nadzorowanego” użytkowania wybranego typu pojazdu. Podczas badań w warunkach „kontrolowanych” założono długości poszczególnych odcinków drogi (pomiędzy kolejnymi punktami postoju z wyłączonym silnikiem) na założonej trasie przejazdu samochodów. Przejazdy odbywały się w wybranych dniach, tak aby nie zakłócały normalnego funkcjonowania systemu przewozu Poczty. Zaproponowano dwie różne trasy przejazdów. Na trasie nr 1 dominowały warunki pozamiejskie, trasa nr 2 przebiegała głównie w warunkach miejskich. Podczas badań kierowcom nie narzucano żadnych ograniczeń co do liczby rozruchów silnika, techniki i sposobu jazdy, wartości prędkości liniowej pojazdu itd. Badania w warunkach „kontrolowanych” przeprowadzono w okresie wiosny, lata oraz jesieni. Spowodowało to, że nie zarejestrowano ujemnych temperatur rozruchu silników badanych samochodów.

Badaniami przebiegowymi objęto pojazdy marki LUBLIN typu furgon z kabiną oddzielną od części ładunkowej, produkowane przez Daewoo Motor Polska, o ładowności 1,1 tony. Jednostkami napędowymi badanych samochodów były wysokoprężne silniki 4CT90 o wtrysku pośrednim produkowanym przez Wytwórnię Silników Wysokoprężnych „Andoria” w Andrychowie. Silnik ten charakteryzuje się pojemnością skokową 2,417 dm<sup>3</sup>, posiada moc 63,5 kW przy 4100 obr/min i rozwija moment maksymalny

195 Nm przy 2500 obr/min. W układzie zasilania zastosowano rzędowną pompę wtryskową produkcji czeskiej firmy MOTORPAL Jihlava typ PP4M7P1g 3176.

Układ rozruchowy silnika składa się ze włącznika rozrusznika (stacyjka), akumulatora rozruchowego o pojemności maksymalnej 150Ah (w 20 °C), przewodów wysokoprądowych oraz rozrusznika. Rozrusznik 443 115 142 723 produkcji czeskiej firmy MAGNETON jest szeregowym silnikiem elektrycznym przeznaczonym do krótkotrwałej pracy. Zębniak wprawiający w ruch koło zamachowe wysuwany jest elektromagnetycznie. Wyłącznik elektromagnetyczny wysuwający zębniak posiada dwa uzwojenia: wciągające i podtrzymujące. Nieprzerwana praca rozrusznika nie może trwać dłużej niż 5 sekund.

Silnik 4CT90 wyposażony jest w obiegowy układ smarowania rozbryzgowo-ciśnieniowy (olej podawany jest pod ciśnieniem 0,10÷0,50 MPa). Silnik ten jest chłodzony płynem w układzie o przymusowym obiegu składającym się z wirnikowej pompy wody, termostatu, chłodnicy, kolektora wody oraz wentylatora.

#### **4.2. Badane parametry „widma rozruchu”**

W badanych pojazdach LUBLIN użytkowanych przez Poczta Polska w Lublinie zamontowano własne urządzenia rejestrujące. Umożliwiały one pomiar i rejestrację następujących parametrów pracy pojazdów LUBLIN i silników 4CT90 [26, 28]:

1. wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik,
2. wartości napięcia na zaciskach rozrusznika,
3. zmiany położenia (wartość obrotów) wału korbowego silnika,
4. zmiany (wartość obrotów) położenia wału napędowego pojazdu,
5. wartości ciśnienia oleju smarującego,
6. wartości temperatury oleju smarującego,
7. wartości temperatury płynu chłodzącego,
8. zmiany położenia (położenie) organu sterującego pompą wtryskową.

Rejestracja parametrów związanych z pracą pojazdu oraz silników takich jak: wartość temperatury oleju smarującego, temperatury cieczy chłodzącej silnik, ciśnienie oleju smarującego, położenie wału korbowego silnika, położenie wału napędowego pojazdu oraz położenie organu sterującego pompą wtryskową odbywała się częstotliwością 1 Hz.



W trakcie badań w warunkach „nadzorowanego” użytkowania czterech pojazdów wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik oraz napięcia na jego zaciskach mierzono z częstotliwością 40 Hz od momentu rozpoczęcia rozruchu. Pomiary wartości napięcia przyłożonego na zaciskach rozrusznika, natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, położenia wału korbowego w warunkach „naturalnego” użytkowania samochodu rejestrowano z częstotliwością 500 Hz. Uzyskane wyniki badań poddano analizom statystycznym przy użyciu programu STATISTICA.

Zastosowane urządzenia rejestrujące pozwoliły na określenie następujących składowych „widma rozruchu” dla pojazdów LUBLIN i silników 4CT90:

1.  $X_{tpra}$  – zmienna losowa opisująca wartość czasu działania silnika przed kolejnym rozruchem [min],
2.  $X_{lpoj}$  – zmienna losowa reprezentująca drogę wykonaną przez pojazd przed kolejnym rozruchem silnika [km],
3.  $X_{lil}$  – zmienna losowa określająca drogę wykonaną przez tłok silnika przed kolejnym rozruchem [km],
4.  $X_{tpos}$  – zmienna losowa reprezentująca czas postoju samochodu z wyłączonym silnikiem przed rozruchem [min],
5.  $X_{tpob}$  – zmienna losowa opisująca czas postoju samochodu z wyłączonym silnikiem przed rozruchem podczas pojedynczego dnia jego pracy (w zmiennej tej nie ujęto postojów dłuższych niż 5 godzin) [min],
6.  $X_{Tpt}$  – zmienna losowa reprezentująca wartość temperatury silnika (płynu chłodzącego) w chwili rozruchu [ $^{\circ}\text{C}$ ],
7.  $X_{Tol}$  – zmienna losowa opisująca wartość temperatury oleju silnikowego w chwili rozruchu [ $^{\circ}\text{C}$ ],
8.  $X_{tprzyt}$  – zmienna losowa opisująca czas przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika [s],
9.  $X_{troz}$  – zmienna określająca czas rozruchu silnika [s],
10.  $X_{Imax}$  – zmienna losowa reprezentująca maksymalną wartość prądu pobieranego przez rozrusznik zarejestrowana na początku rozruchu silnika [A],
11.  $X_{Umax}$  – zmienna losowa opisująca wartość napięcia na zaciskach rozrusznika w chwili wystąpienia maksymalnego natężenia prądu [V],
12.  $X_{Pmax}$  – zmienna losowa opisująca wartość mocy elektrycznej rozwijanej przez rozrusznik w chwili maksymalnego natężenia prądu [W],

13.  $X_{I_{sr}}$  – zmienna losowa określająca wartość średnią prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego [A],
14.  $X_{U_{sr}}$  – zmienna losowa określająca wartość napięcia na zaciskach rozrusznika podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego [V],
15.  $X_{P_{sr}}$  – zmienna losowa opisująca wartość mocy elektrycznej rozwijanej przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika [W].

#### **4.3. Wpływ warunków użytkowania samochodu na parametry „widma rozruchu” silnika o zapłonie samoczynnym stosowane podczas oceny systemu transportu**

Przy określaniu związków pomiędzy warunkami użytkowania samochodu a wybranymi parametrami „widma rozruchu”, które stanowią wskaźniki zaproponowanego w rozprawie kryterium oceny systemu transportu, należy w pierwszej kolejności określić zewnętrzne czynniki i uwarunkowania w jakich funkcjonuje dany system transportu samochodowego. Badany system przewozu Poczty Polskiej w Lublinie charakteryzują:

- położenie i odległości pomiędzy poszczególnymi lokalnymi punktami pocztowymi oraz regionalnym centrum logistycznym,
- możliwa prędkość liniowa samochodu wynikająca z rodzaju warunków przejazdu (miejskie lub pozamiejskie) oraz zależny od niej czas przejazdu,
- ograniczenia wynikające z przepisów związanych z czasem pracy kierowców i punktów pocztowych,
- godziny wyjazdów pojazdów obsługujących regionalne centra logistyczne.

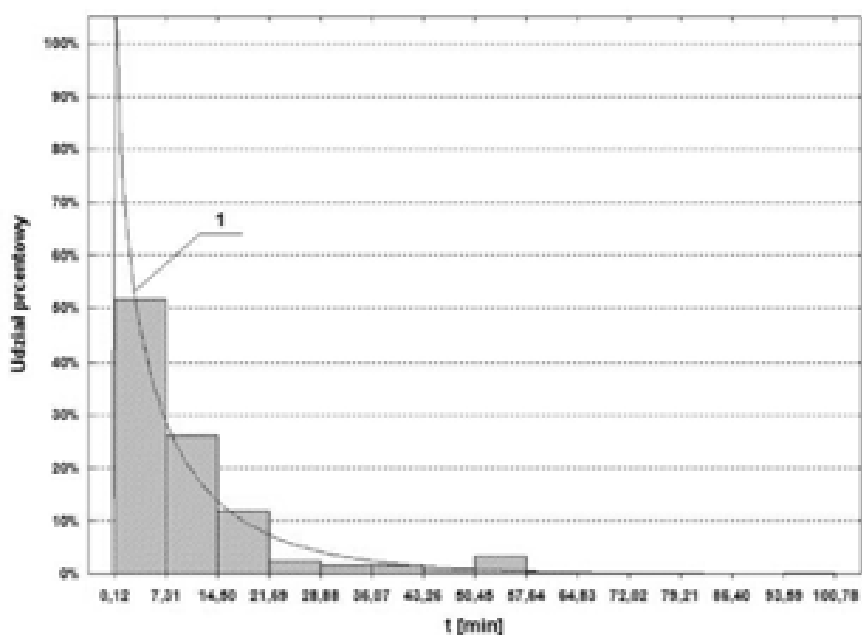
Harmonogram pojedynczego dnia pracy samochodu zawiera:

- godzinę rozpoczęcie pracy przez kierowcę,
- godzinę wyjazdu pojazdu z bazy,
- czas jazdy oraz długość drogi przebytej przez pojazd pomiędzy kolejnymi punktami przewozu na trasie przejazdu,
- czas prac załadunkowo-wyładunkowych w punktach pocztowych oraz regionalnym centrum logistycznym,
- czas przerw w pracy kierowcy,
- czas zakończenia dnia pracy przez kierowcę.

Założony w systemie transportu Poczty Polskiej plan przejazdów samochodów w ciągu pojedynczego dnia pracy powinien oddziaływać na warunki jego użytkowania, a tym samym na wartości parametrów „widma rozruchu” oraz ich rozkłady statystyczne.

Jednym z istotnych parametrów „widma rozruchu” jest czas nieprzerwanego działania silnika podczas pojedynczego dnia użytkowania samochodu. Miary położenia i rozrzutu tego parametru dla badanych pojazdów przedstawiono w tabelach Z1.1-Z1.5 w załączniku nr 1 do niniejszej monografii.

Na rysunku 4.1 zaprezentowano rozkład statystyczny tego parametru dla badań przebiegowych w warunkach „naturalnego” użytkowania pojazdu. Rozkład ten przybliżono rozkładem Weibulla o parametrach podanych pod rysunkiem 4.1.



Rys. 4.1. Rozkład statystyczny czasu  $t$  nieprzerwanego działania silnika 4CT90 podczas dnia użytkowania samochodu LUBLIN; 1 – funkcja gęstości rozkładu Weibulla dopasowana (poziom istotności  $p < 0,01$ ) do danych empirycznych o parametrach skali: 9,3012 i kształtu: 0,0733

Dla czterech pozostałych pojazdów, które poddano badaniom w warunkach „kontrolowanych”, histogramy rozkładu czasów działania silników 4CT90 zaprezentowano na rysunku Z2.1 w załączniku nr 2. Rozkłady te dopasowano także rozkładami Weibulla.

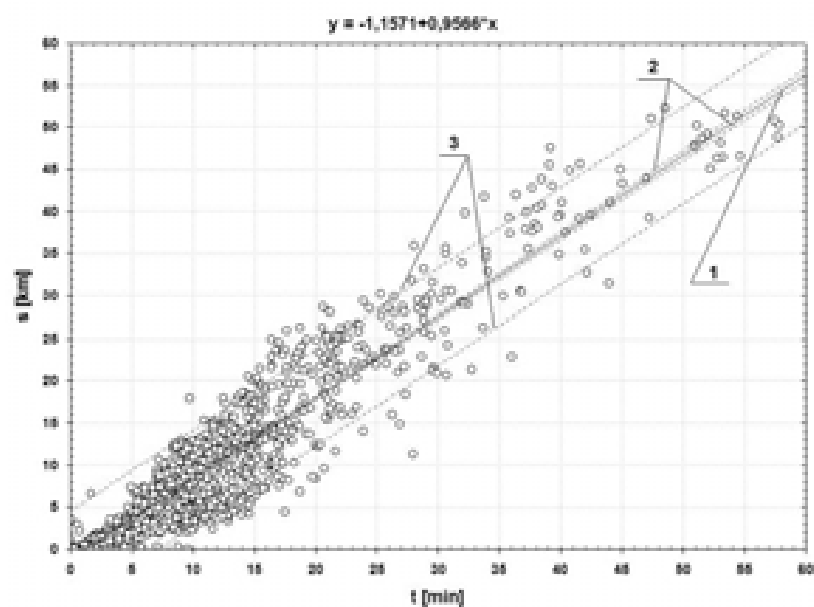
Analizując histogram z rysunku 4.1 oraz histogramy znajdujące się na rysunku Z2.1 należy stwierdzić duży udział procentowy krótkich czasów działania badanych silników 4CT90. Czasy do 7 minut stanowią około 50% wszystkich zarejestrowanych przypadków. Taki udział procentowy czasów działania silnika wynika z występowania dodatkowych (nie ujętych w harmonogramie) krótkich przejazdów samochodu związanych z występującymi pracami manewrowymi na terenie lokalnych oddziałów pocztowych, regionalnego centrum logistycznego oraz bazy transportowej (np.: dojazd po rampę załadowniczą i do warsztatu mechanicznego, tankowanie i mycie pojazdu itp.). Przyczynia się to do zwiększenia liczby dziennych rozruchów badanych silników względem liczby wynikającej z harmonogramu pojedynczego dnia pracy samochodu. Obliczony na podstawie uzyskanych wyników średni czas działania silników pojazdów LUBLIN wynosił około 8 minut.

Oczywiste jest, że czas nieprzerwanego działania silnika wpływa na wartość drogi tłka wykonaną między kolejnymi jego rozruchami. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy tymi parametrami, która równa  $r = 0,99$ . Poziom istotności tego współczynnika wynosi  $p \leq 0,05$ .

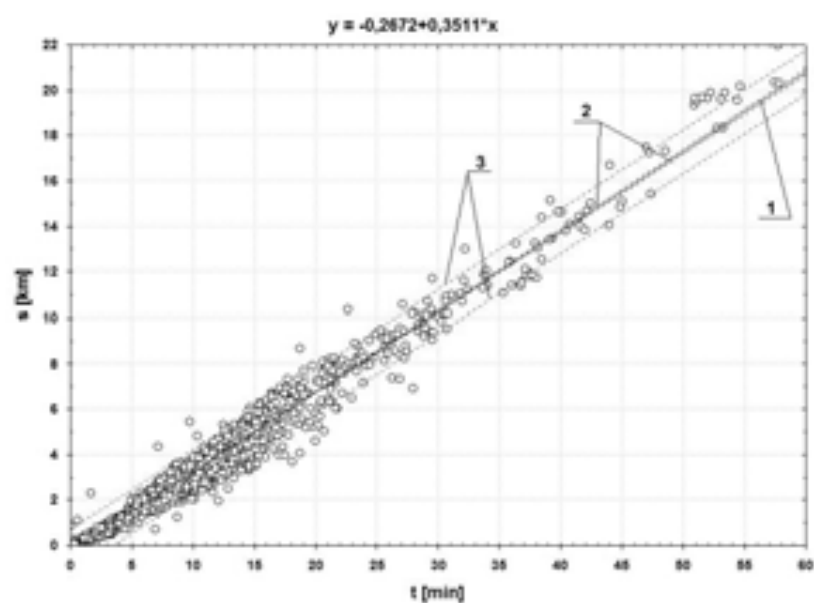
Czas działania silnika jest związany z drogą wykonaną przez pojazd pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika. Dla czasu działania i drogi pojazdu wartość współczynnika korelacji linowej wynosi  $r = 0,95$  (poziom istotności  $p \leq 0,05$ ).

Na rysunku 4.2 pokazano wykresy rozrzutu dla wymienionych trzech parametrów „widma rozruchu”. Na wykresach tych poprowadzono także prostą regresji wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.

a)



b)



Rys. 4.2. Wykres rozrzutu: a) czasu  $t$  nieprzerwanego działania silnika 4CT90 oraz drogi  $s$  wykonanej przez pojazd pomiędzy kolejnymi rozruchami, b) czasu  $t$  nieprzerwanego działania silnika i drogi  $s$  tłoka pomiędzy kolejnymi rozruchami; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 4.2a charakteryzuje się średnim błędem losowym równym 0,01% (dla poziomu istotności  $p < 0,001$ ). Wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 136,072. Wyraz wolny dla tej prostej posiada średni błąd losowy równy 0,08% (poziom istotności  $p < 0,001$ ), zaś wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 22,776. Wartość współczynnika determinacji równa się  $r^2 = 0,9072$  (poziom istotności  $p = 0,001$ ). Dla prostej regresji z rysunku 4.2b współczynnik kierunkowy posiada średni błąd losowy równy 0,01% (poziom istotności  $p < 0,001$ ). Wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 288,509. Średni błąd losowy wyrazu wolnego wynosi 0,04% (poziom istotności  $p = 0,001$ ), zaś wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 22,529. Wartość współczynnika determinacji wynosi  $r^2 = 0,9779$  (poziom istotności  $p = 0,001$ ).

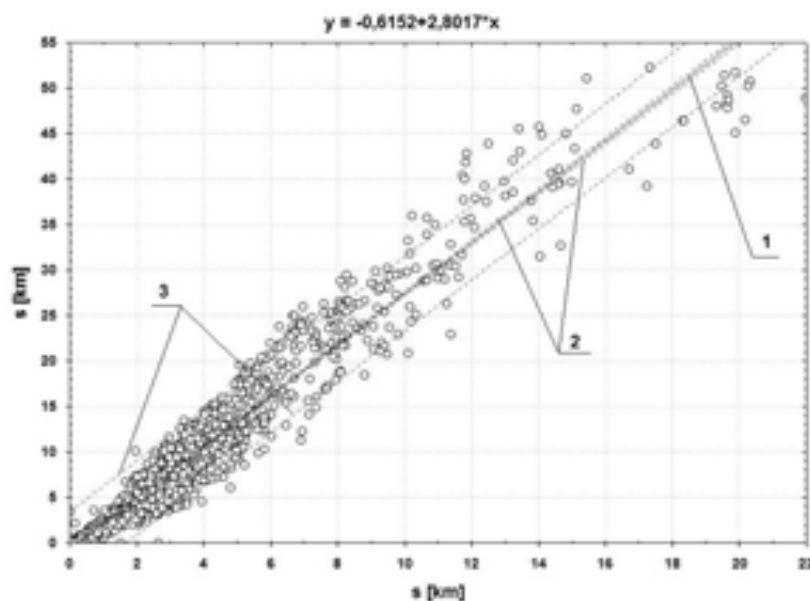
Wykresy rozrzutu dla czasu nieprzerwanego działania silnika oraz drogi wykonanej przez pojazd pomiędzy kolejnymi rozruchami (dla badań w warunkach „kontrolowanych”) pokazano na rysunku Z2.2 załącznika nr 2. Wykresy rozrzutu dla czasu nieprzerwanego działania silnika oraz drogi tłoka pomiędzy kolejnymi rozruchami (dla badań w warunkach „nadzorowanych”) pokazano na rysunku Z2.3.

Wartości współczynników korelacji liniowej dla czasu nieprzerwanego działania silnika, drogi wykonanej przez pojazd oraz drogi tłoka pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika obliczone na podstawie wyników uzyskanych w warunkach „nadzorowanego” użytkowania pojazdów zaprezentowano w macierzach załącznika nr 3. Poziom istotności dla tych współczynników wynosi  $p \leq 0,05$ .

Przedstawione wyniki analiz statystycznych wskazują na występowanie silnej liniowej zależności pomiędzy czasem nieprzerwanego działania silnika oraz drogą tłoka i drogą pojazdu wykonaną pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika. Oczywiście jest więc, że istnieje związek pomiędzy drogą wykonaną przez pojazd a drogą tłoka pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika. Ilustracją tego jest rysunek 4.3 na którym pokazano wykres rozrzutu dla wymienionych parametrów „widma rozruchu” wraz z prostą regresji oraz 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 4.3 ma średni błąd losowy równy 0,01% (poziom istotności  $p = 0,001$ ), przy czym wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 194,342. Błąd losowy wyrazu wolnego wynosi 0,02% (poziom istotności  $p = 0,001$ ), zaś wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 16,406.

Współczynnik determinacji wynosi  $r^2 = 0,9524$ . Wartość zaś współczynnika korelacji liniowej wynosi  $r = 0,97$ . Poziom istotności dla wymienionych współczynników jest równy  $p = 0,001$ .



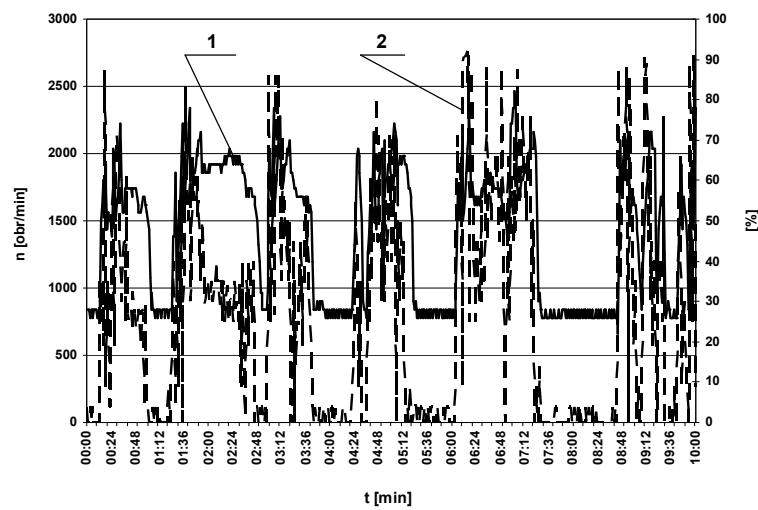
Rys. 4.3. Wykres rozrzutu dla drogi s tłoka oraz drogi s wykonanej przez samochód LUBLIN pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika 4CT90; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

Także wykresy rozrzutu zaprezentowane na rysunku Z2.4 oraz wartości współczynników korelacji z załącznika nr 3 pokazują występowanie silnej liniowej zależności pomiędzy drogą wykonaną przez pojazd a drogą tłoka pomiędzy kolejnymi rozruchami badanych silników 4CT90.

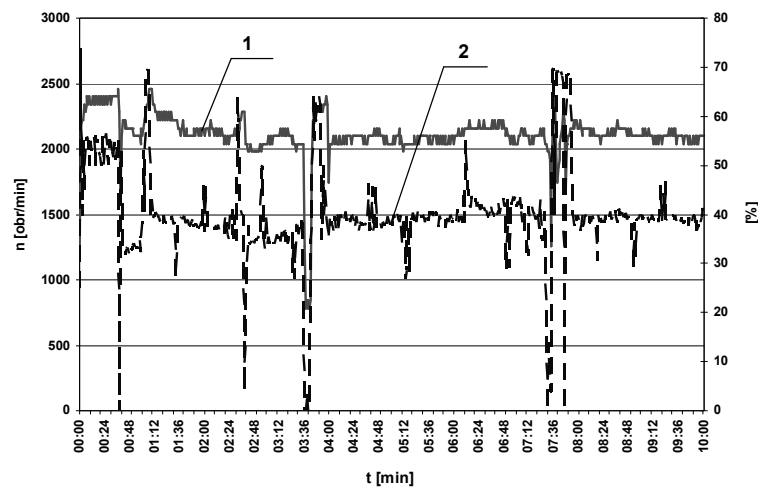
Należy w tym miejscu zaznaczyć, że podczas przebiegu pojazdów w warunkach miejskich, które charakteryzują się większą częstotliwością zmian prędkości kątowej wału korbowego oraz znacznym udziałem biegu jałowego silnika, obserwuje się spadek wartości współczynnika korelacji liniowej pomiędzy drogą wykonaną przez pojazd a drogą tłoka pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika. W przejazdach pozamiejskich, które charakteryzują się stabilniejszą pracą silnika, wartość tego współczynnika wzrasta.

Zmienność stanów działania silnika scharakteryzowanych prędkością obrotową  $n$  wału korbowego oraz położeniem listwy zębatej sterującej dawkowaniem pompy wtryskowej, w zależności od warunków jazdy, ilustruje rysunek 4.4.

a)



b)



Rys. 4.4. Przebieg zmian prędkości obrotowej  $n$  wału korbowego silnika oraz położenia organu sterującego pompą wtryskową silnika 4CT90: a) przebieg pojazdu LUBLIN w warunkach miejskich b) przebieg pojazdu LUBLIN w warunkach pozamiejskich; 1 – prędkość obrotowa, 2 – położenie listwy zębatej [30]



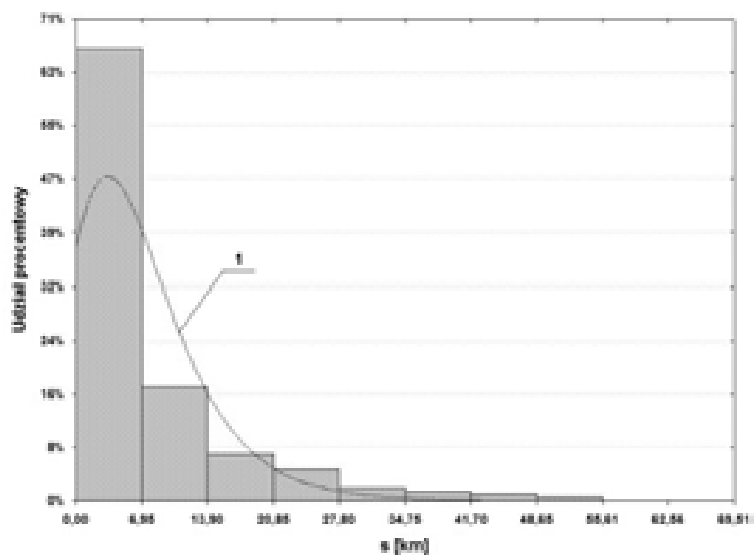
Na rysunku 4.5 zaprezentowano rozkłady statystyczne drogi wykonanej przez pojazd oraz drogi tłoka pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika 4CT90 uzyskanymi na podstawie badań w warunkach „naturalnego” użytkowania pojazdu LUBLIN. W załączniku nr 2 na rysunkach Z2.5 oraz Z2.6 zaprezentowano histogramy dla obydwu parametrów „widma rozruchu” w warunkach „kontrolowanych”. Wszystkie rozkłady dopasowano rozkładem wartości ekstremalnych o parametrach podanych pod rysunkami. Miary położenia i rozrzutu parametrów „widma rozruchu” drogi pojazdu oraz drogi tłoka wykonanej pomiędzy dwoma rozruchami silnika dla badanych pojazdów przedstawiono w tabelach Z1.1-Z1.5 w załączniku nr 1 do niniejszej monografii.

Należy stwierdzić, że dla badanych pojazdów LUBLIN wartość przejechanej drogi jest około 2,5 razy większa od drogi wykonanej przez tłoki pomiędzy dwoma kolejnymi rozruchami silnika 4CT90. Podkreślić należy jednak, że tłoki silników wykonują drogę wynoszącą około 2,6 km (zob. tabele Z1.1-Z1.5 załącznik nr 1) podczas nieprzerwanego działania pomiędzy kolejnymi rozruchami.

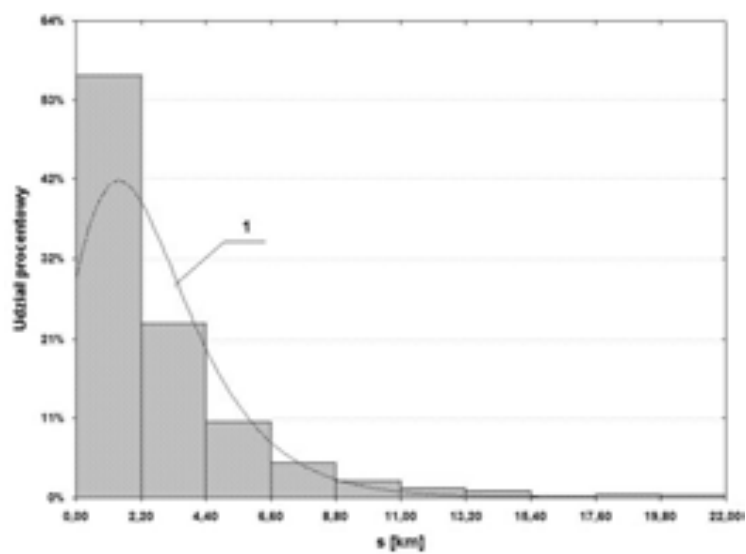
Z badań przeprowadzonych przez autora wynika również, że podczas przejazdów w warunkach miejskich średnia wartość liczby obrotów (wynosząca 2137) wału korbowego silnika spalinowego przypadająca na jeden kilometr przejechanej przez samochód drogi jest większa od średniej wartości liczby obrotów (równej 1939) wału korbowego wykonanej na porównywalnym odcinku drogi przejazdu samochodu w warunkach pozamiejskich. Na rysunku 4.6. zaprezentowano rozkłady liczby obrotów wału korbowego silnika 4CT90 przypadających na jeden kilometr drogi (parametr ten oznaczono jako  $k$ ) przejechanej przez pojazd LUBLIN w warunkach miejskich oraz poza miastem [24].

Występujące na rysunku 4.6 różnice pomiędzy histogramami oraz funkcjami gęstości dopasowującymi rozkłady liczby obrotów wału korbowego przypadające na jeden kilometr drogi pojazdu wynikają z większej niestabilności pracy silnika w warunkach przejazdów w mieście (zob. rys 4.4). Ogólnie średnia liczba obrotów wału korbowego badanego silnika 4CT90 wykonana w trakcie przejazdu samochodu LUBLIN na odcinku drogi jednego kilometra wynosi 1994. Przedstawione wyniki pokazują skalę procesów tribologicznych zachodzących w zespole TPC podczas działania silnika [24].

a)

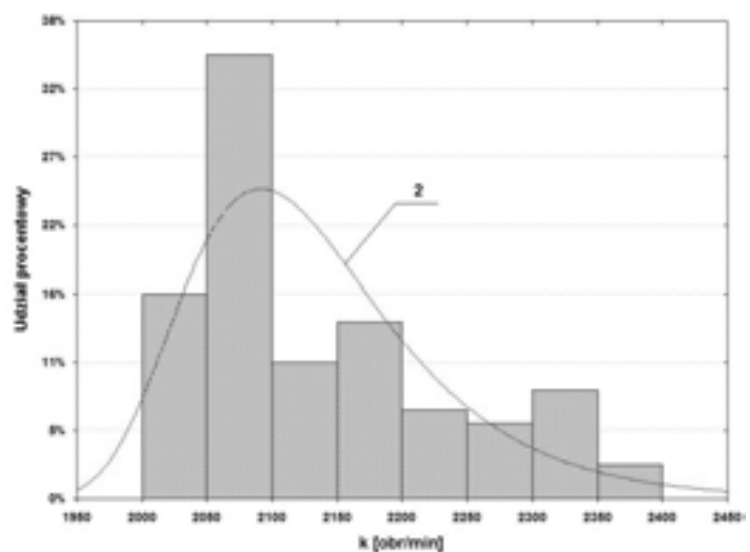
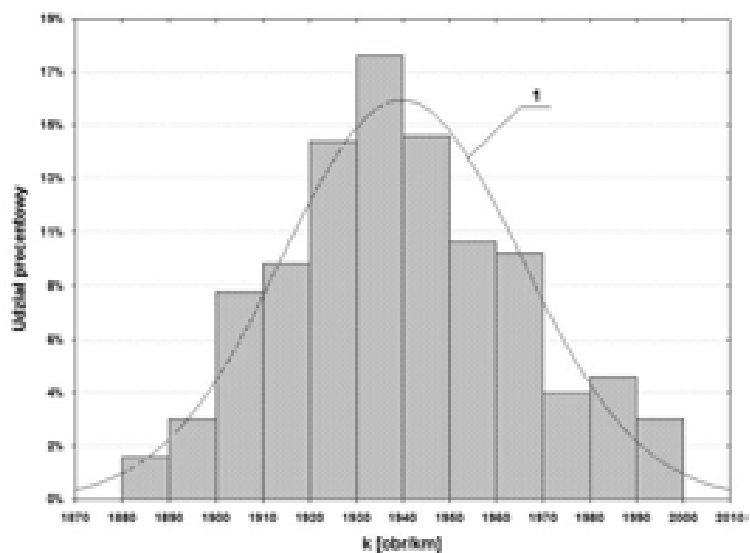


b)



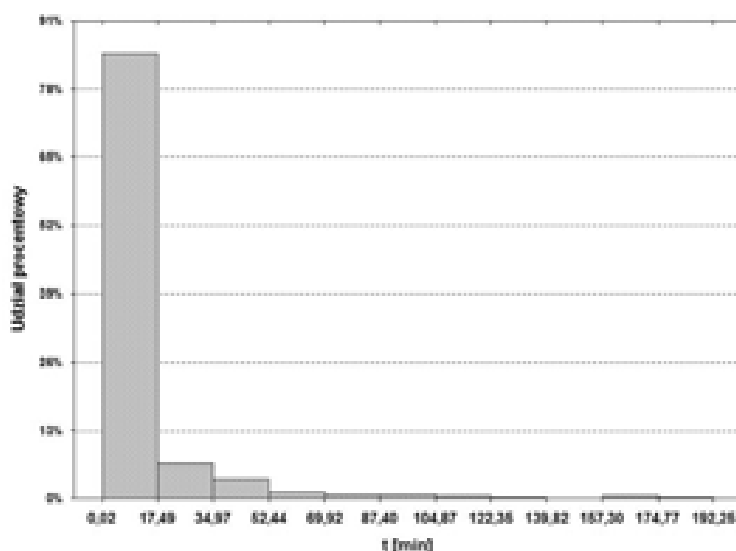
Rys. 4.5. Rozkład statystyczny: a) droga s pojazdu LUBLIN pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika 4CT90, b) droga s tłoka pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika 4CT90;  $f$  – funkcja gęstości rozkładu wartości ekstremalnych dopasowana (poziom istotności  $p < 0,01$ ) do danych empirycznych a) dla drogi s wykonanej przez pojazd pomiędzy kolejnymi rozruchami o parametrach położenia: 1,441 i skali: 1,9216, b) dla drogi tłoka s pomiędzy kolejnymi rozruchami o parametrach położenia: 3,358 i skali: 5,352

a)



Rys. 4.6. Rozkład statystyczny liczby obrotów  $k$  wału korbowego silnika 4CT90 przypadających na jeden kilometr drogi samochodu LUBLIN: a) przejazdy w warunkach miejskich, b) przejazdy w warunkach pozamiejskich; 1 – dopasowanie rozkładem normalnym (poziom istotności  $p < 0,05$ ), 2 – dopasowanie rozkładem wartości ekstremalnych o parametrach położenia: 2090, 713 i skali: 75,4981 (poziom istotności  $p < 0,05$ ) [24]

Kolejnym, brany pod uwagę podczas dokonywania oceny systemu transportu, parametrem „widma rozruchu” podczas pojedynczego dnia użytkowania jest czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem. Wartość tego czasu jest zależna od sposobu organizacji prac załadunkowo-wyładunkowych w punktach pocztowych oraz regionalnym centrum logistycznym, a także czynności obsługowych odbywających się na terenie bazy transportowej. Czas przerw w działaniu silnika jest więc istotnym parametrem oceny porównawczej samochodowych systemów transportowych. Na rysunku 4.7 przedstawiono rozkład statystyczny czasu postoju samochodu z wyłączonym silnikiem podczas dnia użytkowania (z wyłączeniem postojów dłuższych niż 5 godzin) uzyskany na podstawie wyników „długotrwałych” badań przebiegowych.



Rys. 4.7. Rozkład statystyczny czasu  $t$  postoju samochodu LUBLIN z wyłączonym silnikiem 4CT90 podczas pojedynczego dnia użytkowania [31]

Analiza histogramu z rysunku 4.7 wskazuje, że 85% czasów postojów z wyłączonym silnikiem podczas pojedynczego dnia pracy pojazdu LUBLIN nie przekracza 17,5 minut. Średni czas postoju dla badanego samochodu wynosi 10,8 minuty. Należy dodatkowo zauważyć, że wartość średnia czasów postoju pojazdów z wyłączonym silnikiem (także podczas badań w warunkach „kontrolowanych”) jest porównywalna z czasami nieprzerwanej pracy silników (zob. tabele Z2.1-Z2.4 w załączniku nr 1).

Na rysunku Z2.7 przedstawiono rozkłady statystyczne czasów postoju samochodów z wyłączonym silnikiem podczas pojedynczego dnia jego użytkowania dla badań w warunkach „nadzorowanych”. Na rysunku Z2.7 zwraca uwagę wynoszący ponad 90% udział czasów postojów nie przekraczających 20 minut. Średnie czasy postoju dla badanych silników nie przekraczają 13 minut.

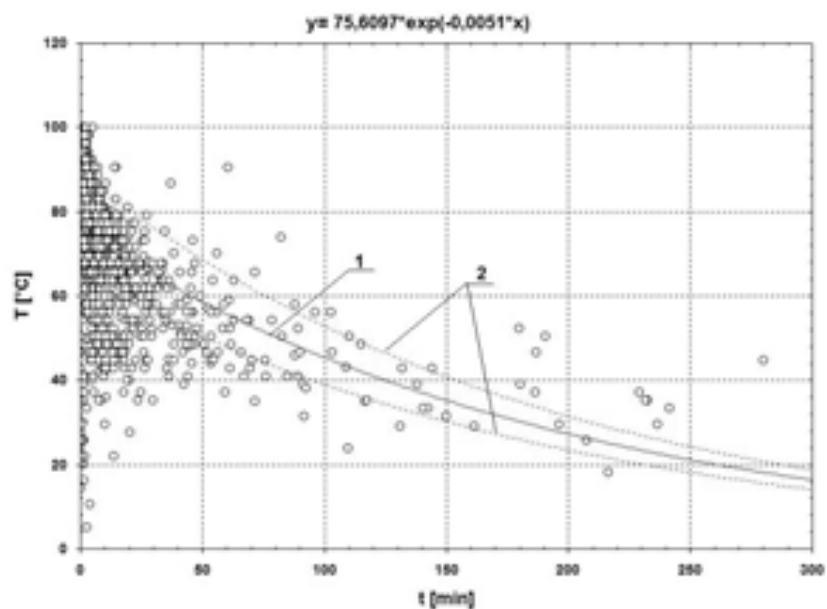
Zaprezentowane wyniki przeprowadzonych badań wskazują na dobrą organizację prac załadunkowo-wyładunkowych w poszczególnych punktach dowozu przesyłek pocztowych. W systemie transportu Poczty Polskiej dąży się do minimalizowania postojów pojazdów w poszczególnych punktach przewozu. Dłuższe wartości czasów postoju samochodów z wyłączonym silnikiem zaprezentowane na rysunkach 4.7 oraz Z2.7 wynikają z przepisów regulujących dzienny czas pracy kierowcy oraz z czynności wykonywanych na terenie bazy transportowej (mycie, tankowanie pojazdu itd.).

W trakcie użytkowania pojazdu występuje zależność pomiędzy długością czasu przerw w działaniu silnika a temperaturą silnika w chwili jego rozruchu. W miarę wydłużenia się czasu postoju samochodu obserwuje się zmniejszanie się wartości temperatury rozruchu silnika. Potwierdza to wartość współczynnika korelacji pomiędzy tymi parametrami który wynosi  $r = -0,55$  (poziom istotności  $p = 0,001$ ) oraz rysunek 4.8, na którym przedstawiono wykres rozrzutu dla tych zmiennych oraz wykładniczą krzywą regresji opisującą zależność funkcyjną pomiędzy czasem postoju silnika a temperaturą jego rozruchu.

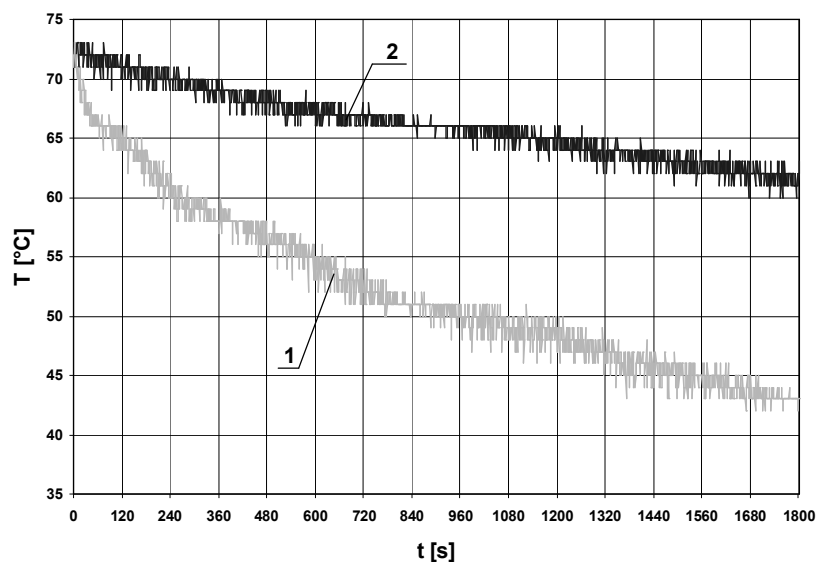
Analizując wykres z rysunku 4.8 należy zauważyć występowanie dużego „rozproszenia” wartości temperatur rozruchu w zakresie czasów postoju samochodu z wyłączonym silnikiem trwających do około 30 minut.

To „rozrzucenie” wartości temperatur rozruchu silnika wynika z wpływu jaki wywierają zewnętrzne warunki atmosferyczne na prędkość spadku temperatury silnika. Na przykład, w okresie występowania niskich temperatur otoczenia (okres jesienno-zimowy) obserwuje się większą szybkość zmian temperatury badanego silnika 4CT90. Przedstawia to wykres na rysunku 4.9.

Także w czasie badań w warunkach „nadzorowanego” użytkowania pojazdów występuje spadek temperatury rozruchu w miarę czasu trwania ich postojów z wyłączonymi silnikami. Potwierdzają to wartości współczynników korelacji zaprezentowane w załączniku nr 3 oraz wykresy znajdujące się na rysunku Z2.8.

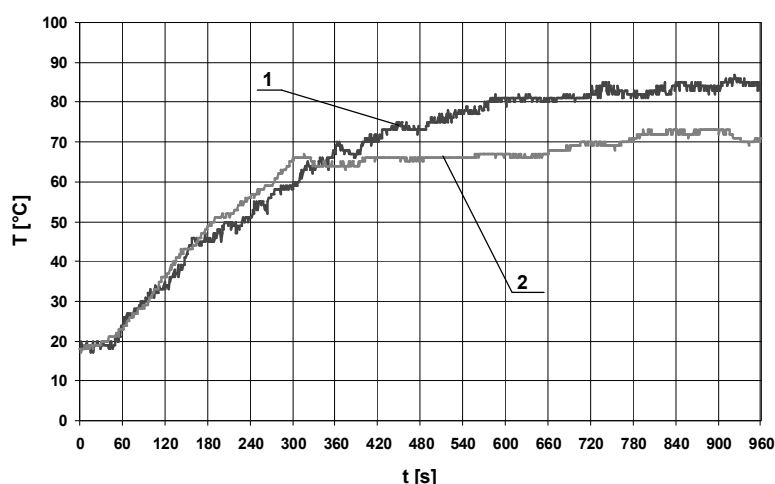


Rys. 4.8. Wykres rozrzutu dla czasu  $t$  postoju samochodu LUBLIN z wyłączonym silnikiem oraz temperatury  $T$  rozruchu silnika 4CT90; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji



Rys. 4.9. Przebieg zmian temperatury  $T$  silnika 4CT90 podczas trwania postoju samochodu LUBLIN; 1 – dzień zimowy, 2 – dzień letni

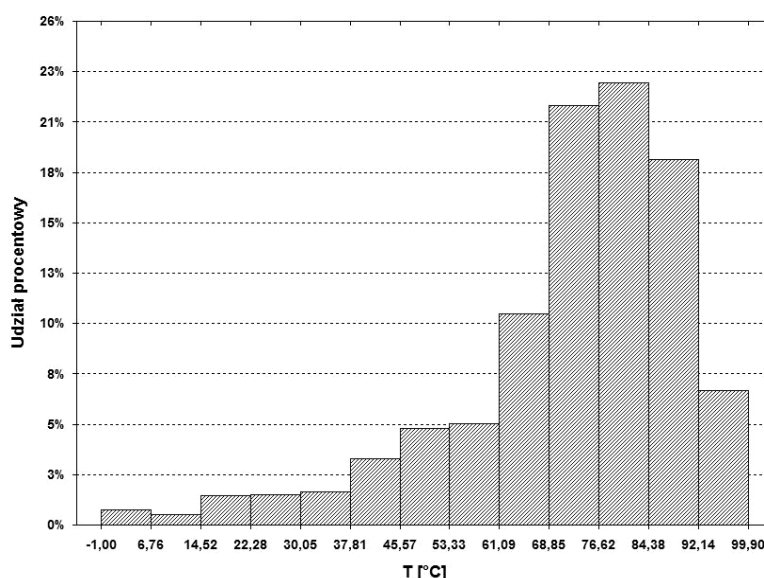
Ze względu na emisję składników toksycznych spalin oraz procesy tribologiczne zachodzące w zespole TPC wymagane jest, aby silnik spalinowy podczas działania uzyskał jak najszybciej „stabilne” warunki termodynamiczne. Dla badanych silników czas „stabilizacji” temperatury płynu chłodzącego oraz oleju silnikowego występuje po około 10 minutach nieprzerwanego działania. Ilustruje to rysunek 4.10 na którym pokazano przebieg zmian temperatury płynu chłodzącego oraz temperatury oleju smarującego silnika 4CT90. Na rysunku 4.10 należy zwrócić uwagę na występujące różnice w wartości „stabilizacji” temperatur. Wartość temperatury oleju silnikowego stabilizuje się na niższym poziomie niż temperatura płynu chłodzącego silnik. Podyktowane jest to lepszym chłodzeniem podczas jazdy miski olejowej silnika.



Rys. 4.10. Przebieg zmian temperatury  $T$  płynu chłodzącego oraz oleju silnikowego podczas działania silnika 4CT90; 1 – płyn chłodzący, 2 – olej silnikowy

Organizacja tras przejazdów samochodów LUBLIN w systemie transportu Poczty Polskiej zakłada występowanie na początku każdego dnia ich użytkowania odcinka drogi wynoszącego około 6 km. W trakcie jego pokonywania czas nieprzerwanej pracy silników spalinowych przekracza 8 minut. Umożliwia to uzyskanie przez płyn chłodzący i olej silnikowy wysokich temperatur oraz w zależności od warunków atmosferycznych „stabilizację” ich wartości. Trwający następnie postój samochodu z wyłączonym silnikiem jest stosunkowo krótki (około 2 min), co powoduje nieznaczny spadek wymienionych temperatur. W trakcie działania silnika, po kolejnym jego rozruchu, dochodzi już do stabilizacji wartości temperatur dla płynu chłodzącego oraz oleju silnikowego.

Założony na początku dnia użytkowania pojazdu sposób organizacji przejazdów wraz z występowaniem krótkich postojów z wyłączonym silnikiem powoduje obecność dużej liczby (ponad 81%) gorących rozruchów, w których temperatura płynu chłodzącego i oleju silnikowego przekracza 60 °C. Ilustruje to rysunek 4.11, na którym przedstawiono rozkład statystyczny temperatury silnika w chwili jego rozruchu.

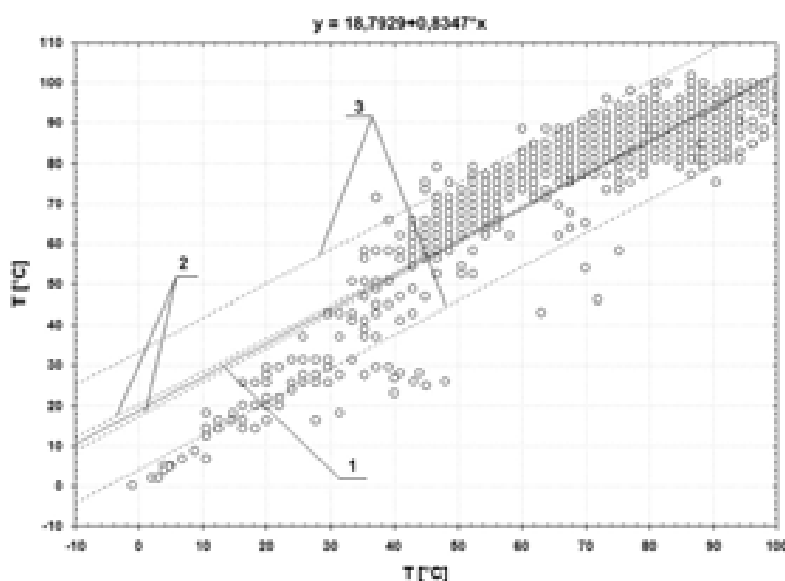


Rys. 4.11. Rozkład statystyczny temperatury silnika 4CT90 w chwili jego rozruchu dla pojazdu LUBLIN

Analizując wykres z rysunku 4.11 należy stwierdzić, że rozruchy przy umownej temperaturze silnika zawierającej się w granicach (20 ÷ 60) °C stanowią około 17% zarejestrowanych przypadków. Rozruchy, przy umownej temperaturze silnika zawierającej się w granicach (0 ÷ 20) °C stanowią w przybliżeniu 1,6%. Temperatury silnika w chwili rozruchu niższe niż 0 °C były obserwowane w około 0,4%. Taki mały udział jest wynikiem łagodnej zimy podczas przeprowadzania badań. Rozruchy przy umownej temperaturze zawierającej się w granicach (0 ÷ 20) °C oraz poniżej 0 °C są związane z pierwszymi dziennymi rozruchami silnika 4CT90. Także wartości temperatur rozruchu silników badanych w warunkach „kontrolowanych” w przeważającej mierze przekraczają 60 °C. Ilustrują to rozkłady zaprezentowane na rysunku Z2.9.



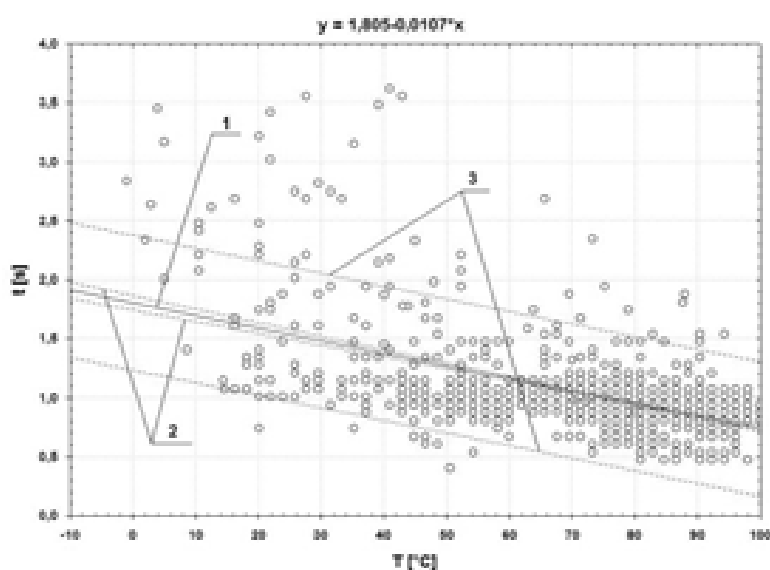
Istnieje silny związek pomiędzy wartością temperatury oleju silnikowego a wartością temperatury silnika w chwili jego rozruchu, co pokazuje wykres rozrzutu na rysunku 4.12. Na wykresie tym poprowadzono także prostą regresji wraz z 95% przedziałami ufności prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.



Rys. 4.12. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika 4CT90 oraz temperatury  $T$  oleju silnikowego (oś  $y$ ) w chwili rozruchu; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 4.12 ma średni błąd losowy równy 0,02% (dla poziomu istotności  $p = 0,001$ ), przy czym wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 83,586. Błąd losowy wyrazu wolnego wynosi 0,96% (poziom istotności  $p = 0,001$ ), zaś wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-5,255$ . Wartość współczynnika determinacji równa się  $r^2 = 0,8171$ . Współczynnik korelacji liniowej wynosi  $r = 0,90$ . Poziom istotności wymienionych współczynników wynosi  $p = 0,001$ . Także wykresy rozrzutu dla temperatury rozruchu oraz temperatury oleju silnikowego w chwili rozruchu, uzyskane podczas badań w warunkach „kontrolowanych”, zaprezentowane na rysunku Z2.10 wykazują podobne zależności pomiędzy tymi parametrami „widma rozruchu”.

Temperatura silnika w chwili rozruchu oddziałuje na kolejny parametr „widma rozruchu” – czas trwania rozruchu silnika. Wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy tymi dwoma parametrami wynosi  $r = -0,55$  (poziom istotności  $p = 0,001$ ). Na rysunku 4.13 zaprezentowano wykres rozrzutu temperatury silnika w chwili rozruchu oraz czasu jego trwania. Na wykresie tym poprowadzono także prostą regresji wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.



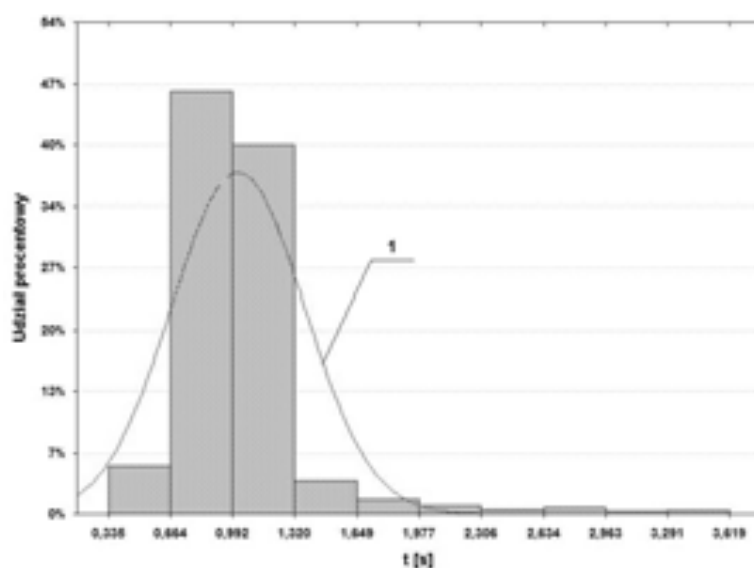
Rys. 4.13. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika w chwili rozruchu oraz czasu  $t$  rozruchu silnika 4CT90; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

Występujące na rysunku 4.13 rozproszenie wyników jest spowodowane utrudnionymi warunkami tworzenia i spalania mieszanki palnej oraz wzrostu wartości rozruchowego momentu oporowego podczas pierwszych dziennych rozruchów silnika 4CT90. Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 4.13 charakteryzuje się średnim błędem losowym 1,22%, wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 84,382. Błąd losowy wyrazu wolnego równa się 1,14%, zaś wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-25,498$ . Współczynnik determinacji równy jest  $r^2 = 0,3060$ . Poziom istotności wymienionych współczynników wynosi  $p = 0,001$ . Przedstawione wyniki analiz wskazują na wzrost wartości czasu rozruchu w miarę spadku temperatury silnika w chwili jego wystąpienia.

Wykresy rozrzutu z rysunku Z2.11, opracowane na podstawie badań „nadzorowanych”, wykazują na podobną zależność pomiędzy czasem trwania rozruchu a temperaturą silnika w chwili jego wystąpienia. Wartości współczynników korelacji liniowej uzyskane podczas badań „kontrolowanych” (obliczone na poziomie istotności  $p \leq 0,05$ ) zaprezentowane w macierzach załącznika nr 3 wskazują na wzrost wartości czasu rozruchu w miarę spadku temperatury silnika.

Analizowane współczynniki korelacji liniowej pomiędzy czasem trwania rozruchu a temperaturą silnika w chwili jego wystąpienia, obliczone na podstawie wyników badań „nadzorowanych”, charakteryzują się jednak mniejszymi wartościami niż wartość tego współczynnika wyliczona na podstawie badań w warunkach „naturalnych”. Wynika to z tego, że podczas badań w warunkach „kontrolowanych” czas rozruchu określono, zgodnie z procedurą opisaną w normach [123, 124], jako czas pracy rozrusznika pod obciążeniem. Wskazuje to na poprawność przyjętej w niniejszej rozprawie definicji rozruchu silnika spalinowego.

Na rysunku 4.14 zaprezentowano rozkład statystyczny czasu rozruchu badanego silnika 4CT90 podczas badań w warunkach „długotrwałego” użytkowania pojazdu LUBLIN.



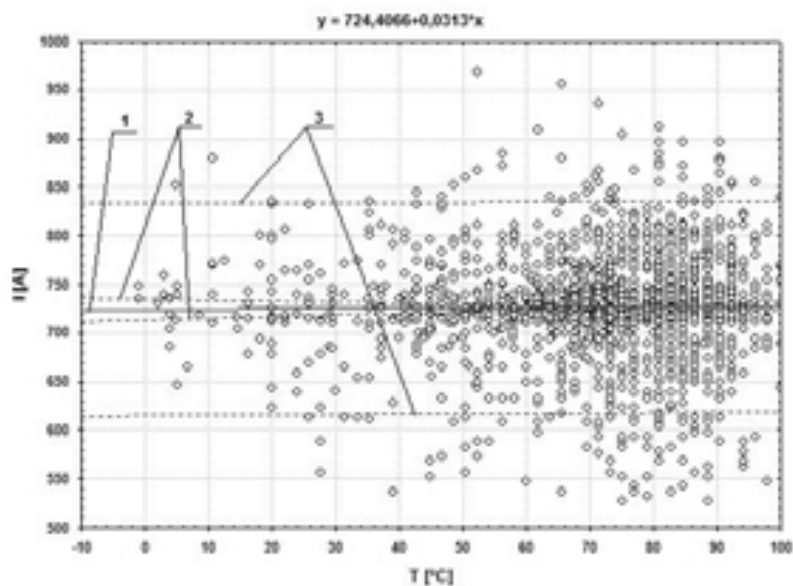
Rys. 4.14. Rozkład statystyczny czasu  $t$  trwania rozruchu silnika 4CT90; 1 – funkcja gęstości rozkładu wartości ekstremalnych dopasowana (poziom istotności  $p < 0,01$ ) do danych empirycznych o parametrach położenia: 0,8923 i skali: 0,2152

Analizując histogram z rysunku 4.14 należy zwrócić uwagę na występowanie czasów rozruchów trwających powyżej 1,5 s. Są to czasy trwania pierwszych dziennych rozruchów badanego silnika. Także zaprezentowane rozkłady na rysunku Z2.12 wskazują, że pierwsze dzienne rozruchy stanowią odrębną klasę w zbiorze rozruchów silników spalinowych. Odrębność ta jest szczególnie widoczna podczas analizy statystycznej parametrów „widma rozruchu” związanych z działaniem rozrusznika elektrycznego podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego. Zostanie to szczegółowo omówione w następnym podrozdziale monografii.

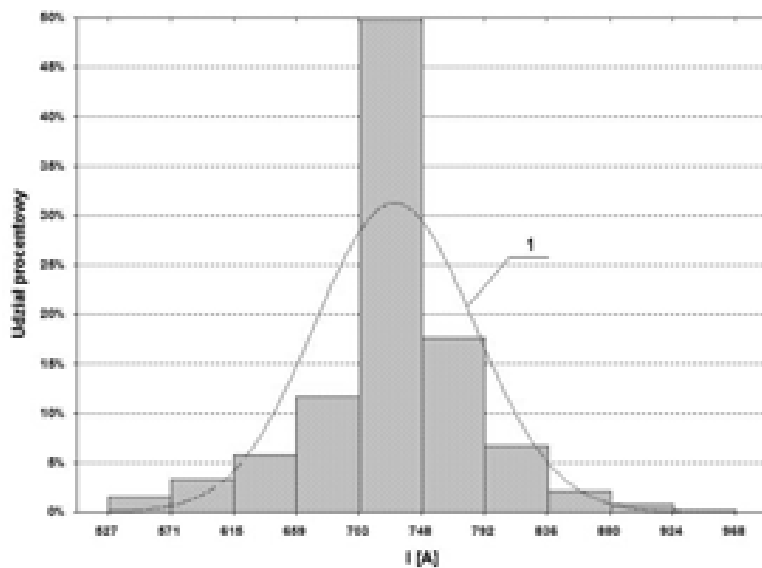
#### **4.4. Wpływ stanu cieplnego silnika o zapłonie samoczynnym na parametry „widma rozruchu” charakteryzujące działanie jego rozrusznika elektrycznego**

Przeprowadzone przez autora przebiegowe badania w warunkach „naturalnego” oraz „kontrolowanego” użytkowania pojazdów LUBLIN wykazały istnienie zależności pomiędzy stanem cieplnym w chwili rozruchu silników 4CT90 a parametrami „widma rozruchu” związanymi z działaniem rozrusznika elektrycznego. Stwierdzono jednakże, że nie obserwuje się wpływu stanu cieplnego na wartość maksymalnego prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu. Wyrazem tego są wartości współczynników korelacji liniowej pomiędzy temperaturą silnika i oleju silnikowego w chwili rozruchu a maksymalnym natężeniem prądu. Dla temperatury silnika współczynnik korelacji liniowej wynosi  $r=0,23$ , zaś dla temperatury oleju silnikowego  $r=0,25$  (poziom istotności obydwu współczynników wynosi  $p = 0,001$ ) [38]. Na rysunku 4.15 zaprezentowano wykres rozrzutu dla maksymalnego natężenia prądu pobieranego na początku rozruchu silnika 4CT90 opracowany na podstawie badań „naturalnego” użytkowania pojazdu. Na rysunku 4.15 poprowadzono także prostą regresji wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.

Brak zależności pomiędzy stanem cieplnym silnika w czasie rozruchu a wartością maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu ilustrują także wykresy rozrzutu z rysunku Z2.13 załącznika nr 2 oraz wartości współczynników korelacji liniowej zaprezentowane w macierzach załącznika nr 3.

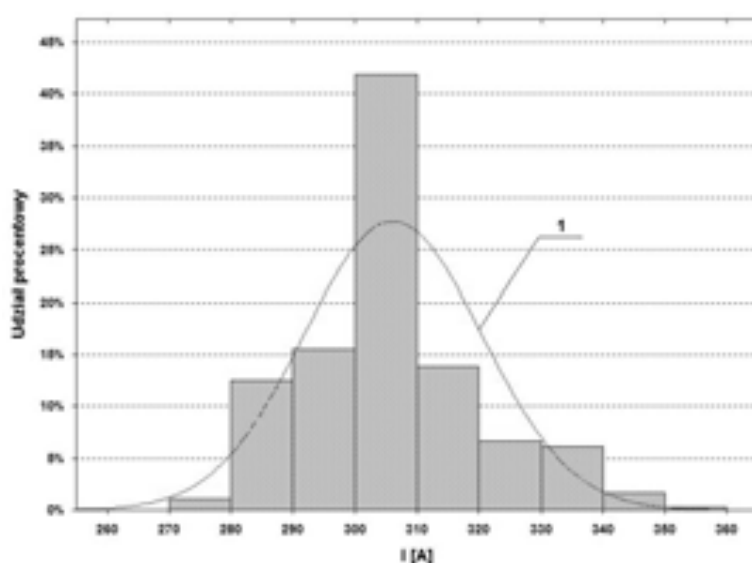


Rys. 4.15. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika w chwili rozruchu oraz maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika 4CT90; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



Rys. 4.15. Rozkład statystyczny wartości maksymalnego natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika 4CT90; 1 – dopasowanie rozkładem normalnym [38]

Rozkład statystyczny wartości maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu opracowany na podstawie analizy wyników badań „długotrwałych” zaprezentowano na rysunku 4.16, przy czym zastosowano dopasowanie rozkładem normalnym. Także rozkłady statystyczne tego parametru uzyskane z badań w warunkach „nadzorowanego” użytkowania pojazdów przedstawione na rysunku Z2.14 dopasowano rozkładem normalnym. Poziom istotności dopasowania wynosi  $p \leq 0,05$ .

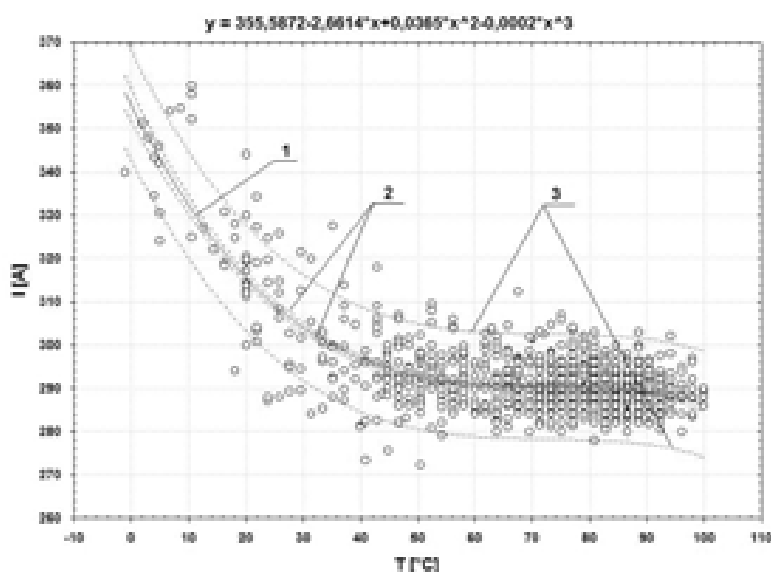


Rys. 4.16. Rozkład statystyczny wartości natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik podczas uruchamiania silnika 4CT90; 1 – dopasowanie rozkładem normalnym

Po ruszeniu z miejsca wału korbowego silnika spalinowego wartość natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik spada (zob. rys. 1.2). Występujący następnie przebieg zmian wartości natężenia prądu wynika z kinematyki ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka oraz zmieniającego się podczas sprężania i rozprężania ładunku ciśnienia w cylindrach. Rozkład wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas uruchamiania silnika przedstawiono na rysunku 4.16. Zastosowano także dopasowanie rozkładem normalnym. Rozkłady statystyczne tego parametru uzyskane z badań w warunkach „nadzorowanego” użytkowania pojazdów, przedstawione na rysunku Z2.15 w załączniku nr 2, przybliżono rozkładem normalnym na poziomie istotności  $p \leq 0,05$ .

Analizując omawiane rysunki 4.16 i Z2.15 oraz wartości oczekiwane zaprezentowane w tabelach Z1.1-Z1.5 należy zauważyć, że wartość średnia „prądu rozruchu” jest ponad dwa razy mniejsza od wartości średniej maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu badanych silników 4CT90. Wskazuje to na znaczne zmniejszenie się rozruchowego momentu oporowego względem momentu oporu sił tarcia statycznego silnika spalinowego.

Stwierdzono, że występuje zależność pomiędzy stanem cieplnym silnika w chwili rozruchu a wartością „prądu rozruchu”. Wyrazem tego jest wykres rozrzutu z rysunku 4.17 na którym przedstawiono krzywą regresji wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.



Rys. 4.18. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika w chwili rozruchu oraz natężenia  $I$  prądu podczas uruchamiania silnika 4CT90; 1 – krzywa regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej pojedynczej obserwacji [38]

Wyraz wolny krzywej regresji zaprezentowanej na rysunku 4.16 ma średni błąd losowy równy 1,93%, wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 184,667. Błąd losowy parametru występującego przy pierwszej potęgze równa się 0,13%, zaś

wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-21,0009$ . Wartość średniego błędu losowego parametru związanego z drugą potęgą wynosi  $0,01\%$ , przy czym wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $14,530$ . Błąd losowy parametru trzeciej potęgi równa się  $0,001\%$ , wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-11,135$ . Udział wariancji wyjaśnianej przyjętym modelem regresji wynosi  $0,6201$ . Wartość wskaźnika korelacji nieliniowej Pearsona [72] wynosi  $e = 0,7874$ . Poziom istotności dla zaprezentowanych współczynników i wskaźnika korelacji nieliniowej wynosi  $p = 0,001$ .

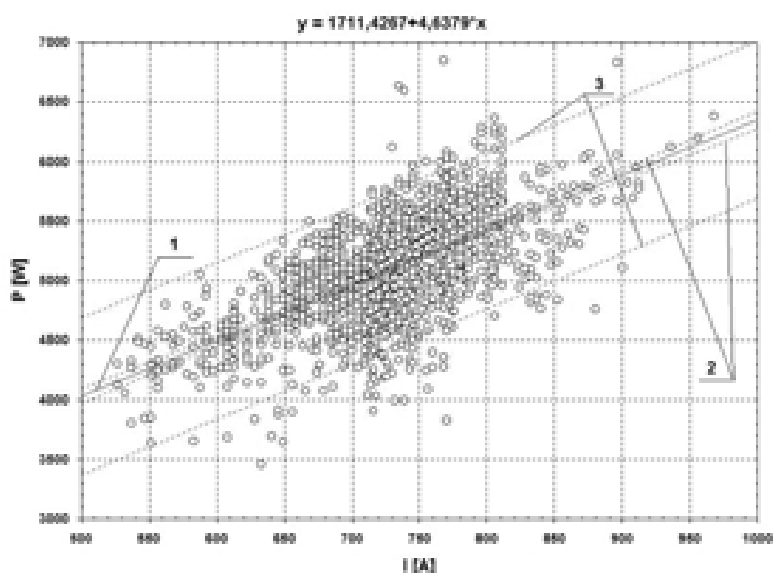
Wyniki te wskazują, że następuje wzrost średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas uruchamiania silnika, w miarę spadku temperatury silnika. Także wykresy rozrzutu z rysunku Z2.16 wskazują na występowanie zależności pomiędzy wartością „prądu rozruchu” a stanem cieplnym silnika spalinowego w chwili rozruchu. Należy w tym miejscu zauważyć, że wpływ na tę zależność mają pierwsze dzienne rozruchy silnika spalinowego. Potwierdza to odrębność tych rozruchów względem innych występujących podczas dnia użytkowania pojazdu.

Istnieje, co jest oczywiste, związek pomiędzy dwoma parametrami elektrycznymi „widma rozruchu” jakimi są natężenie prądu oraz moc pobierana przez rozrusznik. Wartość współczynnika korelacji liniowej dla wartości maksymalnego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika 4CT90 i odpowiadającej mu mocy elektrycznej rozwijanej przez rozrusznik wynosi  $r = 0,61$ , zaś dla wartości średniej „prądu rozruchu” podczas uruchamiania silnika i odpowiadającej jemu mocy elektrycznej rozrusznika  $r = 0,81$ . Poziom istotności obydwu współczynników korelacji liniowej wynosi  $p = 0,001$ . Występujące związki ilustrują wykresy rozrzutu zaprezentowane na rysunku 4.19. Na wykresach tych poprowadzono prostą regresji wraz z  $95\%$  przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.

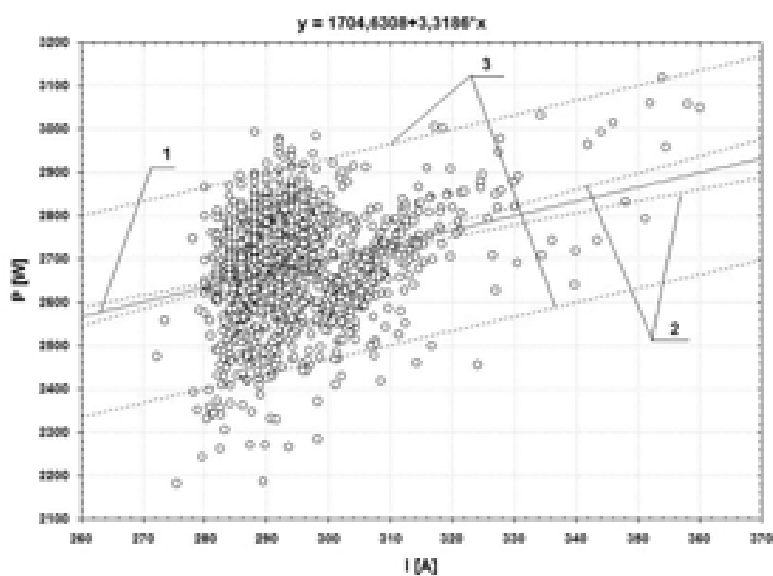
Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 4.19a charakteryzuje się średnim błędem losowym  $41,04\%$ , wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-5,424$ . Błąd losowy wyrazu wolnego równa się  $6,25\%$ , wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $13,850$ . Współczynnik determinacji wynosi  $r^2 = 0,3365$ . Poziom istotności tych współczynników wynosi  $p = 0,001$ .



a)



b)

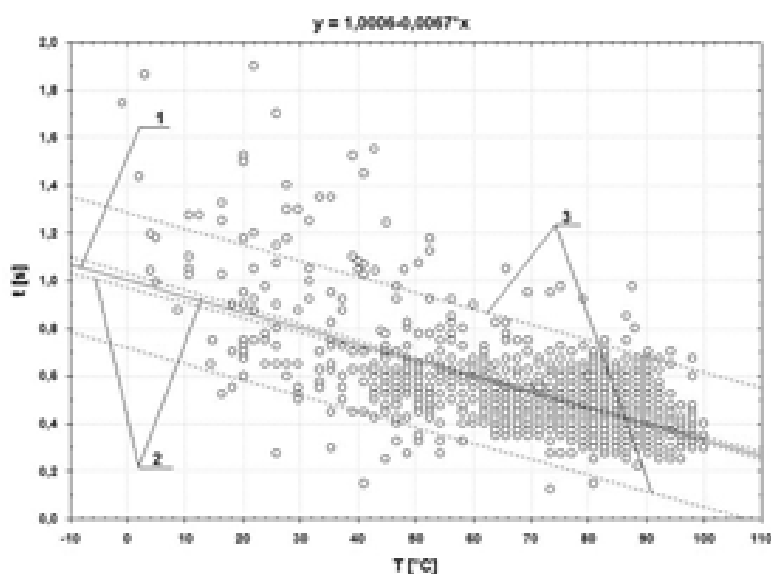


Rys. 4.19. Wykres rozrzutu dla: a) maksymalnego natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika 4CT90 oraz odpowiadającej mu mocy  $P$  elektrycznej, b) natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas uruchamiania silnika 4CT90 oraz odpowiadającej mu mocy  $P$  elektrycznej; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

Dla prostej regresji z rysunku 4.19b współczynnik kierunkowy ma średni błąd losowy 0,0254%, wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 10,984. Błąd losowy wyrazu wolnego ma wartość 6,20 %, przy czym wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 36,578. Współczynnik determinacji wynosi  $r^2 = 0,7396$ . Poziom istotności współczynników wynosi  $p = 0,001$ .

Zależności pomiędzy analizowanymi parametrami elektrycznymi „widma rozruchu” związanymi z działaniem rozrusznika obserwuje się także w trakcie badań w warunkach „nadzorowanego” użytkowania pojazdów. Potwierdzeniem tego są wartości współczynników korelacji liniowej zaprezentowane w macierzach załącznika nr 3 oraz wykresy rozrzutu z rysunków Z2.17 i Z2.18.

Istnieje związek pomiędzy temperaturą rozruchu silnika a czasem przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika. Wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy tymi parametrami równa się  $r = -0,65$  (poziom istotności  $p = 0,001$ ). Wartość tego współczynnika wskazuje na to, że w miarę spadku wartości temperatury rozruchu silnika wydłuża się czas kiedy kierowca pojazdu zwiera układ elektryczny rozrusznika. Wykres rozrzutu z rysunku 4.20 ilustruje tę zależność.



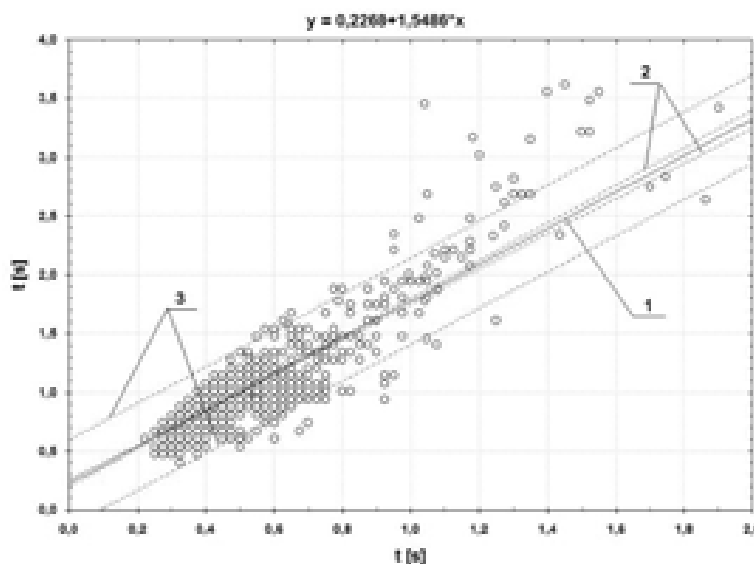
Rys. 4.20. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika w chwili rozruchu oraz czasu  $t$  przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika podczas rozruchu silnika 4CT90; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

Na rysunku tym poprowadzono także prostą regresji wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 4.20 ma średni błąd losowy równy 1,93%, wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-32,8404$ . Błąd losowy wyrazu wolnego wynosi 1,05%, zaś wartość statystyki  $t$ -Studenta  $t = 100,929$ . Wartość współczynnika determinacji wynosi  $r^2 = 0,4123$ . Poziom istotności wymienionych współczynników równa się  $p = 0,001$ .

Wyniki badań w warunkach „kontrolowanych” wykazują także wpływ stanu cieplnego na czas przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika w czasie rozruchu silników 4CT90. Potwierdzeniem tego są wartości współczynników korelacji liniowej zaprezentowane w macierzach w załączniku nr 3 oraz wykresy rozrzutu z rysunku Z2.19.

Czas przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika podczas rozruchu silnika jest także liniowo powiązany z czasem jego trwania. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji liniowej wynosząca  $r = 0,83$ , przy czym poziom istotności tego współczynnika wynosi  $p = 0,001$ . Zależność tą ilustruje wykres rozrzutu z rysunku 4.21.



Rys. 4.21. Wykres rozrzutu czasu  $t$  przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika podczas rozruchu oraz czasu  $t$  rozruchu (oś  $y$ ) silnika 4CT90; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

Średni błąd losowy współczynnika kierunkowego prostej regresji z rysunku 4.21 ma wartość 0,01%, statystyka  $t$ -Studenta wynosi 57,254. Błąd losowy wyrazu wolnego równa się 0,06%, zaś wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 6,6261. Współczynnik determinacji równa się  $r^2 = 0,6881$ . Poziom istotności wymienionych współczynników wynosi  $p = 0,001$ . Wyniki badań w warunkach „kontrolowanych” pokazują także wpływ stanu cieplnego na czas przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika w czasie rozruchu silników 4CT90. Potwierdzeniem tego są wartości współczynników korelacji liniowej zaprezentowane w macierzach załącznika nr 3 oraz wykresy rozrzutu z rysunku Z2.20.

#### **4.5. Złożone analizy wyników badań parametrów „widma rozruchu” silnika o zapłonie samoczynnym**

##### **4.5.1. Analiza kanoniczna**

W celu sprawdzenia istnienia związków wewnętrznych w zbiorze parametrów „widma rozruchu” wyróżniono dwa podzbiory. Pierwszy podzbiór tworzą parametry związane z warunkami użytkowania pojazdu:

- $X_{tpra}$  – czas działania silnika przed kolejnym rozruchem,
- $X_{tpos}$  – czas postoju samochodu z wyłączonym silnikiem przed rozruchem,
- $X_{ltd}$  – droga tłoka silnika przed kolejnym rozruchem,
- $X_{lpoj}$  – droga wykonana przez pojazd przed kolejnym rozruchem silnika,
- $X_{tpl}$  – temperatura silnika (płynu chłodzącego) w chwili rozruchu,
- $X_{Tol}$  – temperatura oleju silnikowego w chwili rozruchu,

Drugi podzbiór tworzą pozostałe parametry „widma rozruchu”, związane z działaniem rozrusznika elektrycznego podczas rozruchu silnika 4CT90, a także z czasem trwania rozruchu:

- $X_{Imax}$  – maksymalna wartość prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika,
- $X_{Umax}$  – napięcie przy maksymalnym natężeniu prądu,
- $X_{Pmax}$  – moc elektryczna przy maksymalnym natężeniu prądu,
- $X_{Isr}$  – średnie natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego,
- $X_{Usr}$  – napięcie podczas napędzania wału korbowego silnika,
- $X_{Psr}$  – moc elektryczna podczas napędzania wału korbowego silnika,
- $X_{tprzył}$  – czas przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika,
- $X_{troz}$  – czas rozruchu silnika.

W celu porównania obydwu wyróżnionych podzbiorów przeprowadzono dla badanych silników 4CT90 pojazdów LUBLIN analizę kanoniczną [19]. Układy kanoniczne dla tak przyjętych zbiorów mają następującą postać:

$$\begin{cases} U_i = a \cdot \dot{X}_{tpra} + b \cdot \dot{X}_{tpos} + c \cdot \dot{X}_{ltl} + d \cdot \dot{X}_{lpoj} + e \cdot \dot{X}_{Tpt} + f \cdot \dot{X}_{Tol} \\ V_i = k \cdot \dot{X}_{Imax} + l \cdot \dot{X}_{Umax} + m \cdot \dot{X}_{Pmax} + n \cdot \dot{X}_{Isr} + o \cdot \dot{X}_{Usr} + p \cdot \dot{X}_{Psr} + r \cdot \dot{X}_{tprzyl} + s \cdot \dot{X}_{troz} \end{cases}$$

Dla wyników uzyskanych podczas badań „naturalnego” użytkowania pojazdu stwierdzono na 95% poziomie ufności, że tylko dla pierwszych czterech pierwiastków kanonicznych (z możliwych sześciu) układ zmiennych kanonicznych charakteryzuje się korelacją kanoniczną istotnie różną od zera. Wyniki obliczeń współczynników korelacji kanonicznej uzyskanych na podstawie badań „długotrwałych” przedstawiono w tabeli Z4.1 Należy zauważyć, że pierwszy pierwiastek kanoniczny bardzo dobrze opisuje występującą zależność kanoniczną pomiędzy dwoma analizowanymi podzbiorami parametrów „widma rozruchu”.

Przedstawione w tabeli Z4.2 wartości współczynników pierwszego układu zmiennych kanonicznych wykazują, że decydujący wpływ w podzbiorze wskaźników charakteryzujących pracę pojazdu LUBLIN i działania silnika mają w kolejności następujące parametry: temperatura oleju w chwili rozruchu  $X_{Tol}$ , droga tłoka  $X_{ltl}$  i droga pojazdu  $X_{lpoj}$  wykonana pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika. Dla podzbioru parametrów charakteryzujących rozruch decydujący wkład mają parametry elektryczne podczas uruchamiania silnika: moc  $X_{Psr}$ , napięcie  $X_{Usr}$  oraz „prąd rozruchu”  $X_{Isr}$ .

Dla drugiego możliwego do stosowania układu zmiennych kanonicznych parametrami decydującymi w podzbiorze wskaźników charakteryzujących pracę pojazdu LUBLIN i działanie silnika są: droga tłoka  $X_{ltl}$  wykonana pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika, droga pojazdu  $X_{lpoj}$ , czas działania silnika  $X_{tpra}$  oraz temperatura silnika w chwili rozruchu  $X_{Tpt}$ . W podzbiorze parametrów rozruchu drugiego układu zmiennych kanonicznych decydujący wpływ odgrywają te same, co w pierwszym układzie zmiennych kanonicznych, parametry elektryczne związane z pracą rozrusznika.

Wariancja wyodrębniona, dla pierwszego pierwiastka kanonicznego, w pierwszym podzbiorze parametrów „widma rozruchu” wynosi 100%. Świadczy to o tym, że pierwiastek ten wyjaśnia w całości zmienność wewnątrz

tego podzbioru danych. Całkowita redundancja dla podzbioru pierwszego określająca, ile zmienności wewnątrzgrupowej wyjaśnione jest przez drugi podzbiór parametrów, wynosi 23,57%. Dla pierwszego pierwiastka kanonicznego wariancja wyodrębniona w drugim podzbiorze danych wynosi 90,30%. Świadczy to o właściwym doborze zmiennych do wyróżnionych podzbiorów. Całkowita redundancja dla podzbioru drugiego określająca, ile zmienności wewnątrzgrupowej wyjaśnione jest przez pierwszy podzbiór parametrów „widma rozruchu”, wynosi 26,69%.

Także przy wyłączeniu z analizy kanonicznej parametrów „widma rozruchu”, które są ze sobą silnie skorelowane (zob. macierz współczynników korelacji liniowej w załączniku nr 3) stwierdzono występowanie zależności pomiędzy analizowanymi podzbiorami zmiennych. Potwierdzeniem tych zależności są wyniki trzech analiz różnych podzbiorów zaprezentowane w tabeli Z4.3. Wartość poziomu istotności dla obliczonych współczynników korelacji kanonicznej wynosi  $p=0,001$ .

Przy wyłączeniu z analizy kanonicznej skorelowanych ze sobą parametrów „widma rozruchu” stwierdza się, że wartości współczynników korelacji kanonicznej zmniejszają się o około 20%. To w połączeniu z wynikami całkowitej redundancji dla przeprowadzonych analiz kanonicznych rezultatów badań „naturalnego” użytkowania pojazdu wskazuje na zbyt małą liczbę wyróżnionych parametrów wykorzystywanych do opisu rozruchu silnika spalinowego, a także na wewnętrzną złożoność tego procesu [19].

Dla wyników badań w warunkach „kontrolowanych” stwierdzono, że wartość prawdopodobieństwa tylko dwóch pierwszych współczynników korelacji kanonicznej (dla 4 badanych pojazdów) nie przekracza poziomu istotności  $p<0,05$ . Wartości tych współczynników zaprezentowano w tabeli Z4.4. Tabele Z4.5 i Z4.6 przedstawiają wartości współczynników tych pierwiastków kanonicznych. Porównanie wyników analiz kanonicznych badań „kontrolowanych” wskazuje na występowanie podobnych zależności statystycznych pomiędzy analizowanymi podzbiorami parametrów „widma rozruchu”. Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy kanonicznej można potwierdzić fakt, że decydujący wpływ na rozruch ma przede wszystkim temperatura rozruchu silnika.

#### 4.5.2. Analiza statystyczna z wykorzystaniem sieci neuronowych

Sztuczne sieci neuronowe wykorzystano do opracowania zagadnień regresji parametrów „widma rozruchu” oraz „temperaturowej” klasyfikacji rozruchów [108].

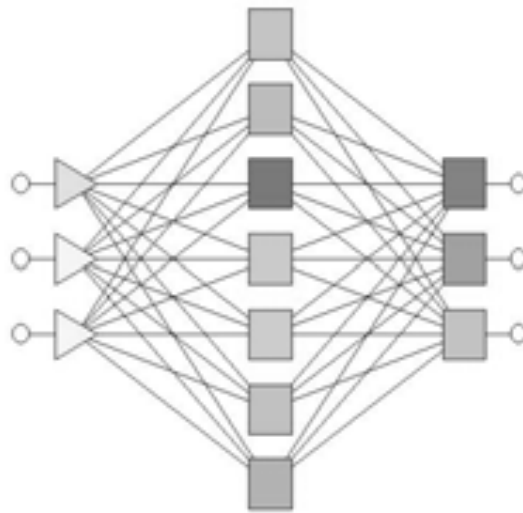
W analizie regresji wyróżnionych parametrów „widma rozruchu” silników 4CT90 pojazdów LUBLIN przyjęto, że zbiór zmiennych wejściowych do sieci neuronowej tworzą (podobnie jak w przeprowadzonej wcześniej analizie kanonicznej) parametry „widma rozruchu” związane z pracą oraz działaniem pojazdu LUBLIN i jego silnika. Zbiór zmiennych wyjściowych tworzą pozostałe parametry „widma rozruchu”, które są związane z rozruchem badanego silnika 4CT90. Wyniki przeprowadzonej analizy z użyciem sieci neuronowych z pojedynczą warstwą ukrytą przedstawiono w tabeli Z4.7.

Dla samochodu poddanego badaniom w warunkach „długotrwałego” użytkowania (oznaczonego w tabelach Z4.7-Z4.8 jako pojazd 0) oraz pojazdów 1 i 2 uwzględnia się wszystkie zmienne wejściowe oraz wyjściowe. Największą rangą charakteryzuje się w tych sieciach zmienna  $X_{Tpt}$  związana z temperaturą silnika w chwili rozruchu. Kolejność pozostałych zmiennych to: czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem  $X_{tpos}$ , droga pojazdu  $X_{lpoj}$ , temperatura oleju w chwili rozruchu  $X_{Tol}$ , czas nieprzerwanego działania silnika oraz droga tłoka  $X_{ltt}$ . Dla pozostałych pojazdów 3 i 4 sieci neuronowe wyłączają z analizy czas postoju  $X_{tpos}$  oraz temperaturę oleju w chwili rozruchu  $X_{Tol}$ . Kolejność rang jest następująca: temperatura silnika  $X_{Tpt}$ , czas działania silnika  $X_{tpra}$ , droga tłoka  $X_{ltt}$  oraz droga pojazdu  $X_{lpoj}$ .

Jednakże wyniki przeprowadzonych analiz z wykorzystaniem sieci neuronowych o jednej warstwie ukrytej pokazane w tabeli Z4.7 wykazują, że dla wszystkich typów sieci wartość błędu testowania znacznie przekracza 95% poziom ufności.

W celu sprawdzenia czy brak zadawalającego rozwiązania problemu regresji przy wykorzystaniu sieci neuronowych z pojedynczą warstwą ukrytą wynikał z występujących współzależności, redundancji oraz wymiarowości dla zmiennych, ograniczono ich liczbę. Zbiór zmiennych wejściowych zawierał następujące parametry: czas nieprzerwanego działania  $X_{tpra}$ , czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem  $X_{tpos}$  oraz temperatura silnika w chwili rozruchu  $X_{Tpt}$ . Zbiór zmiennych wyjściowych obejmował zaś: „prąd rozruchu”  $X_{Isr}$ , czas przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika  $X_{lprzył}$  oraz czas rozruchu  $X_{troz}$ . Wyniki analizy dla ograniczonej liczby parametrów przedstawiono w tabeli Z4.8.

Wyniki przeprowadzonej analizy pokazane w tabeli Z4.8 wykazują również, że dla wszystkich testowanych typów sieci wartość błędu testowania przekracza 95% poziom ufności. W sieci typu MLP 3:3-7-3:3, która została wykorzystana do oceny regresji dla pojazdu poddanego badaniom w warunkach „naturalnych”, największą rangą charakteryzuje się zmienna związana z czasem postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem  $X_{tpos}$ . W następnej kolejności występuje czas pracy silnika  $X_{tpra}$  oraz jego temperatura w chwili rozruchu  $X_{tpl}$ . Na rysunku 4.22. przedstawiono sieć typu MLP 3:3-7-3:3 z pojedynczą warstwą ukrytą najlepiej opisującą problem regresji.



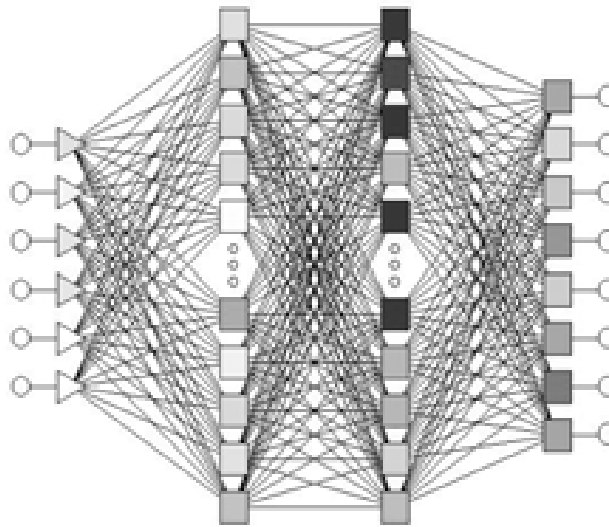
Rys. 4.22. Sieć neuronowa typu MLP 3:3-7-3:3; 3 wejścia oraz 3 wyjścia, 7 neuronów w pojedynczej warstwie ukrytej

Należy stwierdzić, że brak zadawalającego rozwiązania problemu regresji z wykorzystaniem sieci neuronowych o jednej warstwie ukrytej jest spowodowany nie tylko współzależnością, redundancją oraz wymiarowością występującą w zbiorze zmiennych, ale także tym, że sieci takie uniemożliwiają rozpoznania dowolnego podobszaru przestrzeni a jedynie obszary wypukłe oraz jednospójne ograniczone hiperpłaszczyznami (simpleksy).

Zastosowanie sieci neuronowych o dwóch warstwach ukrytych pozwala rozpoznać także obszary niewypukłe oraz niejednospójne przestrzeni błędu. Umożliwia to lepsze dopasowanie się sieci do analizowanych wyników podczas rozwiązywania zagadnienia regresji pomiędzy wejściowymi i wyjściowymi



podzbiórami wyróżnionymi ze zbioru parametrów „widma rozruchu”. Wyrazem tego są mniejsze wartości błędów testowania tych sieci przedstawione w tabeli Z4.7. Na przykład dla wyników badań pojazdu w warunkach „naturalnych” błąd testowania sieci typu MLP 6:6-13-12-8:8 wynosi 0,0916, co nie przekracza 90% poziomu ufności. Sieć tą przedstawiono na rysunku 4.23.

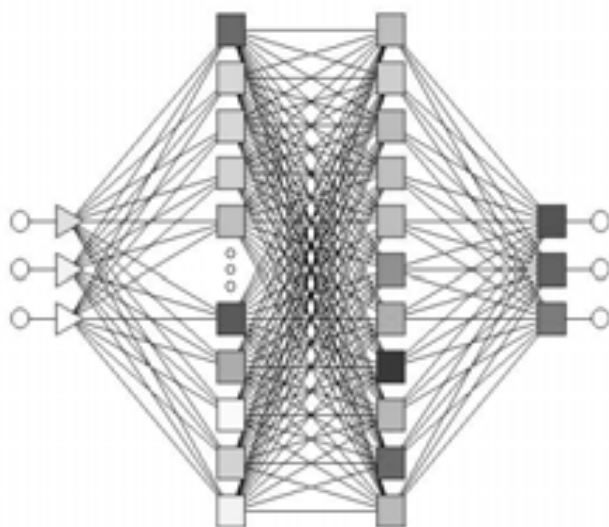


Rys. 4.23. Sieć neuronowa typu MLP 6:6-13-12-8:8; 6 wejścia oraz 8 wyjścia, 13 neuronów w pierwszej warstwie ukrytej i 12 neuronów w drugiej warstwie ukrytej

Dla sieci z rysunku 4.23. największą rangą charakteryzuje się zmienna związana z temperaturą silnika w chwili rozruchu  $X_{Tpt}$ . W następnej kolejności występują: temperatura oleju w chwili rozruchu  $X_{Tol}$ , czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem  $X_{tpos}$ , droga tłoka  $X_{lit}$ , czas pracy silnika  $X_{ipra}$ .

Także sieci z dwoma warstwami ukrytymi przy uwzględnieniu ograniczonego zbioru zmiennych wejściowych i wyjściowych wykazały zadawalające wyniki podczas rozwiązywania problemu regresji, co zaprezentowano w tabeli Z4.8. I tak dla pojazdu poddanego badaniom „długotrwałym” sieć MLP 3:3-12-11-3:3, zaprezentowana na rysunku 4.24. charakteryzuje się błędem testowania wynoszącym tylko 0,0823.

Kolejność rang parametrów dla tej sieci jest następująca: czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem  $X_{tpos}$ , czas pracy silnika  $X_{ipra}$  oraz temperatura silnika w chwili rozruchu  $X_{Tpt}$ .



Rys. 4.24. Sieć neuronowa typu MLP 3:3-12-11-3:3; 3 wejścia oraz 3 wyjścia, 12 neuronów w pierwszej warstwie ukrytej i 11 neuronów w drugiej warstwie ukrytej

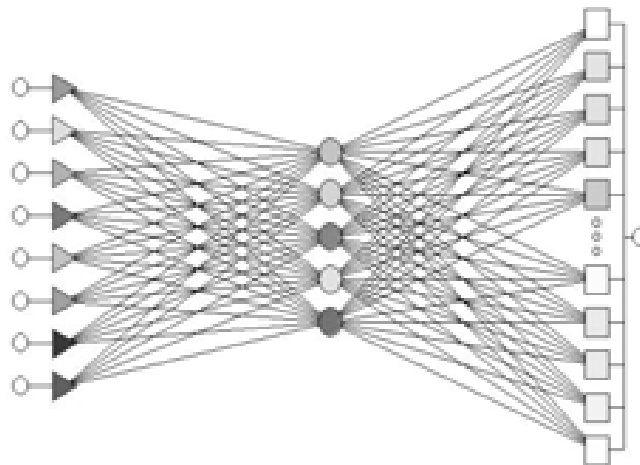
Należy zauważyć (zob. tabela Z4.8), że dla pojazdu 2 sieć neuronowa typu MLP 1:1-13-13-3:3 bierze pod uwagę podczas rozwiązywania problemu regresji tylko temperaturę silnika w chwili rozruchu  $X_{Tpl}$ . Dla pojazdu 4 sieć MLP 2:2-12-8-3:3 wyklucza zaś z analizy czas pracy silnika  $X_{tpra}$ . Wyniki zaprezentowane w tabelach Z4.7 i Z4.8 wskazują na wstępowanie pewnych współzależności, redundancji oraz wymiarowość w zbiorze zmiennych opisujących „widmo rozruchu”.

W dalszej kolejności wykorzystano sieci neuronowe w zagadnieniu klasyfikacji wyników badań parametrów „widma rozruchu” [108]. Sprawdzone, czy sieć neuronowa jest w stanie sklasyfikować „temperaturowo” przypadek pojedynczego rozruchu, czyli czy jest w stanie rozróżnić rozruch „ciepły”, „chłodny” i „gorący”.

W pierwszym etapie klasyfikacji wzięto pod uwagę tylko parametry „widma rozruchu” bezpośrednio związane z rozruchem. Są to: maksymalne natężenie prądu pobierane na początku rozruchu  $X_{Imax}$  oraz odpowiadający mu spadek napięcia na zaciskach rozrusznika  $X_{Umax}$  i moc elektryczna  $X_{Pmax}$ , średnie natężenie prądu podczas uruchamiania silnika  $X_{Isr}$  wraz z odpowiadającym mu napięciem  $X_{Usr}$  i mocą  $X_{Psr}$ , czas przyłożenia napięcia  $X_{tprzyl}$  oraz czas rozruchu  $X_{troz}$ . Wyniki analizy klasyfikacyjnej przedstawiono w tabeli Z4.9.

Na podstawie wyników wykorzystania sieci neuronowych w zagadnieniu klasyfikacji „temperaturowej” rozruchu należy stwierdzić, że żadna z zaprezentowanych sieci w tabeli Z4.9 nie jest w stanie właściwie zaklasyfikować przypadku pojedynczego rozruchu do właściwej grupy temperaturowej. Wartość błędu testowania danych typów sieci znacznie przekracza 95% poziom ufności. Nawet sieć neuronowa, w której wzięto pod uwagę wszystkie parametry „widma rozruchu” związane z rozruchem silnika nie jest w stanie właściwie zaklasyfikować „temperaturowo” rozruchu. Najczęściej proponowanym typem sieci jest sieć o radialnych funkcjach bazowych (RBF). W przypadku sieci z dwoma warstwami ukrytymi błąd testowania posiadał znaczącą wartość, co całkowicie wyklucza ich zastosowanie (zob. tabela Z.9).

Dla sieci typu RBF w dwuelementowym zbiorze ( $X_{Isr}$ ,  $X_{Iprzyl}$ ) zmienna  $X_{Iprzyl}$  ma największą rangę. W zbiorze ( $X_{Isr}$ ,  $X_{troz}$ ) zmiennych wejściowych przeważa  $X_{Isr}$  względem  $X_{troz}$ . Dla zbioru ( $X_{Psr}$ ,  $X_{troz}$ ) większą rangę charakteryzuje się zmienna  $X_{Psr}$ . Dla zmiennych związanych z oporami początkowymi kolejność pod względem ważności jest następująca:  $X_{Umax}$ ,  $X_{Imax}$ ,  $X_{Pmax}$ . Dla zbioru zmiennych związanych z uruchamianiem silnika kolejność jest podobna:  $X_{Usr}$ ,  $X_{Isr}$ ,  $X_{Psr}$ . W zbiorze wszystkich parametrów największą rangę ma  $X_{Iprzyl}$ . W następnej kolejności są:  $X_{troz}$ ,  $X_{Isr}$ ,  $X_{Usr}$ ,  $X_{Pmax}$ ,  $X_{Psr}$ ,  $X_{Umax}$ ,  $X_{Imax}$ . Na rysunku 4.25 przedstawiono sieć typu RBF dla wszystkich parametrów „widma rozruchu” związanych z rozruchem, która najlepiej dokonuje jego klasyfikacji „temperaturowej”.



Rys. 4.25. Sieć neuronowa typu RBF 8:8-5-43:1; osiem wejść oraz 1 wyjście, 5 neuronów w warstwie ukrytej

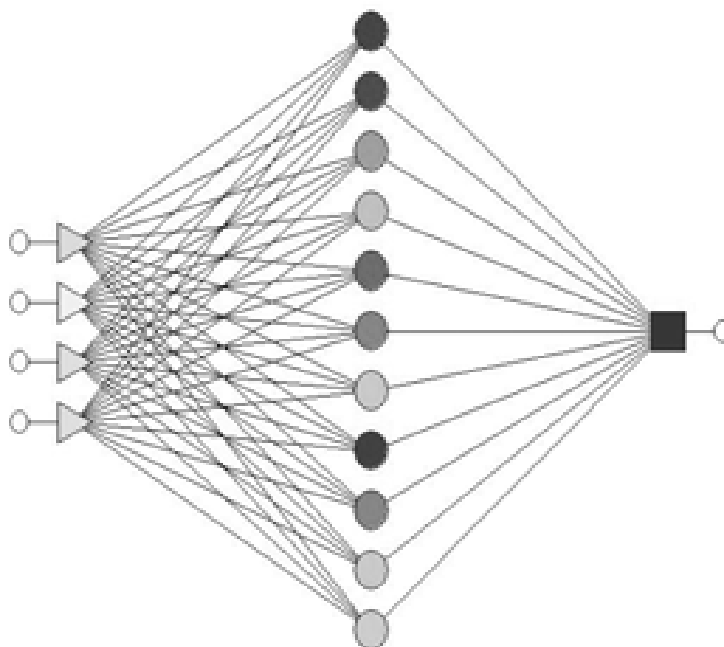
Dla pojedynczego parametru „widma rozruchu” związanego z bezpośrednio z rozruchem należy stwierdzić, że rozruch „najlepiej” klasyfikuje „temperaturowo” zmienna związana z czasem przyłożenia napięcia na zaciskach rozrusznika.

W drugim przypadku klasyfikację „temperaturową” wykonano dla zbioru parametrów „widma rozruchu”, jakie stanowią parametry związane z pracą pojazdu LUBLIN oraz działaniem silnika 4CT90: czas działania silnika przed kolejnym rozruchem  $X_{tpra}$ , droga wykonana przez pojazd przed kolejnym rozruchem silnika  $X_{lpoj}$ , droga tłka przed kolejnym rozruchem  $X_{lil}$  oraz czas postoju samochodu z wyłączonym silnikiem  $X_{tpos}$  w ciągu dnia użytkowania samochodu. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli Z4.10.

Na podstawie wyników zaprezentowanych sieci w tabeli Z4.10 należy stwierdzić, że także żadna z sieci neuronowych wykorzystująca analizę parametrów związanych z pracą pojazdu LUBLIN oraz działaniem silnika 4CT90, nie jest w stanie właściwie zaklasyfikować pojedynczego rozruchu silnika do właściwej grupy określającej jego temperaturę. Nawet wtedy, gdy podczas budowy sieci neuronowej wzięto pod uwagę wszystkie parametry „widma rozruchu” związane z pracą pojazdu LUBLIN oraz działaniem silnika 4CT90. Wartość błędu testowania zaprezentowanych typów sieci RBF znacznie przekracza, bowiem 95% poziom ufności. W przypadku sieci z dwoma warstwami ukrytymi błąd testowania posiadał jeszcze większą wartość (zob. tabela Z.10).

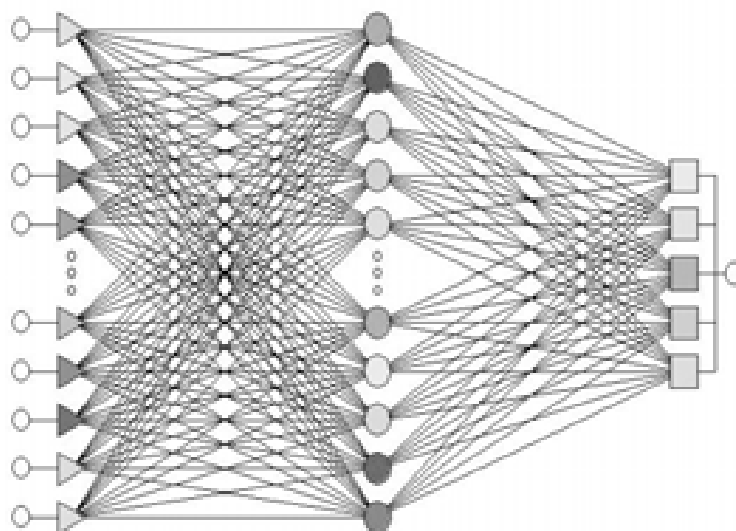
Można jedynie stwierdzić, że większą rangą charakteryzuje się zmienna  $X_{tpra}$  dla dwuelementowego zbioru zmiennych wejściowych ( $X_{tpra}$ ,  $X_{lil}$ ). Dla zbioru zmiennych ( $X_{tpra}$ ,  $X_{tpos}$ ) największą rangę ma czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem. W zbiorze ( $X_{tpra}$ ,  $X_{lpoj}$ ) zmienna  $X_{tpra}$  charakteryzuje się największą rangą. Dla zbioru wszystkich zmiennych najistotniejszy wkład wnosi zmienna związana z czasem postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem  $X_{tpos}$ . Kolejnymi zmiennymi pod względem ważności rangi są:  $X_{lpoj}$ ,  $X_{tpra}$ ,  $X_{lil}$ .

Na rysunku 4.26 przedstawiono sieć typu RBF dla wszystkich parametrów „widma rozruchu” związanych z pracą pojazdu LUBLIN oraz działaniem silnika 4CT90, która najlepiej dokonuje jego klasyfikacji „temperaturowej”.



Rys. 4.26. Sieć neuronowa typu RBF 4:4-11-1:1; 4 wejścia, 1 wyjście oraz 11 neuronów w warstwie ukrytej

Zagadnienie klasyfikacji z zastosowaniem sieci neuronowych wykorzystano także w celu przypisania danego przypadku rozruchu do konkretnego silnika spalinowego. Dałoby to odpowiedź na pytanie czy warunki pracy pojazdów LUBLIN oraz działania i rozruchu ich silników 4CT90 w badaniach „kontrolowanych” oraz „długotrwałych” różnią się istotnie od siebie. Wynikiem tej analizy klasyfikacyjnej jest stwierdzenie, że sieć typu RBF 13:13-56-5:1, którą przedstawia rysunek 4.27, najlepiej przypisuje konkretny przypadek rozruchu silnika spalinowego do pojazdu. Ta sieć neuronowa nie uwzględnia, podczas przeprowadzanej analizy klasyfikacyjnej, jednego parametru „widma rozruchu”, jakim jest postój pojazdu z wyłączonym silnikiem  $X_{tpob}$ . Kolejność rang parametrów tej sieci jest następująca:  $X_{Tpt}$ ,  $X_{Tol}$ ,  $X_{Uśr}$ ,  $X_{lpoj}$ ,  $X_{Pmax}$ ,  $X_{Umax}$ ,  $X_{Imax}$ ,  $X_{troz}$ ,  $X_{Isr}$ ,  $X_{tprzyt}$ ,  $X_{Pśr}$ ,  $X_{tpra}$ ,  $X_{lil}$ . Jednakże sieć typu RBF 13:13-56-5:1 charakteryzuje się błędem testowania równym 0,3142, który znacznie przekracza 95% poziom ufności, co wyklucza ją z praktycznego zastosowania.



Rys. 4.27. Sieć neuronowa typu RBF 13:13-56-5:1 najlepiej rozwiązująca problem klasyfikacyjny

Przy wyłączeniu z analizy postojów trwających, co najmniej 5 godzin pojazdu z unieruchomionym silnikiem problem klasyfikacji dalej nie został rozstrzygnięty. Najlepszą siecią neuronową jest ponownie sieć typu RBF 13:13-83-5:1 o błędzie testowania wynoszącym 0,3034, który także znacznie przekracza 95% poziom ufności. Wyłącza ona z analizy tylko drogę tłoka  $X_{tl}$ . Kolejność rangowa parametrów jest następująca:  $X_{Tpl}$ ,  $X_{Uśr}$ ,  $X_{Tol}$ ,  $X_{troz}$ ,  $X_{Pmax}$ ,  $X_{Isr}$ ,  $X_{Imax}$ ,  $X_{lpoj}$ ,  $X_{Pśr}$ ,  $X_{tpra}$ ,  $X_{tprzyl}$ ,  $X_{Umax}$ ,  $X_{tpos}$ .

Przedstawione wyniki wskazują, że warunki pracy pojazdów LUBLIN i ich silników 4CT90 podczas badań „kontrolowanych” oraz „naturalnych” nie różniły się istotnie od siebie.

Analizując kolejność rang w sieciach typu RBF 13:13-56-5:1 oraz RBF 13:13-83-5:1 należy potwierdzić fakt, że najważniejszymi parametrami „widma rozruchu” są temperatura silnika i temperatura oleju silnikowego w chwili rozruchu. Oznacza to, że stan cieplny silnika spalinowego (opisywany przez te temperatury) jest decydującym czynnikiem przebiegu jego rozruchu. Dodatkowo potwierdza się wcześniejsze spostrzeżenie dotyczące tego, że pierwsze dzienne rozruchy stanowią odrębną grupę.

## **5. PROCES ROZRUCHU SAMOCHODOWEGO SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM**

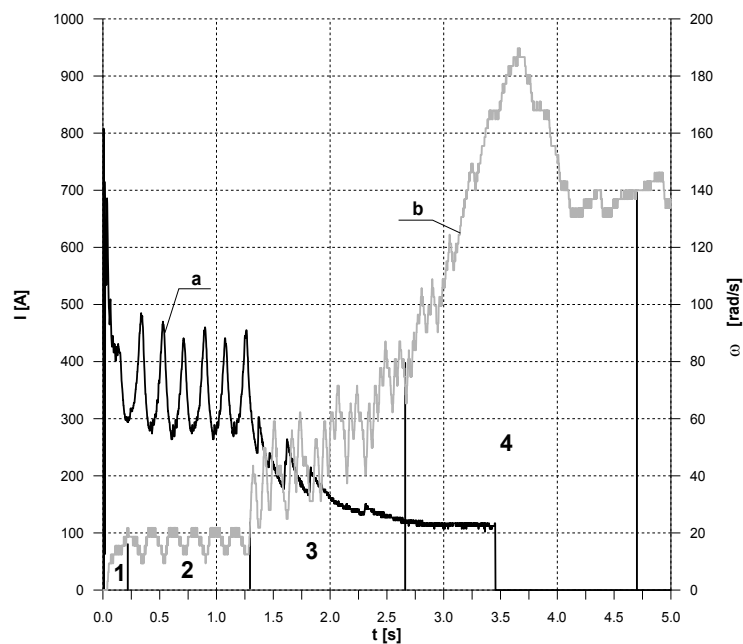
### **5.1. Podział rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym na etapy**

Ze względu na występowanie podczas rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym złożonych procesów tworzenia i spalania mieszanki paliwowo-powietrznej oraz mechanizmów tarcia należy traktować rozruch jako proces wieloetapowy. Dokonana, na podstawie badań własnych autora niniejszej rozprawy, analiza przebiegu zmian wartości prędkości kątowej wału korbowego oraz natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas jego fazy zazębiania się z kołem zamachowym umożliwia wyróżnienie czterech etapów rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [33, 38].

**Etap nr 1** rozpoczyna się w chwili sprzęgnięcia się zębniaka rozrusznika elektrycznego z kołem zamachowym wału korbowego silnika. Następuje ruszanie z miejsca wału korbowego, tłoków i innych mechanizmów ruchomych silnika. W wyniku napędzania rozrusznikiem systematycznie wzrasta prędkość kątowa wału korbowego od zera do wartości odpowiadającej prędkości kątowej rozrusznika (zob. rys. 5.1).

**Etap nr 2** rozruchu obejmuje obracanie wału korbowego silnika rozrusznikiem (zob. rys. 5.1) z niemal stałą prędkością kątową, której wartość zależy od stanu naładowania akumulatorów oraz temperatury rozruchu. Wraz ze spadkiem temperatury zmniejsza się wartość prędkości kątowej wału korbowego oraz wzrasta czas trwania tego etapu, który może wynosić nawet kilkadziesiąt sekund. Jeżeli prędkość obracania się wału korbowego odpowiada prędkości kątowej rozruchu, zachodzą dogodne warunki do pojawienia się pierwszych zapłonów mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach silnika.

Należy podkreślić, że te dwa etapy stanowią tzw. uruchamianie silnika spalinowego, które występuje przy napędzaniu wału korbowego za pomocą samego rozrusznika.



Rys. 5.1. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego  $\omega$  oraz natężenia prądu  $I$  pobieranego przez rozrusznik podczas opisanych czterech etapów rozruchu silnika 4CT90; 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 [38]

**Etap nr 3** rozpoczyna się w chwili wystąpienia pierwszego zapłonu mieszanki palnej w cylindrach silnika (zob. rys. 5.1). W etapie tym występuje nieregularne spalanie mieszanki oraz przerywana praca rozrusznika. Kiedy prędkość kątowa wału korbowego osiągnie dostatecznie dużą wartość następuje odłączenie napędzającego go rozrusznika poprzez sprzęgło jednokierunkowe. Jednak chwilowy spadek prędkości kątowej wału korbowego poniżej tej wartości, spowodowany wypadaniem zapłonów mieszanki, powoduje ponowne „krótkie” sprzęgnięcie wału korbowego i jego ponowne napędzanie rozrusznikiem.

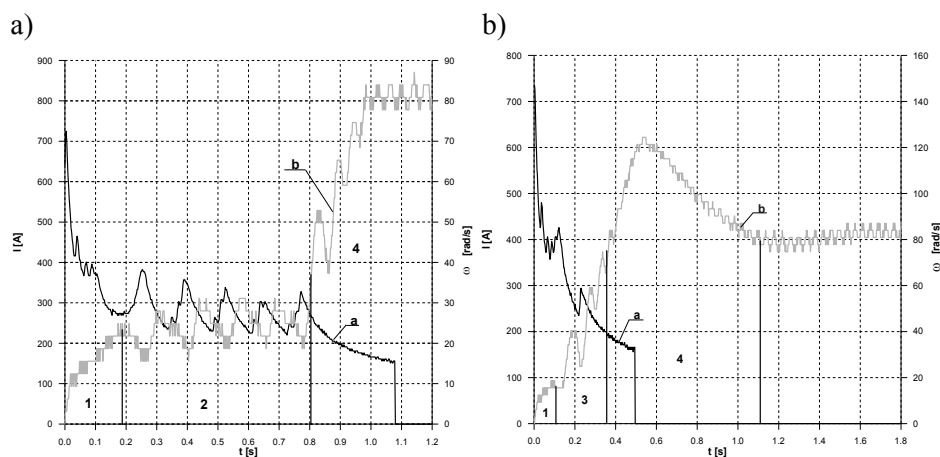
Ostatnim etapem rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jest **etap nr 4** (zob. rys. 5.1), w którym występują już tylko same zapłony mieszanki. Podczas tego etapu prędkość kątowa wału korbowego po początkowym szybkim



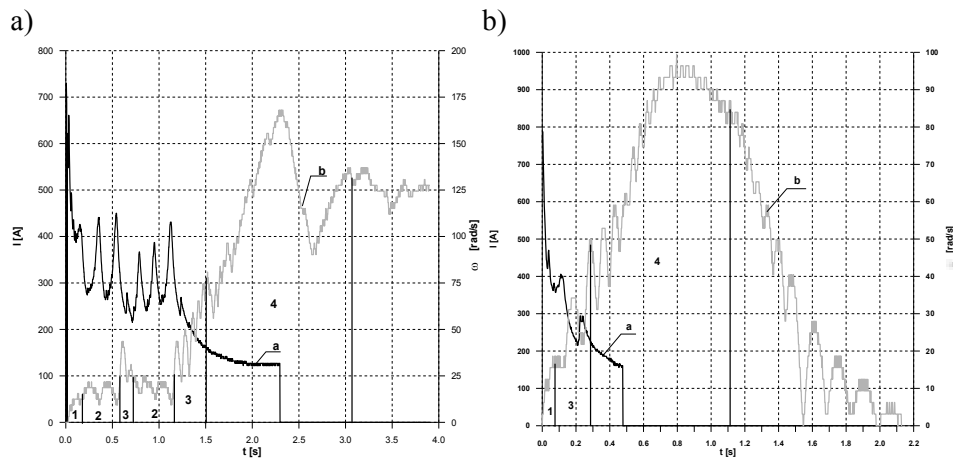
wzroście i osiągnięciu maksimum lokalnego stabilizuje się w zakresie wartości odpowiadających biegowi jałowemu lub biegowi luzem silnika. Początkowa wartość prędkości kątowej wału korbowego po zakończeniu rozruchu charakteryzuje się dużą zmiennością, co wynika z niestabilnego spalania w poszczególnych cylindrach silnika.

W trakcie użytkowania samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym mogą wystąpić rozruchy, w których nie występują niektóre z wyżej wymienionych etapów. Ilustruje to rysunek 5.2. Dodatkowo w warunkach użytkowania samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym może dojść do sytuacji kiedy po wystąpieniu etapu nr 3 rozruchu pojawi się ponownie etap nr 2, czyli napędzanie wału korbowego silnika spalinowego samym rozrusznikiem. Przedstawiono to na rysunku 5.3a. Obserwuje się także podczas użytkowania silnika, ale bardzo sporadycznie, wystąpienie przejścia z etapu nr 4 do stanu spoczynku silnika. Mamy wtedy do czynienia z przypadkiem nieudanego rozruchu silnika spalinowego, co zaprezentowano na rys 5.3b.

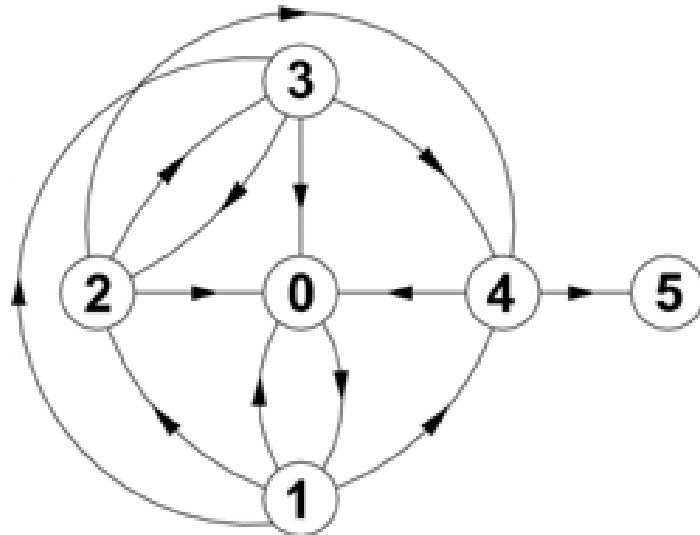
Możliwe przejścia pomiędzy wyróżnionymi etapami rozruchu, zilustrowano na grafie skierowanym procesu rozruchu silnika z rysunku 5.4.



Rys. 5.2. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego  $\omega$  oraz natężenia prądu  $I$  pobieranego przez rozrusznik podczas rozruchu silnika 4CT90; A) rozruch bez wystąpienia etapu nr 3, B) rozruch bez pojawienia się etapu nr 2; a – natężenie prądu, b – prędkość kątowa wału korbowego, 1 – etap nr 1 rozruchu, 2 – etap nr 2 rozruchu, 4 – etap nr 4 rozruchu [38]



Rys. 5.3. Przebieg prędkości kątowej wału korbowego  $\omega$  oraz natężenia prądu  $I$  pobieranego przez rozrusznik podczas rozruchu silnika 4CT90; A) rozruch z wystąpieniem etapu nr 2 po zaistnieniu etapu nr 3, B) przypadek nieudanego rozruchu; a – natężenie prądu, b – prędkość kątowa wału korbowego, 1 – etap nr 1 rozruchu, 2 – etap nr 2 rozruchu, 4 – etap nr 4 rozruchu [38]



Rys. 5.4. Graf procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym uwzględniający wszystkie wyróżnione etapy oraz możliwe przejścia pomiędzy nimi; 0 – stan spoczynku silnika, 1 – etap nr 1 rozruchu, 2 – etap nr 2, 3 – etap nr 3, 4 – etap nr 4 rozruchu, 5 – stan samodzielnego działania silnika

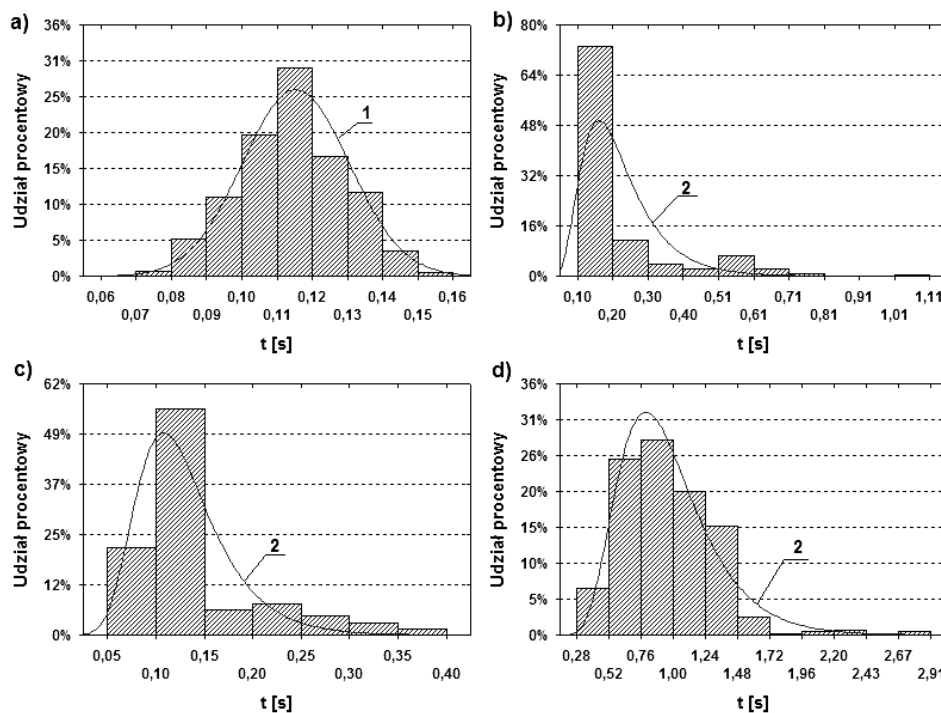
Omawiając graf procesu rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym należy zwrócić uwagę na możliwe przejścia do stanu spoczynku 0 ze wszystkich wyróżnionych etapów rozruchu. Przejście w trakcie realizacji rozruchu z  $i$ -tego ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) etapu do stanu spoczynku występuje w przypadku nieudanego rozruchu silnika. Powoduje to, że rozruch silnika należy rozpocząć ponownie. Przyczyn nieudanego rozruchu jest wiele. Na przykład zbyt mały stopień naładowania akumulatorów może spowodować, że wał korbowy silnika nie osiągnie wymaganej kątowej prędkości rozruchowej, potrzebnej do uzyskania odpowiednich warunków zainicjowania spalania mieszanki paliwowo-powietrznej silnika. Powoduje to przerwanie rozruchu i przejścia z etapów nr 1 lub nr 2 do stanu spoczynku. Niewłaściwy stan techniczny innych układów wpływających na proces tworzenia oraz spalania w cylindrach (np.: układ wtryskowy) może być powodem zaistnienia przejść z etapów nr 3 i nr 4 do stanu nr 0.

## **5.2. Badania etapów rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym**

Przeprowadzone przez autora rozprawy badania rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach rzeczywistego użytkowania pojazdu wykazały, że w większości przypadków (83,7%) nie obserwuje się wystąpienia etapu nr 3. Tylko w 12,6% zarejestrowanych rozruchów silnika 4CT90 zaobserwowano istnienie kolejno pojawiających się etapów nr 1, nr 2, nr 3 oraz nr 4. Rozruchów silnika, w których po etapach nr 1, nr 2, nr 3 pojawił się ponownie etap nr 2 było tylko 1,3%. W 0,5% przypadków analizowanych rozruchów silnika zaobserwowano obecność etapu nr 1, a następnie tylko etapu nr 4. Świadczyć to może o tym, że samozapłon mieszanki palnej wystąpił w pierwszym sprężanym cylindrze podczas rozruchu badanego silnika [38].

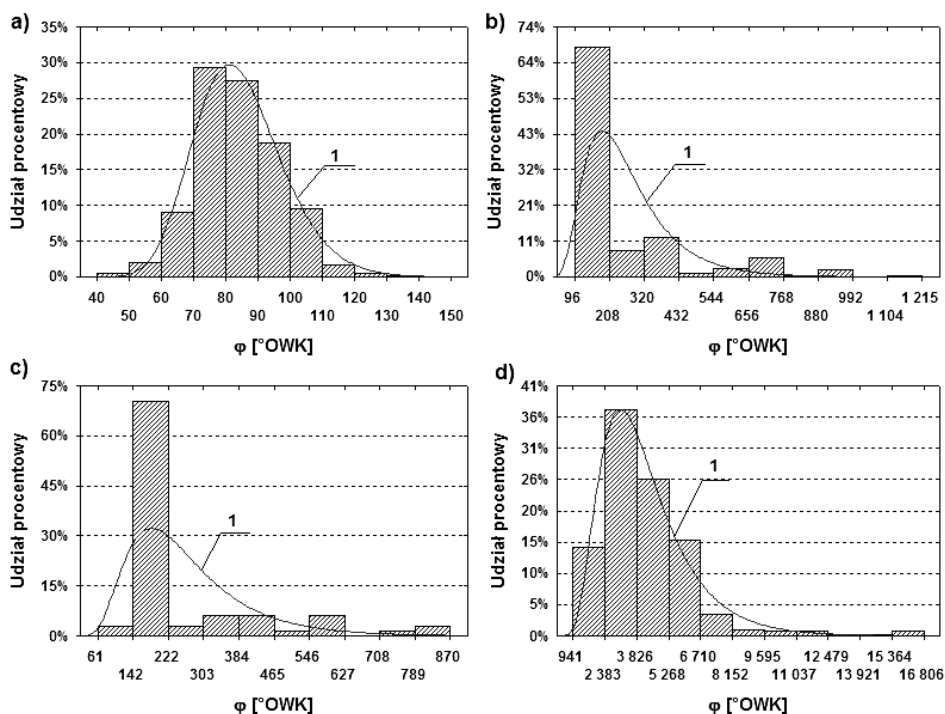
W tabeli nr Z5.1 załącznika nr 5 zaprezentowano wybrane parametry statystyczne etapów rozruchu silnika 4CT90. Rysunek 5.5 prezentuje rozkłady statystyczne czasów trwania poszczególnych etapów rozruchu tego silnika. Analizując uzyskane wyniki należy stwierdzić, że średni czas trwania etapu nr 1 rozruchu badanego silnika wynosił 0,115 s. Średni czas uruchamiania silnika 4CT90 (etap nr 2 rozruchu) równa się 0,226 s, a najdłuższy zarejestrowany czas napędzania wału korbowego samym tylko rozrusznikiem wyniósł 1,114 s. Czas

trwania etapu nr 3 rozruchu silnika, podczas którego pojawiają się pojedyncze zapłony mieszanki paliwowo-powietrznej oraz występuje napędzanie wału korbowego rozrusznikiem, trwał średnio tylko 0,138 s. Średni czas trwania etapu nr 4 dla silnika 4CT90 równa się 0,959 s. Najdłuższy zarejestrowany czas etapu nr 4 rozruchu wyniósł 2,914 s [34].



Rys. 5.5. Rozkład statystyczny czasu  $t$  trwania etapów rozruchu silnika 4CT90; 1 – funkcja gęstości rozkładu normalnego dopasowana (poziom istotności  $p < 0,01$ ) do danych empirycznych, 2 – funkcja gęstości rozkładu log-normalnego dopasowana (poziom istotności  $p < 0,05$ ) do danych empirycznych; a) dla etapu nr 1 o parametrach położenia: 0,115 i skali: 0,015, b) dla etapu nr 2 o parametrach progu: 0,000, skali: -1,618, kształtu: 0,4601, c) dla etapu nr 3 o parametrach progu: 0,000, skali: -2,0812, kształtu: 0,4189, d) dla etapu nr 4 o parametrach progu: 0,000, skali: 0,1053, kształtu: 0,3574 [34]

Na rysunku 5.6 zaprezentowano histogramy statystyczne drogi kątowej wyrażonej w stopniach obrotu wału korbowego ( $^{\circ}$ OWK), wykonanej przez wał silnika w trakcie poszczególnych etapów rozruchu.



Rys. 5.6. Rozkład statystyczny drogi kątowej  $\phi$  etapów rozruchu silnika 4CT90;

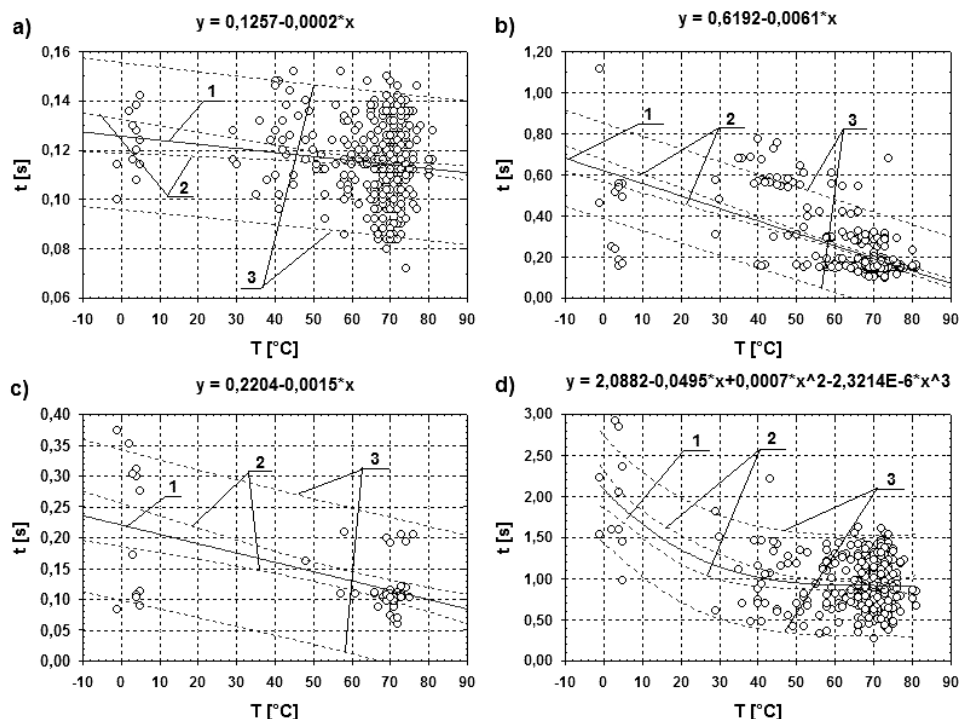
1 – funkcja gęstości rozkładu log-normalnego dopasowana (poziom istotności  $p < 0,05$ ) do danych empirycznych; a) dla etapu nr 1 o parametrach progu: 0,000, skali: 4,216, kształtu: 0,1619, b) dla etapu nr 2 o parametrach progu: 0,000, skali: 5,4639, kształtu: 0,4916, c) dla etapu nr 3 o parametrach progu: 0,000, skali: 5,4503, kształtu: 0,4877, d) dla etapu nr 4 o parametrach progu: 0,000, skali: 8,239, kształtu: 0,458

Analizując rozkłady drogi kątowej (zob. rys. 5.6) wykonanej przez wał korbowy silnika 4CT90 w trakcie poszczególnych etapów jego rozruchu należy stwierdzić, iż podczas etapu nr 1 wartość średniej drogi kątowej jest rzędu 84 °OWK. Podczas etapu nr 2 rozruchu średnia droga kątowa wynosi 273 °OWK. Wartość średnia drogi kątowej wału korbowego badanego silnika podczas etapu nr 3 jest porównywalna z etapem nr 2 i wynosi 266 °OWK. Średnia droga kątowa wału korbowego silnika podczas etapu nr 4 wynosi 4217 °OWK, co odpowiada 11,7 obrotu [38]. Najdłuższe czasy etapów rozruchu oraz dróg kątowych wykonanych przez wał korbowy silnika 4CT90 podczas ich trwania występują dla pierwszych dziennych rozruchów silnika, co zaprezentowano na histogramach z rysunków 5.5 i 5.6. Wynika to z niekorzystnych warunków

tworzenia i spalania mieszanki palnej w trakcie tych rozruchów oraz znacznych oporów ruchu. Na przykład największa zarejestrowana liczba obrotów wału korbowego podczas etapu nr 4 rozruchu silnika 4CT90 w temperaturze 5 °C wynosiła 46,68.

Na podstawie przeprowadzonej analizy korelacji zaobserwowano, że czasy trwania poszczególnych etapów rozruchu, z wyłączeniem etapu nr 1, zależą od stanu cieplnego silnika 4CT90. Wyrazem tego są wartości współczynników korelacji liniowej przedstawione w macierzy, w załączniku nr 5. Współczynnik korelacji liniowej pomiędzy czasem trwania etapu nr 1 i temperaturą oleju silnikowego wynosi tylko  $r = -0,22$ , zaś temperaturą silnika w chwili rozruchu  $r = -0,16$  [38]. Poziom istotności wymienionych współczynników wynosi  $p = 0,001$ . Tą słabą zależność ilustruje wykres rozrzutu dla czasu trwania etapu nr 1 oraz temperatury silnika 4CT90 w chwili rozruchu z rysunku 5.7a. Na wykresie tym zaprezentowano także prostą regresji wraz z 95% przedziałami ufności prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji. Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 5.7a charakteryzuje się średnim błędem losowym 49,25%, wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-3,139$ . Błąd losowy wyrazu wolnego równa się 5,71%, zaś wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 14,459. Wartość współczynnika determinacji równa się  $r^2 = 0,0254$ . Poziom istotności wymienionych współczynników wynosi  $p \leq 0,002$ .

Na rysunku 5.7b zaprezentowano także wykres rozrzutu pomiędzy czasem trwania etapu nr 2 oraz temperaturą silnika wraz z 95% przedziałami ufności dla prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji. Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 5.7b posiada średni błąd losowy równy 4,17%, przy czym wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-14,824$ . Błąd losowy wyrazu wolnego wynosi 1,12%, zaś wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 70,158. Wartość współczynnika determinacji równa się  $r^2 = 0,3764$ . Poziom istotności wymienionych współczynników wynosi  $p = 0,001$ .



Rys. 5.7. Wykres rozrzutu oraz proste i krzywa regresji czasu  $t$  trwania wyróżnionych etapów rozruchu silnika 4CT90 oraz temperatury  $T$  silnika w chwili rozruchu; a) etap nr 1 rozruchu, b) etap nr 2 rozruchu, c) etap nr 3 rozruchu, d) etap nr 4 rozruchu; 1 – prosta lub krzywa regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

Wartości współczynników korelacji liniowej przedstawione w załączniku nr 5 wskazują na wydłużenie się czasu trwania etapu nr 2 wraz ze spadkiem temperatury silnika oraz oleju silnikowego w chwili rozruchu. Wartość współczynnika korelacji liniowej dla czasu trwania etapu nr 2 oraz temperatury rozruchu silnika wynosi  $r = -0,61$ . Obserwuje się jednak występowanie silniejszego związku pomiędzy czasem trwania etapu nr 2, a temperaturą oleju silnikowego w chwili rozruchu [38]. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji liniowej, który wynosi  $r = -0,69$ . Poziom istotności omawianych współczynników korelacji liniowej wynosi  $p = 0,001$ . Porównanie wartości obydwu współczynników korelacji liniowej wskazuje na to, że czynnikiem decydującym o długości trwania etapu nr 2 są przede wszystkim opory ruchu (zależne od zmian lepkości oleju silnikowego w funkcji temperatury) występujące podczas rozruchu silnika.

Należy podkreślić, że także czas trwania etapu nr 3 wzrasta w miarę spadku temperatury silnika oraz oleju silnikowego w chwili jego rozruchu. Wyrazem tego jest wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy tymi parametrami, który dla obydwu zależności wynosi  $r = -0,58$ . Ilustracją tego jest także wykres rozrzutu z rysunku 5.7c pomiędzy czasem trwania etapu nr 3 oraz temperaturą silnika wraz z 95% przedziałami ufności prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.

Współczynnik kierunkowy prostej regresji z rysunku 5.7c charakteryzuje się średnim błędem losowym 41,04%, wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-5,424$ . Błąd losowy wyrazu wolnego jest mniejszy i równa się 6,25%, przy czym wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 13,850. Wartość współczynnika determinacji równa się  $r^2 = 0,3365$ . Poziom istotności wymienionych współczynników wynosi  $p = 0,001$ .

Obserwuje się słabą zależność pomiędzy czasem trwania etapu nr 4 a temperaturą oleju silnikowego w chwili rozruchu silnika [38]. Współczynnik korelacji dla tych zmiennych wynosi  $r = -0,31$ . Zależność pomiędzy czasem trwania etapu nr 4 oraz a temperaturą silnika jest nieco większa ( $r = -0,40$ ). Wykres rozrzutu czasu trwania etapu nr 4 oraz temperatury silnika w chwili rozruchu przedstawiono na rysunku 5.7d. Na rysunku tym pokazano także krzywą regresji (wielomian 3-stopnia) wraz z 95% przedziałami ufności prognozowanej wartości średniej i prognozowanej pojedynczej obserwacji.

Wyraz wolny krzywej regresji z rysunku 5.7d ma średni błąd losowy 0,12%, wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 18,2665. Błąd losowy parametru występującego przy pierwszej potęgze równa się 0,013% (wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-19,231$ ). Wartość średniego błędu losowego parametru związanego z drugą potęgą wynosi 0,0003% (wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi 24,511). Błąd losowy parametru dla trzeciej potęgi równa się 0,0001 %, wartość statystyki  $t$ -Studenta wynosi  $-14,112$ . Udział wariancji wyjaśnianej dla przyjętego modelu regresji wynosi 0,2271. Wartość wskaźnika korelacji nieliniowej Pearsona [72] wynosi  $e = 0,4765$ . Poziom istotności dla omawianych współczynników i wskaźnika korelacji nieliniowej wynosi  $p = 0,001$ . Występuje także zależność pomiędzy czasem trwania etapów rozruchu a drogą kątową wykonaną przez wał korbowy silnika 4CT90 w ich trakcie. Wyrazem tego są wartości współczynników korelacji liniowej z macierzy załącznika nr 5 (poziom istotności  $p = 0,001$ ).



Podsumowując przedstawione wyniki analiz statystycznych dla poszczególnych etapów rozruchu silnika 4CT90 należy stwierdzić, że czas trwania etapu nr 1 nie zależy od stanu cieplnego silnika w chwili rozruchu. Wartości współczynników korelacji pomiędzy czasem trwania wymienionych etapów a temperaturą silnika i oleju silnikowego w chwili rozruchu wskazują, że w miarę spadku temperatury wydłużają się czasy trwania etapów nr 2 i nr 3 rozruchu oraz grzania silnika. Wydłużenie czasów trwania tych etapów wynika ze wzrostu oporów ruchu oraz z pogorszenia się warunków tworzenia i spalania mieszanki paliwowo-powietrznej przy spadku temperatury rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym. Czas trwania etapu nr 4 nie zależy już tak bardzo od stanu cieplnego silnika. Należy jednak podkreślić, że o występujących zależnościach decydują pierwsze dzienne rozruchy badanego silnika 4CT90. Świadczy to po raz kolejny o tym, że rozruchy te stanowią odrębną grupę.

### **5.3. Stochastyczny model przebiegu procesu startu silnika spalinowego**

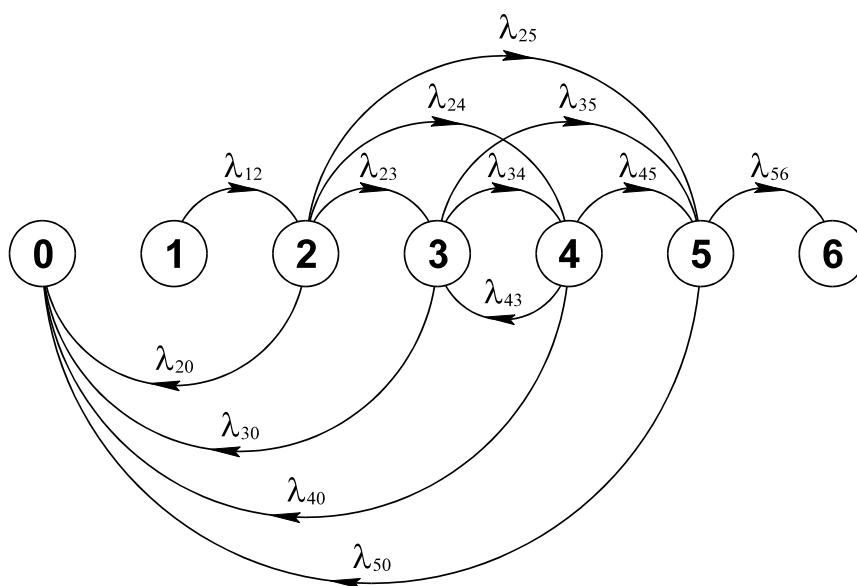
#### **5.3.1. Założenia przyjęte podczas budowy modelu**

W przebiegu **procesu startu** silnika o zapłonie samoczynnym można wyróżnić siedem zasadniczych stanów i przypisać im numery: 0, 1, ..., 6.

Stan opisany jako „0” to stan spoczynku silnika. Przejście do niego oznacza, że wystąpił przypadek nieudanego rozruchu. Stan „1” związany jest z czynnościami przygotowawczymi przez przyłożeniem napięcia na rozrusznik (np.: włączenie świece żarowych przez kierowcę pojazdu). Stan „2” oznacza etap nr 1 rozruchu, stan „3” – etap nr 2, stan „4” – etap nr 3, stan „5” – etap nr 4 rozruchu. Stan „6” to samodzielne działanie silnika. Przejście do tego stanu oznacza, że wystąpił udany rozruch. Dwa stany „0” oraz „6” procesu rozruchu silnika spalinowego są, więc stanami pochłaniającymi. Określając dopuszczalne przejścia pomiędzy wyróżnionymi stanami można założyć, że matematycznym modelem rozpatrywanego procesu startu jest jednorodny dyskretny proces Markowa z czasem ciągłym [7] o siedmioelementowym zbiorze stanów  $S = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ . Graf skierowany rozpatrywanego procesu ma postać przedstawioną na rys. 5.8.

Założenie o markowskim charakterze przebiegu procesu startu jest słuszne tylko dla przypadku pierwszego dziennego rozruchu silnika o zapłonie

samoczynnym. Dla pierwszych dziennych rozruchów silnika spalinowego występuje bowiem nie tylko „ustabilizowany” stan termiczny silnika, ale także nie obserwuje się wpływu jego wcześniejszego działania.



Rys. 5.8. Graf skierowany jednorodnego dyskretnego procesu Markowa opisującego przebieg procesu startu silnika o zapłonie samoczynnym

W wyniku spłynięcia oleju smarującego do miski olejowej silnika obserwuje się zanik jego trwałej warstewki granicznej na powierzchniach elementów zespołu TPC silnika oraz wyparowanie osiadłego na ścianka komory spalania paliwa pochodzącego z ostatniej wtrysniętej i niespalonej dawki.

Aby określić niezawodność silnika spalinowego aspekcie skuteczności rozruchu należy określić jednowymiarowe rozkłady zmiennych losowych  $X(t)$ ,  $t \geq 0$ , definiujących proces Markowa dla dostatecznie dużych wartości czasu  $t$ .

W jednorodnym procesie Markowa intensywności przejść pomiędzy stanami nie zależą od czasu [7]. Macierz intensywności przejścia  $\Lambda$  procesu pokazanego na rysunku 5.8 jest macierzą liczbową

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{00} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{11} & \lambda_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{20} & 0 & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} & \lambda_{25} & 0 \\ \lambda_{30} & 0 & 0 & \lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & 0 \\ \lambda_{40} & 0 & 0 & \lambda_{43} & \lambda_{44} & \lambda_{45} & 0 \\ \lambda_{50} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{55} & \lambda_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{66} \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

której elementy diagonalne spełniają zależności

$$\lambda_{ii} = -\sum_{k=0}^6 \lambda_{ik}, \quad i=0, 1, \dots, 6. \quad (5.2)$$

Z równań (5.2) wynika, że

$$\begin{aligned} \lambda_{00} &= 0, \lambda_{11} = -\lambda_{12}, \lambda_{22} = -(\lambda_{20} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25}), \lambda_{33} = -(\lambda_{30} + \lambda_{34} + \lambda_{35}) \\ \lambda_{44} &= -(\lambda_{40} + \lambda_{43} + \lambda_{45}), \lambda_{55} = -(\lambda_{50} + \lambda_{56}), \lambda_{66} = 0. \end{aligned}$$

W macierzy (5.1) wszystkie elementy nie leżące na głównej przekątnej są nieujemne. Tym samym elementy diagonalne (określające intensywności wyjścia ze stanu  $i$ ) są liczbami niedodatnimi. Macierz (5.1) charakteryzuje w zupełności dyskretny proces Markowa  $\{X(t); t \geq 0\}$  [7], którego graf przedstawiono na rys. 5.8.

### 5.3.2. Wyznaczanie rozkładów brzegowych procesu

#### 5.3.2.1. Równania Chapmana-Kołmogorowa

Niech  $\mathbf{p}(t) = (p_i(t))$ ,  $i \in \mathbf{S}$ , gdzie  $p_i(t) = \Pr\{X(t) = i\}$ ,  $i \in \mathbf{S}$ . W ustalonej chwili  $t$  ( $t \geq 0$ ) jednowymiarowe rozkłady procesu Markowa spełniają równania Chapmana-Kołmogorowa

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{k \in \mathbf{S}} p_k(t) \cdot \lambda_{ki}, \quad i \in \mathbf{S} \quad (5.3)$$

oraz warunek normujący

$$\sum_{i \in \mathbf{S}} p_i(t) = 1. \quad (5.4)$$

Dodatkowo, przebieg procesu startu silnika opisywany macierzą (5.1) spełnia warunki początkowe

$$p_0(0)=0, p_1(0)=1, p_i(0)=0, i=2, \dots, 6. \quad (5.5)$$

Układ (5.3) można zapisać w postaci macierzowej

$$\mathbf{p}'(t)=\mathbf{p}(t) \cdot \mathbf{\Lambda}, \quad (5.6)$$

gdzie:

$$\mathbf{p}'(t)=\frac{d\mathbf{p}(t)}{dt}.$$

Równość (5.6) prowadzi do liniowej zależności rekurencyjnej

$$\mathbf{p}^{(k+1)}(t)=\mathbf{p}^{(k)}(t) \cdot \mathbf{\Lambda}, k=0, 1, \dots,$$

w której

$$\mathbf{p}^{(k)}(t)=\frac{d^k \mathbf{p}(t)}{dt^k}.$$

Rozwiązaniem tej rekurencji (wzór na  $k$ -tą pochodną wektora prawdopodobieństwa) jest zależność

$$\mathbf{p}^{(k)}(t)=\mathbf{p}(t) \cdot \mathbf{\Lambda}^k, k=1, 2, \dots. \quad (5.7)$$

Oznaczając przez  $\mathbf{q}_0$  wektor warunków początkowych dla układu (5.3)

$$\mathbf{q}_0=\mathbf{p}(0)=(0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$$

oraz przyjmując

$$\mathbf{q}_k=\mathbf{p}^{(k)}(0), k=0, 1, \dots,$$

ze wzoru (5.7) otrzymuje się

$$\mathbf{q}_k=\mathbf{q}_0 \cdot \mathbf{\Lambda}^k, k=1, 2, \dots. \quad (5.8)$$

Ze wzoru (5.8) można wyliczyć, że

$$\mathbf{q}_1=(0, -\lambda_{12}, \lambda_{12}, 0, 0, 0, 0),$$

$$\mathbf{q}_2=(\lambda_{20} \lambda_{12}, (\lambda_{12})^2, -\lambda_{12}(\lambda_{12} + \lambda_{20} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25}), \lambda_{23} \lambda_{12}, \lambda_{24} \lambda_{12}, \lambda_{25} \lambda_{12}, 0).$$

### 5.3.2.2. Równanie charakterystyczne

Układ (5.3) równań różniczkowych jest tzw. normalnym układem równań liniowych jednorodnych rzędu pierwszego o równaniu charakterystycznym

$$\det(\Lambda - r\mathbf{I}) = 0 \quad (5.9)$$

( $\mathbf{I}$  – macierz jednostkowa o stopniu równym stopniu macierzy  $\Lambda$ , a  $r$  – zmienna zespolona). Pierwiastkami równania (5.9) są wartości własne macierzy  $\Lambda$ .

Równanie charakterystyczne (5.9) można przedstawić w postaci rozwiniętej

$$r^7 + a_6 r^6 + a_5 r^5 + a_4 r^4 + a_3 r^3 + a_2 r^2 + a_1 r + a_0 = 0, \quad (5.10)$$

gdzie współczynniki  $a_k$ ,  $k=0, 1, \dots, 7$ , wyznacza się z zależności

$$a_k = (-1)^{k+1} \cdot \sum_{C \in \mathbf{C}_7^k} \det \Lambda(C). \quad (5.11)$$

(We wzorze (5.11) symbol  $\mathbf{C}_n^k$  oznacza zbiór wszystkich  $k$ -elementowych kombinacji zbioru  $\{0, 1, \dots, n-1\}$ , zaś  $\Lambda(C)$  jest podmacierzą główną macierzy  $\Lambda$ , powstałą przez usunięcie z  $\Lambda$  wierszy i kolumn o numerach należących do zbioru  $C$ .)

W przyjętym modelu przebiegu rozruchu współczynniki w równaniu (5.10) zależą od 13 parametrów. Biorąc pod uwagę postać macierzy (5.1), można dokonać rozkładu lewej strony równości (5.10) na czynniki liniowe

$$\prod_{i=1}^7 (r - r_i) = 0,$$

gdzie:

$$r_1 = \lambda_{11} = -(\lambda_{12} + \lambda_{22} + \lambda_{20} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25}),$$

$$r_3 = \frac{1}{2} \cdot \left( \lambda_{33} + \lambda_{44} - \sqrt{(\lambda_{33} - \lambda_{44})^2 + 4\lambda_{34}\lambda_{43}} \right) =$$

$$= \frac{-\lambda_{30} - \lambda_{34} - \lambda_{35} - \lambda_{40} - \lambda_{43} - \lambda_{45} - \sqrt{(\lambda_{30} + \lambda_{34} + \lambda_{35} - \lambda_{40} - \lambda_{43} - \lambda_{45})^2 + 4\lambda_{34}\lambda_{43}}}{2},$$

$$r_4 = \frac{1}{2} \cdot \left( \lambda_{33} + \lambda_{44} + \sqrt{(\lambda_{33} - \lambda_{44})^2 + 4\lambda_{34}\lambda_{43}} \right) =$$

$$= \frac{-\lambda_{30} - \lambda_{34} - \lambda_{35} - \lambda_{40} - \lambda_{43} - \lambda_{45} + \sqrt{(\lambda_{30} + \lambda_{34} + \lambda_{35} - \lambda_{40} - \lambda_{43} - \lambda_{45})^2 + 4\lambda_{34}\lambda_{43}}}{2},$$

$$r_5 = \lambda_{55} = -(\lambda_{50} + \lambda_{56}), \quad r_6 = r_7 = 0.$$

Z podanych zależności wynika, że wszystkie pierwiastki  $r_k$ ,  $k=1, \dots, 7$ , równania (5.9) są niedodatnimi liczbami rzeczywistymi. Postać rozwiązania układu (5.3) zależy od tego czy wśród liczb  $r_k$ ,  $k=1, \dots, 5$ , są pierwiastki wielokrotne.

### 5.3.2.3. Rozwiązania równań Chapmana-Kolmogorowa w przypadku parami różnych pierwiastkach równania charakterystycznego

W przypadku najbardziej ogólnym, tzn. gdy liczby  $r_k$ ,  $k=1, \dots, 5$ , są ujemne i parami różne, rozwiązanie ogólne układu (5.3) ma postać

$$p_i(t) = \sum_{j=1}^6 b_{ij} e^{r_j t}, \quad i=1, \dots, 6,$$

$$p_0(t) = 1 - \sum_{i=1}^6 p_i(t).$$

Współczynniki  $b_{ij}$  są elementami rzeczywistej macierzy  $\mathbf{B}$  stałych współczynników, zależnych od  $\mathbf{\Lambda}$  oraz  $\mathbf{q}_0$ . Dla układu (5.3) macierz ta jest postaci

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & 0 & 0 \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & 0 & 0 \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & 0 \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} \end{bmatrix}. \quad (5.12)$$

Wartości elementów macierzy (5.12) wyznacza się poprzez rozwiązanie sześciu układów równań liniowych. Dla każdego  $k \in \{1, \dots, 6\}$  zachodzą równości

$$\sum_{l=1}^6 b_{kl} r_l^j = q_{jk}, \quad j=0, 1, \dots, 5 \quad (5.13)$$

( $q_{jk}$  —  $k$ -ta składowa wektora  $\mathbf{q}_j$ ). Rozwiązanie układu (5.13) jest dane wzorami Cramera:

$$b_{kl} = \frac{W_l}{W}, \quad l=1, \dots, 6, \quad (5.14)$$

gdzie:

$$W = \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ r_1 & r_2 & r_3 & r_4 & r_5 & r_6 \\ r_1^2 & r_2^2 & r_3^2 & r_4^2 & r_5^2 & r_6^2 \\ r_1^3 & r_2^3 & r_3^3 & r_4^3 & r_5^3 & r_6^3 \\ r_1^4 & r_2^4 & r_3^4 & r_4^4 & r_5^4 & r_6^4 \\ r_1^5 & r_2^5 & r_3^5 & r_4^5 & r_5^5 & r_6^5 \end{bmatrix} = \prod_{\substack{m,n \in \{1,\dots,6\} \\ m>n}} (r_m - r_n) \quad (5.15)$$

jest wyznacznikiem głównym układu (w tym przypadku jest to wyznacznik Vandermonde'a), zaś  $W_l$  jest wyznacznikiem macierzy powstałej w wyniku zastąpienia  $l$ -tej kolumny macierzy głównej układu (5.14) wektorem wyrazów wolnych

$$(q_{0l}, q_{1l}, q_{2l}, q_{3l}, q_{4l}, q_{5l})^T.$$

(**T** – operator transponowania macierzy). Uwzględniając postać macierzy **B**, dla nieznanych wartości współczynników na podstawie zależności (5.14) otrzymuje się następujące wzory obliczeniowe:

$$\begin{aligned} b_{11} &= q_{01} = 1; \quad b_{21} = \frac{-q_{12}}{r_1 - r_2}, \quad b_{22} = \frac{q_{12}}{r_1 - r_2}; \\ b_{31} &= \frac{q_{23}(r_2 + r_3 + r_4) - q_{33}}{(r_4 - r_1)(r_3 - r_1)(r_2 - r_1)}, \quad b_{32} = \frac{-q_{23}(r_1 + r_3 + r_4) + q_{33}}{(r_4 - r_2)(r_3 - r_2)(r_2 - r_1)}, \\ b_{33} &= \frac{q_{23}(r_1 + r_2 + r_4) - q_{33}}{(r_4 - r_3)(r_3 - r_2)(r_3 - r_1)}, \quad b_{34} = \frac{-q_{23}(r_1 + r_2 + r_3) + q_{33}}{(r_4 - r_1)(r_4 - r_2)(r_4 - r_3)}, \\ b_{41} &= \frac{q_{24}(r_2 + r_3 + r_4) - q_{34}}{(r_4 - r_1)(r_3 - r_1)(r_2 - r_1)}, \quad b_{42} = \frac{-q_{24}(r_1 + r_3 + r_4) + q_{34}}{(r_4 - r_2)(r_3 - r_2)(r_2 - r_1)}, \\ b_{43} &= \frac{q_{24}(r_1 + r_2 + r_4) - q_{34}}{(r_4 - r_3)(r_3 - r_2)(r_3 - r_1)}, \quad b_{44} = \frac{-q_{24}(r_1 + r_2 + r_3) + q_{34}}{(r_4 - r_1)(r_4 - r_2)(r_4 - r_3)}, \\ b_{51} &= \frac{q_{25}(r_2 r_3 + r_2 r_4 + r_2 r_5 + r_3 r_4 + r_3 r_5 + r_4 r_5) - q_{35}(r_2 + r_3 + r_4 + r_5) + q_{45}}{(r_5 - r_1)(r_4 - r_1)(r_3 - r_1)(r_2 - r_1)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{52} &= \frac{-q_{25}(r_1 r_3 + r_1 r_4 + r_1 r_5 + r_3 r_4 + r_3 r_5 + r_4 r_5) + q_{35}(r_1 + r_3 + r_4 + r_5) - q_{45}}{(r_5 - r_2)(r_4 - r_2)(r_3 - r_2)(r_2 - r_1)}, \\
b_{53} &= \frac{q_{25}(r_1 r_2 + r_1 r_4 + r_1 r_5 + r_2 r_4 + r_2 r_5 + r_4 r_5) - q_{35}(r_1 + r_2 + r_4 + r_5) + q_{45}}{(r_5 - r_3)(r_4 - r_3)(r_3 - r_1)(r_3 - r_2)}, \\
b_{54} &= \frac{-q_{25}(r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_1 r_5 + r_2 r_3 + r_2 r_5 + r_3 r_5) + q_{35}(r_1 + r_2 + r_3 + r_5) - q_{45}}{(r_5 - r_4)(r_4 - r_1)(r_4 - r_2)(r_4 - r_3)}, \\
b_{55} &= \frac{q_{25}(r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_1 r_4 + r_2 r_3 + r_2 r_4 + r_3 r_4) - q_{35}(r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + q_{45}}{(r_5 - r_1)(r_5 - r_2)(r_5 - r_3)(r_5 - r_4)}, \\
b_{61} &= \frac{q_{36}(r_2 r_3 + r_2 r_4 + r_2 r_5 + r_3 r_4 + r_3 r_5 + r_4 r_5) - q_{46}(r_2 + r_3 + r_4 + r_5) + q_{56}}{r_1(r_5 - r_1)(r_4 - r_1)(r_3 - r_1)(r_2 - r_1)}, \\
b_{62} &= \frac{-q_{36}(r_1 r_3 + r_1 r_4 + r_1 r_5 + r_3 r_4 + r_3 r_5 + r_4 r_5) + q_{46}(r_1 + r_3 + r_4 + r_5) - q_{56}}{r_2(r_5 - r_2)(r_4 - r_2)(r_3 - r_2)(r_2 - r_1)}, \\
b_{63} &= \frac{q_{36}(r_1 r_2 + r_1 r_4 + r_1 r_5 + r_2 r_4 + r_2 r_5 + r_4 r_5) - q_{46}(r_1 + r_2 + r_4 + r_5) + q_{56}}{r_3(r_5 - r_3)(r_4 - r_3)(r_3 - r_1)(r_3 - r_2)}, \\
b_{64} &= \frac{-q_{36}(r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_1 r_5 + r_2 r_3 + r_2 r_5 + r_3 r_5) + q_{46}(r_1 + r_2 + r_3 + r_5) - q_{56}}{r_4(r_5 - r_4)(r_4 - r_1)(r_4 - r_2)(r_4 - r_3)}, \\
b_{65} &= \frac{q_{36}(r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_1 r_4 + r_2 r_3 + r_2 r_4 + r_3 r_4) - q_{46}(r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + q_{56}}{r_5(r_5 - r_1)(r_5 - r_2)(r_5 - r_3)(r_5 - r_4)}, \\
b_{66} &= \frac{q_{36}(r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_1 r_4 + r_1 r_5 + r_2 r_3 + r_2 r_4 + r_2 r_5 + r_3 r_4 + r_3 r_5 + r_4 r_5)}{r_1 r_2 r_3 r_4 r_5} + \\
&\quad + \frac{q_{56}}{r_1 r_2 r_3 r_4 r_5} - \frac{q_{46}(r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5)}{r_1 r_2 r_3 r_4 r_5}.
\end{aligned}$$

Po obliczeniu wartości współczynników otrzymuje się rozwiązania szczególne układu (5.3) – funkcje  $p_i(t)$ ,  $i=1, \dots, 6$ . Prawdopodobieństwo  $p_0(t)$  nieudanego rozruchu po czasie  $t$  wyznacza się natomiast z zależności

$$p_0(t) = 1 - \sum_{i=1}^6 p_i(t).$$



### 5.3.2.4. Rozkłady ergodyczne

Niech  $\mathbf{p}_g = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{p}(t)$  będzie wektorem prawdopodobieństw ergodycznych.

Jeśli pierwiastki równania charakterystycznego (5.9) spełniają warunki  $r_k < 0$ ,  $k = 1, \dots, 5$ , to rozkład graniczny istnieje i jest równy

$$\mathbf{p}_g = (1 - b_{66}, 0, 0, 0, 0, 0, b_{66}).$$

Oznacza to, że po dostatecznie długim czasie prawdopodobieństwo udanego rozruchu dąży do wartości równej  $b_{66}$ , zaś prawdopodobieństwo nieudanego rozruchu dąży do wartości  $1 - b_{66}$ .

### 5.3.3. Wyznaczanie elementów macierzy intensywności

Przyjmując, że w rozważanym modelu rozruchu silnika czas  $T_{jk}$  przebywania obiektu w stanie  $j$ -tym przed przejściem bezpośrednio do stanu  $k$ -tego, ma dla każdej pary wskaźników  $(j, k) \in \mathbf{S}^2$ ,  $j \neq k$ , rozkład wykładniczy z parametrem  $\lambda_{jk}$ , wartość tego parametru można otrzymać estymując wartość oczekiwaną zmiennej losowej  $T_{jk}$ . Przy założeniu wykładniczego charakteru rozkładu wartość oczekiwana wynosi

$$ET_{jk} = 1/\lambda_{jk} \text{ dla } (j, k) \in \mathbf{S}^2, j \neq k$$

( $E$  – operator wartości oczekiwanej). Estymatorem wartości oczekiwanej zmiennej losowej jest średnia arytmetyczna z próby. Stąd

$$\lambda_{jk} = \frac{n}{\sum_{s=1}^n t_{jk}^{(s)}},$$

gdzie:  $n$  – liczebność próby losowej,  $t_{jk}^{(s)}$  – zmierzona w  $s$ -tej realizacji wartość czasu przebywania obiektu w stanie  $j$  przed przejściem bezpośrednio do stanu  $k$ -tego.

Przedstawione rozważania pozwalają na określenie niezawodności silnika spalinowego ze względu na skuteczność jego pierwszego dziennego startu [37]. Analiza niezawodności pierwszego dziennego startu silnika o zapłonie samoczynnym może być pomocna przy podejmowaniu właściwych decyzji eksploatacyjnych związanych z oceną stanu technicznego silnika o zapłonie samoczynnym.

### 5.3.4. Przykładowa analiza rozkładu prawdopodobieństwa pierwszego dziennego startu silnika spalinowego

W celu określenia rozkładu prawdopodobieństwa pierwszego dziennego startu silnika 4CT90, w oparciu o uzyskane wyniki badań w warunkach „naturalnego” użytkowania pojazdu LUBLIN, wyznaczono empiryczną macierz  $\Lambda$  intensywności przejścia dla procesu Markowa opisującego proces startu:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,041 & 0,041 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -15,020 & 7,978 & 7,042 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5,815 & 4,043 & 1,772 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6,944 & -14,696 & 7,752 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,557 & 0,557 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Przy czym liczebności analizowanej próby losowej wynosiła  $n = 56$  realizacji. Wektorem własnym macierz  $\Lambda$  intensywności przejścia jest wektor

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} -0,041 \\ -15,020 \\ -34,339 \\ -6,685 \\ -0,557 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

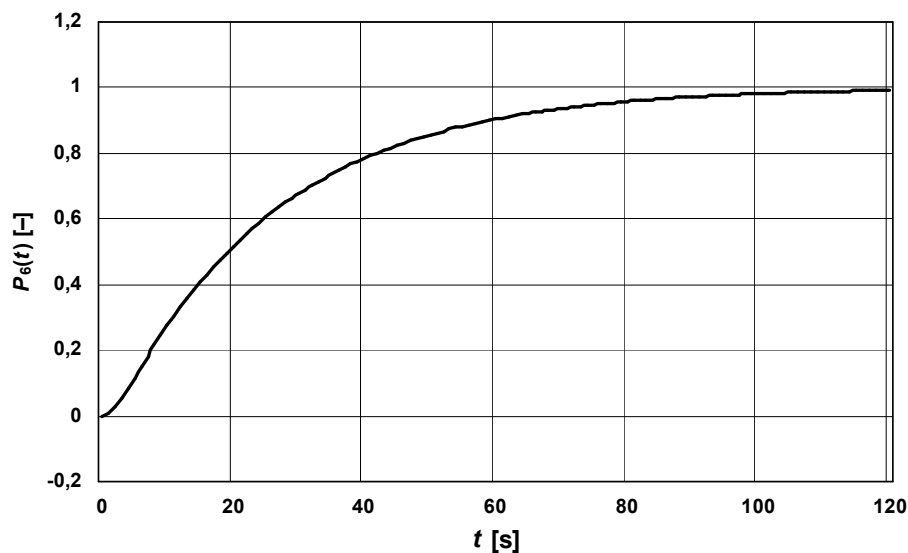
Macierz  $\mathbf{B}$  stałych współczynników jest równa

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,003 & -0,003 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,037 & 0,002 & -0,001 & -0,001 & -0,037 & 0 \\ -0,003 & 0,002 & 0 & -0,006 & 0,007 & 0 \\ 0,052 & -0,001 & 0 & 0,008 & -0,059 & 0 \\ -1,089 & 0 & 0,001 & -0,001 & 0,089 & 1 \end{bmatrix}$$

Prawdopodobieństwo zaistnienia udanego startu silnika spalinowego po upływie czasu  $t$  wyraża się wzorem

$$P_6(t) = 1 - 1,089 \cdot e^{-0,041t} + 0,001 \cdot e^{-34,339t} - 0,001 \cdot e^{-6,685t} + 0,089 \cdot e^{-0,557t}.$$

Na podstawie dokonanych obliczeń opracowano wykres prawdopodobieństwa udanego procesu pierwszego startu silnika 4CT90 samochodu LUBLIN w funkcji czasu trwania tego procesu, który przedstawiono na rysunku 5.9.



Rys. 5.9. Prawdopodobieństwo  $P_6(t)$  zaistnienia udanego pierwszego dziennego startu silnika 4CT90 w funkcji czasu jego trwania w warunkach „długotrwałego” użytkowania samochodu LUBLIN

Z analizy uzyskanych wyników wynika, że o długości trwania procesu startu decyduje czas przebywania obiektu w stanie „1” przed bezpośrednim przejściem do stanu „2”, decydujący o intensywności  $\lambda_{12}$ . Dla pojazdu LUBLIN czas ten zależy do czasu podgrzewania silnika przed jego rozruchem przy pomocy świecy żarowej, który jest znacząco dłuższy niż sumaryczny czas trwania pozostałych wyróżnionych etapów rozruchu. To tłumaczy przekroczenie wartości 0,85 prawdopodobieństwa zaistnienia udanego startu dopiero po 50 sekundach od włączenia świecy żarowej, co można zobaczyć na rys. 5.9.



## **6. WYKORZYSTANIE ZAPROPONOWANEGO KRYTERIUM OCENY WARUNKÓW UŻYTKOWANIA POJAZDU W SYSTEMIE TRANSPORTU POCZTY POLSKIEJ**

Wyniki badań przedstawione w rozdziale 4 niniejszej rozprawy wykorzystano do eksperckiego kryterium oceny systemu transportu Poczty Polskiej w Lublinie. W tym celu opracowano program komputerowy, który dokonuje automatycznego porównania wartości średnich wybranych parametrów „widma rozruchu” z założonymi wartościami „progowymi” (tabela 3.1) przyjętych wielkości charakterystycznych i generuje opisową ocenę słowną systemu.

Do oceny warunków użytkowania badanych pojazdów w warunkach „kontrolowanych” przyjęto największe zaobserwowane wartości średnie dla następujących parametrów „widma rozruchu”: czasu działania silnika, czasu postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem przed rozruchem i długości trasy przebytej przez samochód pomiędzy dwoma kolejnymi rozruchami silnika. Wartości pozostałych parametrów „widma rozruchu”, to jest czasu trwania rozruchu oraz temperatury silnika w chwili rozruchu przyjęto jako najmniejsze wartości średnie. Wartości liczbowe parametrów pokazano na rysunku 6.1. Wynik analizy pojazdów badanych w warunkach „kontrolowanych” przedstawiono na rysunku 6.2.

Do oceny warunków „długotrwałego” użytkowania badanego pojazdu przyjęto wartości średnie parametrów „widma rozruchu” (zob. tabela Z1.5), przedstawione na rysunku 6.3.

Parametry pracy silnika

Podaj średnie wartości parametrów pracy silnika i pojazdu

|      |                                                   |
|------|---------------------------------------------------|
| 8.7  | Czas działania silnika [min]                      |
| 12.6 | Czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem [min] |
| 7.5  | Długość trasy przejazdu samochodu [km]            |
| 81.9 | Temperatura silnika w chwili rozruchu [oC]        |
| .4   | Czas trwania rozruchu [s]                         |

**Wykonaj analizę**

Rys. 6.1. Okno wprowadzania danych do programu oceny system użytkowania pojazdów z wartościami średnim uzyskanymi podczas badań w warunkach „nadzorowanych”

W analizowanym systemie transportu założona organizacja pracy pojazdu powoduje, że można obserwować krótkie czasy działania silnika.

Występujący przeciętny czas postoju oznacza niedopracowany system załadunkowo-wyładunkowy.

Położenie punktów dowozu oraz założona organizacja przebiegów pomiędzy nimi powodują, że pojazd podczas dnia użytkowania wykonuje przejazdy na krótkich trasach.

Podczas użytkowania pojazdu występują przede wszystkim 'gorące' rozruchy jego silnika spalinowego.

Organizacja warunków użytkowania pojazdu powoduje, że występuje natychmiastowy rozruch jego silnika spalinowego.

Warunki użytkowania pojazdu w badanym systemie transportu są właściwe i minimalizują negatywne oddziaływanie jakie podczas rozruchu wywiera na środowisko naturalne silnik spalinowy. Świadczy to o wysokiej kulturze techniczno-organizacyjnej analizowanej firmy.

**Zamknij**

Rys. 6.2. Okno programu do oceny system użytkowania z wynikiem oceny systemu transportu na podstawie badań „nadzorowanych”

Podaj średnie wartości parametrów pracy silnika i pojazdu

|      |                                                   |
|------|---------------------------------------------------|
| 8,6  | Czas działania silnika [min]                      |
| 10,8 | Czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem [min] |
| 7,1  | Długość trasy przejazdu samochodu [km]            |
| 71,8 | Temperatura silnika w chwili rozruchu [oC]        |
| 1,0  | Czas trwania rozruchu [s]                         |

**Wykonaj analizę**

Rys. 6.3. Okno wprowadzania do programu oceny system użytkowania pojazdu z wartościami średnim uzyskanymi podczas badań w warunkach „naturalnych”

Wynik analizy dla samochodu LUBLIN badanego w warunkach „naturalnych” przedstawiono na rysunku 6.4.

W analizowanym systemie transportu założona organizacja pracy pojazdu powoduje, że można obserwować krótkie czasy działania silnika.

Występujący przeciętny czas postoju oznacza niedopracowany system załadunkowo-wyładunkowy.

Położenie punktów dowozu oraz założona organizacja przebiegów pomiędzy nimi powoduje, że pojazd podczas dnia użytkowania wykonuje przejazdy na krótkich trasach.

Podczas użytkowania pojazdu występują przede wszystkim 'gorące' rozruchy jego silnika spalinowego.

Organizacja warunków użytkowania pojazdu powoduje, że występuje natychmiastowy rozruch jego silnika spalinowego.

Warunki użytkowania pojazdu w badanym systemie transportu są właściwe i minimalizują negatywne oddziaływanie jakie podczas rozruchu wywiera na środowisko naturalne silnik spalinowy. Świadczy to o wysokiej kulturze techniczno-organizacyjnej analizowanej firmy.

**Zamknij**

Rys. 6.4. Okno programu do oceny system użytkowania z wynikiem oceny systemu transportu Poczty Polskiej na podstawie badań „długotrwałych” pojazdu LUBLIN

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że warunki użytkowania pojazdów LUBLIN w systemie transportu Poczty Polskiej w Lublinie są właściwe i minimalizują negatywne oddziaływanie jakie wywiera na środowisko naturalne podczas rozruchu silnik spalinowy. Świadczy to o wysokiej kulturze techniczno-organizacyjnej analizowanej firmy, pomimo stwierdzenia niedopracowanego (w świetle przyjętych w rozprawie wartości „progowych” czasu postoju) systemu załadunkowo-wyładunkowego.



## 7. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie rozważań przedstawionych w monografii, obejmujących studium literaturowe i analizę wyników wieloletnich badań stanowiskowych oraz badań w warunkach rzeczywistego użytkowania pojazdów, dotyczących zagadnień rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, a prowadzonych według własnego programu autora można sformułować końcowe wnioski, wyodrębniając trzy grupy tematyczne:

- wnioski dydaktyczne,
- wnioski naukowe,
- wnioski utylitarne.

### *Wnioski dydaktyczne:*

1. Rozruch silnika o zapłonie samoczynnym jest procesem, podczas którego zwiększa się emisja składników toksycznych w spalinach, wzrasta intensywność zużywania się par tribologicznych silnika oraz występują nagłe przeciążenia w elektrycznym układzie rozruchowym pojazdu. O skali tych procesów decyduje przede wszystkim temperatura silnika i oleju silnikowego w chwili rozruchu, które są zależne od czasu postoju pojazdu i warunków atmosferycznych. Wraz ze spadkiem wartości wymienionych temperatur wzrasta czas trwania rozruchu silnika, a tym samym nasilają się negatywne zjawiska.
2. Istnieje potrzeba rozróżniania pojęć takich jak: uruchamianie silnika, rozruch i proces startu. Uruchamianie silnika (czyli napędzanie wału korbowego przy pomocy samego rozrusznika) jest składową rozruchu silnika (rozumianego jako doprowadzenie silnika do samodzielnego działania), natomiast rozruch jest elementem końcowym procesu startu silnika (obejmującym czynności przygotowawcze np.: włączenie podgrzewania silnika, świec żarowych itp.).

3. Podstawowymi parametrami opisującymi proces rozruchu silnika są: średnie natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik podczas uruchamiania, czas pracy rozrusznika pod obciążeniem, czas przyłożenia napięcia na jego zaciski, czas rozruchu, prędkość kątowna rozruchu, rozruchowy moment oporowy silnika, temperatura graniczna i temperatura rozruchu natychmiastowego, a także inne, zaprezentowane i omówione w niniejszej rozprawie.
4. Na podstawie analizy przebiegu zmian wartości prędkości kątowej wału korbowego oraz natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas fazy zazębiania się jego zębniaka z kołem zamachowym silnika, w procesie rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym można wyróżnić cztery charakterystyczne etapy.

*Wnioski naukowe:*

1. Opory statyczne ruchu, które charakteryzuje wartość maksymalnego prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu, są niezależne od stanu cieplnego silnika spalinowego. Wskazuje to, że opory statyczne zależą przede wszystkim od konstrukcji układu korbowo-tłokowego silnika.
2. Czas trwania rozruchu zgodnie z proponowaną w rozprawie definicją jest dłuższy niż czas trwania rozruchu określany zgodnie z procedurą znormalizowanych badań rozruchowych. Wynika to z uwzględnienia w analizie zarówno przebiegu zmian prędkości kątowej wału korbowego silnika jak i zmian natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, w przeciwieństwie do znormalizowanej procedury uwzględniającej jedynie zmiany natężenia prądu.
3. Wyniki pomiarów temperatury silnika oraz temperatury oleju silnikowego w chwili rozruchu wykazują, że podczas badań przebiegowych pojazdu można uprościć procedury badawcze wyłączając pomiar jednej z nich. Proponuje się rejestrować tylko temperaturę oleju silnikowego, która jest przeważnie niższa od temperatury silnika.
4. Pierwsze dzienne rozruchy silnika należy badać odrębnie. W czasie ich trwania obserwuje się najniższe wartości temperatury silnika i jego oleju smarującego, które znacznie odbiegają od wartości rejestrowanych przy następnych rozruchach w ciągu dnia. Pierwsze dzienne rozruchy niosą najwięcej informacji o stanie technicznym silnika i należy na nie zwracać uwagę w trakcie przeprowadzania badań przebiegowych pojazdów.

5. Uproszczonym modelem matematycznym przebiegu pierwszego dziennego rozruchu silnika spalinowego może być jednorodny dyskretny proces Markowa. Pozwala on na oszacowanie liczbowych wartości prawdopodobieństwa uruchomienia silnika. Funkcja niezawodności uwzględniająca kryterium skuteczności pierwszego dziennego rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jest źródłem dodatkowej informacji, wspomagającej podejmowanie decyzji eksploatacyjnych, związanych z oceną stanu technicznego silnika spalinowego.

*Wnioski uylitarne:*

1. O warunkach i parametrach pracy pojazdu oraz działania i rozruchu jego silnika spalinowego decyduje przede wszystkim organizacja tras przejazdów. Zaplanowanie na początku dnia pracy pojazdu długich przebiegów powoduje uzyskanie przez jego silnik „stabilnych” warunków cieplnych.
2. Przyjęcie właściwej organizacji prac załadunkowo-wyładunkowych podczas dnia użytkowania pojazdu minimalizującej czas trwania jego postojów z wyłączonym silnikiem powoduje, że temperatura silnika nie zdąży zbyt szybko się obniżyć. Przyczynia się to do wzrostu udziału tzw. „gorących” rozruchów silnika, w których czas rozruchu nie przekracza 3 s oraz obserwuje się ograniczenie skali niekorzystnych zjawisk i procesów.
3. Liczba rozruchów silnika oraz przejechanych przez pojazd kilometrów jest większa niż wynika z organizacji jego przejazdów w trakcie dnia pracy. Jest to wynikiem nieujętych harmonogramem dodatkowych prac manewrowych samochodów na terenie punktów załadunkowo-wyładunkowych oraz bazy transportowej.
4. Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że w systemie transportowym realizującym powtarzalne zlecenia można dokonać oceny warunków użytkowania pojazdów na podstawie analizy obiektu wybranego losowo z grupy.
5. Zaproponowane kryterium oceny warunków użytkowania pojazdu stanowi istotny element bazy wiedzy charakteryzującej samochodowe systemy transportowe, umożliwiając ich bardziej wszechstronny osąd.



## 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, str.7-12. ISSN 1509-9237.
2. Ajav E. A., Singh B., Bhattacharya T. K.: *Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel*. Biomass & Bioenergy. No. 17(1999), str. 357-365. ISSN: 0961-9534.
3. Becker E. P., Ludema K. C.: *A qualitative empirical model of cylinder bore wear*. WEAR. No. 225-229, 1999, str. 387-404. ISSN 0043-1648.
4. Bendtsen H., Thorsen H.: *A survey of the number of cold vehicles on the roads*. The Science of the Total Environment. No. 189/190, 1996, str. 113-121. ISSN 0048-9697.
5. Bernardo A. and others: *Camelina oil as a fuel for diesel transport engines*. International Journal Industrial Crops and Products. No. 17(2003), str. 191-197. ISSN 0926-6690.
6. Bielaczyc P., Merkisz J., Pielecha J.: *Stan cieplny silnika spalinowego a emisja związków szkodliwych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań, 2001. ISBN 83-7143-435-9.
7. Bobrowski D.: *Probabilistyka w zastosowaniach technicznych*. WNT. Warszawa, 1986. ISBN 83-204-0777-X.
8. Buck W. H., Lohuis J. R.: *Lubricant effects on low-temperature diesel engine cold starting*. SAE Technical Paper Series. No. 940097, 1994, str. 117-124.
9. Chan S. H., Hoang D. L., Zhou P. L.: *Heat transfer and chemical kinetics in the exhaust system of cold-start engine fitted with a three-way catalytic converter*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, Journal of Automobile Engineering. Vol. 215, 2001, str. 765-777. ISSN 0954-4070.
10. Chłopek Z.: *Ochrona środowiska naturalnego*. WKiŁ. Warszawa, 2002. ISBN 83-2061451-1.
11. Cisko Š., Poniščiakoá O.: *Dynamic calculation of costs in freight transport*. Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina. Vol. 11, 1999. str. 23-26. ISBN 80-7100-628-9.
12. Cisko Š., Švaňa Š.: *Mathemaical and statistical methods of costs modeling*. Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina. Vol. 15, 2001. str. 19-23. ISBN 80-7100-861-3.

13. Cupiał K., Dużyński A., Grzełka J.: *Warunki skutecznego rozruchu silnika biogazowego*. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 13, Problemy rozruchu silników spalinowych. 2005, str. 37-45. ISSN 1509-9237.
14. Cypko E., Drożdziel P., Ignaciuk P., Krzywonos L.: *Wpływ temperatury rozruchu na zużycie gładzi tulei cylindrowych silników spalinowych*. Biuletyn WAT. Vol. LV, nr 3(643), 2006, str. 113-125. ISSN 0366-4988.
15. Czarnigowski J., Drożdziel P.: *Rodzaje badań obiektów technicznych w trakcie ich eksploatacji*. Folia Societatis Scientiarum Lublinensis, Technika. Vol. 10, 2001, str. 25-28. ISSN 1428-3646.
16. Čorejová T., Štofková J.: *Modelling of influence of economy structure on demand for postal and telecommunication services in region of Horné Považie and Kysuce*. Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina. Vol. 5, 1996. str. 17-21. ISBN 80-7100-727-7.
17. Čorejová T., Madleňáková L.: *Some remarks to postal service quality*. 11<sup>th</sup> International Scientific Conference: Communications on the Edge of the Millenniums. Žilina, Slovak Republic, 2003, str. 27-30. ISBN 80-8070-120-2.
18. Dembińska-Cyran I., Gugala M.: *Podstawy zarządzania transportem w przykładach*. Biblioteka Logistyka. Instytut Logistyki i Magazynowania. Poznań, 2005. ISBN 83-87344-02-3.
19. Dobosz M.: *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2001. ISBN 83-87674-29-X.
20. Drożdziel P., Niewczas A.: *Czynniki efektywności eksploatacji samochodu ciężarowego*. Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych. Z. 7, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN w Krakowie, 1996, str. 17-21. ISBN 83-906476-1-3.
21. Drożdziel P., Niewczas A.: *Widmo rozruchu silnika 359M samochodu ciężarowego STAR 1142*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1996, str. 29-34. ISBN 83-86359-24-2.
22. Drożdziel P.: *Metoda oceny eksploatacyjnej trwałości tłokowego silnika spalinowego z uwzględnieniem przebiegu rozruchu*. Rozprawa Doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin, 1998.
23. Drożdziel P.: *Przebieg międzyrozruchowy – nowa charakterystyka procesu eksploatacji silników*. Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych, z. 17, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN w Krakowie. 1999, str. 5-11. ISBN 83-906476-1-3.
24. Drożdziel P.: *Skumulowana liczba obrotów wału korbowego samochodowego silnika spalinowego jako uniwersalna miara trwałości układu tłok-pierścienie-cylinder w badaniach stanowiskowych i eksploatacyjnych*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. Z. 1(121), 2000, str. 144-152. ISSN 0137-5474.
25. Drożdziel P.: *Metoda oceny eksploatacyjnej trwałości tłokowego silnika samochodowego z uwzględnieniem przebiegu rozruchu*. Eksploatacja i Niezawodność. Nr 6, 2000, s. 41-49. ISSN 1507-2711.

26. Drożdziel P.: *Badania rozruchu silnika 4CT90 w czasie eksploatacji samochodu dostawczego LUBLIN*. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 6, Problemy rozruchu silników spalinowych. 2002, str. 45-50. ISSN 1509-9237.
27. Drożdziel P., Ignaciuk P.: *Zużycie tulei cylindrowych podczas rozruchu spalinowego silnika 4C90 o zapłonie samoczynnym*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. Z. 4(136), vol. 38, 2003, str. 22-30. ISSN 0137-5474.
28. Drożdziel P., Ignaciuk P., Kordos P.: *Working Conditions of the Lublin III delivery truck during its operations. Proceedings of 5-th European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications TRANSCOM 2003, Sec. 6*, str. 35-38. ISBN 80-8070-085-0.
29. Drożdziel P.: *Rozruchy silnika spalinowego w warunkach nadzorowanej eksploatacji samochodu*. Teka Komisji Budowy i Eksploatacji Maszyn, Elektrotechniki, Budownictwa PAN O/Lublin. T. I, Lublin, 2003, str. 34-38. ISSN 1730-9131.
30. Drożdziel P., Liščák Š.: *The chosen problems of commercial truck maintenance*. EDIS- Žilina University publisher. Žilina, Slovak Republic, 2005. ISBN 80-8070-321-3
31. Drożdziel P.: *Związki pomiędzy wybranymi parametrami rozruchu silnika spalinowego a warunkami eksploatacyjnymi samochodu*. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 13, Rozruchu silników spalinowych. 2005, str. 47-52. ISSN 1509-9237.
32. Drożdziel P., Krzywonos L., Pieczywek P.: *An expert characteristic of engine start-ups during vehicle maintenance*. 3<sup>rd</sup> International Conference Road and Urban Transport and Sustainable Development CMDTUR 2005. Žilina, Slovak Republic str. 34-39. ISBN 80-8070-452-X.
33. Drożdziel P.: *Nowa klasyfikacja etapów rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. Z. 4(144), vol. 40, 2005, str. 87-96. ISSN 0137-5474.
34. Drożdziel P.: *Analiza rozruchu jako procesu wieloetapowego*. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 16, 2007, str. 15-21. ISSN 1509-9237.
35. Drożdziel P.: *Wybrane parametry pracy i rozruchu silnika spalinowego jako elementy kryterium oceny systemu transportu samochodowego*. Eksploatacja i Niezawodność. Nr 4(32), 2006, str. 6-10. ISSN 1507-2711.
36. Drożdziel P.: *O rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym*. Eksploatacja i Niezawodność. Nr 2(34), 2007, str. 51-59. ISSN 1507-2711.
37. Drożdziel P., Krzywonos L.: *The use of the start-up process analysis in the estimation of the technical state of diesel engine*. Diagnostyka. Nr 3(43), 2007, str. 11-14. ISSN 641-6414.
38. Drożdziel P. i inni: *Wybrane zagadnienia samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym*. PNTTE, 2007. ISBN 83-911726-2-7.
39. Ericsson E.: *Independent driving pattern factors and they influence on fuel-use and exhaust emission factors*. Transportation Research. Part D. Transport and Environment. No. 6(2001), str. 325-345. ISSN 1361-9209.

40. Frank L. D.: Stone B. Jr., Bachman W.: *Linking land use with household vehicle emissions in the central Puget sound: methodological framework and findings*. Transportation Research. Part D. Transport and Environment. 5(2000), str. 173-196. ISSN 1361-9209.
41. Gnap J., Paľová M.: *The costs questions and the heigh of grants for the public mass passenger transport*. Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina. Vol. 13, 2000. str. 19-23. ISBN 80-7100-727-7.
42. Gnap J., Konečný V.: *Transport services supplier's quality assurance methods*. 11<sup>th</sup> International Scientific Conference: Communications on the Egde of the Millenniums. Žilina, Slovak Republic, 2003, str. 53-56. ISBN 80-8070-120-2.
43. Gnap J.: *Trvalo udržateľný rozvoj cestnej dopravy*. 3<sup>rd</sup> International Conference Road and Urban Transport and Sustainable Development CMDTUR 2005, Žilina, Slovak Republic str. 113-120. ISBN 80-8070-452-X.
44. Hebda M. red.: *Eksploatacja samochodów*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom, 2005. ISBN 83-7204-476-7.
45. Hlavná V., Kukuča P., Isteník R., Labuda R., Liščák Š.: *Dopravný prostriedok jeho motor*. EDIS- Žilina University publisher. Žilina, Slovak Republic, 2000. ISBN 80-7100-665-3.
46. Hlavná V., Sojčák D., Isteník R.: *Nonconvetional principle of conversion of heat into cold in an internal combustion engine*. Communications. No 2, 2006, str. 10-22. ISSN 1335-4205.
47. Iskra A.: *Opory tarcia tłok-cylinder w temperaturze rozruchu silnika*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 2000, str. 47-53. ISBN 83-87423-39-4.
48. Janotová H.: *The effectiveness of corporate codes of ethics in transport and communications*. Transcom '97. Vol. 1, University of Žilina, Žilina, Slovak Republic, str. 55-58. ISBN 80-7100-415-4.
49. Jarosiński J.: *Techniki czystego spalania*. WNT. Warszawa, 1996. ISBN 83-204-2073-3.
50. Jasica G. , Wistuba H.: *Niezawodnościowe aspekty procesu tribologicznego w parze gładź cylindra – pierścienie tłoka przy ograniczonym smarowaniu*. Tribologia. Nr 4/2001, str. 599-609. ISSN 0208-7774.
51. Jaźwiński J., Grabski F.: *Niektóre problemy modelowania systemów transportowych*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu. Radom, 2003. ISBN 83-7204-329-9.
52. Jensen M. F., Bottiger J., Reitz H. H., Benzon M. E.: *Simulation of wear characteristics of engine cylinder*. WEAR. No. 253, 2002, str. 1044-1056. ISSN 0043-1648.
53. Jensen S. S.: *Driving patterns and emissions from different types of roads*. The Science of the Total Environment. 169 (1995), str. 123-128. ISSN 0048-9697.
54. Jeong S-J., Kim W-S.: *A new strategy for improving the warm-up performance of a light-off auto-catalyst for reducing cold-start emissions*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, Journal of Automobile Engineering. Vol. 215, 2001, str. 1179-1196. ISSN 0954-4070.



55. Kalam M. A., Masjuki H. H.: *Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated in preheated crude palm oil*. Biomass & Bioenergy. No. 27(2004), str. 289-297. ISSN: 0961-9534.
56. Kalašová A., Gurinová J.: *Systems identification vehicle location as the important component of intelligent transportation systems*. Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina. Vol. 19, 2003. str. 67-72. ISBN 80-8070-096-6.
57. Kilar H., Uzdowski M.: *Wpływ niskich temperatur na opory wewnętrzne zespołów spalinowego silnika tłokowego*. Rozprawa doktorska WAT. Warszawa, 1986.
58. Kilar H., Uzdowski M.: *Niskotemperaturowe właściwości paliw do silników ZS*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1996, str. 67-73. ISBN 83-86359-24-2.
59. Kilar H.: *Paliwa alternatywne, wpływ różnych dodatków na ich własności*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1998, str. 77-82. ISBN 83-87423-56-4.
60. Kolanek Cz., Mendiya B., Sikora A., Walkowiak W.: *Skład gazów wylotowych przy zimnym rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym*. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 6, Problemy rozruchu silników spalinowych. 2002, str. 75-80. ISSN 1509-9237.
61. Koliński K., Pszczółkowski J.: *Zużycie cylindrów silnika AD4.236 w warunkach rozruchu*. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 6, Problemy rozruchu silników spalinowych. 2002, str. 81-86. ISSN 1509-9237.
62. Kordos P.: *Stanowiskowa metoda badań niezawodności samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym*. Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska, Lublin, 2005.
63. Kowalewicz A.: *Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych*. WKiŁ. Warszawa, 1990. ISBN 83-206-0891-0
64. Kowalewicz A.: *Podstawy procesów spalania*. WNT. Warszawa, 2000. ISBN 83-204-2496-8.
65. Kowalski K.: *Wybrane problemy rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego paliwami zastępczymi*. Eksploatacja silników spalinowych, Z. 13, Problemy rozruchu silników spalinowych. 2005, str. 83-92. ISSN 1509-9237.
66. Krzywonos L.: *Model eksploatacyjnego przebiegu zużycia elementów układu tłok-pierścienie-cylinder silnika samochodowego o zapłonie samoczynnym*. Rozprawa Doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin, 1999.
67. Lawrowski Z.: *Tribologia - Tarcie, zużywanie i smarowanie*. PWN. Warszawa, 1993. ISBN 83-01-10949-1.
68. Lenaers G.: *On-board real life emission measurements on a 3 way catalyst gasoline car in motor way-, rural- and city traffic and on two Euro-1 diesel city buses*. The Science of the Total Environment. No. 189/190(1996), str. 139-147. ISSN 0048-9697.
69. Lewicki J.: *Opory tarcia i zużycie silników z zapłonem samoczynnym przy rozruchu w niskich temperaturach*. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej. Nr 353. Szczecin, 1988. ISSN 0208-8088.
70. Liščák Š.: *Spoločnosť v prevádzke cestných vozidiel*. EDIS- Žilina University publisher. Žilina, Slovak Republic, 2002. ISBN 80-7100-969-5.

71. Lombaert K., Moyne L. Ie., Tardieu de Maleissye J., Amouroux J.: *Analysis of diesel particulate: influence of air-fuel ratio and fuel composition on polycyclic aromatic hydrocarbon content*. International Journal of Engine Research. Vol. 3, No. 2, 2002, str. 103-114. ISSN 1468-0874.
72. Luszniwicz A., Słaby T.: *Statystyka z pakietem komputerowym STATISTICA PL - Teoria i zastosowanie*. Wydawnictwo C.H. BECK. Warszawa, 2001. ISBN 83-7110-736-6.
73. Mathis U. Mohr M., Forss A. M.: *Comprehensive particle characterization of modern gasoline and diesel passenger cars at low ambient temperatures*. Atmospheric Environment. No. 39 (2005), str. 107-117. ISSN 1352-2310.
74. 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, str. 21-28.
75. Michalski R., Niziński S.: *Podstawy eksploatacji obiektów technicznych*. Wydawnictwo ART. Olsztyn 1997. ISBN 83-86497-78-5.
76. Merkiś J., Hlavňa V., Jursa P.: *Harmful emissions on a cold start*. Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina. Vol. 5, 1996. str. 43-48.
77. Merkiś J., Pielecha J.: *Zagadnienia emisji cząstek stałych podczas rozruchu silnika ZS*. Eksploatacja silników spalinowych. Z. 6, Problemy rozruchu silników spalinowych. 2002, str. 81-86. ISSN 1509-9237.
78. Merkiś J.: *Ekologiczne problemy silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Tom 1 i 2. Poznań, 1998. ISBN 83-7143-07-1.
79. Miksiewicz K., Reksa M.: *Problemy rozruchu silnika spalinowego zasilanego olejem rzepakowym*. Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1998, str. 181-183. ISBN 83-87423-56-4.
80. Mysłowski J.: *Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym*. WNT. Warszawa, 1996. ISBN 83-204-2050-4.
81. Naylor M., Kadali P., Wang J.: *Diesel engine tribology*. Automotive Tribology. Modern Tribology Handbook. Chapter 33. Vol. I & II. CRC Press LCC. 2001. ISBN 978-0849384035.
82. Niewczas A., Ignaciuk P., Drożdżel P.: *Stanowiskowe badania zużycia cylindrów podczas rozruchu silnika*. Conference Proceedings: 24TH International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 1998, Politechnika Gdańska, Wojskowa Akademia Marynarki w Gdyni, Gdańsk, 1998, str. 138-144. ISBN 83-900666-6-1.
83. Niewczas A.: *Trwałość zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego*. WNT. Warszawa, 1998. ISBN 83-204-2267-1.
84. Niewczas A.: *Problemy trwałości eksploatacyjnej samochodów ciężarowych*. LTN. Lublin, 1997. ISBN 83-85491-90-2.
85. Niewczas A., Koszałka G.: *Niezawodność silników spalinowych – wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej. Lublin, 2003. ISBN 83-89246-31-7.
86. Niewczas A. red.: *Wybrane zagadnienia transportu samochodowego*. PNTTE. Warszawa, 2005. ISBN 83-911726-1-9.

87. Olejnik K.: *Standaryzacja badań pojazdów samochodowych w procesie homologacji*. Rozdział w monografii „Wybrane zagadnienia transportu samochodowego”. PNTTE. Warszawa, 2005. ISBN 83-911726-1-9.
88. Piasecki S.: *Zagadnienia użytkowania maszyn i środków transportowych*. LTN, PNTTE. Warszawa-Lublin, 1995. ISBN 83-85491-61-9.
89. Piekarski W., Kuranc A.: *Zadymienie spalin silnika z ZS w warunkach zimnego rozruchu przy wykorzystaniu różnych paliw*. Teki Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. PAN O/Lublin. Lublin, 2001, str. 218-223. ISSN 1642-1639.
90. Priest M., Taylor C. M.: *Automobile engine tribology – approaching the surface*. WEAR. No. 241, 2000, str. 193-203. ISSN 0043-1648.
91. Prochowski L., Żukowski A.: *Samochody ciężarowe i autobusy*. WKiŁ. Warszawa, 2006. ISBN 83-206-1625-5.
92. Pszczółkowski J.: *Prędkość obrotowa wału korbowego jako główne kryterium możliwości rozruchu silników spalinowych*. Materiały Sympozjum Dodatek – „Rozruch silników spalinowych”. Szczecin, 1996, str. 11-16. ISBN 83-86359-24-2.
93. Pszczółkowski J.: *Charakterystyki rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym*. Wydawnictwo SEPP „Cogito”. Zbąszynek, 2004. ISBN 83-910909-6-5.
94. 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, str. 615-624. ISBN 83-89968-28-2.
95. Radkowski S. red.: *Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego w analizie ryzyka technicznego*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu. Radom, 2006. ISBN 83-7204-535-6.
96. Rakha H., Ahn K., Trani A.: *Development of VT-Micro model for estimation hot stabilized light duty vehicle and truck emissions*. Transportation Research. Part D. Transport and Environment. 9 (2004), str. 49-74. ISSN 1361-9209.
97. Riga A. T., Roby S. H.: *Low-temperature properties of crankcase motor oils: a fundamental approach to pumpability phenomena*. Lubrication Engineering. Journal of STLE. Vol. 50, 1994, str. 411-417. ISSN 0024-7154.
98. Serdecki W.: *Badanie współpracy elementów układu tłokowo-cylindrowego silnika spalinowego*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2002. ISBN 83-7143-516-9.
99. Slater A.: *Specification for a dynamic vehicle routing and scheduling system*. International Journal of Transport Management. No. 1(2002), str. 29-40. ISSN: 1471-4051
100. Smith M. F.: *Understanding diesel engine lubrication at low temperature*. SAE Technical Paper Series. No. 902177. 1990, str. 1134-1152.
101. Smalko Z.: *Podstawy eksploatacji technicznej pojazdów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 1998. ISBN 83-87012-93-9.
102. Soltic P., Weilenmann M.: *NO<sub>2</sub>/NO emissions of gasoline passenger cars and light-duty trucks with Euro-2 emission standard*. Atmospheric Environment. No. 37(2003), str. 5207-5216. ISSN 1352-2310.

103. Surovec P.: *Tools for developing passenger transport*. Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina. Vol. 15, 2001. str. 133-136. ISBN 80-7100-861-3.
104. Surovec P.: *Technológia hromadnej osobnej dopravy (cestná a mestská doprava)*. Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 1998. ISBN 80-7100-494-4.
105. Szlachta Z.: *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi*. WKiŁ. Warszawa, 2002. ISBN 83-206-1459-7.
106. Šulgan M.: *Trip generation and attraction in the transport planning process*. Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina. Vol. 19, 2003. str. 173-176. ISBN 80-8070-096-6.
107. Šulgan M.: *The transport system and logistics*. Studies of Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications of University of Transport and Communications in Žilina, Vol. 11, 1999. str. 141-145. ISBN 80-7100-628-9.
108. Tadeusiewicz R. red.: *Wprowadzenie do sieci neuronowych*. StatSoft Polska Sp. z o.o.. Kraków, 2001. ISBN 83-888724-04-5.
109. Tarkowski P., Fijałkowski S.: *Rola układu paliwowego silnika o ZS w rozruchach w niskich temperaturach*. Teka Motoryzacji PAN O/Kraków. Z. 15, Kraków, 1998, str. 205-212. ISSN 1642-1639.
110. Thompson G. J., Atkinson C. M., Clark N. N., Long T. W., Hanzevack E.: *Neural network modeling of the emissions and performance of heavy-duty diesel engine*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, Journal of Automobile Engineering. Vol. 214, 2000, str. 111-126. ISSN 0954-4070.
111. Urs M. Mohr M., Forss A.M.: *Comprehensive particle characterization of modern gasoline and diesel passenger cars at low ambient temperature*. Atmospheric Environment. No. 39 (2005), str. 107-117. ISSN 1352-2310.
112. Uzdowski M., Bramek K. F., Garczyński K.: *Eksploatacja techniczna i naprawa*. WKiŁ. Warszawa, 2003. ISBN 83-206-1496-1.
113. Vasiliev L. L., Burak V. S., Kulakov A. G., Mishkinis D. A., Bohan P. V.: *Heat storage device for pre-heating internal combustion engines at start-up*. Applied Thermal Engineering. No. 20(2000), str. 913-923. ISSN 1359-4311.
114. Wajand J. A., Wajand J. T.: *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*. WNT. Warszawa, 1997. ISBN 83-204-2153-5.
115. Weilenmann M., Stolic P., Saxer Ch., Forss A-M., Heeb N.: *Regulated and nonregulated diesel and gasoline cold start emissions at different temperatures*. Atmospheric Environment. No. 39(2005), str. 2433-2441. ISSN 1352-2310.
116. Witkowska D.: *Sztuczne sieci neuronowe i metody statystyczne*. Wydawnictwo C.H. BECK. Warszawa, 2002. ISBN 83-7110-639-4
117. Woropay M., Landowski B. Jaskulski Z.: *Wybrane problemy eksploatacji i zarządzania systemami technicznymi*. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy. Bydgoszcz, 2004. ISBN 83-8933-495-X
118. Xu G. H., Lee J. H., Liang H., Georing D.: *Tribological properties of solid-lubricating coating on cylinder bore at low temperature*. WEAR. No. 257, 2004, str. 59-65. ISSN 0043-1648.

119. Yoo J-H., Bonadies V., Detwiler E., Ober M., Reed D.: *A study of fast light-off planar oxygen sensor application for exhaust emissions reduction*. SAE Technical Paper Series. No. 2000-01-0888, 2000.
120. Zahdeh A. R., Nenein N. A.: *Diesel engine cold starting: white smoke*. SAE Technical Paper Series. No. 920032. 1994, str. 269-280.
121. 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, str. 809-824. ISSN 0954-4070.
122. J1635 *Cold-start and drive ability procedure*, Issued 1993-05-10.
123. BN-74/1345-09 *Silniki z zapłonem samoczynnym – Określenie granicznej temperatury rozruchu*.
124. BN-82/1374-10 *Silniki samochodowe. Badania stanowiskowe – Określenie właściwości rozruchowych w niskich temperaturach*.
125. PN-EN 116:2001 *Przetwory naftowe – Oznaczenie temperatury zablokowania zimnego filtra*.
126. PN-88/C-04150 *Przetwory naftowe – Oznaczanie lepkości strukturalnej olejów silnikowych w niskich temperaturach symulatorem zimnego rozruchu*.
127. PN-EN 590:2005 *Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań*.



## **Załącznik 1**

**Tabele wskaźników statystycznych  
parametrów „widma rozruchu” silników 4CT90  
poddanych badaniom przebiegowym  
w warunkach „naturalnego” i „kontrolowanego”  
użytkowania pojazdów LUBLIN**

Tabela Z1.1. Parametry położenia i rozrzutu parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN nr 1 uzyskane podczas badań w warunkach „kontrolowanych”

| Parametr „widma rozruchu”       | Wartość średnia | Odchylenie standardowe | Mediana  | Moda     | Błąd standardowy | Skośność | Kurtoza  | Wartość min | Wartość max |
|---------------------------------|-----------------|------------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|-------------|-------------|
| Prąd $I_{max}$ [A]              | 624,738         | 92,0812                | 612,000  | 660,000  | 4,96469          | 0,17390  | -0,7477  | 416,000     | 836,000     |
| Napięcie $U_{max}$ [V]          | 7,819           | 0,6684                 | 7,860    | 7,8600   | 0,03604          | -0,38355 | -0,2069  | 6,000       | 9,480       |
| Moc $P_{max}$ [W]               | 4851,993        | 600,9541               | 4836,960 | Wielokr. | 32,40127         | -0,06456 | -0,1616  | 3030,00     | 6284,880    |
| Prąd $I_{sr}$ [A]               | 294,271         | 10,8802                | 292,000  | 288,800  | 0,77128          | 2,45230  | 7,7534   | 280,980     | 354,580     |
| Napięcie $U_{sr}$ [V]           | 9,295           | 0,3287                 | 9,320    | Wielokr. | 0,02330          | -0,47383 | 0,4241   | 8,130       | 10,130      |
| Moc $P_{sr}$ [W]                | 2733,636        | 98,0677                | 2737,980 | Wielokr. | 6,95184          | -0,00331 | 1,0258   | 2420,592    | 3031,920    |
| Czas $t_{roz}$ [sek]            | 0,355           | 0,134                  | 0,350    | 0,350    | 0,00724          | 4,83175  | 35,7534  | 0,150       | 1,550       |
| Czas $t_{przył}$ [sek]          | 0,440           | 0,181                  | 0,400    | 0,350    | 0,0097           | 3,2015   | 14,1144  | 0,150       | 1,725       |
| Czas $t_{pos}$ [min]            | 56,891          | 346,835                | 2,750    | 1,467    | 18,7000          | 10,4379  | 120,2501 | 0,017       | 4323,083    |
| Czas $t_{pob}$ [min]            | 9,931           | 20,560                 | 2,608    | 1,467    | 1,1284           | 4,48362  | 25,9480  | 0,017       | 186,65      |
| Czas $t_{pra}$ [min]            | 7,894           | 7,979                  | 6,275    | 0,017    | 0,4314           | 1,3549   | 1,8416   | 0,017       | 40,750      |
| Droga pojazdu $l_{poj}$ [km]    | 6,702           | 8,829                  | 3,007    | 0,000    | 0,4752           | 1,7816   | 3,0811   | 0,000       | 44,837      |
| Droga tłoka $l_{tl}$ [km]       | 2,482           | 2,783                  | 1,713    | Wielokr. | 0,1500           | 1,5496   | 2,4072   | 0,001       | 14,101      |
| Temperatura płynu $T_{pt}$ [°C] | 82,06           | 17,371                 | 88,50    | 88,50    | 0,9366           | -2,2095  | 4,8735   | 8,70        | 99,00       |
| Temperatura płynu $T_{ol}$ [°C] | 75,42           | 19,823                 | 88,50    | 88,50    | 1,0688           | -1,3151  | 0,9852   | 8,70        | 99,00       |



Tabela Z1.2. Parametry położenia i rozrzutu parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN nr 2 uzyskane podczas badań w warunkach „kontrolowanych”

| Parametr widma rozruchu         | Wartość średnia | Odchylenie standardowe | Mediana  | Moda     | Błąd standardowy | Skośność | Kurtoza  | Wartość min | Wartość max |
|---------------------------------|-----------------|------------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|-------------|-------------|
| Prąd $I_{max}$ [A]              | 592,238         | 85,4343                | 580,000  | 572,000  | 4,90807          | 0,16574  | -0,6750  | 376,000     | 788,000     |
| Napięcie $U_{max}$ [V]          | 7,870           | 0,5309                 | 7,860    | 8,2200   | 0,03050          | 0,32658  | 0,9814   | 6,540       | 10,020      |
| Moc $P_{max}$ [W]               | 4633,754        | 545,4091               | 4628,400 | 4701,840 | 31,33293         | 0,56227  | 2,2329   | 3175,440    | 7603,200    |
| Prąd $I_{sr}$ [A]               | 292,152         | 7,5305                 | 291,360  | 291,666  | 0,51239          | 1,58465  | 4,9777   | 272,300     | 327,460     |
| Napięcie $U_{sr}$ [V]           | 9,215           | 0,3355                 | 9,255    | 9,420    | 0,02283          | -0,46276 | 0,5309   | 7,950       | 10,200      |
| Moc $P_{sr}$ [W]                | 2691,679        | 106,8087               | 2705,690 | Wielokr. | 7,26741          | -0,29003 | -0,1125  | 2371,326    | 2978,400    |
| Czas $t_{roz}$ [sek]            | 0,403           | 0,1660                 | 0,375    | 0,375    | 0,00962          | 3,84370  | 19,8404  | 0,075       | 1,575       |
| Czas $t_{przyt}$ [sek]          | 0,515           | 0,205                  | 0,450    | 0,400    | 0,01189          | 2,64968  | 10,0350  | 0,125       | 1,700       |
| Czas $t_{pos}$ [min]            | 48,587          | 268,000                | 3,467    | 2,166    | 15,0051          | 10,99330 | 141,7117 | 0,017       | 3861,667    |
| Czas $t_{pob}$ [min]            | 11,394          | 28,779                 | 3,117    | 2,166    | 1,642            | 5,3756   | 33,0493  | 0,017       | 241,667     |
| Czas $t_{pra}$ [min]            | 7,925           | 8,722                  | 6,133    | 0,233    | 0,4883           | 2,02013  | 4,9617   | 0,017       | 48,517      |
| Droga pojazdu $l_{poj}$ [km]    | 6,982           | 9,7409                 | 3,351    | 0,000    | 0,5514           | 2,1870   | 5,1630   | 0,000       | 52,273      |
| Droga tłoka $l_{tl}$ [km]       | 2,546           | 3,0956                 | 1,673    | Wielokr. | 0,1755           | 2,0982   | 5,0568   | 0,002       | 17,334      |
| Temperatura płynu $T_{pt}$ [°C] | 79,77           | 15,246                 | 84,70    | 84,70    | 0,85361          | -2,20371 | 4,1290   | 25,80       | 94,20       |
| Temperatura płynu $T_{ol}$ [°C] | 73,63           | 17,007                 | 79,00    | 82,80    | 0,95223          | -1,29067 | 0,8055   | 25,80       | 96,10       |

Tabela Z1.3. Parametry położenia i rozrzutu parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN nr 3 uzyskane podczas badań w warunkach „kontrolowanych”

| Parametr widma rozruchu         | Wartość średnia | Odchylenie standardowe | Mediana  | Moda     | Błąd standardowy | Skośność | Kurtoza  | Wartość min | Wartość max |
|---------------------------------|-----------------|------------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|-------------|-------------|
| Prąd $I_{max}$ [A]              | 607,142         | 83,1829                | 600,000  | 572,000  | 3,67261          | 0,19361  | -0,4360  | 416,000     | 828,000     |
| Napięcie $U_{max}$ [V]          | 7,700           | 0,6142                 | 7,740    | Wielokr. | 0,02712          | 1,83632  | 20,6080  | 5,520       | 13,980      |
| Moc $P_{max}$ [W]               | 4650,557        | 560,0452               | 4598,880 | 4241,520 | 24,72660         | 0,40901  | 0,3222   | 3194,880    | 7157,760    |
| Prąd $I_{sr}$ [A]               | 292,200         | 7,3986                 | 290,540  | 288,000  | 0,40184          | 2,24008  | 7,0904   | 281,200     | 330,720     |
| Napięcie $U_{sr}$ [V]           | 9,114           | 0,3065                 | 9,130    | Wielokr. | 0,01665          | -0,69139 | 1,8396   | 7,720       | 9,960       |
| Moc $P_{sr}$ [W]                | 2662,494        | 94,0883                | 2660,062 | Wielokr. | 5,11018          | -0,40629 | 1,7201   | 2266,592    | 2908,320    |
| Czas $t_{roz}$ [sek]            | 0,392           | 0,1610                 | 0,375    | 0,375    | 0,0070           | 4,60850  | 29,9091  | 0,150       | 1,800       |
| Czas $t_{przyt}$ [sek]          | 0,567           | 0,2002                 | 0,525    | 0,475    | 0,0087           | 3,67445  | 19,8007  | 0,300       | 2,075       |
| Czas $t_{pos}$ [min]            | 32,351          | 181,8307               | 3,117    | 1,550    | 7,7392           | 14,13479 | 255,7325 | 0,017       | 3543,700    |
| Czas $t_{pob}$ [min]            | 10,656          | 29,046                 | 2,983    | 1,550    | 1,2534           | 6,266192 | 43,53115 | 0,017       | 280,000     |
| Czas $t_{pra}$ [min]            | 8,293           | 8,3894                 | 6,467    | 0,766    | 0,3574           | 1,59822  | 2,8510   | 0,017       | 47,383      |
| Droga pojazdu $l_{poj}$ [km]    | 7,487           | 9,3684                 | 3,537    | 0,000    | 0,4009           | 1,6688   | 2,6543   | 0,000       | 51,067      |
| Droga tłoka $l_{tl}$ [km]       | 2,638           | 2,6543                 | 1,871    | Wielokr. | 0,1249           | 1,6121   | 2,6806   | 0,002       | 15,441      |
| Temperatura płynu $T_{pt}$ [°C] | 79,21           | 14,417                 | 82,80    | 80,90    | 0,61306          | -2,72758 | 7,5329   | 16,30       | 98,00       |
| Temperatura płynu $T_{ol}$ [°C] | 72,75           | 16,164                 | 77,10    | 80,90    | 0,68737          | -1,60868 | 2,5701   | 10,60       | 98,00       |

Tabela Z1.4. Parametry położenia i rozrzutu parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN nr 4 uzyskane podczas badań w warunkach „kontrolowanych”

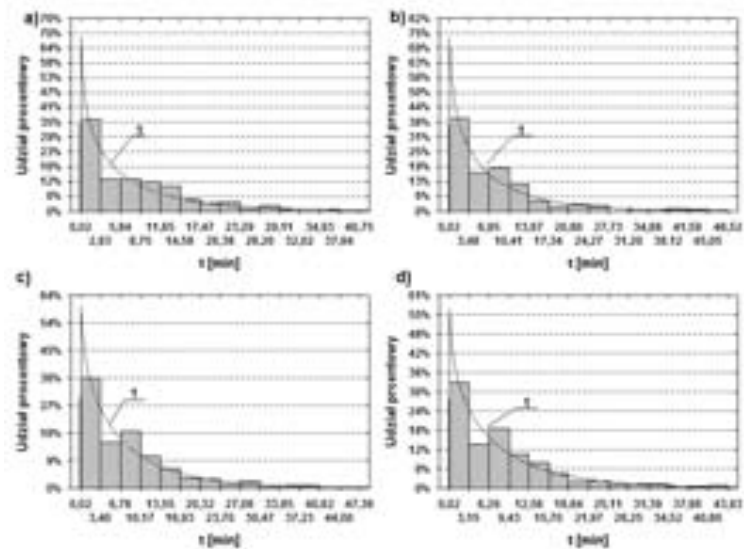
| Parametr widma rozruchu         | Wartość średnia | Odchylenie standardowe | Mediana  | Moda     | Błąd standardowy | Skośność | Kurtoza  | Wartość min | Wartość max |
|---------------------------------|-----------------|------------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|-------------|-------------|
| Prąd $I_{max}$ [A]              | 697,313         | 113,1731               | 692,000  | Wielokr. | 6,32657          | 0,13137  | -0,99851 | 432,000     | 968,000     |
| Napięcie $U_{max}$ [V]          | 7,865           | 0,5959                 | 7,920    | 8,220    | 0,03331          | -0,29239 | 0,10810  | 6,000       | 9,900       |
| Moc $P_{max}$ [W]               | 5435,693        | 654,2316               | 5453,880 | 5806,08  | 36,57266         | 0,13354  | -0,43644 | 3901,440    | 7580,160    |
| Prąd $I_{sr}$ [A]               | 290,996         | 11,6347                | 288,000  | Wielokr. | 0,70416          | 3,79161  | 17,34775 | 273,460     | 360,000     |
| Napięcie $U_{sr}$ [V]           | 9,514           | 0,3284                 | 9,530    | 9,440    | 0,01988          | -0,53323 | 0,48960  | 8,470       | 10,390      |
| Moc $P_{sr}$ [W]                | 2766,811        | 103,9493               | 2763,600 | 2699,840 | 6,29130          | 0,43057  | 1,04678  | 2496,360    | 3165,260    |
| Czas $t_{roz}$ [sek]            | 0,377           | 0,2045                 | 0,350    | 0,350    | 0,01148          | 6,05200  | 43,12676 | 0,125       | 2,300       |
| Czas $t_{przyt}$ [sek]          | 0,497           | 0,2402                 | 0,450    | 0,400    | 0,01347          | 5,06134  | 33,76936 | 0,250       | 2,700       |
| Czas $t_{pos}$ [min]            | 29,019          | 105,941                | 3,450    | Wielokr. | 5,8319           | 5,21350  | 26,99690 | 0,017       | 706,033     |
| Czas $t_{pob}$ [min]            | 9,632           | 19,6465                | 3,233    | Wielokr. | 1,1017           | 5,85720  | 47,15249 | 0,017       | 216,667     |
| Czas $t_{pra}$ [min]            | 8,627           | 8,6490                 | 6,842    | Wielokr. | 0,4761           | 1,58524  | 2,73853  | 0,017       | 43,933      |
| Droga pojazdu $l_{poj}$ [km]    | 5,839           | 7,6730                 | 2,632    | 0,000    | 0,4243           | 1,8904   | 3,6497   | 0,000       | 39,757      |
| Droga tłoka $l_{tl}$ [km]       | 2,656           | 2,9507                 | 1,892    | Wielokr. | 0,1631           | 1,6947   | 2,9149   | 0,002       | 14,665      |
| Temperatura płynu $T_{pt}$ [°C] | 81,93           | 18,233                 | 86,60    | 88,50    | 1,00370          | -2,54733 | 6,87200  | 4,90        | 99,90       |
| Temperatura płynu $T_{ol}$ [°C] | 73,29           | 20,548                 | 79,00    | 80,90    | 1,13114          | -1,33241 | 1,46633  | 4,90        | 99,90       |

Tabela Z1.5. Parametry położenia i rozrzutu parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN uzyskane podczas badań w warunkach „naturalnych”

| Parametr<br>„widma rozruchu”    | Wartość<br>średnia | Odchylenie<br>standardowe | Mediana  | Moda     | Błąd<br>standardowy | Skośność | Kurtoza | Wartość<br>min | Wartość<br>max |
|---------------------------------|--------------------|---------------------------|----------|----------|---------------------|----------|---------|----------------|----------------|
| Prąd $I_{max}$ [A]              | 726,833            | 55,9163                   | 728,000  | 730,000  | 1,2909              | -0,2802  | 1,920   | 527,00         | 968,000        |
| Napięcie $U_{max}$ [V]          | 7,010              | 0,4973                    | 7,056    | 7,081    | 0,01148             | -0,2032  | 0,514   | 4,973          | 9,027          |
| Moc $P_{max}$ [W]               | 5082,400           | 423,8466                  | 5097,892 | 5228,790 | 9,7857              | -0,0611  | 0,735   | 3455,838       | 6849,730       |
| Prąd $I_{sr}$ [A]               | 305,858            | 14,3473                   | 304,531  | 308,233  | 0,7572              | 0,6399   | 0,543   | 275,511        | 351,219        |
| Napięcie $U_{sr}$ [V]           | 8,594              | 0,2721                    | 8,633    | Wielok.  | 0,0143              | -0,8536  | 1,4076  | 7,557          | 9,253          |
| Moc $P_{sr}$ [W]                | 2629,258           | 160,7226                  | 2625,377 | Wielok.  | 8,4826              | 0,2663   | 0,4489  | 2181,389       | 3126,443       |
| Czas $t_{roz}$ [s]              | 1,018              | 0,355                     | 0,938    | 1,006    | 0,0092              | 3,7622   | 19,1368 | 0,402          | 3,619          |
| Czas $t_{przył}$ [s]            | 0,533              | 0,2159                    | 0,495    | 0,400    | 0,0049              | 2,6831   | 10,908  | 0,236          | 1,906          |
| Czas $t_{pos}$ [min]            | 37,896             | 215,072                   | 3,533    | 1,5500   | 4,8829              | 13,9208  | 239,920 | 0,017          | 4323,083       |
| Czas $t_{pob}$ [min]            | 10,806             | 25,1681                   | 3,317    | 1,5500   | 0,5807              | 5,7556   | 40,296  | 0,017          | 280,000        |
| Czas $t_{pra}$ [min]            | 8,658              | 9,5983                    | 6,450    | Wielok.  | 0,2184              | 2,3142   | 8,865   | 0,017          | 100,783        |
| Droga pojazdu $l_{poj}$ [km]    | 7,074              | 9,603                     | 3,317    | 0,000    | 0,220               | 2,1532   | 5,3904  | 0,000          | 69,507         |
| Droga tłoka $l_{tl}$ [km]       | 2,731              | 3,441                     | 1,862    | Wielok.  | 0,076               | 2,2595   | 7,7275  | 0,013          | 21,995         |
| Temperatura płynu $T_{pt}$ [°C] | 71,83              | 17,842                    | 75,20    | 80,90    | 0,4058              | -1,3883  | 2,130   | -1,00          | 99,90          |
| Temperatura płynu $T_{ol}$ [°C] | 74,44              | 19,837                    | 82,80    | 88,50    | 0,4497              | -1,3941  | 1,427   | -1,00          | 101,80         |

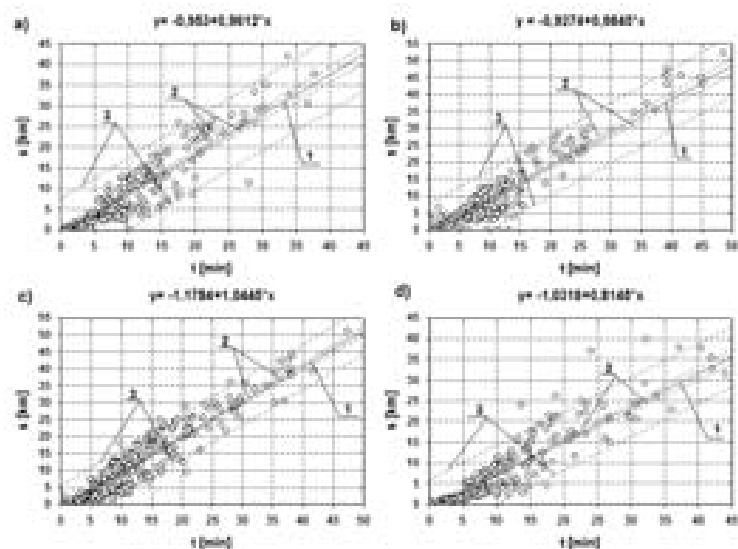
## **Załącznik 2**

**Wykresy statystyczne parametrów „widma rozruchu”  
silników 4CT90  
poddanych badaniom przebiegowym  
w warunkach „kontrolowanego” użytkowania  
pojazdów LUBLIN**

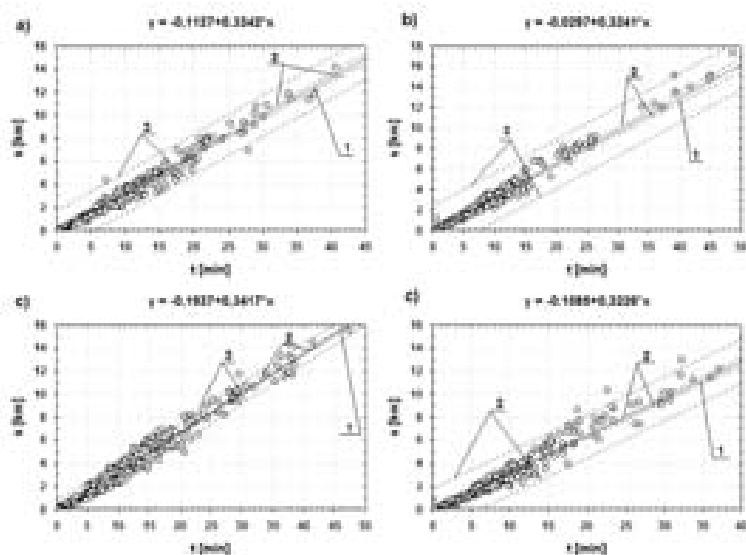


Rys. Z2.1. Rozkład statystyczny czasu  $t$  nieprzerwanego działania silnika 4CT90 podczas dnia użytkowania samochodu LUBLIN; 1 – funkcja gęstości rozkładu Weibulla dopasowana (poziom istotności  $p < 0,01$ ) do danych empirycznych;

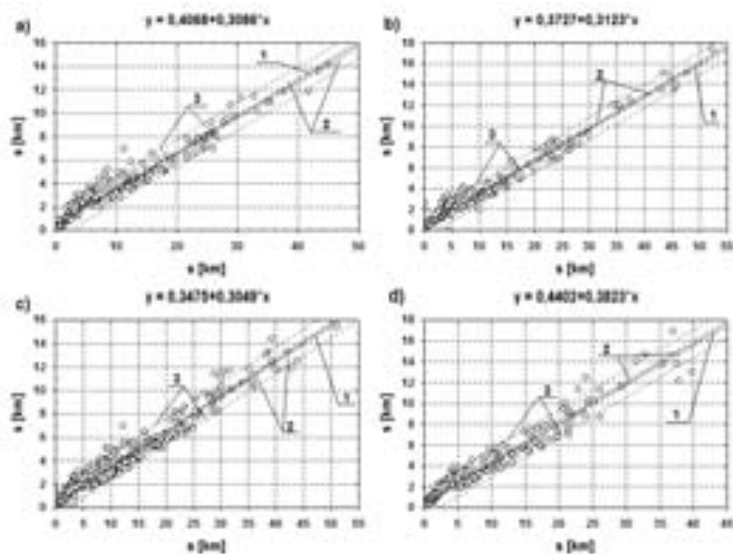
- a) dla pojazdu 1 o parametrach skali: 3,108 i kształtu: 5,102,
- b) dla pojazdu 2 o parametrach skali: 3,201 i kształtu: 5,231,
- c) dla pojazdu 3 o parametrach skali: 3,658 i kształtu: 5,677,
- d) dla pojazdu 4 o parametrach skali: 2,887 i kształtu: 4,488



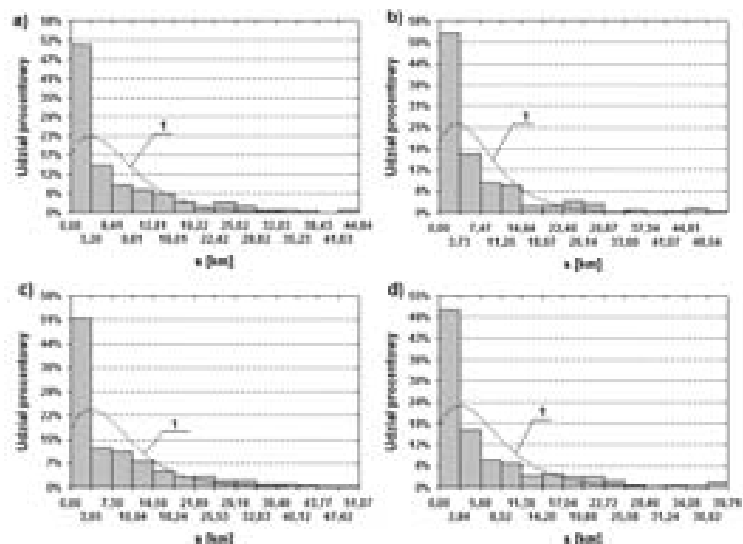
Rys. Z2.2. Wykres rozrzutu i prosta regresji czasu  $t$  nieprzerwanego działania silnika 4CT90 oraz drogi s wykonanej przez pojazd pomiędzy kolejnymi rozruchami; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



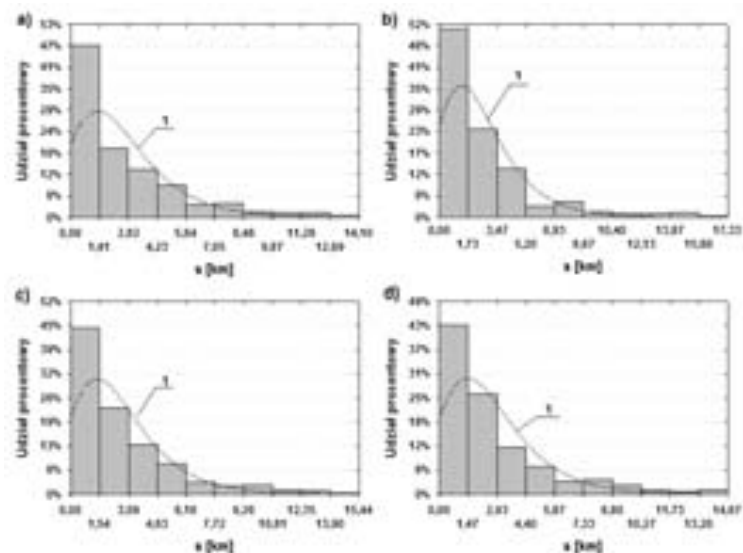
Rys. Z2.3. Wykres rozrzutu i prosta regresji czasu  $t$  nieprzerwanego działania silnika 4CT90 oraz drogi  $s$  tłka pomiędzy kolejnymi rozruchami; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



Rys. Z2.4. Wykres rozrzutu drogi  $s$  przejechanej przez pojazd oraz drogi  $s$  tłka (oś  $y$ ) pomiędzy kolejnymi rozruchami; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji

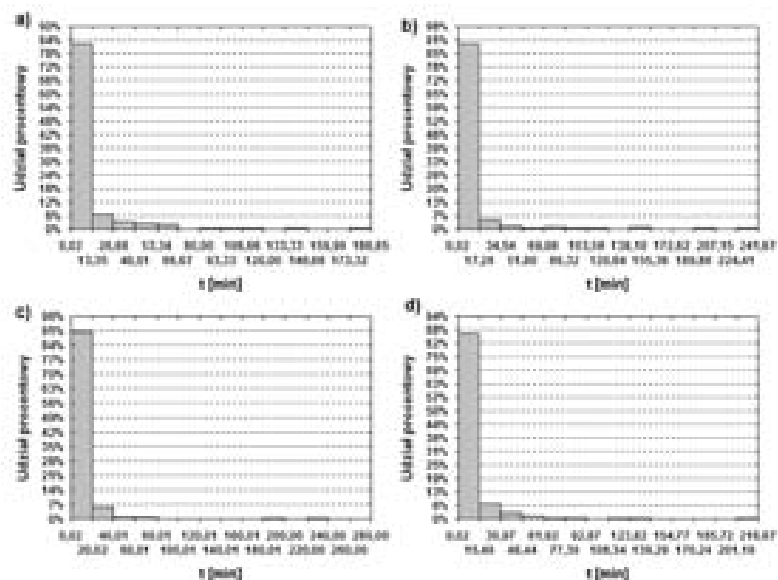


Rys. Z2.5. Rozkład statystyczny drogi s przejechanej przez samochód LUBLIN pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika 4CT90; 1 – funkcja gęstości rozkładu wartości ekstremalnych dopasowana (poziom istotności  $p < 0,01$ ) do danych empirycznych; a) dla pojazdu 1 o parametrach położenia: 7,328 i skali: 0,853, b) dla pojazdu 2 o parametrach położenia: 7,328 i skali: 0,853, c) dla pojazdu 3 o parametrach położenia: 7,874 i skali: 0,893, d) dla pojazdu 4 o parametrach położenia: 8,154 i skali: 0,882

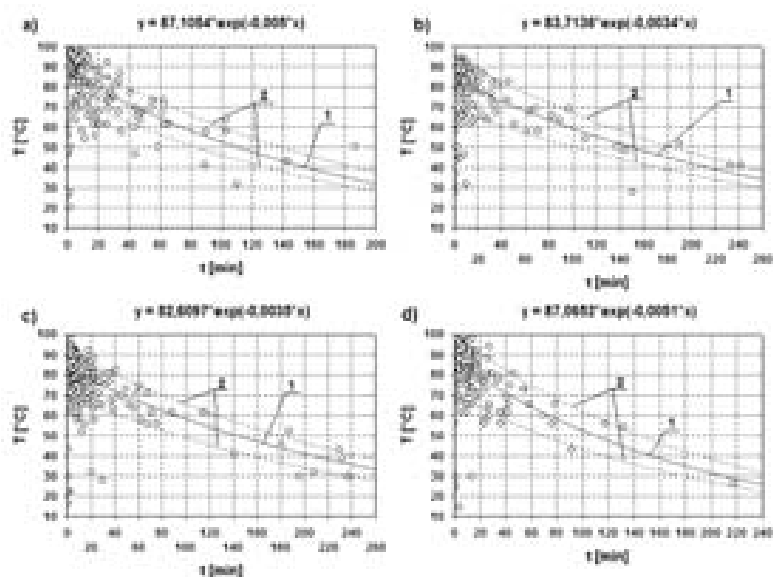


Rys. Z2.6. Rozkład statystyczny drogi s tłka pomiędzy kolejnymi rozruchami silnika 4CT90; 1 – funkcja gęstości rozkładu wartości ekstremalnych dopasowana (poziom istotności  $p < 0,01$ ) do danych empirycznych; a) dla pojazdu 1 o parametrach położenia: 1,318 i skali: 1,776 b) dla pojazdu 2 o parametrach położenia: 1,335 i skali: 1,797, c) dla pojazdu 3 o parametrach położenia: 1,432 i skali: 1,841, d) dla pojazdu 4 o parametrach położenia: 1,448 i skali: 1,828

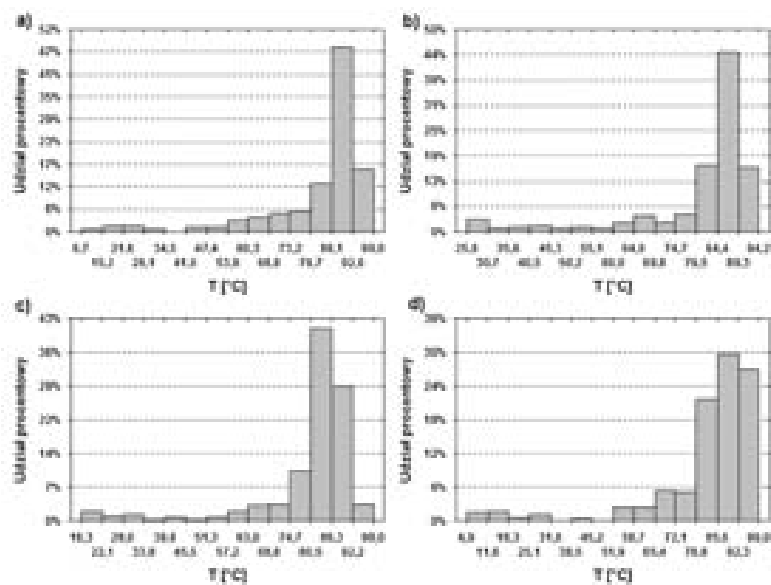




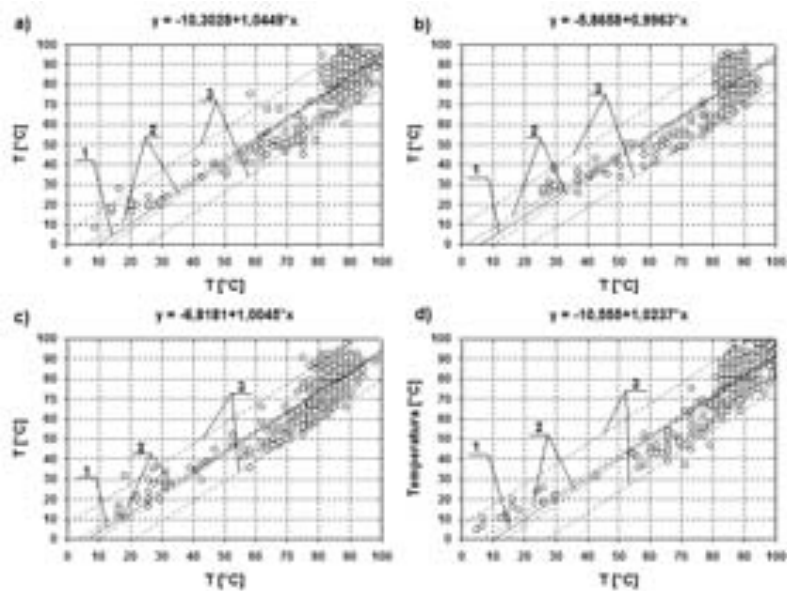
Rys. Z2.7. Rozkład statystyczny czasów  $t$  postoju samochodów LUBLIN z włączonym silnikiem 4CT90 w ciągu pojedynczego dnia użytkowania (z wyłączeniem postojów dłuższych niż 5 godzin)



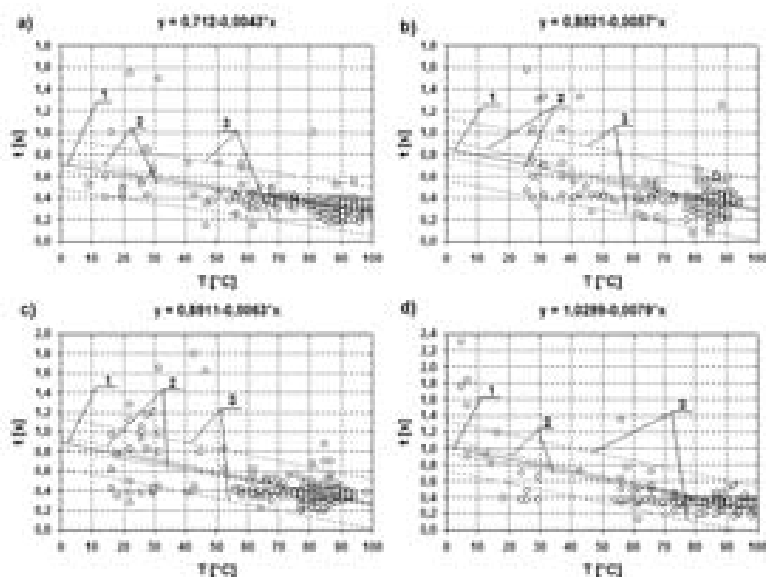
Rys. Z2.8. Wykres rozrzutu dla czasu  $t$  postoju samochodu LUBLIN z wyłączonym silnikiem oraz temperatury  $T$  rozruchu silnika 4CT90; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – krzywa regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji



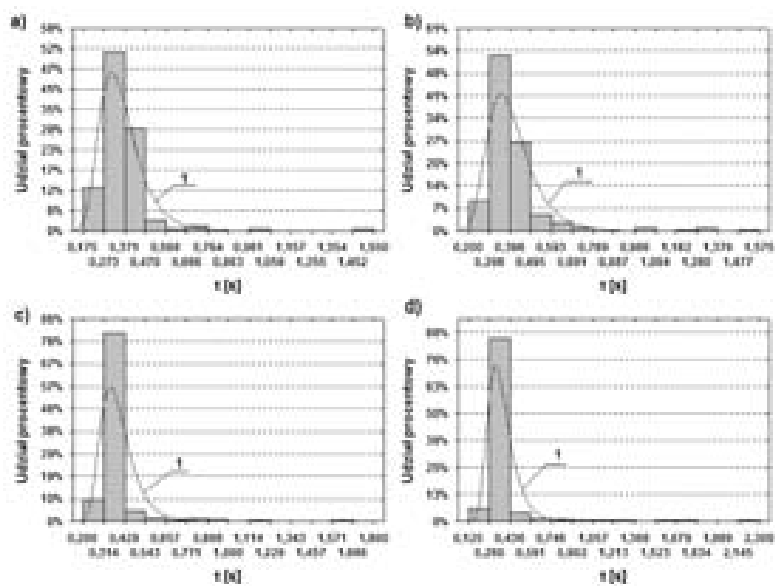
Rys. Z2.9. Rozkład statystyczny temperatury  $T$  silnika 4CT90 w chwili jego rozruchu; a) silnik pojazdu 1, b) silnik pojazdu 2, c) silnik pojazdu 3, d) silnik pojazdu 4



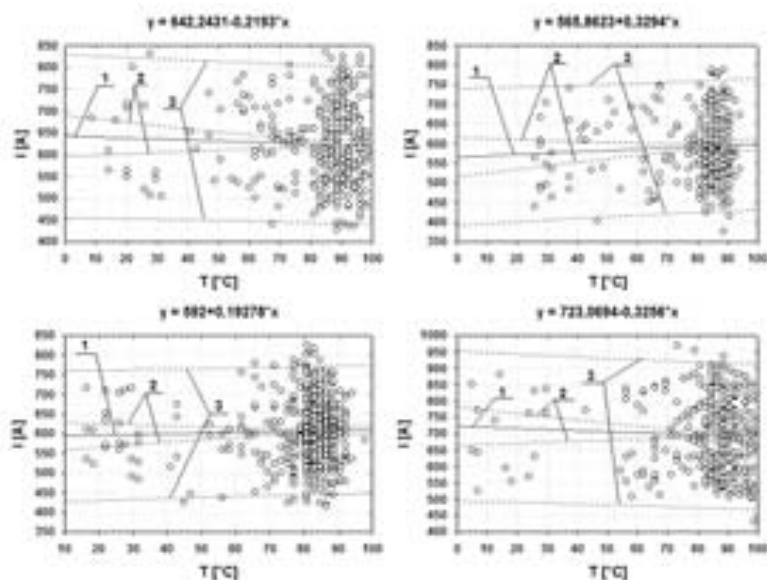
Rys. Z2.10. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika 4CT90 oraz temperatury  $T$  oleju (oś  $y$ ) w chwili rozruchu; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



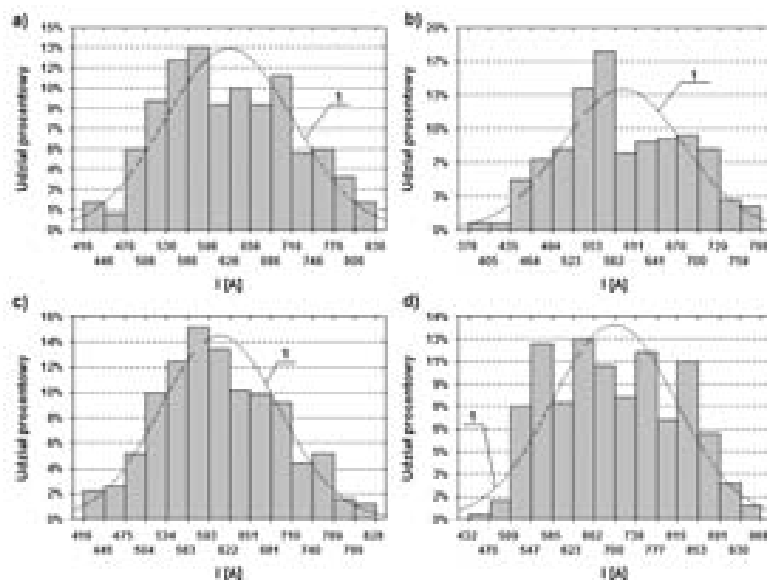
Rys. Z2.11. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika 4CT90 w chwili rozruchu oraz czasu  $t$  jego trwania; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



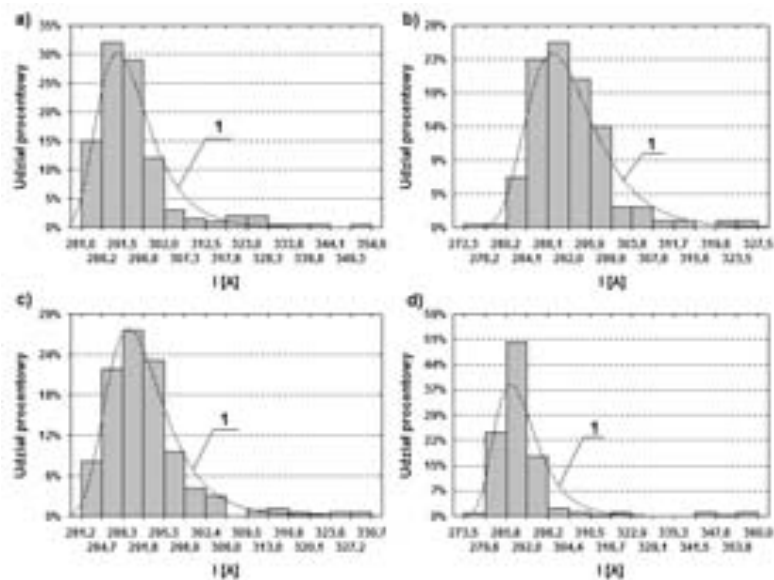
Rys. Z2.12. Rozkład statystyczny czasu  $t$  rozruchu silnika 4CT90; 1 – funkcja gęstości rozkładu wartości ekstremalnych dopasowana (poziom istotności  $p < 0,01$ ) do danych empirycznych; a) dla pojazdu 1 o parametrach położenia: 0,3109 i skali: 0,0789, b) dla pojazdu 2 o parametrach położenia: 0,3535 i skali: 0,0875, c) dla pojazdu 3 o parametrach położenia: 0,3494 i skali: 0,0735, d) dla pojazdu 4 o parametrach położenia: 0,3254 i skali: 0,0787



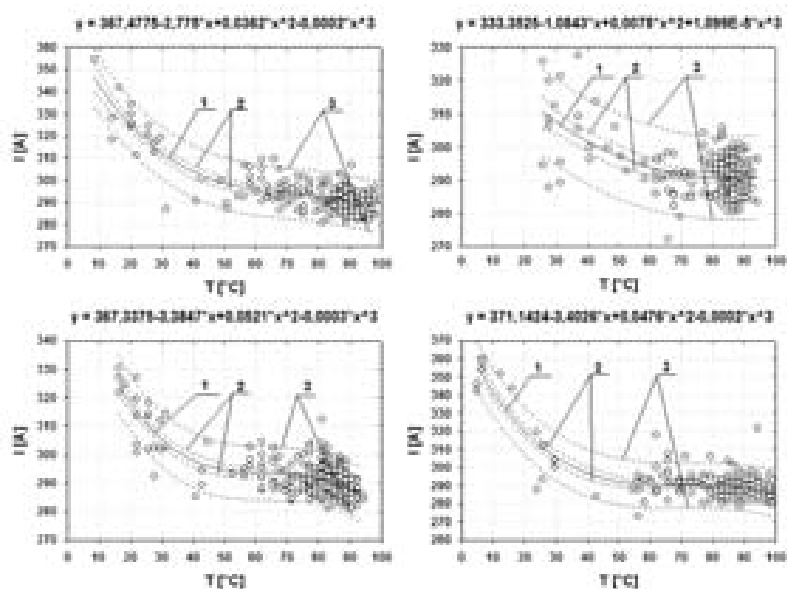
Rys. Z2.13. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika w chwili rozruchu oraz maksymalnego natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika 4CT90; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



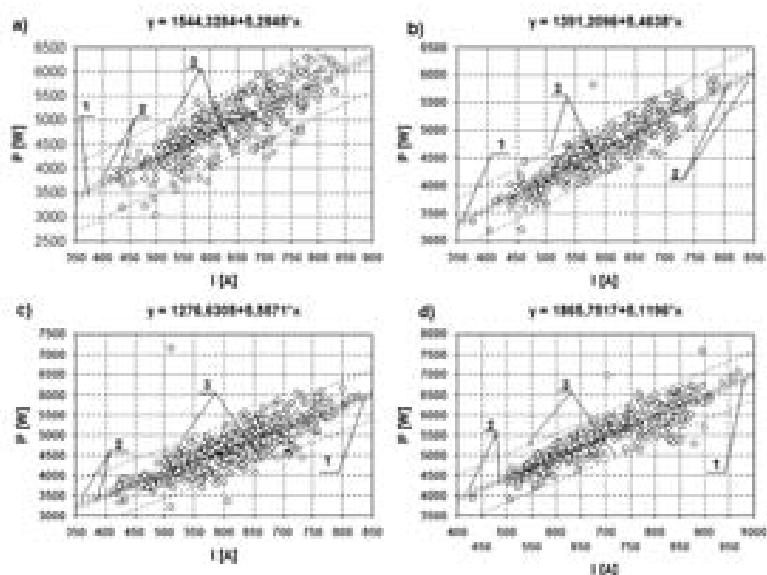
Rys. Z2.14. Rozkład statystyczny wartości maksymalnego natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika 4CT90; 1 – funkcja gęstości rozkładu normalnego dopasowana (poziom istotności  $p < 0,05$ ) do danych empirycznych; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4



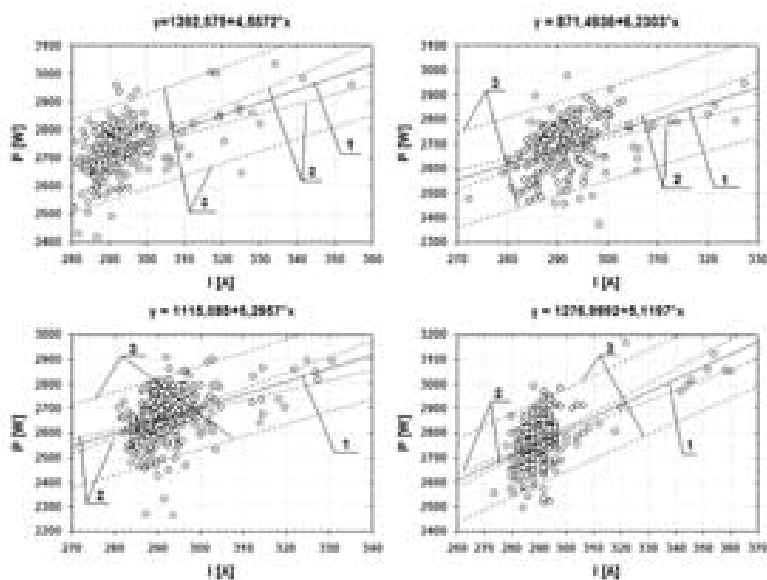
Rys. Z2.15. Rozkład statystyczny wartości natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik w trakcie uruchamiania silnika 4CT90; 1 – funkcja gęstości rozkładu normalnego dopasowana (poziom istotności  $p < 0,05$ ) do danych empirycznych; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4



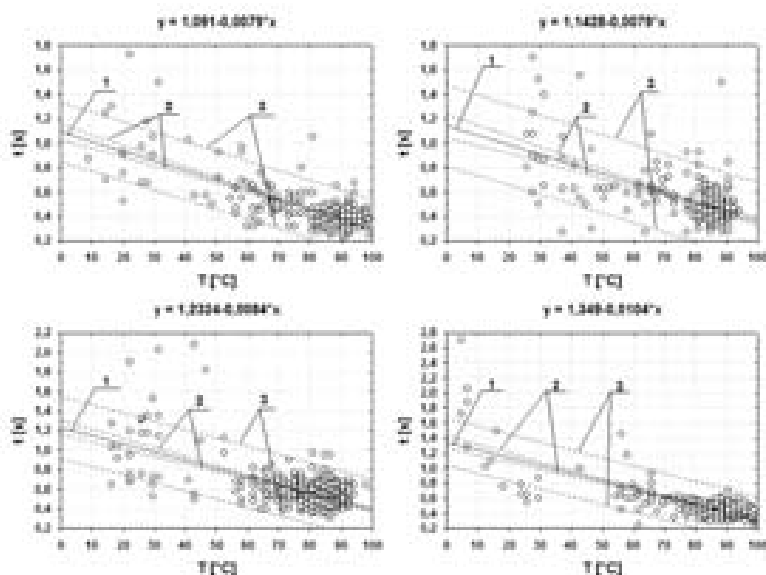
Rys. Z2.16. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika w chwili rozruchu oraz natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik podczas uruchamiania silnika 4CT90; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – krzywa regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



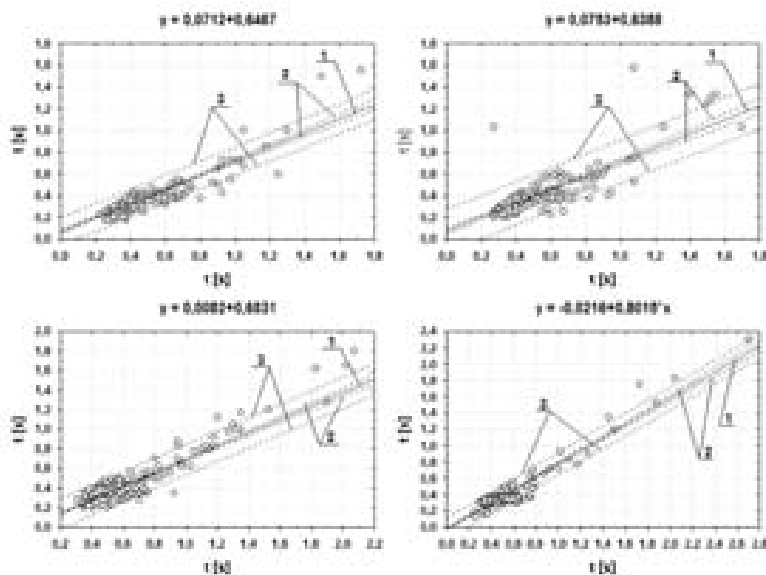
Rys. Z2.17. Wykres rozrzutu maksymalnego natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika 4CT90 oraz odpowiadającej mu mocy  $P$  elektrycznej; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



Rys. Z2.18. Wykres rozrzutu natężenia  $I$  prądu pobieranego przez rozrusznik podczas uruchamiania silnika 4CT90 oraz odpowiadającej mu mocy  $P$  elektrycznej; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



Rys. Z2.19. Wykres rozrzutu temperatury  $T$  silnika w chwili rozruchu oraz czasu  $t$  przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika podczas rozruchu silnika 4CT90; a) pojazd 1 b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji



Rys. Z2.20. Wykres rozrzutu czasu  $t$  rozruchu oraz czasu  $t$  przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika podczas rozruchu silnika 4CT90; a) pojazd 1, b) pojazd 2, c) pojazd 3, d) pojazd 4; 1 – prosta regresji, 2 – przedział ufności dla prognozowanej średniej obserwacji, 3 – przedział ufności dla prognozowanej obserwacji





## **Załącznik 3**

**Macierze wartości współczynników korelacji liniowej  
parametrów „widma rozruchu” silników 4CT90  
poddanych badaniom przebiegowym  
w warunkach „naturalnego” i „kontrolowanego”  
użytkowania pojazdów LUBLIN**

Macierz korelacji parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN nr 1 uzyskana podczas badań w warunkach „kontrolowanych”

|         |             |           |           |           |           |          |          |          |           |           |           |          |          |          |           |             |
|---------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-------------|
| $r_I =$ |             | $t_{pra}$ | $t_{pos}$ | $t_{pob}$ | $l_{poj}$ | $l_{it}$ | $T_{pt}$ | $T_{ol}$ | $I_{max}$ | $U_{max}$ | $P_{max}$ | $I_{sr}$ | $U_{sr}$ | $P_{sr}$ | $t_{roz}$ | $t_{przyt}$ |
|         | $t_{pra}$   | 1,00      | -0,19     | -0,19     | 0,90      | 0,95     | 0,34     | 0,41     | 0,01      | 0,14      | 0,11      | -0,10    | 0,27     | 0,22     | -0,13     | -0,24       |
|         | $t_{pos}$   | -0,19     | 1,00      | 1,00      | -0,23     | -0,21    | -0,52    | -0,54    | 0,09      | -0,23     | -0,06     | 0,13     | -0,21    | -0,12    | 0,33      | 0,52        |
|         | $t_{pob}$   | -0,19     | 1,00      | 1,00      | -0,23     | -0,21    | -0,52    | -0,54    | 0,09      | -0,23     | -0,06     | 0,13     | -0,21    | -0,12    | 0,33      | 0,52        |
|         | $l_{poj}$   | 0,90      | -0,23     | -0,23     | 1,00      | 0,97     | 0,32     | 0,46     | -0,06     | 0,23      | 0,09      | -0,13    | 0,32     | 0,24     | -0,13     | -0,28       |
|         | $l_{it}$    | 0,95      | -0,21     | -0,21     | 0,97      | 1,00     | 0,33     | 0,43     | -0,05     | 0,20      | 0,08      | -0,11    | 0,30     | 0,24     | -0,14     | -0,28       |
|         | $T_{pt}$    | 0,34      | -0,52     | -0,52     | 0,32      | 0,33     | 1,00     | 0,90     | -0,13     | 0,34      | 0,10      | -0,58    | 0,44     | 0,07     | -0,44     | -0,60       |
|         | $T_{ol}$    | 0,41      | -0,54     | -0,54     | 0,46      | 0,43     | 0,90     | 1,00     | -0,08     | 0,40      | 0,18      | -0,51    | 0,57     | 0,24     | -0,42     | -0,62       |
|         | $I_{max}$   | 0,01      | 0,09      | 0,09      | -0,06     | -0,05    | -0,13    | -0,08    | 1,00      | -0,47     | 0,81      | 0,20     | -0,12    | 0,01     | 0,02      | 0,11        |
|         | $U_{max}$   | 0,14      | -0,23     | -0,23     | 0,23      | 0,20     | 0,34     | 0,40     | -0,47     | 1,00      | 0,13      | -0,32    | 0,42     | 0,22     | -0,07     | -0,23       |
|         | $P_{max}$   | 0,11      | -0,06     | -0,06     | 0,09      | 0,08     | 0,10     | 0,18     | 0,81      | 0,13      | 1,00      | -0,01    | 0,16     | 0,15     | -0,03     | -0,03       |
|         | $I_{sr}$    | -0,10     | 0,13      | 0,13      | -0,13     | -0,11    | -0,58    | -0,51    | 0,20      | -0,32     | -0,01     | 1,00     | -0,38    | 0,28     | 0,12      | 0,27        |
|         | $U_{sr}$    | 0,27      | -0,21     | -0,21     | 0,32      | 0,30     | 0,44     | 0,57     | -0,12     | 0,42      | 0,16      | -0,38    | 1,00     | 0,78     | -0,21     | -0,37       |
|         | $P_{sr}$    | 0,22      | -0,12     | -0,12     | 0,24      | 0,24     | 0,07     | 0,24     | 0,01      | 0,22      | 0,15      | 0,28     | 0,78     | 1,00     | -0,14     | -0,20       |
|         | $t_{roz}$   | -0,13     | 0,33      | 0,33      | -0,13     | -0,14    | -0,44    | -0,42    | 0,02      | -0,07     | -0,03     | 0,12     | -0,21    | -0,14    | 1,00      | 0,78        |
|         | $t_{przyt}$ | -0,24     | 0,52      | 0,52      | -0,28     | -0,28    | -0,60    | -0,62    | 0,11      | -0,23     | -0,03     | 0,27     | -0,37    | -0,20    | 0,78      | 1,00        |

Macierz korelacji parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN nr 2 uzyskana podczas badań w warunkach „kontrolowanych”

| $r_2 =$ |                | $t_{pra}$ | $t_{pos}$ | $t_{pob}$ | $l_{poj}$ | $l_{it}$ | $T_{pt}$ | $T_{ol}$ | $I_{max}$ | $U_{max}$ | $P_{max}$ | $I_{\dot{s}r}$ | $U_{\dot{s}r}$ | $P_{\dot{s}r}$ | $t_{roz}$ | $t_{przyt}$ |
|---------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------|-----------|-------------|
|         | $t_{pra}$      | 1,00      | -0,07     | -0,07     | 0,89      | 0,92     | 0,24     | 0,28     | 0,16      | 0,01      | 0,22      | -0,08          | 0,28           | 0,21           | -0,05     | -0,08       |
|         | $t_{pos}$      | -0,07     | 1,00      | 1,00      | -0,07     | -0,07    | -0,58    | -0,50    | 0,06      | -0,18     | -0,04     | 0,25           | -0,25          | -0,09          | 0,28      | 0,38        |
|         | $t_{pob}$      | -0,07     | 1,00      | 1,00      | -0,07     | -0,07    | -0,58    | -0,50    | 0,06      | -0,18     | -0,04     | 0,25           | -0,25          | -0,09          | 0,28      | 0,38        |
|         | $l_{poj}$      | 0,89      | -0,07     | -0,07     | 1,00      | 0,98     | 0,21     | 0,26     | 0,12      | 0,00      | 0,15      | -0,08          | 0,27           | 0,20           | -0,09     | -0,09       |
|         | $l_{it}$       | 0,92      | -0,07     | -0,07     | 0,98      | 1,00     | 0,22     | 0,26     | 0,13      | 0,00      | 0,17      | -0,09          | 0,27           | 0,20           | -0,07     | -0,09       |
|         | $T_{pt}$       | 0,24      | -0,58     | -0,58     | 0,21      | 0,22     | 1,00     | 0,87     | -0,04     | 0,31      | 0,14      | -0,37          | 0,43           | 0,19           | -0,35     | -0,52       |
|         | $T_{ol}$       | 0,28      | -0,50     | -0,50     | 0,26      | 0,26     | 0,87     | 1,00     | -0,04     | 0,38      | 0,18      | -0,30          | 0,53           | 0,32           | -0,28     | -0,51       |
|         | $I_{max}$      | 0,16      | 0,06      | 0,06      | 0,12      | 0,13     | -0,04    | -0,04    | 1,00      | -0,68     | 0,89      | 0,05           | 0,10           | 0,12           | -0,04     | 0,00        |
|         | $U_{max}$      | 0,01      | -0,18     | -0,18     | 0,00      | 0,00     | 0,31     | 0,38     | -0,68     | 1,00      | -0,28     | -0,06          | 0,27           | 0,21           | -0,04     | -0,17       |
|         | $P_{max}$      | 0,22      | -0,04     | -0,04     | 0,15      | 0,17     | 0,14     | 0,18     | 0,89      | -0,28     | 1,00      | 0,04           | 0,29           | 0,29           | -0,07     | -0,11       |
|         | $I_{\dot{s}r}$ | -0,08     | 0,25      | 0,25      | -0,08     | -0,09    | -0,37    | -0,30    | 0,05      | -0,06     | 0,04      | 1,00           | -0,14          | 0,42           | 0,22      | 0,17        |
|         | $U_{\dot{s}r}$ | 0,28      | -0,25     | -0,25     | 0,27      | 0,27     | 0,43     | 0,53     | 0,10      | 0,27      | 0,29      | -0,14          | 1,00           | 0,84           | -0,24     | -0,31       |
|         | $P_{\dot{s}r}$ | 0,21      | -0,09     | -0,09     | 0,20      | 0,20     | 0,19     | 0,32     | 0,12      | 0,21      | 0,29      | 0,42           | 0,84           | 1,00           | -0,10     | -0,19       |
|         | $t_{roz}$      | -0,05     | 0,28      | 0,28      | -0,09     | -0,07    | -0,35    | -0,28    | -0,04     | -0,04     | -0,07     | 0,22           | -0,24          | -0,10          | 1,00      | 0,77        |
|         | $t_{przyt}$    | -0,08     | 0,38      | 0,38      | -0,09     | -0,09    | -0,52    | -0,51    | 0,00      | -0,17     | -0,11     | 0,17           | -0,31          | -0,19          | 0,77      | 1,00        |

Macierz korelacji parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN nr 3 uzyskana podczas badań w warunkach „kontrolowanych”

|        | $t_{pra}$   | $t_{pos}$ | $t_{pob}$ | $l_{poj}$ | $l_{tł}$ | $T_{pt}$ | $T_{ol}$ | $I_{max}$ | $U_{max}$ | $P_{max}$ | $I_{śr}$ | $U_{śr}$ | $P_{śr}$ | $t_{roz}$ | $t_{przył}$ |       |
|--------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-------------|-------|
| $r_3=$ | $t_{pra}$   | 1,00      | -0,05     | -0,05     | 0,95     | 0,99     | 0,27     | 0,32      | -0,01     | 0,06      | 0,04     | -0,08    | 0,09     | 0,05      | -0,09       | -0,11 |
|        | $t_{pos}$   | -0,05     | 1,00      | 1,00      | -0,11    | -0,08    | -0,48    | -0,45     | -0,06     | -0,10     | -0,16    | 0,27     | -0,20    | -0,04     | 0,17        | 0,27  |
|        | $t_{pob}$   | -0,05     | 1,00      | 1,00      | -0,11    | -0,08    | -0,48    | -0,45     | -0,06     | -0,10     | -0,16    | 0,27     | -0,20    | -0,04     | 0,17        | 0,27  |
|        | $l_{poj}$   | 0,95      | -0,11     | -0,11     | 1,00     | 0,98     | 0,25     | 0,31      | 0,03      | 0,04      | 0,07     | -0,06    | 0,09     | 0,06      | -0,07       | -0,11 |
|        | $l_{tł}$    | 0,99      | -0,08     | -0,08     | 0,98     | 1,00     | 0,26     | 0,30      | 0,02      | 0,04      | 0,06     | -0,05    | 0,10     | 0,07      | -0,09       | -0,12 |
|        | $T_{pt}$    | 0,27      | -0,48     | -0,48     | 0,25     | 0,26     | 1,00     | 0,87      | 0,04      | 0,21      | 0,20     | -0,54    | 0,35     | 0,04      | -0,47       | -0,50 |
|        | $T_{ol}$    | 0,32      | -0,45     | -0,45     | 0,31     | 0,30     | 0,87     | 1,00      | 0,01      | 0,23      | 0,18     | -0,51    | 0,40     | 0,11      | -0,37       | -0,44 |
|        | $I_{max}$   | -0,01     | -0,06     | -0,06     | 0,03     | 0,02     | 0,04     | 0,01      | 1,00      | -0,49     | 0,80     | 0,16     | 0,15     | 0,23      | 0,00        | -0,09 |
|        | $U_{max}$   | 0,06      | -0,10     | -0,10     | 0,04     | 0,04     | 0,21     | 0,23      | -0,49     | 1,00      | 0,12     | -0,24    | 0,28     | 0,14      | -0,21       | -0,18 |
|        | $P_{max}$   | 0,04      | -0,16     | -0,16     | 0,07     | 0,06     | 0,20     | 0,18      | 0,80      | 0,12      | 1,00     | 0,01     | 0,37     | 0,36      | -0,14       | -0,23 |
|        | $I_{śr}$    | -0,08     | 0,27      | 0,27      | -0,06    | -0,05    | -0,54    | -0,51     | 0,16      | -0,24     | 0,01     | 1,00     | -0,20    | 0,35      | 0,15        | 0,22  |
|        | $U_{śr}$    | 0,09      | -0,20     | -0,20     | 0,09     | 0,10     | 0,35     | 0,40      | 0,15      | 0,28      | 0,37     | -0,20    | 1,00     | 0,85      | -0,27       | -0,30 |
|        | $P_{śr}$    | 0,05      | -0,04     | -0,04     | 0,06     | 0,07     | 0,04     | 0,11      | 0,23      | 0,14      | 0,36     | 0,35     | 0,85     | 1,00      | -0,18       | -0,17 |
|        | $t_{roz}$   | -0,09     | 0,17      | 0,17      | -0,07    | -0,09    | -0,47    | -0,37     | 0,00      | -0,21     | -0,14    | 0,15     | -0,27    | -0,18     | 1,00        | 0,76  |
|        | $t_{przył}$ | -0,11     | 0,27      | 0,27      | -0,11    | -0,12    | -0,50    | -0,44     | -0,09     | -0,18     | -0,23    | 0,22     | -0,30    | -0,17     | 0,76        | 1,00  |

Macierz korelacji parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN nr 4 uzyskana podczas badań w warunkach „kontrolowanych”

| $r_4 =$ |             | $t_{pra}$ | $t_{pos}$ | $t_{pob}$ | $l_{poj}$ | $l_{tł}$ | $T_{pt}$ | $T_{ol}$ | $I_{max}$ | $U_{max}$ | $P_{max}$ | $I_{sr}$ | $U_{sr}$ | $P_{sr}$ | $t_{roz}$ | $t_{przyt}$ |
|---------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-------------|
|         | $t_{pra}$   | 1,00      | -0,03     | -0,03     | 0,93      | 0,96     | 0,30     | 0,35     | -0,08     | 0,20      | 0,02      | -0,11    | 0,12     | 0,04     | -0,05     | -0,16       |
|         | $t_{pos}$   | -0,03     | 1,00      | 1,00      | -0,10     | -0,05    | -0,55    | -0,56    | -0,03     | -0,22     | -0,18     | 0,07     | -0,29    | -0,22    | 0,37      | 0,46        |
|         | $t_{pob}$   | -0,03     | 1,00      | 1,00      | -0,10     | -0,05    | -0,55    | -0,56    | -0,03     | -0,22     | -0,18     | 0,07     | -0,29    | -0,22    | 0,37      | 0,46        |
|         | $l_{poj}$   | 0,93      | -0,10     | -0,10     | 1,00      | 0,98     | 0,32     | 0,37     | -0,11     | 0,21      | -0,01     | -0,08    | 0,11     | 0,06     | -0,08     | -0,19       |
|         | $l_{tł}$    | 0,96      | -0,05     | -0,05     | 0,98      | 1,00     | 0,31     | 0,35     | -0,10     | 0,20      | -0,01     | -0,09    | 0,10     | 0,03     | -0,06     | -0,17       |
|         | $T_{pt}$    | 0,30      | -0,55     | -0,55     | 0,32      | 0,31     | 1,00     | 0,89     | -0,11     | 0,45      | 0,15      | -0,40    | 0,42     | 0,14     | -0,42     | -0,62       |
|         | $T_{ol}$    | 0,35      | -0,56     | -0,56     | 0,37      | 0,35     | 0,89     | 1,00     | -0,08     | 0,50      | 0,21      | -0,33    | 0,57     | 0,32     | -0,40     | -0,66       |
|         | $I_{max}$   | -0,08     | -0,03     | -0,03     | -0,11     | -0,10    | -0,11    | -0,08    | 1,00      | -0,74     | 0,89      | 0,11     | 0,01     | 0,08     | 0,14      | 0,11        |
|         | $U_{max}$   | 0,20      | -0,22     | -0,22     | 0,21      | 0,20     | 0,45     | 0,50     | -0,74     | 1,00      | -0,35     | -0,18    | 0,44     | 0,29     | -0,34     | -0,46       |
|         | $P_{max}$   | 0,02      | -0,18     | -0,18     | -0,01     | -0,01    | 0,15     | 0,21     | 0,89      | -0,35     | 1,00      | 0,04     | 0,30     | 0,30     | -0,04     | -0,15       |
|         | $I_{sr}$    | -0,11     | 0,07      | 0,07      | -0,08     | -0,09    | -0,40    | -0,33    | 0,11      | -0,18     | 0,04      | 1,00     | -0,21    | 0,44     | -0,01     | 0,16        |
|         | $U_{sr}$    | 0,12      | -0,29     | -0,29     | 0,11      | 0,10     | 0,42     | 0,57     | 0,01      | 0,44      | 0,30      | -0,21    | 1,00     | 0,79     | -0,24     | -0,46       |
|         | $P_{sr}$    | 0,04      | -0,22     | -0,22     | 0,06      | 0,03     | 0,14     | 0,32     | 0,08      | 0,29      | 0,30      | 0,44     | 0,79     | 1,00     | -0,23     | -0,32       |
|         | $t_{roz}$   | -0,05     | 0,37      | 0,37      | -0,08     | -0,06    | -0,42    | -0,40    | 0,14      | -0,34     | -0,04     | -0,01    | -0,24    | -0,23    | 1,00      | 0,79        |
|         | $t_{przyt}$ | -0,16     | 0,46      | 0,46      | -0,19     | -0,17    | -0,62    | -0,66    | 0,11      | -0,46     | -0,15     | 0,16     | -0,46    | -0,32    | 0,79      | 1,00        |

Macierz korelacji parametrów „widma rozruchu” dla silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN uzyskana podczas badań w warunkach „naturalnych”

|        | $t_{pra}$   | $t_{pos}$ | $t_{pob}$ | $l_{poj}$ | $l_{tł}$ | $T_{pt}$ | $T_{ol}$ | $I_{max}$ | $U_{max}$ | $P_{max}$ | $I_{śr}$ | $U_{śr}$ | $P_{śr}$ | $t_{roz}$ | $t_{przył}$ |       |
|--------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-------------|-------|
| $r_5=$ | $t_{pra}$   | 1,00      | 0,01      | 0,01      | 0,95     | 0,99     | 0,18     | 0,22      | 0,18      | 0,19      | 0,25     | 0,13     | 0,25     | 0,22      | 0,00        | -0,15 |
|        | $t_{pos}$   | 0,01      | 1,00      | 1,00      | -0,02    | -0,02    | -0,55    | -0,59     | -0,07     | -0,28     | -0,27    | -0,42    | -0,22    | -0,40     | 0,37        | 0,60  |
|        | $t_{pob}$   | 0,01      | 1,00      | 1,00      | -0,02    | -0,02    | -0,55    | -0,59     | -0,07     | -0,28     | -0,27    | -0,42    | -0,22    | -0,40     | 0,37        | 0,60  |
|        | $l_{poj}$   | 0,95      | -0,02     | -0,02     | 1,00     | 0,92     | 0,16     | 0,21      | 0,15      | 0,18      | 0,23     | 0,15     | 0,23     | 0,22      | 0,00        | -0,17 |
|        | $l_{tł}$    | 0,99      | -0,02     | -0,02     | 0,92     | 1,00     | 0,16     | 0,20      | 0,15      | 0,17      | 0,22     | 0,09     | 0,23     | 0,19      | -0,02       | -0,15 |
|        | $T_{pt}$    | 0,18      | -0,55     | -0,55     | 0,26     | 0,26     | 1,00     | 0,90      | 0,23      | 0,50      | 0,52     | 0,43     | 0,54     | 0,58      | -0,59       | -0,65 |
|        | $T_{ol}$    | 0,22      | -0,59     | -0,59     | 0,21     | 0,20     | 0,90     | 1,00      | 0,25      | 0,60      | 0,61     | 0,54     | 0,64     | 0,71      | -0,62       | -0,69 |
|        | $I_{max}$   | 0,18      | -0,07     | -0,07     | 0,15     | 0,15     | 0,23     | 0,25      | 1,00      | 0,03      | 0,61     | 0,25     | 0,51     | 0,44      | -0,12       | -0,20 |
|        | $U_{max}$   | 0,19      | -0,28     | -0,28     | 0,18     | 0,17     | 0,50     | 0,60      | 0,03      | 1,00      | 0,80     | 0,38     | 0,80     | 0,69      | -0,37       | -0,57 |
|        | $P_{max}$   | 0,25      | -0,27     | -0,27     | 0,23     | 0,22     | 0,52     | 0,61      | 0,61      | 0,80      | 1,00     | 0,46     | 0,93     | 0,81      | -0,36       | -0,56 |
|        | $I_{śr}$    | 0,13      | -0,42     | -0,42     | 0,15     | 0,09     | 0,43     | 0,54      | 0,25      | 0,38      | 0,46     | 1,00     | 0,36     | 0,86      | -0,26       | -0,63 |
|        | $U_{śr}$    | 0,25      | -0,22     | -0,22     | 0,23     | 0,23     | 0,54     | 0,64      | 0,51      | 0,80      | 0,93     | 0,36     | 1,00     | 0,78      | -0,33       | -0,55 |
|        | $P_{śr}$    | 0,22      | -0,40     | -0,40     | 0,22     | 0,19     | 0,58     | 0,71      | 0,44      | 0,69      | 0,81     | 0,86     | 0,78     | 1,00      | -0,36       | -0,72 |
|        | $t_{roz}$   | 0,00      | 0,30      | 0,30      | 0,00     | -0,02    | -0,59    | -0,62     | -0,12     | -0,37     | -0,36    | -0,26    | -0,33    | -0,36     | 1,00        | 0,83  |
|        | $t_{przył}$ | -0,15     | 0,60      | 0,60      | -0,17    | -0,15    | -0,65    | -0,69     | -0,20     | -0,57     | -0,56    | -0,63    | -0,55    | -0,72     | 0,83        | 1,00  |

## **Załącznik 4**

**Tabele wyników analizy kanonicznej oraz  
analizy z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych  
parametrów „widma rozruchu” silników 4CT90  
poddanych badaniom przebiegowym  
w warunkach „naturalnego” i „kontrolowanego”  
użytkowania  
pojazdów LUBLIN**

Tabela Z4.1. Współczynniki korelacji kanonicznej uzyskane w badaniach „długotrwałego” użytkowania pojazdu

| Nr pierwiastka kanonicznego | Współczynnik korelacji kanonicznej |                  |             |
|-----------------------------|------------------------------------|------------------|-------------|
|                             | Wartość współczynnika              | Wartość $\chi^2$ | Wartość $p$ |
| 1                           | 0,8253                             | 1763,58          | 0,001       |
| 2                           | 0,4623                             | 374,620          | 0,001       |
| 3                           | 0,1859                             | 81,726           | 0,001       |
| 4                           | 0,1500                             | 38,950           | 0,002       |

Tabela Z4.2. Wartości współczynników układów zmiennych kanonicznych uzyskane w badaniach „długotrwałego” użytkowania pojazdu

| Parametry pierwszego układu zmiennych kanonicznych |         |          |         | Parametry drugiego układu zmiennych kanonicznych |         |          |         | Parametry trzeciego układu zmiennych kanonicznych |         |          |         | Parametry czwartego układu zmiennych kanonicznych |         |          |          |
|----------------------------------------------------|---------|----------|---------|--------------------------------------------------|---------|----------|---------|---------------------------------------------------|---------|----------|---------|---------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| Parametr                                           |         |          |         | Parametr                                         |         |          |         | Parametr                                          |         |          |         | Parametr                                          |         |          |          |
| <i>a</i>                                           | -0,0969 | <i>k</i> | -0,0287 | <i>a</i>                                         | 1,2160  | <i>k</i> | 1,1210  | <i>a</i>                                          | 1,6640  | <i>k</i> | -2,6558 | <i>a</i>                                          | 2,3770  | <i>k</i> | -2,2481  |
| <i>b</i>                                           | 0,0683  | <i>l</i> | 0,0185  | <i>b</i>                                         | 0,3833  | <i>l</i> | 0,6216  | <i>b</i>                                          | 0,9330  | <i>l</i> | -1,9386 | <i>b</i>                                          | -0,5102 | <i>l</i> | -1,9825  |
| <i>c</i>                                           | 0,2466  | <i>m</i> | -0,0357 | <i>c</i>                                         | -2,6842 | <i>m</i> | -1,5397 | <i>c</i>                                          | -3,1158 | <i>m</i> | 2,9940  | <i>c</i>                                          | -5,6876 | <i>m</i> | 1,8170   |
| <i>d</i>                                           | -0,2055 | <i>n</i> | -2,0211 | <i>d</i>                                         | 1,4055  | <i>n</i> | -6,0806 | <i>d</i>                                          | 1,2301  | <i>n</i> | 3,2957  | <i>d</i>                                          | 2,7551  | <i>n</i> | 7,7625   |
| <i>e</i>                                           | 0,0785  | <i>o</i> | -2,4268 | <i>e</i>                                         | -1,1345 | <i>o</i> | -9,5008 | <i>e</i>                                          | 1,1710  | <i>o</i> | 6,7019  | <i>e</i>                                          | -0,2621 | <i>o</i> | 13,319   |
| <i>f</i>                                           | 0,9771  | <i>p</i> | 2,7110  | <i>f</i>                                         | 0,9756  | <i>p</i> | 9,3660  | <i>f</i>                                          | -0,5603 | <i>p</i> | -6,3115 | <i>f</i>                                          | 0,1235  | <i>p</i> | -12,9393 |
|                                                    |         | <i>r</i> | -0,4683 |                                                  |         | <i>r</i> | 0,7518  |                                                   |         | <i>r</i> | 0,3896  |                                                   |         | <i>r</i> | -0,2373  |
|                                                    |         | <i>s</i> | -0,0852 |                                                  |         | <i>s</i> | -0,3780 |                                                   |         | <i>s</i> | 0,3218  |                                                   |         | <i>s</i> | -0,4613  |



Tabela Z4.3. Wartości współczynników układów zmiennych kanonicznych, współczynników korelacji kanonicznej, wariancji wyodrębnionej oraz całkowitej redundancji uzyskane przy wyłączeniu parametrów „widma rozruchu” silnie skorelowanych dla badań w warunkach „naturalnego” użytkowania pojazdu

|          |         |          |         |                                         |          |         |          |         |                                         |          |         |          |         |                                         |
|----------|---------|----------|---------|-----------------------------------------|----------|---------|----------|---------|-----------------------------------------|----------|---------|----------|---------|-----------------------------------------|
| <i>a</i> | —       | <i>k</i> | -0,7562 | Współczynnik korelacji kanonicznej      | <i>a</i> | —       | <i>k</i> | —       | Współczynnik korelacji kanonicznej      | <i>a</i> | —       | <i>k</i> | -0,0444 | Współczynnik korelacji kanonicznej      |
| <i>b</i> | -0,0309 | <i>l</i> | -0,4548 | 0,6834                                  | <i>b</i> | -0,1809 | <i>l</i> | —       | 0,6201                                  | <i>b</i> | -0,0908 | <i>l</i> | —       | 0,6444                                  |
| <i>c</i> | —       | <i>m</i> | 0,8690  | Wariancja wyodrębniona dla zbioru $U_i$ | <i>c</i> | —       | <i>m</i> | 0,2292  | Wariancja wyodrębniona dla zbioru $U_i$ | <i>c</i> | —       | <i>m</i> | —       | Wariancja wyodrębniona dla zbioru $U_i$ |
| <i>d</i> | -0,1008 | <i>n</i> | 0,9370  | 100%                                    | <i>d</i> | -0,0518 | <i>n</i> | —       | 100%                                    | <i>d</i> | -0,1282 | <i>n</i> | -0,3626 | 100%                                    |
| <i>e</i> | 1,0086  | <i>o</i> | 2,2623  | Wariancja wyodrębniona dla zbioru $V_i$ | <i>e</i> | 0,9105  | <i>o</i> | —       | Wariancja wyodrębniona dla zbioru $V_i$ | <i>e</i> | 0,9806  | <i>o</i> | —       | Wariancja wyodrębniona dla zbioru $V_i$ |
| <i>f</i> | —       | <i>p</i> | -1,9182 | 56,36%                                  | <i>f</i> | —       | <i>p</i> | 0,0418  | 100%                                    | <i>f</i> | —       | <i>p</i> | —       | 100%                                    |
|          |         | <i>r</i> | -0,7107 | Całkowita redundancja dla zbioru $U_i$  |          |         | <i>r</i> | -0,8698 | Całkowita redundancja dla zbioru $U_i$  |          |         | <i>r</i> | -0,9134 | Całkowita redundancja dla zbioru $U_i$  |
|          |         | <i>s</i> | 0,0791  | 22,30%                                  |          |         | <i>s</i> | —       | 18,53%                                  |          |         | <i>s</i> | —       | 19,42%                                  |
|          |         |          |         | Całkowita redundancja dla zbioru $V_i$  |          |         |          |         | Całkowita redundancja dla zbioru $V_i$  |          |         |          |         | Całkowita redundancja dla zbioru $V_i$  |
|          |         |          |         | 16,74%                                  |          |         |          |         | 20,69%                                  |          |         |          |         | 15,74%                                  |

Tabela Z4.4. Wartości korelacji kanonicznej uzyskane podczas badań „kontrolowanych” pojazdów

| Nr. | Współczynnik korelacji kanonicznej dla pojazdu 1 |          |          | Współczynnik korelacji kanonicznej dla pojazdu 2 |          |          | Współczynnik korelacji kanonicznej dla pojazdu 3 |          |          | Współczynnik korelacji kanonicznej dla pojazdu 4 |          |          |
|-----|--------------------------------------------------|----------|----------|--------------------------------------------------|----------|----------|--------------------------------------------------|----------|----------|--------------------------------------------------|----------|----------|
|     | Wartość                                          | $\chi^2$ | <i>p</i> | Wartość                                          | $\chi^2$ | <i>p</i> | Wartość                                          | $\chi^2$ | <i>p</i> | Wartość                                          | $\chi^2$ | <i>p</i> |
| 1   | 0,7933                                           | 279,39   | 0,001    | 0,7427                                           | 213,48   | 0,001    | 0,8579                                           | 488,19   | 0,001    | 0,7983                                           | 370,30   | 0,001    |
| 2   | 0,5609                                           | 108,16   | 0,001    | 0,4449                                           | 62,25    | 0,003    | 0,3376                                           | 66,651   | 0,002    | 0,4992                                           | 117,19   | 0,001    |

Tabela Z4.5. Wartości współczynników w pierwszym układzie zmiennych kanonicznych uzyskane podczas badań „kontrolowanych” pojazdów

| Parametry układu zmiennych kanonicznych dla pojazdu 1 |         |          |         | Parametry układu zmiennych kanonicznych dla pojazdu 2 |         |          |         | Parametry układu zmiennych kanonicznych dla pojazdu 3 |         |          |          | Parametry układu zmiennych kanonicznych dla pojazdu 4 |         |          |          |
|-------------------------------------------------------|---------|----------|---------|-------------------------------------------------------|---------|----------|---------|-------------------------------------------------------|---------|----------|----------|-------------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| Parametr                                              |         |          |         | Parametr                                              |         |          |         | Parametr                                              |         |          |          | Parametr                                              |         |          |          |
| <i>a</i>                                              | -0,1660 | <i>k</i> | 0,5945  | <i>a</i>                                              | 0,0245  | <i>k</i> | -1,3884 | <i>a</i>                                              | 0,4948  | <i>k</i> | -4,9956  | <i>a</i>                                              | -0,3373 | <i>k</i> | -2,8562  |
| <i>b</i>                                              | 0,0358  | <i>l</i> | 0,4552  | <i>b</i>                                              | -0,0857 | <i>l</i> | -0,3227 | <i>b</i>                                              | -0,3862 | <i>l</i> | -2,7918  | <i>b</i>                                              | 0,6712  | <i>l</i> | -1,3366  |
| <i>c</i>                                              | 0,0805  | <i>m</i> | -0,4771 | <i>c</i>                                              | 0,1222  | <i>m</i> | 1,2480  | <i>c</i>                                              | 0,0882  | <i>m</i> | 4,1589   | <i>c</i>                                              | -0,1684 | <i>m</i> | 1,8975   |
| <i>d</i>                                              | 0,0703  | <i>n</i> | -3,8410 | <i>d</i>                                              | -0,1232 | <i>n</i> | -0,3222 | <i>d</i>                                              | -0,5678 | <i>n</i> | 13,9197  | <i>d</i>                                              | 0,6591  | <i>n</i> | -19,1635 |
| <i>e</i>                                              | 0,4906  | <i>o</i> | -4,9543 | <i>e</i>                                              | 0,0714  | <i>o</i> | 0,3674  | <i>e</i>                                              | -1,8650 | <i>o</i> | 24,9048  | <i>e</i>                                              | 1,9404  | <i>o</i> | -27,5014 |
| <i>f</i>                                              | 0,5560  | <i>p</i> | 4,9891  | <i>f</i>                                              | 0,8827  | <i>p</i> | 0,0340  | <i>f</i>                                              | 1,8863  | <i>p</i> | -25,4565 | <i>f</i>                                              | -1,5200 | <i>p</i> | 29,4061  |
|                                                       |         | <i>r</i> | -0,5734 |                                                       |         | <i>r</i> | -0,7379 |                                                       |         | <i>r</i> | -0,5507  |                                                       |         | <i>r</i> | 0,1797   |
|                                                       |         | <i>s</i> | 0,0184  |                                                       |         | <i>s</i> | 0,3585  |                                                       |         | <i>s</i> | 0,7942   |                                                       |         | <i>s</i> | -0,2296  |

Tabela Z4.6. Wartości współczynników w drugim układzie zmiennych kanonicznych uzyskane podczas badań „kontrolowanych” pojazdów

| Parametry układu zmiennych kanonicznych dla pojazdu 1 |         |          |          | Parametry układu zmiennych kanonicznych dla pojazdu 2 |         |          |          | Parametry układu zmiennych kanonicznych dla pojazdu 3 |         |          |          | Parametry układu zmiennych kanonicznych dla pojazdu 4 |         |          |         |
|-------------------------------------------------------|---------|----------|----------|-------------------------------------------------------|---------|----------|----------|-------------------------------------------------------|---------|----------|----------|-------------------------------------------------------|---------|----------|---------|
| Parametr                                              |         |          |          | Parametr                                              |         |          |          | Parametr                                              |         |          |          | Parametr                                              |         |          |         |
| <i>a</i>                                              | -0,0123 | <i>k</i> | -0,6801  | <i>a</i>                                              | 0,03716 | <i>k</i> | -2,4508  | <i>a</i>                                              | -0,0429 | <i>k</i> | -1,5626  | <i>a</i>                                              | 0,1241  | <i>k</i> | 0,6383  |
| <i>b</i>                                              | 0,6288  | <i>l</i> | -0,5349  | <i>b</i>                                              | 0,1861  | <i>l</i> | 1,3450   | <i>b</i>                                              | -0,0005 | <i>l</i> | -0,9429  | <i>b</i>                                              | 0,0882  | <i>l</i> | 0,6818  |
| <i>c</i>                                              | -0,3796 | <i>m</i> | 0,4277   | <i>c</i>                                              | 0,5809  | <i>m</i> | -1,5451  | <i>c</i>                                              | 0,0591  | <i>m</i> | 1,4734   | <i>c</i>                                              | -0,1234 | <i>m</i> | -0,1954 |
| <i>d</i>                                              | 0,2818  | <i>n</i> | -11,2067 | <i>d</i>                                              | -0,5615 | <i>n</i> | 22,1297  | <i>d</i>                                              | -0,1116 | <i>n</i> | -9,3804  | <i>d</i>                                              | -0,0750 | <i>n</i> | -4,7621 |
| <i>e</i>                                              | 2,0166  | <i>o</i> | -16,3551 | <i>e</i>                                              | -1,8935 | <i>o</i> | 36,8793  | <i>e</i>                                              | 0,9524  | <i>o</i> | -15,1676 | <i>e</i>                                              | 0,2468  | <i>o</i> | -6,3471 |
| <i>f</i>                                              | -1,6170 | <i>p</i> | 15,3618  | <i>f</i>                                              | 1,7848  | <i>p</i> | -40,1112 | <i>f</i>                                              | 0,0776  | <i>p</i> | 16,0754  | <i>f</i>                                              | 0,8477  | <i>p</i> | 7,0870  |
|                                                       |         | <i>r</i> | 0,6415   |                                                       |         | <i>r</i> | -0,0625  |                                                       |         | <i>r</i> | -0,1336  |                                                       |         | <i>r</i> | -0,5698 |
|                                                       |         | <i>s</i> | -0,4462  |                                                       |         | <i>s</i> | 0,4468   |                                                       |         | <i>s</i> | -0,3324  |                                                       |         | <i>s</i> | 0,1146  |

Tabela Z4.7. Wyniki analizy problemu regresji sieciami neuronowymi podczas badań „kontrolowanych” i „długotrwałych” pojazdów LUBLIN; 0 – pojazd w badaniach „naturalnych”

|          | Sieci z pojedynczą warstwą ukrytą |                 | Sieci z dwiema warstwami ukrytymi |                 |
|----------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
|          | Typ sieci                         | Błąd testowania | Typ sieci                         | Błąd testowania |
| Pojazd 0 | MLP 6:6-13-8:8                    | 0,1192          | MLP 6:6-13-12-8:8                 | 0,0916          |
| Pojazd 1 | Liniowa 6:6-8:8                   | 0,1894          | MLP 6:6-13-13-8:8                 | 0,1603          |
| Pojazd 2 | MLP 6:6-13-8:8                    | 0,1524          | MLP 6:6-13-13-8:8                 | 0,1431          |
| Pojazd 3 | Liniowa 4:4-8:8                   | 0,1787          | MLP 6:6-13-13-8:8                 | 0,1602          |
| Pojazd 4 | MLP 4:4-11-8:8                    | 0,1628          | MLP 6:6-13-13-8:8                 | 0,1543          |

Tabela Z4.8. Wyniki analizy problemu regresji sieciami neuronowymi dla ograniczonych zbiorów wejściowych i wyjściowych podczas badań „kontrolowanych” i „długotrwałych” pojazdów LUBLIN; 0 – pojazd w badaniach „naturalnych”

|          | Sieci z pojedynczą warstwą ukrytą |                 | Sieci z dwiema warstwami ukrytymi |                 |
|----------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
|          | Typ sieci                         | Błąd testowania | Typ sieci                         | Błąd testowania |
| Pojazd 0 | MLP 3:3-7-3:3                     | 0,1212          | MLP 3:3-12-11-3:3                 | 0,0823          |
| Pojazd 1 | MLP 1:1-4-2:2                     | 0,1094          | MLP 3:3-13-13-3:3                 | 0,0912          |
| Pojazd 2 | Liniowa 1:1-2:2                   | 0,1752          | MLP 1:1-13-13-3:3                 | 0,1135          |
| Pojazd 3 | MLP 2:2-2-2:2                     | 0,1169          | MLP 3:3-12-10-3:3                 | 0,0962          |
| Pojazd 4 | Liniowa 1:1-2:2                   | 0,1289          | MLP 2:2-12-8-3:3                  | 0,1139          |

Tabela Z4.9. Wyniki analizy sieciami neuronowymi zagadnienia klasyfikacji dla parametrów „widma rozruchu” związanych z rozruchem silnika podczas badań w trakcie „długotrwałego” użytkowania pojazdu

| Parametry „widma rozruchu” brane jako zmienne wejściowe                                           | Sieci „najlepsze” |                 | Sieci z dwiema warstwami ukrytymi |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
|                                                                                                   | Typ sieci         | Błąd testowania | Typ sieci                         | Błąd testowania |
| $X_{Imax}$                                                                                        | Liniowa 1:1-3:1   | 0,2963          | MLP 1:1-11-11-3:1                 | 0,7778          |
| $X_{Umax}$                                                                                        | RBF 1:1-3-3:1     | 0,3249          | MLP 1:1-11-11-3:1                 | 0,6504          |
| $X_{Pmax}$                                                                                        | RBF 1:1-3-3:1     | 0,2894          | MLP 1:1-11-11-3:1                 | 0,6317          |
| $X_{I\dot{s}r}$                                                                                   | RBF 1:1-5-3:1     | 0,3190          | MLP 1:1-11-11-3:1                 | 0,6589          |
| $X_{U\dot{s}r}$                                                                                   | RBF 1:1-5-3:1     | 0,3144          | MLP 1:1-11-11-3:1                 | 0,7089          |
| $X_{P\dot{s}r}$                                                                                   | RBF 1:1-11-3:1    | 0,2887          | MLP 1:1-11-11-3:1                 | 0,8361          |
| $X_{tprzyl}$                                                                                      | RBF 1:1-12-3:1    | 0,2371          | MLP 1:1-11-11-3:1                 | 0,5150          |
| $X_{troz}$                                                                                        | RBF 1:1-6-3:1     | 0,3740          | MLP 1:1-11-10-3:1                 | 0,8124          |
| $X_{I\dot{s}r}, X_{tprzyl}$                                                                       | RBF 2:2-5-3:1     | 0,2175          | MLP 2:2-8-8-3:1                   | 0,9539          |
| $X_{I\dot{s}r}, X_{troz}$                                                                         | RBF 2:2-5-3:1     | 0,2900          | MLP 2:2-10-10-3:1                 | 0,6449          |
| $X_{P\dot{s}r}, X_{troz}$                                                                         | RBF 2:2-11-3:1    | 0,2213          | MLP 2:2-6-5-3:1                   | 0,7665          |
| $X_{tprzyl}, X_{troz}$                                                                            | RBF 2:2-12-3:1    | 0,2230          | MLP 2:2-11-11-3:1                 | 0,6307          |
| $X_{Imax}, X_{Umax}, X_{Pmax}$                                                                    | RBF 3:3-12-3:1    | 0,2696          | MLP 3:3-11-11-3:1                 | 0,6915          |
| $X_{I\dot{s}r}, X_{U\dot{s}r}, X_{P\dot{s}r}$                                                     | RBF 3:3-11-3:1    | 0,2168          | MLP 2:2-11-5-3:1                  | 0,8775          |
| $X_{Imax}, X_{Umax}, X_{Pmax}, X_{I\dot{s}r}, X_{U\dot{s}r}, X_{P\dot{s}r}, X_{tprzyl}, X_{troz}$ | RBF 8:8-5-43:1    | 0,1469          | MLP 4:4-11-11-3:1                 | 0,5897          |

Tabela Z4.10. Wyniki analizy sieciami neuronowymi związane z zagadnieniem klasyfikacji dla parametrów „widma rozruchu” uwarunkowane pracą i działaniem silnika w trakcie „długotrwałego” użytkowania pojazdu

| Parametry „widma rozruchu” brane jako zmienne wejściowe | Sieci „najlepsze” |                 | Sieci z dwiema warstwami ukrytymi |                 |
|---------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
|                                                         | Typ sieci         | Błąd testowania | Typ sieci                         | Błąd testowania |
| $X_{tpra}$                                              | RBF 1:1-2-3:1     | 0,3453          | MLP 1:1-10-10-1:1                 | 0,5112          |
| $X_{tpos}$                                              | RBF 1:1-11-1:1    | 0,3156          | MLP 1:1-10-10-1:1                 | 0,4605          |
| $X_{ltl}$                                               | RBF 1:1-11-1:1    | 0,3570          | MLP 1:1-10-10-1:1                 | 0,5411          |
| $X_{lpoj}$                                              | RBF 1:1-35-1:1    | 0,3801          | MLP 1:1-10-10-1:1                 | 0,6538          |
| $X_{tpra}$ i $X_{tpos}$                                 | RBF 2:2-15-1:1    | 0,2744          | MLP 2:2-10-6-1:1                  | 0,5094          |
| $X_{tpra}$ i $X_{ltl}$                                  | RBF 2:2-5-1:1     | 0,3891          | MLP 2:2-10-5-1:1                  | 0,5903          |
| $X_{tpra}$ i $X_{lpoj}$                                 | RBF 2:2-23-1:1    | 0,3378          | MLP 2:2-10-9-1:1                  | 0,4336          |
| $X_{tpra}, X_{lpoj}, X_{ltl}, X_{tpos}$                 | RBF 4:4-11-1:1    | 0,2943          | MLP 4:4-10-8-1:1                  | 0,7030          |



## **Załącznik 5**

**Tabele wskaźników statystycznych  
oraz macierze korelacyjne  
etapów rozruchu silnika 4CT90 pojazdu LUBLIN**

Tabela Z5.1. Parametry położenia i rozrzutu dla poszczególnych etapów rozruchu silnika 4CT90

| Parametr etapu rozruchu                                             | Wartość<br>średnia | Odchylenie<br>standardowe | Mediana  | Moda     | Błąd<br>standardowy | Skośność | Kurtoza | Wartość<br>min | Wartość<br>max |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|----------|----------|---------------------|----------|---------|----------------|----------------|
| Czas trwania etapu nr 1 [s]                                         | 0,115              | 0,015                     | 0,116    | 0,116    | 0,0008              | 0,0025   | -0,2347 | 0,072          | 0,152          |
| Droga kątowa wału korbowego<br>wykonana w trakcie etapu nr 1 [°OWK] | 84,311             | 13,485                    | 81,980   | 78,415   | 0,6776              | 0,2432   | 0,0673  | 49,901         | 135,45         |
| Liczba obrotów wału korbowego<br>wykonana w trakcie etapu nr 1 [-]  | 0,234              | 0,037                     | 0,228    | 0,217    | 0,0019              | 0,2432   | 0,0673  | 0,380          | 0,1386         |
| Czas trwania etapu nr 2 [s]                                         | 0,226              | 0,145                     | 0,226    | 0,160    | 0,0075              | 2,3577   | 5,9736  | 0,100          | 1,114          |
| Droga kątowa wału korbowego<br>wykonana w trakcie etapu nr 2 [°OWK] | 273,151            | 187,181                   | 188,911  | Wielokr. | 9,6403              | 2,2414   | 4,6087  | 96,237         | 1215,45        |
| Liczba obrotów wału korbowego<br>wykonana w trakcie etapu nr 2 [-]  | 0,761              | 0,579                     | 0,525    | Wielokr. | 0,0268              | 2,2414   | 4,6087  | 0,2673         | 3,38           |
| Czas trwania etapu nr 3 [s]                                         | 0,138              | 0,072                     | 0,106    | 0,104    | 0,0088              | 1,7714   | 2,3386  | 0,060          | 0,370          |
| Droga kątowa wału korbowego<br>wykonana w trakcie etapu nr 3 [°OWK] | 266,63             | 165,785                   | 192,475  | 196,039  | 20,2539             | 2,0924   | 4,2024  | 60,594         | 869,70         |
| Liczba obrotów wału korbowego<br>wykonana w trakcie etapu nr 3 [-]  | 0,740              | 0,461                     | 0,535    | 0,544    | 0,0563              | 2,0924   | 4,2024  | 0,1683         | 2,415          |
| Czas trwania etapu nr 4 [s]                                         | 0,959              | 0,354                     | 0,890    | Wielokr. | 0,354               | 1,3635   | 4,4549  | 0,278          | 2,91           |
| Droga kątowa wału korbowego<br>wykonana w trakcie etapu nr 4 [°OWK] | 4217,22            | 2184,391                  | 3758,614 | 2969,109 | 110,328             | 2,2221   | 8,1434  | 940,990        | 16805,94       |
| Liczba obrotów wału korbowego<br>wykonana w trakcie etapu nr 4 [-]  | 11,715             | 6,068                     | 10,441   | 8,2475   | 0,3065              | 2,2221   | 8,1434  | 2,613          | 46,68          |



Macierz korelacji wybranych parametrów etapów rozruchu silnika 4CT90 oraz temperatury silnika i oleju silnikowego w chwili rozruchu

|       |             |          |          |       |       |       |       |             |             |             |             |
|-------|-------------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $r =$ |             | $T_{pt}$ | $T_{ol}$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ | $\varphi_1$ | $\varphi_2$ | $\varphi_3$ | $\varphi_4$ |
|       | $T_{pt}$    | 1,00     | 0,97     | -0,16 | -0,61 | -0,58 | -0,40 | -0,06       | -0,56       | -0,53       | -0,53       |
|       | $T_{ol}$    | 0,97     | 1,00     | -0,22 | -0,69 | -0,58 | -0,31 | -0,12       | -0,66       | -0,52       | -0,45       |
|       | $t_1$       | -0,16    | -0,22    | 1,00  | 0,28  | 0,34  | 0,37  | 0,81        | 0,29        | 0,32        | 0,47        |
|       | $t_2$       | -0,61    | -0,69    | 0,28  | 1,00  | 0,12  | 0,47  | 0,18        | 0,99        | 0,16        | 0,58        |
|       | $t_3$       | -0,58    | -0,58    | 0,34  | 0,12  | 1,00  | 0,58  | 0,26        | 0,11        | 0,94        | 0,63        |
|       | $t_4$       | -0,40    | -0,31    | 0,37  | 0,47  | 0,58  | 1,00  | 0,17        | 0,44        | 0,65        | 0,94        |
|       | $\varphi_1$ | -0,06    | -0,12    | 0,81  | 0,18  | 0,26  | 0,17  | 1,00        | 0,22        | 0,27        | 0,23        |
|       | $\varphi_2$ | -0,56    | -0,66    | 0,29  | 0,99  | 0,11  | 0,44  | 0,22        | 1,00        | 0,15        | 0,55        |
|       | $\varphi_3$ | -0,53    | -0,52    | 0,32  | 0,16  | 0,94  | 0,65  | 0,27        | 0,15        | 1,00        | 0,27        |
|       | $\varphi_4$ | -0,53    | -0,45    | 0,47  | 0,58  | 0,63  | 0,94  | 0,23        | 0,55        | 0,27        | 1,00        |