



Jacek Caban

Paweł Drożdziel

Badanie wpływu wybranych nastaw jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym na parametry jego rozruchu

MONOGRAFIE

Badanie wpływu wybranych nastaw
jednocylindrowego silnika o zapłonie
samoczynnym na parametry jego rozruchu

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Jacek Caban
Paweł Drożdziel

Badanie wpływu wybranych nastaw jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym na parametry jego rozruchu



Wydawnictwo
Politechniki Lubelskiej

Lublin 2021

Recenzenci:

dr hab. inż. Karol Franciszek Abramek, prof. uczelni

dr hab. inż. Jacek Czarnigowski, prof. uczelni

Wydanie monografii zostało sfinansowane z Projektu Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie umowy nr 030/RID/2018/19

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2021

ISBN: 978-83-7947-481-3

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

Druk: Soft Vision Mariusz Rajski
www.printone.pl

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

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Wykaz skrótów i symboli	6
1. WPROWADZENIE	8
2. PODSTAWOWE INFORMACJE O PROCESIE ROZRUCHU SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM.....	12
2.1. Proces rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym.....	12
2.2. Parametry rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym	15
2.3. Fizyko-chemiczne podstawy tworzenia i spalania mieszanki palnej podczas rozruchu.....	19
2.4. Właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym	24
2.4.1. Czynniki konstrukcyjne	29
2.4.2. Czynniki regulacyjne	32
2.4.3. Czynniki eksploatacyjne	33
2.5. Podsumowanie	44
3. WPŁYW PARAMETRÓW ZASILANIA W PALIWO NA PRZEBIEG PROCESU ROZRUCHU JEDNOCYLINDROWEGO SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM W TEMPERATURZE OTOCZENIA ..	46
3.1. Metodyka badań.....	46
3.2. Statystyczna analiza wyników badań procesu rozruchu jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym	50
3.2.1. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na maksymalny prąd rozruchu.....	51
3.2.2. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na parametry akumulatora rozruchowego 60	
3.2.3. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na moc średnią rozrusznika	77
3.2.4. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na czas pracy rozrusznika	85
3.2.5. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na pracę rozruchu.....	93
3.2.6. Analiza regresji ciśnień w komorze spalania dla wybranych parametrów rozruchu	99
4. PODSUMOWANIE.....	118
Bibliografia	121

Wykaz skrótów i symboli

1	– nominalna dawka paliwa,
2	– zwiększona dawka paliwa,
$2 I_{\max}$	– maksymalne natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik podczas sprężania („drugie maksimum”) [A],
a	– współczynnik kierunkowy prostej,
AC/DC	– przetwornica prądu przemiennego w stały,
b	– wyraz wolny,
B20	– paliwo o 20% stężeniu etanolu w mieszance paliwowej [%],
CFPP	– ang. <i>Cold Filter Plugging Point</i> , temperatura blokady zimnego filtra,
CO	– tlenek węgla,
CRT	– ang. <i>Continous Regeneration Traps</i> , filtr cząstek stałych o stałej regeneracji,
DOC	– ang. <i>Diesel Oxidation Catalysts</i> , reaktor katalityczny,
DPF	– ang. <i>Diesel Particulate Filter</i> , filtr cząstek stałych,
$\Delta\omega$	– odchylenie wartości prędkości kątowej rozrusznika [rad/s],
ΔA	– odchylenie wartości natężenia prądu [A],
EOBD	– ang. <i>European On Board Diagnostic</i> , Europejski system diagnostyki pokładowej,
EGR	– ang. <i>Exhaust Gas Recirculation</i> , układ recyrkulacji spalin,
ε	– geometryczny stopień sprężania [–],
FAME	– ang. <i>Fatty Acid Methyl Esters</i> , estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego,
GMP	– górne martwe położenie tłoka,
H	– wynik test Kruskala–Wallisa,
HC	– węglowodory,
I_{\max}	– maksymalne natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu [A],
LC	– liczba cetanowa paliwa,
n	– prędkość obrotowa wału korbowego [obr/min],
n_{\min}	– minimalna wartość prędkości obrotowej wału korbowego [obr/min],
NO _x	– tlenki azotu,
ON	– olej napędowy,
p	– poziom istotności testu statystycznego,
p_1	– ciśnienie pierwszego cyklu spalania [bar],
PM	– ang. <i>Particulate Matter</i> , cząstki stałe,

p_{nor}	– ciśnienie normalne w kolejnych cyklach spalania [bar],
p_s	– ciśnienie sprężania w komorze spalania [bar],
r	– współczynnik korelacji,
r^2	– moc korelacji,
RME	– ang. <i>Rapessed Methyl Esters</i> , estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego,
°OWK	– stopnie obrotu wału korbowego [°],
SCR	– ang. <i>Selective Catalytic Reduction NOx</i> , selektywna redukcja katalityczna tlenków azotu,
$S_{\text{np}g}$	– niepełny stan gorący rozruchu silnika,
$S_{\text{np}z}$	– niepełny stan zimny rozruchu silnika,
SOF	– ang. <i>Soluble Organic Fraction</i> , organiczna frakcja rozpuszczona,
S_{pg}	– pełny stan gorący rozruchu silnika,
S_{pz}	– pełny stan zimny rozruchu silnika,
T_g	– graniczna temperatura rozruchu [°C],
TPC	– zespół tłok-pierścienie-cylinder,
t_{rp}	– czas rozruchu względem ciśnienia [s],
t_{rn}	– czas rozruchu względem prędkości obrotowej [s],
t_s	– czas pracy rozrusznika [s],
U_k	– napięcie na końcu rejestracji danych po zakończeniu rozruchu [V],
U_{max}	– napięcie maksymalne przed rozruchem [V],
U_{min}	– napięcie minimalne na początku rozruchu [V],
ω_{max}	– maksymalna wartość prędkości kątowej wału korbowego [rad/s],
ω_o	– wartość prędkości kątowej rozłączenia rozrusznika [rad/s],
ω_r	– prędkość kątowa rozrusznika [rad/s],
ZI	– zapłon iskrowy,
ZS	– zapłon samoczynny.

1. WPROWADZENIE

Silnik spalinowy jest maszyną ciepłą, która przekształca energię chemiczną zawartą w paliwie na energię mechaniczną przez spalanie paliwa. Większa sprawność silników o zapłonie samoczynnym (ZS) w porównaniu z silnikami o zapłonie iskrowym (ZI) oraz zdolność generowania większego momentu obrotowego sprawia, że silniki o ZS ciągle montowane są w pojazdach samochodowych (osobowych, użytkowych i ciężarowych), ciągnikach, urządzeniach stacjonarnych oraz statkach morskich i powietrznych [112]. Jak podaje Torregrosa i współpracownicy [120] w ostatnich latach silnik wysokoprężny stał się bardziej popularny na europejskim rynku samochodów osobowych, w porównaniu do silników benzynowych. Według analiz statystycznych [46], udział samochodów osobowych z silnikami o ZS do 2009 r. stale się powiększał, a w roku 2015 zajmował ustabilizowaną pozycję na rynku z ok. 50% udziałem. Jak podaje w raporcie z 2021 roku [124] Europejskie Stowarzyszenie Producentów Samochodów w roku 2019 udział samochodów osobowych z silnikami o ZS spadł do poziomu 42,3%. Z kolei w przypadku pojazdów dostawczych do 3,5 tony ładowności stanowi on prawie 90%, pojazdy ciężarowe średnie i ciężkie stanowią 97,8% a udział autobusów stanowi 94,5% rynku. Pomimo wielu informacji medialnych dotyczących ograniczania wjazdu do centrów miast pojazdom z silnikami o ZS, pozycja tego typu silnika wydaje się być nadal niezagrażona, szczególnie w obszarze ciężkiego transportu, maszyn budowlanych, leśnych i do zasilania różnego rodzaju maszyn i urządzeń technicznych. Wszędzie tam, gdzie występują duże obciążenia i wymagana jest wysoka trwałość i sprawność silnika oraz występują niedobory innej energii, silnik o zapłonie samoczynnym będzie stanowił główne źródło zasilania. Dlatego też, ze względu na trwałość silników spalinowych bardzo istotne znaczenie ma prawidłowa obsługa techniczna i właściwie dobrane środki eksploatacyjne, w tym oleje, smary [105] oraz paliwa.

Rozwój silników spalinowych stanowi siłę napędową techniki motoryzacyjnej i transportu, ponadto w dużym stopniu przyczynił się do rozwoju innych dziedzin gospodarki. Pomimo ciągłego doskonalenia konstrukcji silniki spalinowe nadal negatywnie oddziałują na środowisko naturalne. W odniesieniu do pojazdów mechanicznych wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym zostały wprowadzone limity emisji węglowodorów, tlenu węgla, tlenków azotu i cząstek stałych [106, 116]. Dlatego prowadzone są ustawiczne prace mające na celu ich doskonalenie w aspekcie wzrostu nie tylko niezawodności i sprawności, ale także proekologiczności, ukierunkowane szczególnie na ograniczenie emisji szkodliwych zanieczyszczeń oraz hałasu [107]. Z tego powodu wymagane jest prowadzenie różnorodnych badań,

zarówno na etapie opracowywania i ulepszania konstrukcji silników spalinowych, jak również w okresie ich eksploatacji i napraw.

Stanowiskowe badania niezawodności samochodowych silników spalinowych przeprowadza się w celu określenia zużycia wybranych elementów silnika spalinowego, a tym samym oceny trwałości stosowanych elementów oraz całej konstrukcji silnika [67]. W wielu przypadkach wymagania stawiane silnikom spalinowym są sprzeczne, co dodatkowo komplikuje zagadnienie i zmusza do określenia właściwych kryteriów oceny i powoduje rozwiązania kompromisowe. Ogromna różnorodność przeprowadzanych badań silnikowych oraz badanych parametrów skłania do budowania nowych stanowisk i opracowywania nowych programów badawczych realizowanych na różnych obiektach w specjalistycznych laboratoriach.

Według literatury [125] pod względem celu, badania rozwojowe można podzielić na:

- badania poznawcze zjawisk zachodzących w silnikach spalinowych,
- badania kształtujące geometrię części i zespołów,
- badania współpracy części (tarcie, zużycie), w tym badania materiałowe,
- badania modeli matematycznych, umożliwiające przez badania obliczeniowe skrócenie badań doświadczalnych,
- badania paliw i olejów,
- badania technologiczne,
- badania eksploatacyjne.

Badania eksploatacyjne nie zawsze są możliwe do wykonania ze względu na ograniczenia czasowe i finansowe. Wtedy ocenę niezawodności silnika przeprowadza się wyprzedzająco, drogą obliczeniową uwzględniając strukturę niezawodnościową silnika oraz wcześniej znane wskaźniki niezawodności poszczególnych elementów silnika [86]. Przy czym niezawodność obiektu technicznego oznacza zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu oraz wpływające na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi [87].

Urządzenia techniczne są projektowane i wykonywane do realizacji określonych zadań. Nieciągłość wykonywania tych zadań (okresowość pracy) jest często spotykaną cechą procesów eksploatacji urządzeń technicznych. Wynika stąd konieczność inicjowania funkcjonowania urządzenia, czyli jego uruchamiania, po każdym okresie przerwy w działaniu [95]. Skuteczne uruchomienie i łatwy rozruch tłokowego silnika spalinowego z ZS jest jednym z podstawowych warunków niezbędnych dla zagwarantowania prawidłowej eksploatacji środków transportu, maszyn i urządzeń wykorzystujących tego rodzaju silniki jako źródło napędu [6]. W okresach rozruchu i zatrzymania

silnika obciążenia na ogół wzrastają, zmieniając się najczęściej w sposób losowy, zarówno pod względem wartości, jak i częstości występowania.

Rozruch współczesnych silników o ZS jest powszechnie dokonywany za pomocą rozrusznika elektrycznego. Trzeba jednak pamiętać, że rozruch może być realizowany również przy pomocy innych systemów np. [6, 32, 95, 126]:

- pneumatyczny system rozruchu, czyli rozruch sprężonym powietrzem (najczęściej stosowany w silnikach wysokoprężnych o średnicy tłoka powyżej 180 mm),
- rozruch silnikiem hydrostatycznym, składa się z rozrusznika hydraulicznego, pompy napędzanej ręcznie lub silnikiem, zbiornika ciśnieniowego oraz zbiornika wyrównawczego. Rozrusznikiem jest niewielki silnik hydrauliczny zasilany olejem pod ciśnieniem 20÷30 MPa. Tego typu układy rozruchowe wyróżniają się wysokim momentem rozruchowym uzyskiwanym niezależnie od wartości temperatury otoczenia.
- system rozruchu z silnikiem benzynowym, stosowany w przypadku dużych silników ciągników lub maszyn budowlanych, pracujących w zimnym klimacie. Silnik rozruchowy jest połączony z silnikiem głównym.
- pirotechniczny system rozruchu, przeważnie stosowany w silnikach o dużej mocy. Siła wybuchu ładunku pirotechnicznego działająca bezpośrednio na tłok wprawiała w ruch układ korbowy silnika lub współpracowała z napędem przekładniowym.
- bezwładnościowy system rozruchu, stosowany jest w silnikach pracujących w warunkach, w których utrzymanie stanu akumulatorów zasilających rozrusznik elektryczny jest trudne. Rozruch bezwładnościowy polega na rozpędzeniu koła zamachowego o dużym momencie bezwładności i połączeniu go za pomocą sprzęgła z wałem korbowym [95].
- ręczny system rozruchu – stosowany w przypadku silników o małej pojemności i małej masie. Rozruch może być realizowany za pomocą korby umieszczonej w osi wału korbowego lub linki nawijanej na oś wału korbowego [95].

Złożoność procesu i trudności wynikające z początkiem oraz podjęciem samodzielnej pracy silnika są ważnym problemem eksploatacyjnym. Pomimo znacznego rozwoju teorii silników spalinowych, ciągłych projektów badawczych procesu rozruchu silników, istnieje wiele trudności interpretacyjnych, zależności i procesów mających znaczenie dla szerszego poznania tego zjawiska. Rozruch tłokowych silników spalinowych stał się ważną dziedziną badań i stanowi problem eksploatacyjny ze względu na szczególną specyfikę przebiegu procesu i trudności zapoczątkowania samodzielnej pracy silników [95].

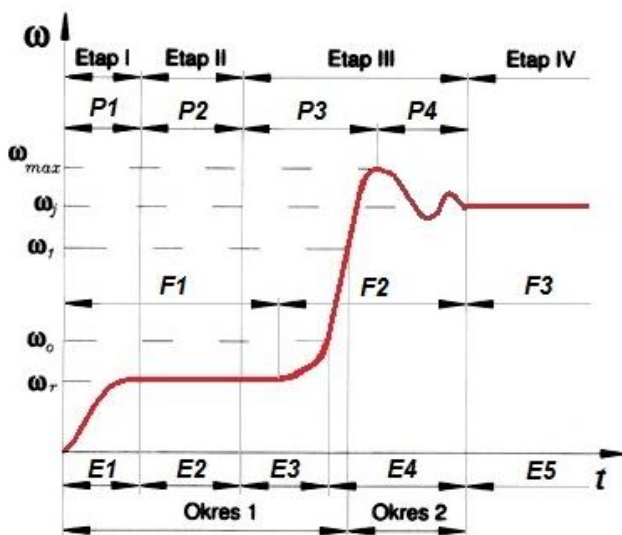
Mimo licznych publikacji związanych z rozruchem silnika o zapłonie samoczynnym, zagadnienia dotyczące wpływu parametrów wtrysku na przebieg procesu rozruchu, w zależności od istniejących warunków, nie zostały dotychczas dostatecznie zbadane.

Niniejsza monografia dotyczy wybranych aspektów rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym. Wykorzystano w niej częściowo fragmenty rozprawy doktorskiej uzupełnionej o sugestie i uwagi recenzentów pt.: *Wpływ parametrów wtrysku paliwa na przebieg procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym* zrealizowanej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej w 2018 r. W monografii przedstawiono rezultaty badań laboratoryjnych procesu rozruchu jednocylindrowego silnika spalinowego o ZS w temperaturach otoczenia, metodykę prowadzonych badań stanowiskowych oraz analizę statystyczną uzyskanych wyników badań. Za pomocą testów statystycznych przeanalizowano wyniki badań laboratoryjnych w celu wyłonienia istotnych parametrów procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w aspekcie oceny stanu technicznego i wpływu na parametry regulacyjne silnika.

2. PODSTAWOWE INFORMACJE O PROCESIE ROZRUCHU SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

2.1. Proces rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym

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 [37]. Przeprowadzona analiza zagadnienia rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym wykazała, że proces rozruchu składa się z kilku następujących po sobie etapów. Podczas rozruchu silnika spalinowego następuje wzrost prędkości kątowej wału korbowego od zera do takiej wartości, która umożliwia podjęcie samodzielnej pracy silnika. Podejmowane badania doprowadziły do opracowania klasyfikacji etapów rozruchu. Wynikiem, których jest szereg odrębnych podziałów, w zależności od przyjętych czynników i kryteriów, obecnych w dostępnej literaturze. Szczegółowy podział na poszczególne etapy rozruchu silnika spalinowego przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Podział na etapy rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym [23]

W publikacjach autorów [41, 108, 109] podano, że rozruch składa się z czterech etapów. Na rysunku 2.1, oznaczono je cyframi rzymskimi I – IV. Czynnikiami wyróżniającymi w tym podziale etapów rozruchu są: wartość prędkości kątowej wału korbowego silnika oraz wartość oporów ruchu. Etap

I zaczyna się od chwili sprzęgnięcia zębniaka rozrusznika z kołem zamachowym wału korbowego silnika. Powoduje to ruszenie z miejsca wału korbowego, tłoków i pozostałych mechanizmów ruchomych silnika. W wyniku napędzania rozrusznikiem systematycznie wzrasta prędkość kątowna wału korbowego do prędkości kątownej rozrusznika – ω_r . Przebieg tego etapu uzależniony jest od bezwładności mechanizmu korbowego i oporów sił tarcia w mechanizmach ruchomych silnika. Etap II charakteryzuje się prawie stałą prędkością obrotową wału korbowego zbliżoną do prędkości kątownej rozrusznika – ω_r . Prędkość kątowna ω_r zależy od stanu naładowania akumulatora oraz temperatury rozruchu. W niskiej temperaturze czas trwania tego etapu wydłuża się, nawet do kilkudziesięciu sekund. W trakcie tego etapu prędkość kątowna wału korbowego może ulegać nieznacznym wahaniom o wartość $\Delta\omega$ w wyniku zmian oporów ruchu [97]. Jeżeli prędkość obracania się wału korbowego odpowiada prędkości kątownej rozruchu, wystąpią dogodne warunki do pojawienia się pierwszych zapłonów mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach silnika [39]. Etap III, rozpoczyna się w momencie wystąpienia pierwszego zapłonu mieszanki palnej. W tym etapie rozrusznik pracuje w sposób przerywany, następuje obracanie się wału korbowego przy nieregularnym spalaniu mieszanki paliwowo-powietrznej w komorze spalania. W momencie, kiedy prędkość kątowna wału korbowego przekroczy wartość ω_o , następuje rozłączenie rozrusznika za pomocą sprzęgła jednokierunkowego. Zabezpiecza to rozrusznik przed uzyskaniem znacznych prędkości obrotowych (rzędu kilku tysięcy obrotów na minutę) i zniszczeniem. Występujące chwilowe spadki prędkości kątownej poniżej wartości ω_o , spowodowane przez wypadanie zapłonów mieszanki, prowadzi do ponownego sprzęgnięcia na krótko wału korbowego z rozrusznikiem. Należy stwierdzić, że nie zawsze podczas rozruchu musi wystąpić etap III. Natomiast w etapie IV stwierdza się występowanie tylko samych zapłonów mieszanki paliwowo-powietrznej w komorze spalania. Prędkość kątowna wału korbowego po początkowym szybkim wzroście (maksimum lokalne ω_{max}), spada i następnie stabilizuje się do osiągnięcia prędkości biegu jałowego lub prędkości ustalonej przez operatora silnika. Początkowa wartość prędkości kątownej wału korbowego po zakończeniu rozruchu charakteryzuje się dużą zmiennością [39]. Dzieje się tak na skutek niestabilnego spalania w cylindrze silnika jednocyndrowego i niestabilności tego procesu w poszczególnych cylindrach silnika wielocyndrowego. W etapie tym następuje także całkowite rozłączenie zębniaka rozrusznika elektrycznego z kołem zamachowym wału korbowego silnika [39].

Podsumowując omawianie czteroetapowej klasyfikacji rozruchu należy podkreślić, że etap I i II stanowią tzw. uruchamianie silnika o ZS, które występują przy udziale rozrusznika elektrycznego. W rzeczywistych warunkach eksploatacji samochodu występują rozruchy, w których czas trwania etapu II jest bardzo krótki lub ten etap wcale nie występuje [39]. Możliwe jest również

przejście z etapu III ponownie do II czyli napędzania rozrusznikiem wału korbowego silnika. Wystąpić mogą też przypadki, w których nie dojdzie do uruchomienia silnika pomimo osiągnięcia wymaganej prędkości rozruchowej.

Fijałkowski w publikacji [47] podzielił rozruch silnika spalinowego na cztery przedziały, które na rysunku 2.1., oznaczono symbolami $PI - P4$. Wyróżnił też cztery początkowe stany rozruchów silnika doładowanego S_{pz} – pełny stan zimny, S_{npz} – niepełny stan zimny, S_{pg} – pełny stan gorący, S_{npg} – niepełny stan gorący. Przedział PI zaczyna się w momencie rozpoczęcia napędzania silnika przy pomocy urządzenia rozruchowego do momentu osiągnięcia stabilnej wartości prędkości kątowej (ω_r). Przedział $P2$ charakteryzuje się prawie stałą prędkością obrotową wału korbowego silnika. W przedziale $P3$ występuje nieregularne pojawianie się pierwszych samozapłonów i przyrost prędkości kątowej do wartości ω_{max} której osiągnięcie kończy ten etap rozruchu. Przedział $P4$ jest etapem podjęcia samodzielnej pracy przez silnik spalinowy. W etapie tym silnik osiąga ustaloną wartość prędkości obrotowej a urządzenie rozruchowe przestaje działać.

W monografii Pszczółkowskiego [96], autor na podstawie własnych badań silników o ZS w komorze niskich temperatur, zaproponował podział rozruchu w niskiej temperaturze otoczenia tylko na dwie fazy ($F1$ i $F2$). W pierwszej fazie $F1$ następuje długotrwałe napędzanie wału korbowego silnika samym rozrusznikiem przy braku zapłonów paliwa w cylindrach. W drugiej fazie $F2$ następuje napędzanie wału korbowego przez rozrusznik przy istnieniu zapłonów mieszanki w cylindrach silnika. Faza ta trwa do momentu podjęcia przez silnik spalinowy samodzielnej pracy. W pracach [89, 90] autorzy uzupełniają podział zaproponowany przez Pszczółkowskiego o jeszcze jedną fazę – $F3$. W fazie $F3$ silnik po udanym rozruchu pracuje z prędkością obrotową biegu jałowego.

W pracach innych autorów [17] wyróżniono pięć etapów rozruchu silnika spalinowego. Na „modelowym” przebiegu zmian prędkości kątowej wału korbowego silnika na rysunku 2.1, oznaczono je symbolami $E1$ do $E5$. Parametrami klasyfikacyjnymi decydującymi o podziale rozruchu na poszczególne etapy są wartość prac wykonywanych przez: rozrusznik podczas obracania wału korbowego, siły gazowe powstające w cylindrach, siły bezwładności oraz rozruchowy moment oporowy silnika spalinowego. W etapie $E1$ wał korbowy jest rozpędzany pod wpływem mocy doprowadzonej z urządzenia rozruchowego. Moc ta jest większa od mocy traconej na pokonanie oporów ruchu silnika i pokonanie bezwładności jego ruchomych elementów [17]. Czas trwania etapu $E1$ wynosi od 0,1 do 0,5 s. Etap $E2$ rozpoczyna się w momencie osiągnięcia stałej wartości prędkości kątowej ω_r . W etapie $E3$ występuje nieregularne pojawianie się pierwszych samozapłonów. Wał korbowy silnika zaczyna być rozpędzany pod wpływem mocy wewnętrznej oraz mocy działającego w dalszym ciągu urządzenia rozruchowego [17]. Wzrost prędkości

obrotowej zależy od dynamiki wzrostu mocy wewnętrznej silnika. Etap ten może trwać od 0,003 do 2 s, w zależności od występujących oporów silnika. Etap *E4* jest granicą samodzielnej pracy silnika. W etapie tym wzrastająca moc wewnętrzna powoduje, że dalsze działanie urządzenia rozruchowego dla utrzymania ruchu silnika jest zbędne [17]. Etap *E5* charakteryzuje się samodzielną pracą silnika z możliwością wykorzystania mocy użytecznej [17]. Ustabilizowanie się wartości prędkości obrotowej na zadanym poziomie oznacza zakończenie procesu rozruchu silnika spalinowego o ZS.

Autorzy publikacji [111, 127] uważają, że ze względu na analogiczne procedury sterowania działaniem silnika, rozruch składa się tylko z dwóch okresów, przedstawionych na rysunku 2.5. Okres 1 zaczyna się od chwili rozpoczęcia przez rozrusznik elektryczny obracania wału korbowego silnika. Natomiast Okres 2 (tzw. stabilizujący), rozpoczyna się gdy prędkość kąтова wału korbowego osiąga „stabilną” wartość 1,5÷2 razy większą od prędkości kątowej wymuszanej przez rozrusznik. Co z kolei może być zbieżne z rozważaniami Mysłowskiego [82], który rozruch silnika spalinowego za pomocą rozrusznika elektrycznego podzielił na dwa etapy. Etap 1, który rozpoczyna się od momentu włączenia rozrusznika do chwili wystąpienia pierwszych wyraźnych samozapłonów. Moc rozruchowa jest zużywana na pokonanie: sił tarcia w silniku, oporów sprężania powietrza w cylindrze, sił bezwładności przy zwiększaniu energii kinetycznej wirujących mas silnika [82]. W przypadku gdy w pierwszym etapie rozruchu pojawią się pierwsze samozapłony, rozpoczyna się Etap 2 [82]. W tym okresie działa moment rozruchowy silnika, niezależnie od momentu rozruchowego dodatkowo występuje okresowe działanie momentu własnego silnika, powstającego od sił gazowych w cylindrach w wyniku pierwszych samozapłonów [82], w silnikach wielocylindrowych. Ze względu na nieregularność występowania samozapłonów pomimo wzrostu prędkości obrotowej wału korbowego silnik nie zawsze podejmie samodzielną pracę.

Niezależnie od przyjętej klasyfikacji czas trwania poszczególnych etapów czy też faz rozruchu powinien być jak najkrótszy, ze względu na ograniczony zapas energii skumulowanej w akumulatorze rozruchowym.

2.2. Parametry rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym

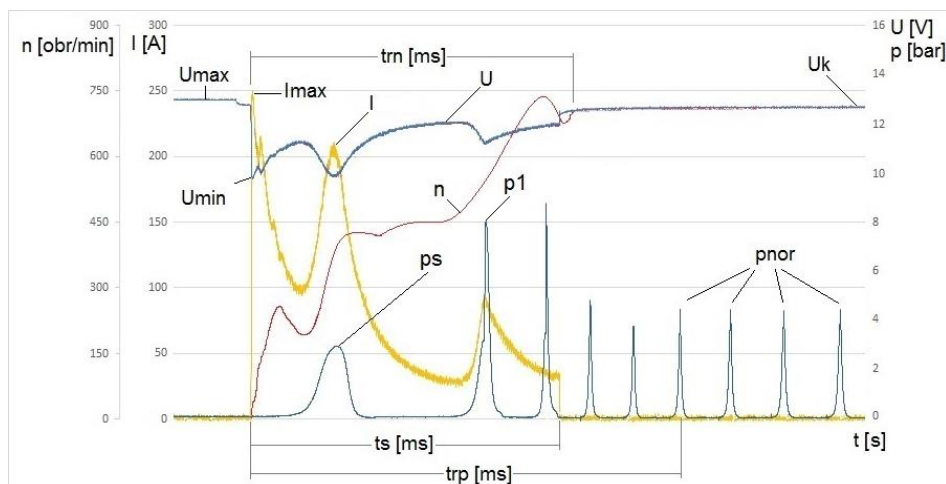
Powszechnie wiadomo, że właściwości i parametry operacyjne silników spalinowych ulegają zmianie w czasie ich eksploatacji [25]. Związane jest to z oddziaływaniem czynników roboczych i zewnętrznych na obiekt techniczny. To między innymi skład mieszanki paliwowo-powietrznej, rodzaj oleju smarującego, dawka paliwa itd. Natomiast czynniki zewnętrzne to te wywierane przez otoczenie w jakim pracuje silnik (pochodzące od zespołu napędowego,

pojazdu, warunków ruchu pojazdu itp.). Można zatem stwierdzić, że warunki eksploatacji obiektu technicznego zasilanego silnikiem spalinowym, wpływają w sposób bezpośredni i pośredni na parametry rozruchu jego silnika.

Do parametrów rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym zaliczyć możemy między innymi [22, 24, 40, 42, 97]:

- maksymalne natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu,
- średnie natężenie prądu podczas uruchamiania silnika,
- czas trwania pracy rozrusznika pod obciążeniem,
- czas przyłożenia napięcia na zaciskach rozrusznika,
- czas trwania rozruchu,
- temperaturę silnika i temperaturę oleju smarującego na początku rozruchu,
- prędkość kątową wału korbowego silnika podczas uruchamiania,
- moc rozrusznika.

Maksymalne natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu występuje w chwili ruszenia wału korbowego silnika [40]. Parametr ten charakteryzuje więc opory sił tarcia spoczynkowego występującego w zespołach ruchomych silnika [39]. Na rysunku 2.2, oznaczono go symbolem – I_{max} .



Rys. 2.2. Wybrane parametry rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym: U – napięcie, U_{max} – maksymalne napięcie przed rozruchem, U_{min} – minimalne napięcie na początku rozruchu, I – natężenie prądu, I_{max} – maksymalne natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu, U_k – napięcie na końcu rejestracji danych po zakończeniu rozruchu, n – prędkość obrotowa silnika, p_s – ciśnienie sprężania, p_1 – ciśnienie 1 cyklu spalania, p_{nor} – kolejna normalna wartość ciśnienia w komorze spalania (po uzyskaniu stabilnej pracy silnika), t_s – czas pracy rozrusznika, t_{rn} – czas rozruchu względem prędkości obrotowej, t_{rp} – czas rozruchu względem ciśnienia w komorze spalania

Średnie natężenie prądu podczas uruchamiania silnika określa się w trakcie napędzania wału korbowego silnika samym tylko rozrusznikiem [39]. W literaturze naukowej [39, 60, 97] oraz normie [133] parametr ten definiuje się jako „prąd rozruchu”. Średnie natężenie prądu podczas uruchamiania silnika determinuje wartość rozruchowego momentu oporowego silnika spalinowego. Natomiast rozruchowy moment oporowy silnika jest sumą momentów oporu sprężania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach i sił tarcia kinematycznego pochodzących od zespołów ruchomych silnika.

Czas pracy rozrusznika pod obciążeniem jest to czas, jaki upłynął od chwili włączenia rozrusznika do chwili kiedy parametry elektryczne (napięcie i natężenie prądu) osiągnął wartości odpowiadające jego działaniu bez obciążenia [39]. Czas ten wg normy branżowej BN-74/2345-09 [133], utożsamiany jest z czasem rozruchu silnika spalinowego.

Jak wynika z literatury czas rozruchu nie jest jednoznacznie określonym parametrem i występują pewne różnice w jego interpretacji. W pracy [39] definiuje się czas rozruchu jako czas, jaki upłynął od chwili ruszenia wału korbowego do chwili osiągnięcia przez niego ustabilizowanej prędkości kątowej podczas samodzielnego działania silnika. Różnicę pomiędzy czasem pracy rozrusznika pod obciążeniem, a czasem rozruchu przedstawiono na rysunku 2.2. Jak widać rzeczywisty czas rozruchu jest dłuższy niż czas pracy rozrusznika pod obciążeniem. Na rysunku tym przedstawiono również interpretację czasu rozruchu wg ustabilizowanego ciśnienia sprężania w komorze spalania, jako kryterium stabilnej pracy silnika spalinowego. W związku z tym kryterium potrzebna jest analiza kolejnych cykli sprężania w cylindrze silnika. Przyjęto, że pierwsze ciśnienie normalne powtarzające się w kilku kolejnych cyklach będzie wyznaczało koniec czasu rozruchu silnika spalinowego o ZS. Zależność tę ilustruje rysunek 2.2., na którym t_{rp} określa czas rozruchu względem ciśnienia a p_{nor} określa kolejne wartości ciśnienia normalnego dla danego silnika przy określonych parametrach regulacyjnych.

Czas pracy rozrusznika – t_s , to czas, jaki upłynął od chwili włączenia rozrusznika do momentu kiedy napięcie i natężenie prądu osiągnął wartości odpowiadające jego działaniu bez obciążenia.

Czas rozruchu względem prędkości obrotowej – t_{rn} , to czas, jaki upłynął od chwili włączenia rozrusznika do momentu kiedy prędkość obrotowa wału korbowego silnika staje się „ustabilizowana”. Czas ten jest przeważnie nieco dłuższy od czasu pracy rozrusznika.

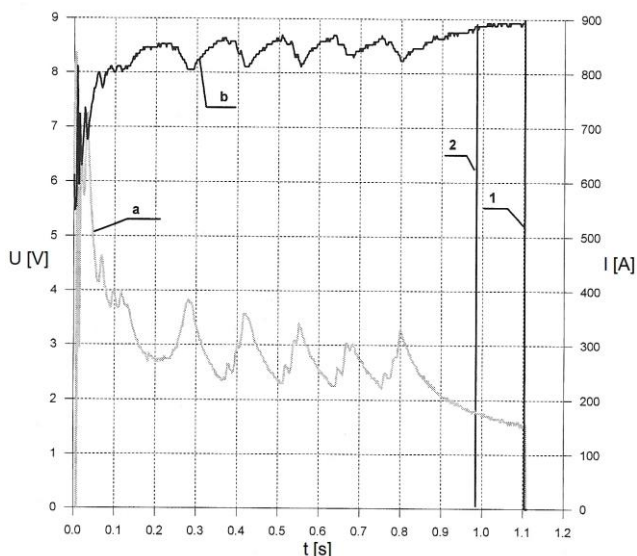
Czas rozruchu względem ciśnienia w komorze spalania – t_{rp} , to czas, jaki upłynął od chwili włączenia rozrusznika do momentu kiedy wartość ciśnienia w komorze spalania w kolejnych cyklach pracy silnika bez obciążenia uzyska normalne wartości ciśnienia (p_{nor}). Za wartość normalną ciśnienia uznaje się 4 następujące po sobie wartości ciśnienia, nie różniące się od siebie o więcej jak

5% w kolejnych cyklach. Pierwsza wartość ciśnienia normalnego uznawana jest za koniec wyznaczania czasu rozruchu względem ciśnienia w komorze spalania [23]. W stosunku do czasu pracy rozrusznika i czasu rozruchu wyznaczonego według prędkości obrotowej wału korbowego silnika czas ten przeważnie osiąga największą wartość.

Za najważniejsze parametry rozruchu uważa się temperaturę silnika oraz oleju smarującego w chwili rozruchu. Oddziałują one na wiele czynników związanych z właściwościami rozruchowymi silnika o zapłonie samoczynnym [39, 60, 79, 82, 90, 95]. Określenia temperatury oleju dokonuje się poprzez pomiar jej wartości w misce olejowej silnika.

Wraz ze spadkiem temperatury silnika i oleju smarującego obserwuje się pogorszenie energetycznych właściwości układu rozruchowego silnika [39, 95, 115], wzrost oporów ruchu oraz wydłużenie czasu rozruchu silnika [62, 99]. Gorsze warunki smarowania powodują zwiększone zużycie elementów i zespołów silnika a spadek temperatury powoduje również gorsze warunki tworzenia i spalania paliwa. Przedstawione warunki powodują z kolei wzrost emisji szkodliwych składników spalania paliwa [8, 15, 19, 76, 78, 84, 92, 102, 128].

Czas przyłożenia napięcia na zaciskach rozrusznika to czas, w którym operator silnika zwiera jego obwód elektryczny. Czas ten ze względu na „bezwładność” operatora jest dłuższy od czasu pracy rozrusznika pod obciążeniem [39]. Opisaną sytuację zilustrowano na wykresie przedstawionym na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik – a, i napięcia na zaciskach rozrusznika – b, podczas rozruchu silnika 4CT90, czas przyłożenia napięcia – 1, czas pracy rozrusznika pod obciążeniem – 2 [39]

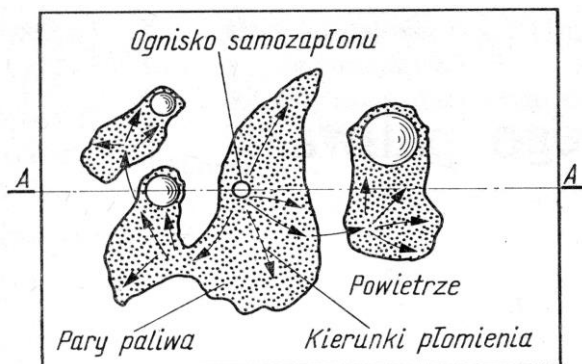
Prędkość kątowna rozruchu to taka wartość prędkości wału korbowego silnika, przy której występują warunki do wytworzenia właściwej mieszanki paliwowo-powietrznej i jej spalania w cylindrze. Wartość prędkości kątowej rozruchu uzależniona jest od temperatury rozruchu silnika i wzrasta w miarę jej spadku [38, 96, 98].

2.3. Fizyko-chemiczne podstawy tworzenia i spalania mieszanki palnej podczas rozruchu

W trakcie rozruchu silnika spalinowego dochodzi do tworzenia paliwowo-powietrznej mieszaniny palnej oraz zainicjowania jej spalania w poszczególnych cylindrach silnika [37]. W silnikach o zapłonie samoczynnym podczas suwu sprężania w cylindrze znajduje się powietrze. Na krótko przed martwym położeniem tłoka następuje wtrysk paliwa do komory spalania wypełnionej gorącym powietrzem. W konsekwencji paliwo rozpyła się, odparowuje i zapala bez udziału dodatkowych źródeł ciepła, jeżeli temperatura w komorze spalania przy końcu suwu sprężania jest odpowiednio wyższa od wartości temperatury samozapłonu.

Najczęściej stosowanym sposobem tworzenia mieszaniny palnej w silnikach o zapłonie samoczynnym jest wtrysk paliwa pod wysokim ciśnieniem do sprężonego w cylindrze lub komorze wstępnej powietrza [37]. Rozpylenie paliwa następuje poprzez wypchanie paliwa pod wysokim ciśnieniem przez małe otworki rozpylacza. Początkowo zwarty strumień paliwa rozrywany jest na drobne kropelki poprzez siłę tarcia występującego na granicy między gęstą atmosferą gazową a strumieniem paliwa i wskutek burzliwego przepływu przez dyszę rozpylacza. W związku z tym, że do cylindra doprowadzane jest samo paliwo, a nie mgła paliwowo-powietrzna w cylindrze spala się większa masa paliwa i tym samym wzrasta ciśnienie w komorze spalania. Jakość rozpylenia strugi paliwa można ocenić na podstawie dokładności rozpylenia i jednorodności kropel [38]. Zatem z pewnym uproszczeniem można uznać, że spalanie paliwa w cylindrze zachodzi częściowo izochorycznie a częściowo izobarycznie. Oprócz utrudnień procesu rozpylenia paliwa w czasie uruchamiania silnika o zapłonie samoczynnym, podczas suwu sprężania występują straty ciepłe wynikłe z przejmowania ciepła przez ścianki komory spalania oraz ucieczki ładunku w cylindrach [37]. Występowanie strat ciepła jest widoczne szczególnie podczas rozruchu silnika w niskich temperaturach. 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 paliwa [82, 96].

Pomimo wieloletnich i rozległych badań proces spalania w silniku o ZS, jest ciągle jednym z najmniej poznanych procesów w silniku spalinowym szczególnie podczas jego rozruchu. Warunki rozruchu często nie sprzyjają samozapłonowi i muszą zostać przewyżczone przy zachowaniu wymagań dotyczących wydajności i emisji [56]. Szczególne utrudnienie stanowi równoczesny przebieg i wzajemne powiązanie takich zjawisk jak: wtrysk i rozpylenie paliwa, odparowanie kropli, mieszanie z powietrzem, wstępne przedpłomienne reakcje chemiczne i właściwe spalanie paliwa [131]. Ze względu na niskie wartości temperatury sprężonego ładunku powietrza podczas rozruchu wydłuża się czas trwania reakcji fizycznych i chemicznych poprzedzających zimne płomienie (czyli czas opóźnienia samozapłonu) [37]. Uzależnione jest to również dużym stopniem niejednorodności mieszaniny palnej, której proces powstawania można przedstawić schematycznie tak jak na rysunku 2.4.

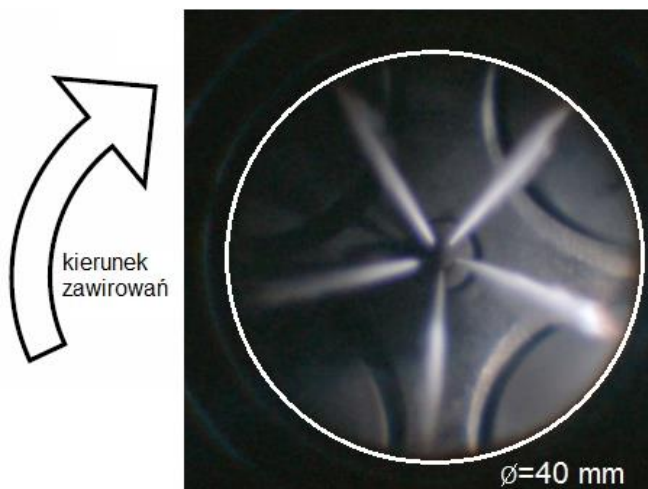


Rys. 2.4. Wstępny okres tworzenia mieszaniny palnej w małym wycinku komory spalania silnika o zapłonie samoczynnym [131]

W małym wycinku komory spalania, bezpośrednio przed zapłonem paliwa można wyróżnić obszary objęte przez same krople paliwa ciekłego, jego pary wymieszane z paliwem oraz czyste powietrze. Spalanie ciekłego paliwa inicjowane jest w miejscu, gdzie zaszły dogodne warunki do wystąpienia samozapłonu mieszaniny palnej. Od tego miejsca rozchodzi się czoło płomienia, które obejmuje obszar mieszaniny par paliwa z powietrzem. W innych miejscach, oddzielonych od rozpatrywanego obszaru strefą czystego powietrza, spalanie może rozpocząć się wskutek bezpośredniego działania istniejącego już płomienia albo w wyniku wzrostu temperatury i wystąpienia samozapłonu [131]. Z kolei w miejscach, gdzie występują nie odparowane krople, wzrost wartości temperatury powoduje cieplny rozkład paliwa. Produkty tego rozkładu spalają się w powietrzu dopływającym dzięki dyfuzji i zawirowaniom powstałym

w komorze spalania. Kształt komory spalania jest tak dobierany aby zapewnić dostateczny ruch wirowy powietrza i skierować je w strefę strugi rozpylanego paliwa.

Istotnym czynnikiem tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej jest kształt strumienia paliwa jaki wypływa z wtryskiwacza. Zależy on od kształtu otworu dyszy i jej krawędzi. Natomiast zasięg strumienia paliwa musi mieć swoją określoną wartość. Mały zasięg strumienia determinuje spadek mocy silnika i wzrost jednostkowego zużycia paliwa, ponieważ nie całe zgromadzone powietrze weźmie udział w spalaniu. Zbyt duży zasięg strumienia powoduje obniżenie sprawności silnika wskutek osiadania kropeł paliwa na ściankach cylindra i denku tłoka. Zasięg strumienia zwiększa się z wzrostem wartości ciśnienia wtrysku i średnicy dyszy wtryskiwacza, a zmniejsza się ze wzrostem wartości ciśnienia w cylindrze. Na rysunku 2.5., przedstawiono zdjęcie obrazujące rozchodzenie się strugi paliwa z otworków wtryskiwacza pięcio-otworkowego.



Rys. 2.5. Rozchodzenie się strug paliwa w komorze spalania [56]

Przy rozruchu, w związku ze zwiększoną dawką rozruchową paliwa, uzyskuje się większy udział mniejszych kropeł paliwa w stosunku do ładunku powietrza w cylindrze silnika. Ułatwia to jego odparowanie i uzyskanie przez mieszankę paliwowo-powietrzną składu umożliwiającego jej samozapłon [37]. Jednocześnie część osiadającego na gładzi cylindra paliwa bierze udział w doszczelnieniu komory spalania. Powoduje to zmniejszenie strat ciepła wskutek ucieczki masy ładunku oraz poprawia warunki termodynamiczne samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej.

Z punktu widzenia kinematyki tworzenia mieszanki zauważono istotną różnicę przebiegu samozapłonu w różnych temperaturach. W temperaturach wyższych mechanizm samozapłonu opiera się głównie na reakcjach łańcuchowych. Ponadto powstające rozgałęzienia łańcuchów przyczyniają się do przyspieszenia reakcji. Natomiast termiczne przyspieszenie reakcji w większym stopniu oddziałuje dopiero w ostatniej fazie samozapłonu. W przypadku niższych temperatur dominują zjawiska tzw. chłodnego płomienia, obejmujące zespół wielu faz reakcji przygotowawczych prowadzących do samozapłonu paliwa. W praktyce zaś samozapłon w silniku przebiega na granicy obu tych zakresów, co komplikuje interpretację procesu tworzenia samozapłonu.

Chemiczne przygotowanie do samozapłonu odbywa się w silniku przy intensywnym transporcie energii i masy, co nieprzerwanie zmienia fizyczne warunki przebiegu reakcji chemicznych [131]. Wpływ różnych czynników na opóźnienie samozapłonu w silniku spalinowym o ZS częściowo pokrywa się z czynnikami wpływającymi na jego rozruch. Wśród nich wymienić należy: właściwości paliwa (chemiczna budowa drobin, liczba cetanowa, dodatki do paliwa); wartości temperatury powietrza dolotu; ciśnienie otwarcia iglicy wtryskiwacza; kąt wyprzedzenia wtrysku; kształt i rodzaj komory spalania; prędkość obrotową silnika.

Analiza spalania rozpylonej strugi paliwa nie jest łatwa. Wypracowano co prawda metody rozpatrujące procesy spalania niestety nie są one dokładnym opisem zjawisk zachodzących w silniku. Znana jest metoda analizy spalania pojedynczej kropli paliwa ale uzyskane wyniki nie są zgodne z wynikami doświadczalnymi. Inna metoda polega na rozpatrywaniu grupy kropeł umieszczonych w środowisku określonej ilości gorącego powietrza. Natomiast proces spalania w rzeczywistości zachodzi w bardziej skomplikowanych warunkach niż w obu wspomnianych przypadkach. Przede wszystkim istnieją wzajemne intensywne ruchy kropeł i powietrza, co powoduje, że w pierwszej fazie w proces mieszania wchodzi stale świeże porcje gorącego powietrza [131]. Mieszanka będzie szybciej przygotowana do samozapłonu gdy gorące powietrze w strefę mieszania będzie dostarczane w sposób ciągły.

Fizyko-chemicznym procesom prowadzącym do samozapłonu ulegają oczywiście te porcje paliwa, które przebywają najdłużej w warunkach wysokiej wartości temperatury i ciśnienia powietrza, a więc przede wszystkim dostarczane w pierwszej fazie wtrysku [131]. Do wystąpienia samozapłonu konieczne jest lokalne wytworzenie mieszaniny palnej o odpowiednim składzie drobin paliwa. Biorąc pod uwagę bardzo szybką zmienność pola temperatur i koncentracji paliwa we wtryskiwanej strudze, szczególnie w warunkach dużej względnej prędkości powietrza i kropeł paliwa, można stwierdzić, że znaczna ilość kropli z pierwszej fazy wtrysku nie zdoła utrzymać wokół siebie optymalnego dla samozapłonu składu mieszaniny przez odpowiednio długi

okres czasu [131]. Z tego względu samozapłonowi najłatwiej ulegają pary paliwa wytworzone w pierwszej fazie wtrysku paliwa, charakteryzujące się mniejszą ruchliwością kropeł.

Badania optyczne w silnikach wykazały, że rozpad paliwa na krople następuje z chwilą opuszczenia otworków wylotowych rozpylacza. Rozpylacze czopikowe i otworkowe w pierwszej fazie wtrysku wytwarzają obłok paliwa składający się z drobnych kropli o małej masie. Następnie zostają gwałtownie wyhamowane w powietrzu i tworzą nasadę powłoki strugi paliwa. W strefie tej istnieją optymalne warunki do najwcześniejszego samozapłonu powstałej mieszaniny. Należy przy tym podkreślić, że we wnętrzu strugi, gdzie odparowuje większa ilość kropeł przy ograniczonej ilości powietrza, występuje znaczne obniżenie temperatury, wytworzona zaś mieszanina jest stale silniej wzbogacana i trudniej utrzymuje optymalny skład [131]. Wokół całej strugi paliwa wytworzona zostaje powłoka odparowana, ale samozapłon pojawia się w okolicy rozpylacza. Uwzględniając skład mieszaniny, pierwsze ogniska samozapłonu występują zazwyczaj nie na obrzeżu powłoki, ale pomiędzy rozpylaczem a rdzeniem strugi paliwa. Strefy samozapłonu dla rozpylaczy wielotworkowych mogą występować w pobliżu każdego z otworów wylotowych. Takie warunki tworzenia samozapłonu występują zarówno przy wtrysku paliwa do nieruchomego powietrza jak i w powietrze ruchome. Występowanie zawirowań powietrza może przyczynić się do powstawania ognisk samozapłonu również w innych miejscach komory spalania.

Dla wystąpienia samozapłonu korzystniejsze są warunki, w których względna prędkość powietrza i kropli paliwa jest niewielka. Natomiast z chwilą rozpoczęcia właściwego spalania pożądane są silniejsze ruchy powietrza i kropli w celu odparowania par paliwa. Sprzyja to szybkiemu tworzeniu mieszaniny, która mogłaby spalać się całkowicie. Wymagania dotyczące jakości rozpylenia są precyzowane również dla poszczególnych faz samego okresu wtrysku, szczególnie początku i końca tego procesu [131]. Na początku jakość rozpylenia powinna zapewniać warunki szybkiego samozapłonu paliwa, a dobremu rozpyleniu powinny ulec również ostatnie porcje paliwa. Spełnienie tego warunku natrafia na trudności w związku ze spadkiem prędkości wypływu paliwa pod koniec wtrysku. Z tych powodów aby uzyskać lepsze warunki do zaistnienia samozapłonu a następnie dużej intensywności spalania w cylindrze oraz uzyskać odpowiedni skład spalin, współcześnie stosowany jest wtrysk wielofazowy.

Zatem przebieg procesu spalania, determinowany jest dużą zmiennością w czasie i w przestrzeni komory pola temperatury oraz koncentracji paliwa w mieszaninie. Ponadto duży wpływ wywiera stopień niejednorodności palącej się mieszaniny, szczególnie podczas rozruchu i w początkowej fazie działania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym. Można więc stwierdzić, że

pierwszy okres spalania w silniku o zapłonie samoczynnym to spalanie niekontrolowane. Wynika on z niepełnej powtarzalności wtrysku i rozpylenia dawki paliwa, a także mieszania z powietrzem.

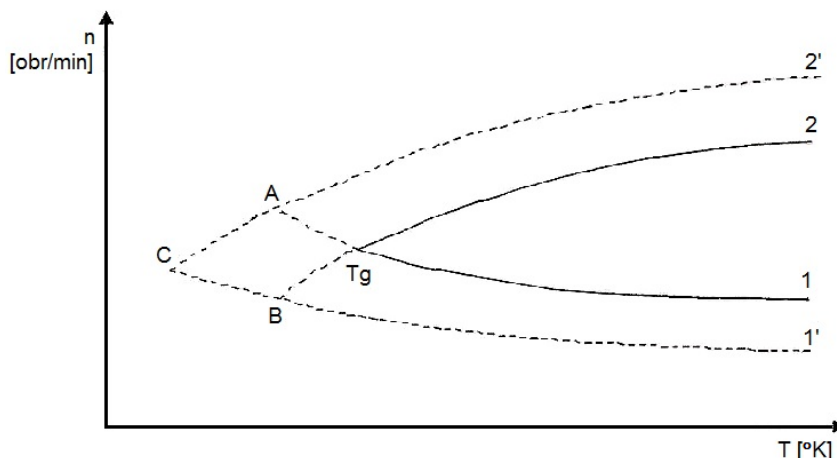
Sterowanie przebiegiem spalania jest związane z procesem wywiązywania ciepła, który to wywołuje określone skutki fizyczne i chemiczne. Skutki fizyczne to przede wszystkim jakość wywiązywania się energii z paliwa oraz jej wykorzystanie, wielkość dynamicznych obciążeń mechanizmu korbowodowego a także głośność pracy silnika. Skutkami chemicznymi są skład spalin oraz ich zadymienie. Na toksyczność spalin wpływają również odchylenia przebiegu spalania w kolejnych obiegach pracy, wyrażające się fluktuacją maksymalnego ciśnienia spalania [131]. Warunki pełnego wywiązywania się ciepła, jego wykorzystanie oraz uzyskanie niskich dynamicznych obciążeń mechanizmu korbowodowego przy możliwie dużej cichobieżności są przeciwstawne a każde techniczne rozwiązanie problemu jest kompromisowe. Obecnie dodatkowym czynnikiem utrudniającym ten kompromis są wymagania dotyczące toksyczności emitowanych z silnika spalin. Współcześnie silniki o zapłonie samoczynnym mogą być wyposażone w różne systemy sterowania przebiegiem spalania, które umożliwiają mniej lub bardziej korzystne z punktu widzenia omawianych wymagań rozwiązanie. Jak zauważa Zabłocki [131], niektóre z tych sposobów wpływają jednocześnie zarówno na fizyczne, jak i chemiczne skutki przebiegu spalania, niestety nie zawsze w jednakowym korzystnym kierunku. Istnieje więc, potrzeba lepszego zrozumienia podstawowych zjawisk dotyczących rozruchu na zimno, aby można było zoptymalizować kontrolę tego procesu w silnikach następnej generacji [56].

2.4. Właściwości rozruchowe silnika o zapłonie samoczynnym

Właściwościami rozruchowymi tłokowego silnika spalinowego określa się stopień jego przystosowania do podjęcia samodzielnej pracy w różnych warunkach otoczenia [96]. Oznacza to, że jego graniczna temperatura rozruchu lub czas trwania rozruchu są zależne od cech i parametrów charakteryzujących jego układy funkcjonalne [95]. Wyznaczenie granicznej temperatury rozruchu – T_g polega na znalezieniu takiej jej wartości, dla której czas rozruchu silnika jest nie większy od zadanego maksymalnego czasu rozruchu [95]. Graniczna temperatura rozruchu nie jest wielkością ściśle fizyczną [96], lecz umowną, zależną od przyjętej maksymalnej wartości czasu włączenia rozrusznika, np. zgodnie z daną normą badań [95]. Na właściwości te mają wpływ wszystkie cechy układu silnika, od których uzależniony jest proces tworzenia i samozapłonu mieszaniny paliwowo-powietrznej.

Możliwości zmiany (poprawy) właściwości rozruchowych silnika można analizować w oparciu o jego podstawową charakterystykę rozruchową

przedstawioną na rysunku 2.6, ograniczoną dwoma obszarami oddziaływania temperatury na rozruch silnika.



Rys. 2.6. Możliwości poprawy właściwości rozruchowych silnika spalinowego o ZS [96]

Odpowiednią poprawę właściwości rozruchowych można interpretować jako obniżenie wartości minimalnej rozruchowej prędkości obrotowej silnika – krzywa 1, uzyskując w ten sposób krzywą 1', lub zwiększenie prędkości obrotowej wału korbowego wymuszanej przez układ rozruchowy – krzywa 2, co pozwala na jej przemieszczenie do położenia 2' [95]. Zatem graniczna temperatura rozruchu T_g może być determinowana przez punkty A, B lub C, uzyskane z przecięcia się krzywych 1, 1', 2 oraz 2'.

Zmiana wartości określonej cechy lub parametru układu powoduje odpowiednie przemieszczenie jednej z krzywych [95].

Na podstawie analizy literatury i doświadczeń badawczych przyjmuje się, że największy wpływ na rozruch silników spalinowych o ZS ma temperatura jego otoczenia w chwili jego wystąpienia. W dodatnich temperaturach rozruch nie powoduje problemów, które występują tylko przy ujemnych temperaturach [3]. Zbyt niska temperatura może spowodować zakłócenia i nieprawidłową pracę układu zasilania w paliwo, jak i układu smarowania silnika [5]. Obniżenie temperatury rozruchu silnika o ZS wywołuje spadek wartości prędkości kątowej wału korbowego, pojemności elektrycznej akumulatora, pogorszenie rozpylenia paliwa w komorze spalania, zwiększenie strat ciepłych, wzrost siły tarcia itd., [1, 2, 3, 5, 6, 20, 39, 42, 58, 61, 75, 82, 107, 118]. Wymienione czynniki utrudniają zapłon mieszaniny paliwowo-powietrznej, co skutkuje brakiem udanego rozruchu silnika. W obecnie prowadzonych pracach coraz więcej uwagi

poświęca się badaniom składu spalin z silników podczas ich uruchamiania i nagrzewania w ujemnej temperaturze otoczenia [63].

W celu poprawy właściwości rozruchowych silnika w niskich temperaturach stosowane są różnego rodzaju urządzenia wspomagające rozruch. Są to między innymi: świece płomieniowe i nagrzewnice elektryczne podgrzewające powietrze za jego filtrem w kolektorze dolotowym silnika oraz świece żarowe, które podgrzewają ładunek powietrza wewnątrz komory spalania [39]. Stosowane są także ciecze rozruchowe, podgrzewacze rozruchowe oraz układy ogrzewania strefowego, czy też układy wykorzystujące skumulowane ciepło z poprzedniego cyklu działania silnika [17, 20, 28, 39, 79, 82, 95, 119, 122]. Do wspomagania rozruchu stosuje się również energię sprężonego powietrza, czy specjalne silniki hydrostatyczne [32, 39, 82, 95, 115]. Urządzenia wspomagające rozruch powodują przyrost temperatury ładunku powietrza w końcu suwu sprężania, co ułatwia rozruch silnika w niskich temperaturach.

Temperatura otoczenia jest czynnikiem powszechnie uznanym za mający istotny wpływ na rozruch silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym. Analiza wpływu wartości temperatury na rozruch tłokowych silników spalinowych dotyczy mechanizmów jej oddziaływania na możliwość ich uruchomienia [95]. Analizy tej można dokonać przy założeniu, że spełnione są dwa warunki [95, 96]:

- niezależnym zmiennym parametrem podczas realizacji rozruchu jest jedynie wartość temperatury otoczenia (i równej jej temperatura silnika),
- wszystkie elementy silnika jako badanego układu uzyskały stan równowagi cieplnej z otoczeniem.

W przypadku procesu rozruchu silnika spalinowego wraz ze spadkiem wartości temperatury zwiększa się znacznie czas rozruchu silnika. Miarą naturalnych właściwości rozruchowych silnika tłokowego jest jego graniczna temperatura otoczenia [95]. Graniczna temperatura rozruchu jest to najniższa wartość temperatury otoczenia, przy której można doprowadzić ustabilizowany termicznie silnik do stanu samodzielnego działania [39]. W trakcie rozruchu silnika o ZS w niskiej temperaturze zapłony mieszanki paliwowo-powietrznej następują po upływie pewnego czasu pracy rozrusznika, którego wartość wzrasta wraz z obniżeniem wartości temperatury otoczenia i silnika. Procesy zachodzące w cylindrach silnika w tym czasie prowadzą do wytworzenia warunków dla powstania pierwszego zapłonu paliwa. Do tych procesów należy zaliczyć [96]:

- wzrost wartości temperatury ścianek komory spalania w wyniku przejmowania ciepła od sprężonego powietrza oraz wskutek tarcia w zespole tłok-cylinder,

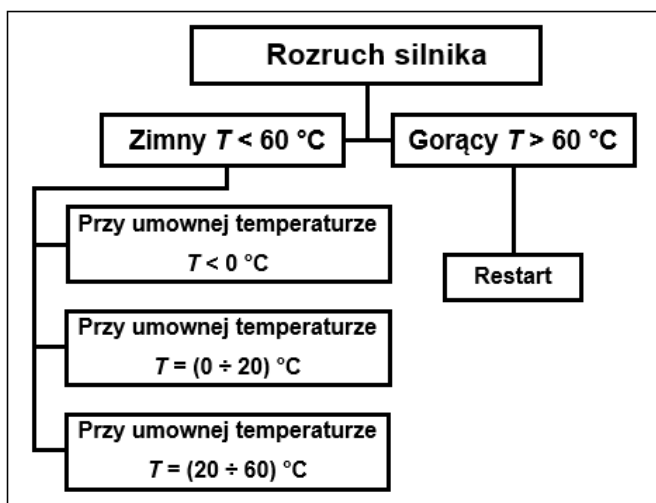
- działanie wtryskiwanego paliwa powodujące uszczelnienie skojarzenia TPC, przez co zmniejsza się intensywność przepływu powietrza przez jego nieszczelności.

W wyniku tego podczas długotrwałego napędzania wału korbowego przez rozrusznik następuje wzrost wartości temperatury i ciśnienia podczas sprężania ładunku powietrza. Przy tym zmiana temperatury ścianek komory sprężania jest niewielka – rzędu kilku stopni, nawet przy długotrwałym napędzaniu wału korbowego przez rozrusznik [126]. Przy braku wtryskiwania paliwa do komory spalania podczas napędzania wału korbowego silnika parametry termodynamiczne (temperatura i ciśnienie sprężania ładunku) w kolejnych suwach sprężania ulegają pogorszeniu w wyniku strat ładunku przez nieszczelności zespołu TPC. Natomiast od momentu powstawania zapłonów następuje poprawa warunków do zaistnienia zapłonu i spalania paliwa dzięki nagrzewaniu ścianek komory spalania w wyniku uwalniania gazów wylotowych. Dla każdej wartości temperatury istnieje minimalna wartość prędkości obrotowej wału korbowego – n_{min} , przy której możliwe jest uruchomienie silnika w określonym czasie [96]. Zatem, warunkiem koniecznym i wystarczającym rozruchu naturalnego w danej temperaturze jest zapewnienie odpowiedniej prędkości obrotowej wału korbowego – n_{min} . W obniżonej temperaturze większy jest spadek napięcia na rezystancji wewnętrznej akumulatora a w wyniku tego zmniejsza się napięcie na zaciskach zasilającego rozrusznik akumulatora rozruchowego. Wraz ze spadkiem wartości temperatury, jak też wzrostem wartości pobieranego prądu, obniża się pojemność efektywna akumulatora [95]. W związku z tym akumulator ma mniejszą zdolność do oddawania energii i zasilania układu rozruchowego, który z kolei za pomocą rozrusznika ma mniejszą zdolność do napędzania wału korbowego silnika, i rozwija mniejszą prędkość obrotową wału korbowego.

Analizując wpływ zmian wartości temperatury na rozruch silników spalinowych o zapłonie samoczynnym można stwierdzić, że związany jest on ze zmianą stanu początkowego i zależy głównie od właściwości powietrza, paliwa, oleju smarującego i zdatności układu rozruchowego.

Ze względu na wartość temperatury silnika można wyróżnić rozruch zimny lub gorący. 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.) [39]. Wartość temperatury silnika wynosi wtedy przeważnie powyżej 60 °C. W przeciwnym przypadku następuje zimny rozruch silnika spalinowego. Podczas uruchamiania zimnego silnika o ZS, temperatura

wszystkich części składowych silnika jest równa temperaturze otoczenia [31]. Urządzenia wspomagające rozruch silnika o ZS włączane są automatycznie przez układ sterowania wtryskiem paliwa lub przez operatora silnika. Klasyfikację rozruchów silnika spalinowego według stanu temperaturowego silnika przedstawiono na rysunku 2.7.



Rys. 2.7. Podział rozruchów ze względu na temperaturę silnika [23]

W grupie gorących rozruchów wyróżnia się tzw. restart silnika, który odbywa się po krótkotrwałej przerwie w działaniu silnika spalinowego. Podczas restartu silnika nie występuje wzbogacenie mieszanki paliwowo-powietrznej [37]. Długość przerwy w działaniu silnika, po której zachodzi restart zależy od zastosowania algorytmów sterujących zasilaniem w paliwo [39].

W grupie zimnych rozruchów silnika spalinowego wyróżnia się:

- rozruchy przy umownej temperaturze poniżej 0 °C,
- rozruchy przy umownej temperaturze w przedziale 0÷20 °C,
- rozruchy przy umownej temperaturze w przedziale 20÷60 °C.

W praktyce eksploatacyjnej pojazdów zasilanych silnikami spalinowymi klasyfikacja temperaturowa rozruchów wynika z przedziału czasowego postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem. Zatem rozruchy przy umownej temperaturze poniżej 0 °C, występują w okresie zimowym przy długich czasach postoju pojazdów. Rozruchy przy umownej temperaturze silnika zawierającej się w granicach 0÷20 °C, są także wynikiem długich postojów pojazdu [39]. Ostatnią grupę rozruchów stanowią rozruchy przy umownej temperaturze silnika

zawierającej się w przedziale $20\div 60$ °C. Są to rozruchy ciepłego silnika występujące po krótkim postoju pojazdu zdarzające się kilkakrotnie w ciągu dnia.

Ponadto w trakcie eksploatacji pojazdów zasilanych silnikami spalinowymi, można wyróżnić tzw. pierwszy dzienny rozruch. Występuje on po trwającym minimum 8 h postoju pojazdu na otwartej przestrzeni lub w pomieszczeniu garażowym [39]. Temperatura pierwszego dziennego rozruchu silnika spalinowego jest równa temperaturze powietrza otaczającego pojazd [35].

Czynniki wpływające na rozruch silnika o ZS według przyjętego w literaturze podziału dzieli się na; konstrukcyjne, regulacyjne i eksploatacyjne.

2.4.1. Czynniki konstrukcyjne

Cechy konstrukcyjne kształtowane są w fazie opracowania konstrukcji oraz produkcji silnika i nie mogą ulegać zmianie podczas eksploatacji. Wśród podstawowych czynników konstrukcyjnych silników o zapłonie samoczynnym można wyróżnić:

- Typ i kształt komory spalania. Czynniki te decydują o stopniu rozwinięcia powierzchni komory spalania silnika czyli stosunku powierzchni do objętości oraz zawirowaniu ładunku powietrza podczas suwu sprężania. Wpływają przez to na intensywność wymiany ciepła między ładunkiem sprężonego powietrza a otaczającymi go ściankami [70]. Determinuje to w obiegu zastępczym silnika wartość wykładnika politropy [95]. Dlatego też silniki o komorze wirowej lub dzielonej wykazują gorsze, szczególnie w niskich temperaturach otoczenia właściwości rozruchowe w porównaniu do silników z układami bezpośredniego wtrysku paliwa. Z powyższych powodów wymagane jest stosowanie urządzeń ułatwiających rozruch (np. świec żarowych).
- Stosunek skoku tłoka do średnicy cylindra. Czynniki ten ma znaczenie na wartość wymiany ciepła między ładunkiem sprężonego powietrza a otaczającymi go ściankami. Silniki, w których stosunek pola powierzchni do objętości komory ma wartość minimalną wykazują lepsze właściwości rozruchowe.
- Geometryczny stopień sprężania. Jest on wielkością równą stosunkowi objętości całkowitej cylindra wraz z objętością komory spalania do objętości samej komory spalania. Geometryczny stopień sprężania ϵ jako czynnik konstrukcyjny jest wskaźnikiem, którego zwiększenie poprawia sprawność obiegu cieplnego i właściwości rozruchowe silnika [1, 6]. Zwiększenie geometrycznego stopnia sprężania do jego wartości $19\div 20$ wpływa korzystnie na właściwości rozruchowe silnika [95]. Przeszkodą do zwiększania wartości stopnia sprężania jest wzrost obciążeń mechanicznych

łożysk wału korbowego przez siły gazowe. W związku z powyższym stopień sprężania jest wynikiem kompromisu pomiędzy dobrymi właściwościami rozruchowymi a stosunkowo niewysokimi obciążeniami mechanicznymi. Geometryczny stopień sprężania ε jest ściśle powiązany z temperaturą końca suwu sprężania. Przy wzroście ε rośnie także temperatura końca suwu sprężania, która powinna przekraczać temperaturę zapłonu paliwa przynajmniej o 200 °K [82]. Temperatura ta zależy od dużej liczby czynników, z których stopień sprężania i układ spalania są dwoma najbardziej znaczącymi [18]. Wpływ stopnia sprężania na właściwości rozruchowe oraz temperaturę rozruchu analizowano w pracach [88, 89] w przedziale 17:1÷13,7:1 w temperaturze do -25 °C, oraz przy wartości 15:1 w temperaturze -10 °C. Z kolei MacMillan z zespołem [77] prowadzili podobne badania w zakresie 18,4:1÷15,4:1 w temperaturze do -20 °C. Obecnie dąży się do obniżenia stopnia sprężania co jest spowodowane zmniejszeniem wartości emisji związków toksycznych.

- Stopień zmiany objętości ładunku. Dla przebiegu procesu tworzenia i samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej istotna jest wartość temperatury i ciśnienia powietrza w okresie wtryskiwania paliwa [95]. Zatem nie wartość geometrycznego stopnia sprężania, lecz rzeczywistego stopnia zmiany objętości ładunku powietrza decyduje o jego parametrach termodynamicznych. Stopień zmiany objętości ładunku należy określać od chwili zamknięcia zaworu dolotowego do położenia tłoka odpowiadającego początkowi wtrysku paliwa. Wartość stopnia zmiany objętości ładunku uwzględnia: geometryczny stopień sprężania, kąt zamknięcia zaworu dolotowego oraz kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa. Są to trzy parametry związane ze zmianą objętości ładunku mające wpływ na przebieg procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym.
- Kąt zamknięcia zaworu dolotowego. Kąt zamknięcia zaworu dolotowego ma zasadniczy wpływ na wartość ciśnienia końca sprężania ładunku. Silniki doładowane mają zwiększoną wartość kąta opóźnienia zamknięcia zaworu dolotowego i stąd mają one na ogół gorsze właściwości rozruchowe niż odpowiadające im silniki bez doładowania [95]. Turbosprężarka w trakcie rozruchu nie zwiększa stopnia napełnienia cylindrów silnika. Opóźnienie końca otwarcia zaworu dolotowego wpływa na podwyższenie temperatury ładunku w końcu suwu sprężania, co jest korzystne w czasie rozruchu [39].
- Liczba i konstrukcja pierścieni tłokowych. Uszczelnienie komory spalania ma również wpływ na właściwości rozruchowe silnika o ZS. Ograniczenie strat ładunku w komorze spalania wpływa korzystnie na temperaturę sprężanego powietrza. W trakcie rozruchu występuje niedostateczne smarowanie wywołane szeregiem zjawisk takich jak: większa lepkość oleju smarującego, początkową bezwładnością układu smarowania, zbyt niską

prędkością wału korbowego i innych mechanizmów silnika [36, 39, 42, 66, 75]. Konstrukcja zespołu tłok-pierścienie-cylinder (TPC), spalinowego silnika tłokowego decyduje o natężeniu przedmuchów spalin do skrzyni korbowej, ilościowym zużyciu oleju silnikowego oraz o procesach tarcia i zużycia zachodzących podczas współpracy elementów zespołu [69]. Jednym z symptomów zużycia zespołu TPC może być wydłużenie czasu rozruchu. Zużycie zespołu TPC prowadzi do znacznego zmniejszenia właściwości rozruchowych silnika [83].

- Moc rozrusznika. Przy określonej wartości momentu oporu silnika spalinowego prędkość obrotowa wału korbowego jest zależna od charakterystyk energetycznych układu rozruchowego [95]. Moc nominalna rozrusznika określa możliwości wykorzystania go do napędzania wału korbowego danego silnika. Moment obciążenia rozrusznika zmienia się w szerokim zakresie [30]. Przyczyną tego są zmiany: momentu spowodowanego siłami pochodzącymi od kompresji i dekompresji gazów w cylindrach silnika, momentu tarcia w silniku spalinowym oraz zmiany momentu bezwładności układu korbowego [30]. Rozruszniki pracują w temperaturze otoczenia od (-40 °C) do 150 °C przy napięciu zasilania mniejszym od 12 V, o prądzie znamionowym wynoszącym kilkaset amperów i prądzie rozruchowym, który może przekraczać 1000 A [43].
- Pojemność i zdolność rozruchowa akumulatora. Nominalna 20 godzinna pojemność akumulatora kwasowego określa ilość zgromadzonego w nim ładunku elektrycznego [95]. Wpływa ona na spadek napięcia na zaciskach akumulatora przy danym obciążeniu prądowym oraz na wartość napięcia zasilania rozrusznika. Ważnym czynnikiem mającym wpływ na wartość napięcia obciążonego akumulatora jest temperatura. Zmiany wartości temperatury wpływają na moc układu rozruchowego determinowaną głównie poprzez zmianę przewodności elektrycznej elektrolitu, która obniża się wraz ze spadkiem wartości temperatury [98]. Ponadto zwiększają się opory ruchu wału korbowego silnika w chwili napędzania go przez rozrusznik, co powoduje zwiększenie wartości natężenia prądu pobieranego z akumulatora.
- Wartość przełożenia między zębniakiem rozrusznika a wieńcem zębatym koła zamachowego. Przekładnia mechaniczna zapewnia zmianę momentów sił i prędkości obrotowych kół zębatych. Zgodnie z równaniem przekładni, stosunek prędkości obrotowej kół zębatych przekładni jest równy odwrotności stosunku liczby zębów poszczególnych kół [95]. Większe przełożenie zapewnia zwiększone wartości prędkości obrotowej wału korbowego przy wyższych wartościach temperatury rozruchu, natomiast niższe przy obniżonej wartości temperatury. Zwiększenie przełożenia powoduje wzrost prędkości maksymalnej kosztem spadku momentu obrotowego, co przy niskich temperaturach (zwiększonych oporach ruchu)

powoduje, że moment napędowy jest mniejszy od momentu oporów i nie jest możliwe przyspieszenie do większej prędkości obrotowej. W związku z powyższym zębnik rozrusznika powinien mieć małą liczbę zębów.

- Parametry konstrukcyjne układu wtryskowego paliwa. Od nich zależy intensywność wypływu paliwa z rozpylaczy. Ilość dostarczonego paliwa determinuje realizację dalszych przemian w komorze spalania. Do parametrów konstrukcyjnych układu wtryskowego paliwa można zaliczyć: średnicę tłoczków pompy wtryskowej, kształt krzywki wałka pompy rzędowej lub krzywki rozdzielacza determinujący czasowy przebieg wtrysku oraz liczbę i średnicę otworów rozpylaczy [95]. W przypadku układów typu common-rail najistotniejszym elementem układu są wtryskiwacze elektromagnetyczne stosowane w układach I i II generacji oraz piezoelektryczne dla układów common-rail III generacji.

2.4.2. Czynniki regulacyjne

Czynniki lub parametry regulacyjne silnika to parametry charakteryzujące jego układy funkcjonalne, które mogą być ustalane przez producenta lub eksploatatora w procesie eksploatacji bez wymiany elementów układów [95]. Czynniki regulacyjne umożliwiają celowe sterowanie procesami pracy silnika spalinowego. Do podstawowych parametrów regulacyjnych w zakresie kształtowania właściwości rozruchowych silnika o ZS, można zaliczyć przede wszystkim parametry związane z układem zasilania paliwem. Jak podaje Mysłowski [82], istnieją optymalne wartości parametrów, przy których silnik uzyskuje najkorzystniejsze właściwości rozruchowe. Niestety wartości te istotnie odbiegają od parametrów regulacyjnych aparatury wtryskowej odpowiadających za optymalne dla normalnej pracy silnika. Jak już wspomniano szczególnie trudne warunki do rozruchu występują w niskich temperaturach.

Obecnie w systemach z elektronicznym sterowaniem układu wtryskowego, łatwo uzyskać dostosowanie wartości parametrów regulacyjnych podczas rozruchu w niskich temperaturach. Tradycyjnie realizowane było to poprzez zwiększenie dawki rozruchowej na pompie paliwa i przestawienie kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przed rozruchem silnika.

Wśród czynników regulacyjnych wpływających na przebieg rozruchu wyróżnia się:

- Kąt wyprzedzenia wtrysku. Parametr ten ma największy wpływ na właściwości rozruchowe silnika o ZS w układzie zasilania paliwem. Wpływa on na rzeczywisty stopień zmiany objętości ładunku powietrza podczas sprężania do chwili rozpoczęcia wtryskiwania paliwa, a zatem o wartościach parametrów termodynamicznych powietrza, w którym zachodzą przemiany fizyczne i chemiczne paliwa [95]. Badania doświadczalne [58, 96] wykazały, że podczas uruchamiania silnika w ujemnych temperaturach istnieje

optymalna wartość kąta wyprzedzenia wtrysku, przy której czas wystąpienia pierwszego zapłonu mieszanki palnej osiąga wartość minimalną. Optymalne wartości kąta wyprzedzenia wtrysku zawierają się w przedziale od 20 do 15 °OWK przed GMP.

- Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza. Determinuje ono prędkość wypływu paliwa z rozpylacza a jakość jego rozpylenia ma szczególnie istotne znaczenie podczas rozruchu. Uzyskuje się dzięki temu rozpad strugi paliwa na krople o mniejszych średnicach, jednocześnie zwiększona zostaje energia kinetyczna wtryskiwanego paliwa, która zamieniona jest w trakcie jego gwałtownego hamowania, w ośrodku powietrznym, w dużą ilość ciepła [39]. Ułatwia to proces odparowania paliwa i zainicjowania jego samozapłonu [17, 68, 82].
- Dawka paliwa. Wielkość rozruchowej dawki paliwa jest determinowana przez czynny skok tłoczków pompy wtryskowej [95]. Zmiana dawki powoduje zmianę czasu wtrysku paliwa do cylindra. Ze względu na to, że szybkość przemian wtryskiwanego paliwa podczas rozruchu jest znacznie mniejsza niż podczas normalnej pracy silnika rozruchowe dawki paliwa są większe o około 50% od nominalnej wartości dawki eksploatacyjnej. Poprzez zwiększenie dawki paliwa uzyskuje się zwiększenie ilości małych kropeł paliwa, które w tych warunkach stanowią ogniska zapłonu. Zastosowanie wtrysku wielofazowego: najpierw dawka pilotażowa (przedwtrysk), a następnie wtrysk dawki głównej w silniku o ZS i dotrysk dodatkowy, poprawia właściwości rozruchowe silnika [39]. W pracach [96, 108] stwierdzono, że nadmierne zwiększanie dawki rozruchowej paliwa jest niekorzystne. W układach typu common-rail doboru dawki rozruchowej dokonuje sterownik analizując takie parametry jak temperatura paliwa, cieczy chłodzącej oraz prędkość obrotowa wału korbowego silnika. Sygnały dla doboru dawki rozruchowej są przesyłane do sterownika od momentu przekręcenia kluczyka w stacyjce w położenie „start” aż do uzyskania minimalnych prędkości obrotowych przez silnik. W tym przypadku operator silnika nie ma żadnego wpływu na dobieraną dawkę rozruchową.

2.4.3. Czynniki eksploatacyjne

Do ostatniej grupy cech wpływających na rozruch silnika o zapłonie samoczynnym należą czynniki eksploatacyjne. Cechy eksploatacyjne są zależne od decyzji użytkownika danego silnika spalinowego. Dotyczą one głównie właściwości płynów eksploatacyjnych i sposobów działania [95]. Wśród tych czynników występują:

- Stan techniczny silnika. Odnosi się szczególnie do szczelności komory sprężania (zespół TPC) oraz do układu zasilania paliwem. Odparowanie filmu paliwowego odgrywa znaczną i dominującą rolę podczas zimnego

startu silnika wysokoprężnego [56]. Szczelność sekcji tłoczących determinuje wielkość strat dawki paliwa i intensywność jego wtryskiwania, a szczelność cylindra – wielkość strat masy ładunku [95]. Szczelność zespołu TPC ma zasadnicze znaczenie podczas rozruchu zimnego silnika, gdy temperatura otoczenia jest poniżej zera [1].

- Stan naładowania akumulatora. Stan akumulatora decyduje o jego zdolności do oddawania ładunku podczas rozruchu silnika: rzeczywistej, użytecznej pojemności i zdolności rozruchowej [95]. W temperaturze otoczenia poniżej zera akumulator ma trudne warunki techniczne pracy (mały prąd rozruchu, niska zdolność spowodowana przez zużycie i temperaturę poniżej zera), występuje niewielka prędkość obrotowa wału korbowego, spowodowana również przez gęsty olej smarowy (gdzie są trudne warunki do utworzenia dobrego filmu olejowego), który uszczelnia zespół TPC w niezadowalającym stopniu [1]. W układach rozruchowych pojazdów powszechnie stosowane są akumulatory kwasowo-ołowiowe [53]. Zmniejszenie stanu naładowania akumulatora do 70% jego nominalnej pojemności skutkuje obniżeniem granicznej temperatury rozruchu o 2 stopnie. Podobne skutki mogą wynikać z zastosowania akumulatora wychłodzonego w stosunku do przechowywanego w temperaturze pokojowej. Sprawny akumulator jest kluczowym elementem elektrycznego układu rozruchowego silnika spalinowego. Górski i współprac. [52] wykazali w badaniach, że największa dynamika zmian rezystancji wewnętrznej akumulatorów występuje po zmianie ich temperatury poniżej wartości zbliżonej do 5 °C. Można uznać tę wartość za graniczną, po przekroczeniu której zdolność rozruchowa akumulatora ulega wyraźnemu ograniczeniu [52].
- Właściwości paliwa. Właściwości rozruchowe silników zależą w istotny sposób od rodzaju i właściwości fizycznych zastosowanego paliwa [96]. Podstawowymi makroskopowymi cechami oleju napędowego (ON), określającymi jego przydatność do zasilania silników o ZS są: liczba cetanowa, lepkość, lotność i temperatura blokady zimnego filtra (CFPP) [95]. Od olejów napędowych wymaga się dużej wartości liczby cetanowej ($LC > 51$) [39]. Wpływ liczby cetanowej jest najistotniejszy przy minimalnej temperaturze rozruchowej, ponieważ poniżej tej temperatury silnik nie będzie działał [102]. Wzrost liczby cetanowej LC poprawia właściwości rozruchowe silników o ZS. Im mniejsza jest wartość temperatury oddestylowania 10% oleju napędowego, tym olej napędowy ma większą lotność i szybciej odparowuje [137, 139]. 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 [138]. Zasadniczy wpływ rodzaju paliwa na proces rozruchu determinuje spadek temperatury otoczenia. Badania

empiryczne [8, 9, 10, 14, 21, 29, 31, 58, 71, 78, 80, 81, 100, 121, 132] wykazały, że stosowanie paliw alternatywnych takich jak olej rzepakowy, estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (FAME) oraz ich mieszaniny z ON, powoduje zmianę właściwości rozruchowych silników o zapłonie samoczynnym (np.: zmiana temperatury granicznej rozruchu, czas rozruchu).

- Właściwości reologiczne oleju smarującego. Zadaniem oleju silnikowego jest zmniejszenie tarcia współpracujących elementów, smarowanie zespołów silnika w szerokim zakresie temperatur, chłodzenie silnika, zapobieganie korozji wewnętrznych części silnika, tłumienie drgań oraz ograniczanie zużycia części ruchomych silnika [105]. Podczas użytkowania silnika spalinowego może dochodzić do bardzo dużych zmian wartości lepkości oleju silnikowego. Przyczyną wzrostu lepkości oleju podczas eksploatacji jest jego degradacja termiczna i oksydacyjna [94], oraz dodatkowo przedostawanie się sadzy do oleju. Wraz ze spadkiem temperatury zwiększa się lepkość oleju smarującego co powoduje wzrost momentu oporów ruchu i rośnie zapotrzebowanie na energię elektryczną. Szczególnie korzystne właściwości wykazują oleje syntetyczne, których lepkość w niskiej temperaturze jest zazwyczaj niższa niż mineralnych, a w temperaturze wysokiej – odpowiednio wyższa [95].
- Metodyka realizacji rozruchu. Właściwa realizacja procesu uruchamiania silnika jest szczególnie istotna z uwagi na ograniczony zapas energii układu rozruchowego. Uwidacznia się to szczególnie podczas rozruchu w niskich temperaturach, lub i przy niskim poziomie naładowania akumulatora. Wpływ tego czynnika badali m.in. Bielaczy z zespołem [15]. Jak pokazuje praktyka eksploatacyjna czynnik ten jest często niedocenianym parametrem podczas rozruchu silnika spalinowego. Metodyka rozruchu to określone czynności, które powinien wykonać operator silnika przed przystąpieniem do próby rozruchu oraz w trakcie jego trwania. Czynności te mogą obejmować sprawdzenie stanu naładowania akumulatora, włączenie urządzeń wspomagających rozruch, wyłączenie innych odbiorników energii (np. car-audio, oświetlenie zewnętrzne, klimatyzacja itp.). Wg [134] należy wyłączyć sprzęgło (jeżeli próbie poddaje się zespół napędowy – silnik ze skrzynią biegów) i ustawić urządzenia sterujące pracą silnika w położeniu przewidzianym w instrukcji obsługi dla rozruchu w danej temperaturze otoczenia (dawka paliwa, urządzenie rozruchowe, zapłon itp.).

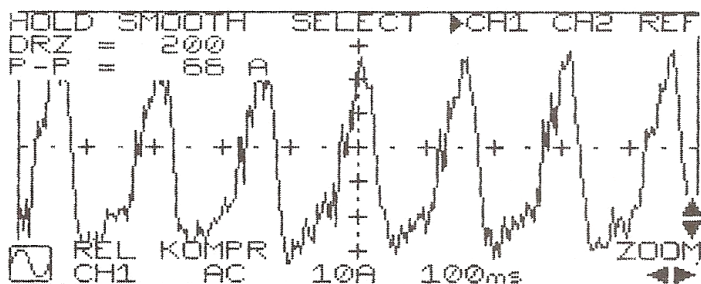
Zmiana stanu technicznego silnika spalinowego jest wynikiem zużycia powierzchniowego i objętościowego oraz uszkodzeń [27]. Ocena stanu technicznego silników spalinowych jest trudnym i bardzo złożonym procesem. Wytwarzanie pracy mechanicznej oraz reakcje chemiczne spalania paliwa w cylindrach silników są powodem występowania wielu niepożądanych zjawisk

mających wpływ na stan techniczny elementów struktury konstrukcyjnej silników, w szczególności ich przestrzeni roboczych [65]. Warunki pracy silnika spalinowego podczas eksploatacji pojazdu mają istotny wpływ na wartość zużycia jego tulei cylindrowej. Wpływają one nie tylko na wartość tego zużycia ale przede wszystkim na jego charakter [67]. Na temat procesów zużycia silnika spalinowego zachodzącego w trakcie jego uruchamiania można znaleźć wiele prac naukowych w dostępnej literaturze światowej [12, 33, 60, 78, 85, 101, 130], i krajowej [4, 27, 37, 39, 55, 57, 66, 69, 71, 72, 83, 95, 96, 108, 113, 114, 117]. Na podstawie wielu badań [7, 13, 26, 34, 54, 101, 132] ustalono, że większość uszkodzeń i zakłóceń w pracy silników związana jest z układem paliwowym i układem rozrządu czynnika roboczego. Nie mniej istotny jest również stan techniczny układu rozruchowego, którego niedomagania nasilają się szczególnie w temperaturach poniżej 0 °C.

Rozruchowi silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym towarzyszą procesy fizyko-chemiczne, które prowadzą do stopniowej degradacji stanu technicznego silnika oraz negatywnie oddziałują na środowisko. Z powodu niedostatecznego smarowania (spowodowanego przede wszystkim bezwładnością układu smarowania), dużej lepkości oleju smarującego (szczególnie w obniżonych temperaturach) oraz zbyt małej prędkości względnej przemieszczających się elementów, następuje wzrost intensywności zużywania w parach tribologicznych silnika [85, 122]. W okresie wstępnym rozruchu w podstawowych obszarach tribologicznych silnika istnieje tarcie graniczne lub mieszane hydrodynamiczne, czyli tarcie wewnętrzne w warstwie oleju smarującego, którego lepkość zwiększa się w miarę obniżania wartości temperatury [95]. Z kolei słabe rozpylenie i odparowanie w cylindrach silnika pierwszych dawek paliwa wywołuje wypadanie samozapłonów, a także niecałkowite i niezupełne spalanie bogatej w paliwo mieszanki palnej (czego efektem jest zwiększenie emisji toksycznych składników spalin do atmosfery) [128, 130].

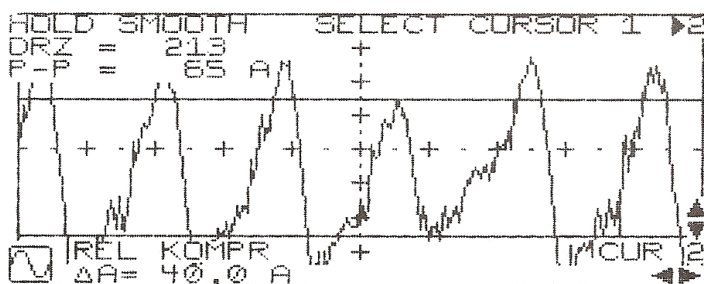
Najważniejszym elementem tłokowego silnika spalinowego, którego zużycie decyduje o jego trwałości jest szczelność pary tłok-cylinder. Zużycie tego układu, wskutek zwiększenia intensywności przepływu ładunku przez nieszczelności, powoduje straty mocy indykowanej i efektywnej silnika. Ma to odzwierciedlenie również podczas rozruchu silnika w postaci pogorszenia warunków tworzenia i zapłonu mieszaniny paliwowo-powietrznej. Tak więc, pomiar ciśnienia w cylindrze jest uważany za bardzo cenne źródło informacji podczas faz projektowania i kalibracji silnika [91]. Większość diagnostyk umożliwia sprawdzenie ciśnienia sprężania na podstawie oceny przebiegu prądu rozrusznika lub przebiegu napięcia akumulatora [54]. Podczas sprawdzania rejestruje się przy wyłączonym zapłonie prąd rozrusznika lub napięcie akumulatora [54]. Kiedy tłok przechodzi przez GMP podczas zapłonu znacznie

wzrasta pobór prądu. Dla sprawnego silnika otrzymuje się krzywą w postaci fali, dla której każdy wierzchołek odpowiada danemu cylindrowi, a wszystkie wierzchołki są na zbliżonej lub równej wysokości (rysunek 2.8).



Rys. 2.8. Prawidłowy obraz przebiegu prądu rozrusznika [54]

W przypadku usterki zarejestrowany pobór prądu będzie mniejszy na cylindrze uszkodzonym. Sytuację taką przedstawia przebieg prądu na rysunku 2.9, gdzie wzrost prądu (ΔA) jest mniejszy o ok 30%.



Rys. 2.9. Nieprawidłowy obraz przebiegu prądu rozrusznika na cylindrze nr 4 [54]

Ponadto sprawdzenie ciśnienia sprężania w komorze spalania można ocenić na podstawie sygnału prędkości obrotowej, również za pomocą diagnostyki. Jako czujnik jest wykorzystywany nadajnik położenia wału korbowego umieszczony na wale korbowym [54].

Problemy z rozruchem silnika o ZS mogą być spowodowane poprzez usterki w układzie wtryskowym silnika. Proces zużycia może być zdefiniowany jako zmiany układu wtryskowego w wyniku użytkowania i prowadzi do stopniowej utraty funkcjonalności lub trwałego uszkodzenia aparatury wtryskowej [7]. W celu określenia rodzaju usterki układu zalecany jest pomiar ciśnienia tłoczenia odpowiednią metodą w zależności od wyposażenia aparatury wtryskowej silnika.

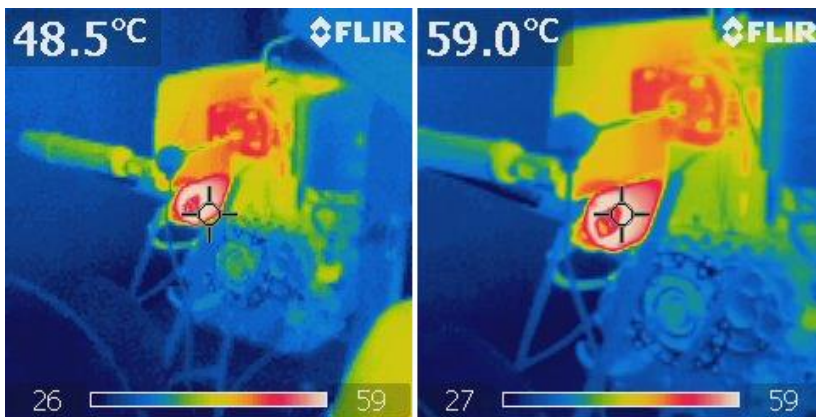
W przypadku problemów z zimnym rozruchem silnika o ZS przyczyną może być źle ustawiona tzw. dawka rozruchowa. W pompach z regulatorem mechanicznym jest zawsze ustalana i podawana przy prędkości obrotowej rozruchu. Układy regulowane elektronicznie dawkę rozruchową ustalają na podstawie pomiaru wartości temperatury cieczy chłodzącej. Tradycyjnie dawka rozruchowa sprawdzana jest na stanowisku do badania pomp wtryskowych, natomiast obecnie coraz częściej wykorzystywane w tym celu są dymomierze adsorpcyjne.

Dobry stan techniczny układu świec żarowych eliminuje występowanie problemów z zimnym rozruchem silnika. Do sprawdzenia świec żarowych wymontowuje je się z silnika i sprawdza za pomocą omomierza. Aby przyspieszyć proces diagnostyczny wykorzystuje się pomiar prądu żarzenia za pomocą szczypiec prądowych. Szczypce przykładają się wokół przewodu zasilającego świecę i włącza zapłon [54]. W przypadku sprawnego układu świec żarowych dla silnika czterocyndrowego po ok. 10 sekundach natężenie prądu powinno się ustalić na 40 do 48 A [54], w układach połączonych równolegle. W przypadku uszkodzenia świec, wartość prądu wyniesie od 20 do 24 A. Niesprawności w układzie świec żarowych mogą wystąpić w wyniku usterek elektrycznego zasilania układu świec żarowych (np. bezpiecznik, przekaźnik świec żarowych). W nowszych konstrukcjach, każda ze świec zasilana jest oddzielnym przewodem biegnącym ze sterownika, co pozwala na indywidualną kontrolę działania poszczególnych świec. Również indywidualne podłączenie stosowane jest w układach najnowszej generacji, które realizują podgrzewanie rozruchowe i dogrzewanie po rozruchu świecami zasilanymi prądem o sterowanym przebiegu prostokątnym i napięciu skutecznym 7 V (także świecami wyposażonymi w czujniki spalania stukowego).

Jak już wspomniano rozruch współczesnych tłokowych silników spalinowych odbywa się za pomocą rozrusznika elektrycznego. Rozruszniki samochodowe składają się z silnika elektrycznego, mechanizmu sprzęgającego i zębniaka [45]. Trwałość rozrusznika samochodowego powinna być nie mniejsza niż 10000 cykli włączeń rozruchowych dla badań laboratoryjnych i przebiegu pojazdu samochodowego wynoszącego 100 000 km w warunkach jego eksploatacji. Ciężkie warunki pracy rozrusznika w temperaturze otoczenia w zakresie $-40 \div 150$ °C, wpływają na zmianę jego stanu technicznego. Na rysunku 2.10, przedstawiono obraz z kamery termowizyjnej FLIR InfraCAM SD pokazujący rozkład wartości temperatury pracy rozrusznika podczas badań procesu rozruchu jednocylindrowego silnika spalinowego o ZS. Jak widać na rysunku 2.10, wartość temperatury obudowy rozrusznika podczas próby rozruchu zawierała się w zakresie od 48,5 °C do 59 °C.

Podczas eksploatacji rozrusznika następuje stopniowe zużywanie się jego elementów i podzespołów, bądź zużycie przyspieszone w wyniku

nieprawidłowego użytkowania i obsługi lub pracy rozrusznika w ciężkich warunkach, np. częsty rozruch silnika w okresie zimowym, rozruch silnika z niedomaganiem układu zasilania lub układu zapłonowego [93]. W konsekwencji utraty zdolności przez rozrusznik silnik spalinowy nie może podjąć pracy. W zależności od charakteru uszkodzenia rozrusznika wyróżnić można uszkodzenia mechaniczne i elektryczne [45, 93]. Uszkodzenia mechaniczne uniemożliwiają poprawną pracę urządzenia, np.: nadmierne zużycie szczotek, zużycie łożysk ślizgowych i czopów wałka twornika, zmiany komutatora. W przypadku uszkodzeń elektrycznych, ograniczają bądź uniemożliwiają pracę rozrusznika np.: w wyniku przeciążenia rozrusznika, uszkodzenia izolacji.



Rys. 2.10. Przykładowe rozkłady wartości temperatury rozrusznika przy wybranej próbie rozruchu jednocylinowego silnika spalinowego o ZS [25]

Elementy składowe rozrusznika w wyniku eksploatacji zużywają się w wyniku tarcia, erozji oraz procesów korozyjnych. Badania stanu technicznego rozrusznika można przeprowadzić przy zastosowaniu następujących metod:

- bezpośrednio na pojeździe, podczas próby rozruchu,
- po demontażu rozrusznika z pojazdu i sprawdzeniu go na stanowisku laboratoryjnym [93].

Pierwsza metoda pozwala na weryfikację charakteru uszkodzenia rozrusznika. Polega ona na eliminacji z obwodu części elementów działających do momentu zlokalizowania niesprawności obwodu. Druga z metod jest warsztatowym przeglądem rozrusznika dla sklasyfikowania jego zużycia lub znalezienia uszkodzonej części [93]. Badania stanu technicznego układu rozruchowego najczęściej obejmują: oględziny zewnętrzne, sprawdzenie poprawności działania rozrusznika i ciągłości obwodu rozruchowego, pomiar napięcia zasilającego rozrusznik i spadków napięć [93].

Właściwe funkcjonowanie rozrusznika determinuje przede wszystkim pojemność i stan naładowania akumulatora rozruchowego. Ponadto istotne znaczenie mają stan złącz elektrycznych czy rezystancja przewodów, ponieważ w przypadku niesprawności jednego z elementów układu cały obwód staje się niesprawny. Bardziej szczegółową analizę metod diagnostycznych układu rozruchowego przedstawiono w następujących pracach naukowych [11, 44, 45, 93].

Przytoczone metody elektrycznej kontroli, dzięki szybkiemu dostarczeniu wyników wypierają metody klasyczne. Równie pomocne są tutaj informacje uzyskane z systemów diagnostyki pokładowej pojazdu (EOBD). Wśród producentów warsztatowego sprzętu pomiarowego można wyróżnić przede wszystkim firmę AVL oraz Bosch. Jak wykazano powyżej stan techniczny silnika, układu wtryskowego oraz układu rozruchowego ma szczególnie istotne znaczenie podczas rozruchu tłokowego silnika spalinowego.

Obecny szybki rozwój motoryzacji oraz wyczerpywanie się zasobów naturalnych powoduje stałe poszukiwanie nowych paliw stosowanych do zasilania tłokowych silników spalinowych. Badania prowadzone są nad zastosowaniem biopaliw wytwarzanych z różnych roślin, tłuszczu pochodzenia zwierzęcego, alkoholi i eterów. W odniesieniu do silników o ZS poszukiwania te prowadzone są w trzech głównych kierunkach [76]:

- poszukuje się paliw nie pochodzących z ropy naftowej,
- poszukuje się dodatków do oleju napędowego, które można stosować w mieszaninach z olejem napędowym,
- modyfikuje się skład chemiczny i własności fizykochemiczne oleju napędowego na etapie jego produkcji.

Biopaliwa są całkowicie biodegradowalne a ich spalanie generuje mniejszą emisję tlenku węgla (CO), węglowodorów (HC) i cząstek stałych. Niestety jak zauważa wielu badaczy podczas spalania biodiesla wzrasta emisja tlenków azotu (NO_x) [9, 14, 50, 100, 117, 121]. Prowadzone badania dotyczą również oceny wpływu dodatków estrów metylowych i etylowych kwasów tłuszczowych olei roślinnych do olei napędowych na emisję szkodliwych składników spalin podczas zimnego rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym [21, 100, 101, 107, 130]. Biodiesel ma jeszcze jedną ważną cechę wpływającą na rozruch silnika spalinowego, jest nią ograniczona możliwość zastosowania w niskich temperaturach. W odniesieniu do stabilności mieszanki i problemu zimnego rozruchu, Lapuerta z zespołem [74] konkluduje, że mieszanki paliwowe do 10% etanolu w oleju napędowym mogą być stosowane w temperaturach otoczenia do -5 °C. Randazzo i Sodre [100] nie stwierdzili trudności związanych z zimnym rozruchem w silnikach zasilanych 20% biodieslem oleju sojowego w oleju napędowym w temperaturach otoczenia do -5 °C. Zwiększenie stężenia biodiesla soi w oleju napędowym z 3% do 10% nie wpływa na zimny rozruch silnika, ale wykorzystanie 20% biodiesla sojowego w oleju napędowym powoduje dłuższy

czas zimnego rozruchu [100]. Podobnie wzrost stężenia etanolu w mieszance paliwowej B20 powoduje zwiększony czas zimnego rozruchu [100]. Cieślowski zwraca uwagę, że okresowość wykorzystania np. pojazdów rolniczych zasilanych estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (RME) przy podwyższonej zawartości wolnej gliceryny może stwarzać problemy eksploatacyjne związane z tendencją gliceryny do wytrącania osadów [29]. Wysoki poziom całkowitej zawartości gliceryny może prowadzić do zanieczyszczenia końcówek wtryskiwaczy i tworzenia osadów w komorach spalania silników [48], co również może wpływać na pogorszenie właściwości rozruchowych silnika zasilanego tego typu paliwami oraz zwiększyć emisję związków toksycznych do atmosfery.

W pracach naukowych [10, 15, 16, 19, 41, 73, 89] stwierdzono, że w pierwszej fazie rozruchu zimnego silnika emisja tlenu węgla, węglowodorów i cząstek stałych jest większa niż w przypadku rozruchu silnika ciepłego. Oprócz zwiększonej emisji szkodliwych składników spalin podczas zimnego rozruchu mogą pojawić się inne negatywne symptomy np. związane z większymi drganiami, hałasem i bardziej nierównomierną pracą silnika [36, 41, 121]. Wynikać może to z tego, że podczas zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej w komorze spalania panują niesprzyjające warunki powodujące gorsze rozpylenie i odparowanie wtryskiwanych kropeł paliwa. Na okres opóźnienia samozapłonu wpływa wiele czynników między innymi: wartość temperatury czynnika roboczego, właściwości fizykochemiczne paliwa, przebieg procesu wtrysku i procesu napełniania cylindra powietrzem oraz wiele innych [8]. W silniku o zapłonie samoczynnym w trakcie normalnej pracy zachodzi pełniejsze spalanie niż podczas zimnego uruchamianego silnika.

Właściwości paliwa wtryskiwanego do cylindra wywierają istotny wpływ na czas trwania i niezawodność rozruchu oraz osiągnięcie przez silnik równowagi termicznej [8]. Okres zwłoki samozapłonu zależy także od temperatury czynnika roboczego w cylindrze i zwiększa się ze spadkiem jego wartości temperatury. Według literatury [82, 96] chemiczny okres opóźnienia zapłonu przy niższej temperaturze czynnika roboczego wydłuża się, ponieważ szybkość reakcji chemicznych maleje znacznie szybciej niż szybkość przemian fizycznych zachodzących w tym okresie. Dla wysokich wartości temperatur w komorze spalania występuje duża szybkość reakcji chemicznych, stąd opóźnienie samozapłonu zależy od procesów fizycznych. Są to między innymi szybkość wtryskiwania i parowania paliwa oraz jakość mieszania się par paliwa z powietrzem.

Rozruch zimnego silnika i emisja szkodliwych składników spalin zależą od właściwości fizyko-chemicznych paliw, takich jak: liczby cetanowej, wartości temperatury destylacji określonej ilości paliwa, lepkości, gęstości, napięcia powierzchniowego, temperatury blokowania zimnego filtra i temperatury

krzepnięcia [8]. Od paliw stosowanych do zasilania silników o zapłonie samoczynnym wymaga się aby charakteryzowały się dobrą zdolnością do parowania. Paliwa charakteryzujące się niższą temperaturą destylacji frakcji paliwa i posiadające wyższą liczbę cetanową umożliwiają łatwiejszy rozruch silnika, również przy niskiej temperaturze otoczenia.

W przypadku rozruchu zimnego silnika w spalinach znajduje się więcej niespalonych węglowodorów, oparów paliwa oraz produktów niezupełnego spalania [16]. Jednym z ciekawych rozwiązań zmniejszających stężenie toksycznych składników spalin podczas zimnego rozruchu jest na przykład krótki rozruch silnika bez doprowadzania paliwa, powodujący nagrzanie komory spalania procesem sprężania, przez co uzyskuje się zmniejszenie stężenia tlenu węgla, węglowodorów i cząstek stałych [73]. Podczas zimnego rozruchu silnika wyposażonego w układ recyrkulacji spalin (EGR), część z nich powraca do cylindra i może powodować skrócenie okresu opóźnienia samozapłonu [92].

Sprostanie rygorystycznym wymaganiom odnośnie czystości spalin tłokowych silników spalinowych jest możliwe między innymi dzięki stosowaniu biopaliw ograniczających negatywny wpływ silników na środowisko naturalne oraz technicznych układów redukcji toksycznych składników spalin. Większość emisji węglowodorów i tlenu węgla z silników o ZS z bezpośrednim wtryskiem paliwa występuje podczas okresu rozgrzewania silnika i jest spowodowane głównie trudnościami w uzyskaniu stabilnego i skutecznego spalania w tych warunkach [19, 64]. Katalizator w okresie rozruchu jest nieefektywny ze względu na jeszcze zbyt niską temperaturę silnika. Katalizator zaczyna działać wraz z upływem czasu pracy silnika i wzrostem jego wartości temperatury [104]. Po uruchomieniu zimnego silnika monitorowanie efektywności katalizatora zaczyna się po upływie około 330 sekund i trwa przez około 900 sekund [103].

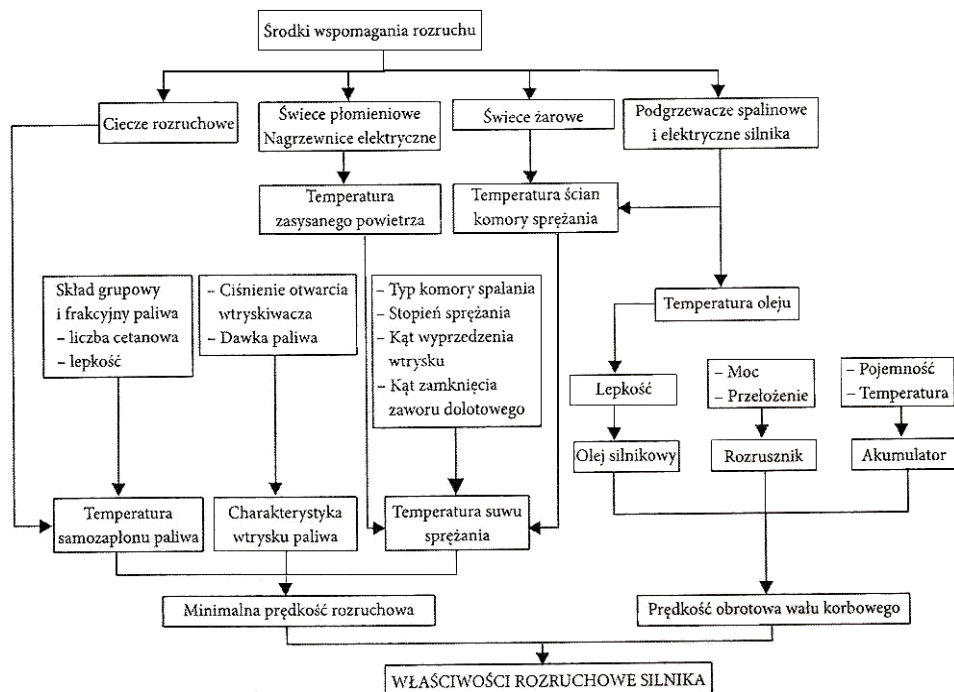
Obecnie układy wydechowe silników o zapłonie samoczynnym wyposażone są w elementy służące do eliminacji cząstek stałych PM (ang. *Particulate Matter*). Jednym z takich elementów jest filtr cząstek stałych DPF (ang. *Diesel Particulate Filter*), który służy do usuwania cząstek sadzy i popiołu ze spalin [51, 59]. Sadza to zanieczyszczenie powstające w wyniku niecałkowitego spalania. Podczas eksploatacji silnika z filtrem DPF konieczne jest okresowe dopalanie sadzy w filtrze poprzez wtryskiwanie dodatkowej dawki paliwa do komory spalania. Efektem ubocznym tego procesu jest to, że część paliwa skrapla się ze ścianek tulei cylindrowej do miski olejowej [129]. Rozcieńczenie oleju silnikowego jest jednym z poważnych problemów występujących w silnikach o ZS. W niskiej temperaturze otoczenia, rozcieńczenie paliwa w oleju silnikowym może generować wosk, co prowadzi do niskiego ciśnienia oleju i powoduje problemy podczas uruchamiania [110]. Filtry DPF są powszechnie montowane w silnikach pojazdów samochodowych od 1996 roku.

Innym rozwiązaniem są reaktory katalityczne DOC (ang. *Diesel Oxidation Catalysts*), które utleniają niespalone węglowodory oraz CO. Reaktory utleniające usuwają również część organicznej frakcji rozpuszczalnej SOF (ang. *Soluble Organic Fraction*), która jest składnikiem cząstek stałych PM [49]. W celu dalszego obniżenia emisji cząstek stałych wykorzystuje się filtry cząstek stałych o stałej regeneracji CRT (ang. *Continous Regeneration Traps*). W przypadku dużych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym stosuje się układy selektywnego oczyszczania spalin SCR (ang. *Selective Catalytic Reduction NOx*). Reaktory SCR niestety działają w wąskim przedziale temperaturowym, co nieco obniża ich skuteczność [49].

Na końcu należy stwierdzić, że rodzaj paliwa zasilającego silniki o zapłonie samoczynnym ma zasadniczy wpływ na jego zdolności rozruchowe. Podczas zimnego rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym występuje znacznie większa ilość szkodliwych składników spalin w porównaniu z tymi ilościami dla silnika uruchamianego po jego nagraniu i pracującego w ustalonym stanie temperaturowym.

Mechanizmy oddziaływania różnych czynników na właściwości rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym są złożone i mogą zależeć od kilku czynników jednocześnie. Ponadto aby ułatwić przebieg procesu rozruchu mogą zostać włączone środki wspomaganie rozruchu.

Podsumowując mechanizmy oddziaływania różnych czynników na właściwości rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym można przedstawić w postaci schematu na rysunku 2.11. Dokonano przy tym podziału wg minimalnej prędkości rozruchowej i wymuszonej przez układ rozruchowy.



Rys. 2.11. Wpływ różnych czynników na właściwości rozruchowe silnika o ZS [95]

Nie wszystkie z umieszczonych na rysunku 2.11 czynników występują jednocześnie i nie wszystkie zostały omówione w niniejszej pracy natomiast mogą one wpływać na właściwości rozruchowe silnika o ZS dlatego uznano, że warto jest o nich wspomnieć i przedstawić je na wykresie.

2.5. Podsumowanie

Rozruch silnika spalinowego rozpoczyna się z chwilą zwarcia obwodu elektrycznego układu rozruchowego. Wtedy to za pomocą mechanizmu sprzęgającego zębniaka rozrusznika dochodzi do współpracy zębów wieńca koła zamachowego, co skutkuje wprawieniem w ruch wału korbowego silnika. Związane jest to z pokonaniem oporów ruchu elementów ruchomych silnika spalinowego a symptomem tego jest uzyskanie maksymalnej wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik na początku procesu rozruchu. Z przedstawionego studium procesu rozruchu silnika o ZS wynika, że proces ten może przebiegać wieloetapowo a na jego właściwości rozruchowe wpływają czynniki konstrukcyjne, regulacyjne oraz eksploatacyjne. Ponadto na przebieg

i parametry rozruchu zasadniczy wpływ ma układ zasilania w paliwo, od którego zależy tworzenie mieszaniny paliwowo-powietrznej i jej spalanie.

Pomimo licznych publikacji dotyczących procesu rozruchu wpływ parametrów wtrysku paliwa na przebieg procesu rozruchu w zależności od istniejących warunków otoczenia nie został dotychczas dostatecznie zbadany. W związku z powyższym, w niniejszej monografii podjęto się oceny wpływu czynników regulacyjnych jednocylindrowego silnika spalinowego o ZS (kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza i dawka paliwa), na wybrane parametry jego rozruchu.

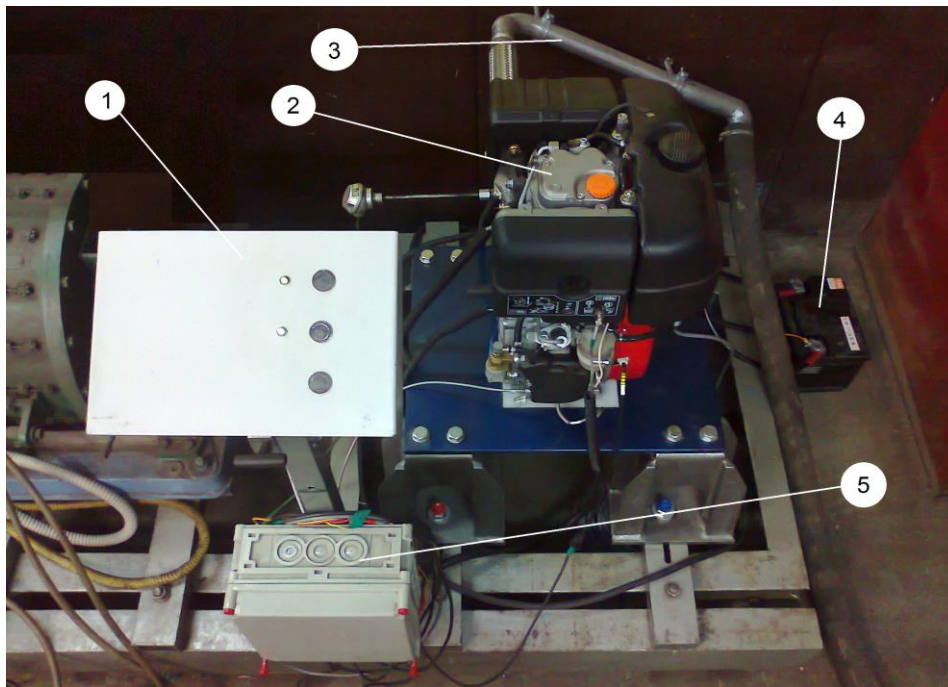
Znajomość odpowiednich wartości parametrów regulacyjnych umożliwia takie znalezienie ustawień układu zasilania, aby proces rozruchu przebiegał w sposób niezakłócony i przy minimalnych obciążeniach układu rozruchowego silnika spalinowego w danych warunkach.

W monografii przedstawiono metodykę badań stanowiskowych procesu rozruchu jednocylindrowego silnika spalinowego o ZS w temperaturze otoczenia. Następnie analizę uzyskanych wyników badań, wpływu określonych nastaw układu zasilania w paliwo na wybrane parametry rozruchu silnika o ZS. Analizy statystycznej dokonano w oparciu o nieparametryczną jednoczynnikową analizę wariancji oraz analizę regresji liniowej prób rozruchowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz wyników sformułowano wnioski końcowe i przedstawiono dalsze kierunki badań procesu rozruchu silników spalinowych.

3. WPLYW PARAMETRÓW ZASILANIA W PALIWO NA PRZEBIEG PROCESU ROZRUCHU JEDNOCYLINDROWEGO SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM W TEMPERATURZE OTOCZENIA

3.1. Metodyka badań

Badania parametrów procesu rozruchu jednocylindrowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym przeprowadzono w warunkach temperatury otoczenia silnika na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 3.1. Badania były prowadzone przy ustalonych parametrach wtrysku paliwa (kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa, ciśnienie wtrysku paliwa oraz dawka paliwa), bez użycia urządzeń wspomagających rozruch. Dla każdej serii badawczej wykonano po 60 pojedynczych prób rozruchowych silnika.



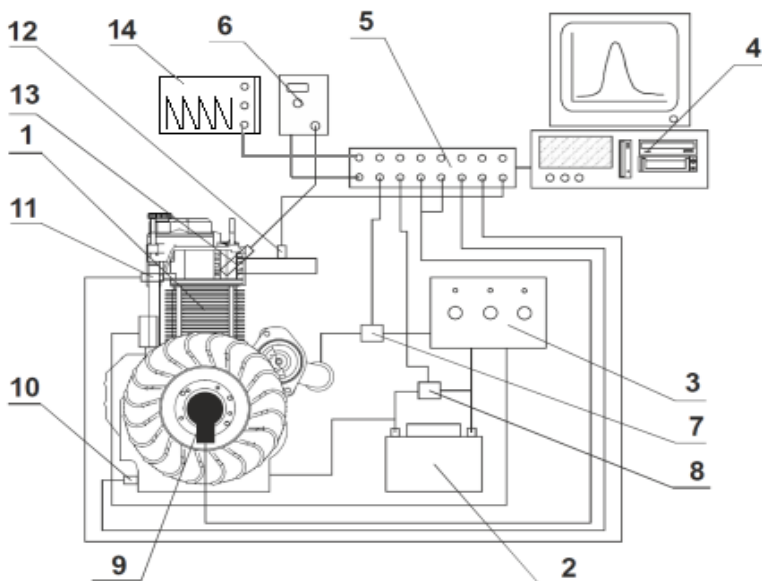
Rys. 3.1. Stanowisko jednocylindrowego silnika spalinowego o ZS do badań procesu rozruchu, 1 – pulpit sterowniczy, 2 – jednocylindrowy silnik spalinowy, 3 – układ odprowadzenia spalin, 4 – akumulator rozruchowy, 5 – skrzynka przyłączeniowa dla wyjściowych sygnałów pomiarowych [23]

Głównym elementem stanowiska badawczego był jednocyldrowy silnik spalinowy Ruggerini Diesel RY125. Silnik badawczy wyposażony był w mechaniczny układ wtryskowy z jednosekcyjną pompą wtryskową, regulator odśrodkowy prędkości obrotowej i wtryskiwacz mechaniczny. Podstawowe parametry techniczne silnika spalinowego zestawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Podstawowe parametry jednocyldrowego silnika Ruggerini serii RY 125 [123]

Parametr	Jednostka	Objaśnienie
Cykl roboczy		DIESEL czterosurowy
Wtrysk		Bezpośredni
Chłodzenie		Powietrzne wymuszone z wentylatora koła zamachowego
Podawanie paliwa		Grawitacyjne
Smarowanie		Wymuszone pompą krzywkową
Regulator		Odśrodkowy z ciężarami wirującymi
Srednica tłoka	mm	87
Skok tłoka	mm	85
Pojemność skokowa	cm ³	505
Pojemność miski olejowej	dm ³	1,5
Prędkość obrotowa	obr/min	3600
Stopień sprężania		20:1
Max moment obrotowy	Nm obr/min	31/2000
Moc silnika	kW (KM) obr/min	8,8 (12,0) przy 3600
Pojemność zbiornika paliwa	dm ³	5,0
Masa suchego silnika	kg	48

Stanowisko badawcze jednocyldrowego silnika spalinowego przedstawione na rysunku 3.1, wyposażono w aparaturę do pomiaru charakterystycznych parametrów procesu rozruchu silnika o ZS. Schemat stanowiska z aparaturą przedstawiono na rysunku 3.2. Do pomiaru wartości temperatury cylindra, temperatury oleju i temperatury otoczenia zastosowano czujniki TP-371 i TP-372 z rezystorem platynowym Pt100 oraz z przetwornikiem pomiarowym TCD-3125. Natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik mierzone było za pomocą czujnika LEM, HTA-1000, zamocowanego na przewodzie zasilającym rozrusznik. Do pomiaru napięcia na zaciskach akumulatora wykorzystano specjalnie wykonany układ pomiarowy oparty na dwóch rezystorach 100 Ω połączonych w układzie szeregowym. Tor pomiarowy ciśnienia w komorze spalania stanowił wzmacniacz AVL Graz Austria, Type 3057V01 z podłączonym piezoelektrycznym czujnikiem ciśnienia indykowanego Kistler Type 601 A SN 104015 [23]. Przedział czasowy podczas prób rozruchowych określany był poprzez użycie generatora napięć wzorcowych piłokształtnych. Wszystkie sygnały pomiarowe rejestrowano za pomocą karty pomiarowej DAQPad-6070E firmy National Instruments.



Rys. 3.2. Stanowisko jednocylindrowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, 1 – silnik badawczy, 2 – akumulator, 3 – pulpit sterowniczy, 4 – komputer pomiarowy, 5 – karta pomiarowa, 6 – wzmacniacz sygnału, 7 – układ pomiarowy prądu rozruchu, 8 – układ pomiarowy napięcia, 9 – enkoder kąta obrotu wału korbowego, 10 – czujnik temperatury oleju, 11 – czujnik temperatury cylindra, 12 – czujnik temperatury powietrza zasysanego, 13 – czujnik ciśnienia w cylindrze, 14 – generator napięć wzorcowych piłokształtnych [23]

Stanowiskowe próby rozruchowe silnika spalinowego były poprzedzone badaniem stanu naładowania akumulatora rozruchowego za pomocą testera akumulatora AR020014 R150 firmy Jonnesway, przedstawionego na rysunku 3.3. Wszystkie próby badawcze rozruchu silnika zostały zrealizowane przy stanie naładowania akumulatora rozruchowego wynoszącym minimum 75% dla badania akumulatora bez obciążenia.

Ponadto w badaniach stanowiskowych wykorzystano następujące urządzenia:

- lampa stroboskopowa do ustawiania kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa BOSCH ETD019.02 FD268 produkcji AVL, Austria,
- próbnik wtryskiwaczy PRW-3.



Rys. 3.3. Zdjęcie testera akumulatora AR020014 R150 firmy Jonnesway [23]

Podstawowym wymogiem procedury badań było zapewnienie równowagi termicznej między badanym silnikiem a jego otoczeniem [133, 134, 136]. Z tego powodu próby badawcze zimnego rozruchu silnika następowały przy pierwszym dziennym rozruchu i po ustalonym czasie od unieruchomienia silnika wynoszącym 4 godziny. Był to odstęp czasu, w którym silnik osiągał stabilny stan temperaturowy od poprzedniego rozruchu, czyli stan, w którym wszystkie części silnika i płyny eksploatacyjne (olej silnikowy), miały taką samą temperaturę.

Próby rozruchowe przeprowadzono w temperaturze otoczenia w zakresie 21 ± 3 °C, przy następujących ustalonych parametrach regulacyjnych silnika spalinowego:

- statyczny kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa wyrażony w °OWK,
- dawka paliwa – fabryczna (1) dla biegu jałowego lub zwiększona (2),
- ciśnienie otwarcia wtryskiwacza – 21 MPa lub 26 MPa.

Wartości kątów wyprzedzenia wtrysku ustalano w oparciu o zalecany przez producenta silnika zakres kątów, który zawierał się w przedziale od 16,6 – 19,6 °OWK. W badaniach wybrano cztery wartości kątów: 16,6, 17,6, 18,6 oraz 19,6 °OWK. Fabryczne ustawienie tego silnika dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa wynosi 17,6 °OWK.

Dawkę paliwa determinowało położenie dźwigni sterującej dawką paliwa na pompie wtryskowej. Wybrano dwie dawki paliwa. Pierwsza – 1 to nominalna dawka paliwa odpowiadająca pracy silnika na biegu jałowym określona przez producenta silnika. Wartość tą wybrano ze względu na to, że jest jednym z najczęściej występujących ustawień przy uruchamianiu silnika. Druga wartość dawki paliwa została określona jako zwiększona – 2 i została wyznaczona

poprzez stałe przesunięcie dźwigni sterującej dawką paliwa na pompie wtryskowej do połowy zakresu regulacji na pompie czyli o 50% [23]. Jest to najczęściej zalecane ustawienie występując podczas rozruchu silnika.

Wybrano dwie wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza paliwa, pierwsza z nich to wartość nominalna podana przez producenta silnika wynosząca 21 MPa, druga natomiast została zwiększona i wynosiła 26 MPa.

Określenie ciśnienia otwarcia wtryskiwacza zostało przeprowadzone zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie BN-84/1301-08 [135], na stanowisku do badania wtryskiwaczy PRW-3.

Podczas próby rozruchu rejestrowano następujące parametry:

- napięcie na zaciskach akumulatora,
- wartość prądu,
- kąt położenia wału korbowego wyrażony w °OWK,
- wartość ciśnienia w komorze spalania,

Na podstawie w/w parametrów określono następujące parametry rozruchu:

- napięcie maksymalne na zaciskach akumulatora przed próbą rozruchu,
- napięcie minimalne na zaciskach akumulatora podczas próby rozruchu,
- napięcie końcowe na zaciskach akumulatora po próbie rozruchu,
- maksymalne natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik na początku próby rozruchu,
- chwilowa prędkość obrotowa wału korbowego silnika.
- czas pracy rozrusznika,
- czas rozruchu wyrażony względem prędkości obrotowej silnika i względem ciśnienia w komorze spalania.

Schematyczny opis wymienionych parametrów rejestrowanych podczas próby badawczej zobrazowano na wykresie na rysunku 2.2.

3.2. Statystyczna analiza wyników badań procesu rozruchu jednocyndrowego silnika o zapłonie samoczynnym

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizy statystyczne wybranych parametrów procesu rozruchu jednocyndrowego silnika o zapłonie samoczynnym zrealizowanych w temperaturze otoczenia podczas badań stanowiskowych. Są to wartości z pomiarów parametrów elektrycznych układu rozruchowego silnika oraz wartości ciśnień uzyskiwanych w komorze spalania w relacji do wybranych parametrów wtrysku paliwa (kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza oraz dawka paliwa).

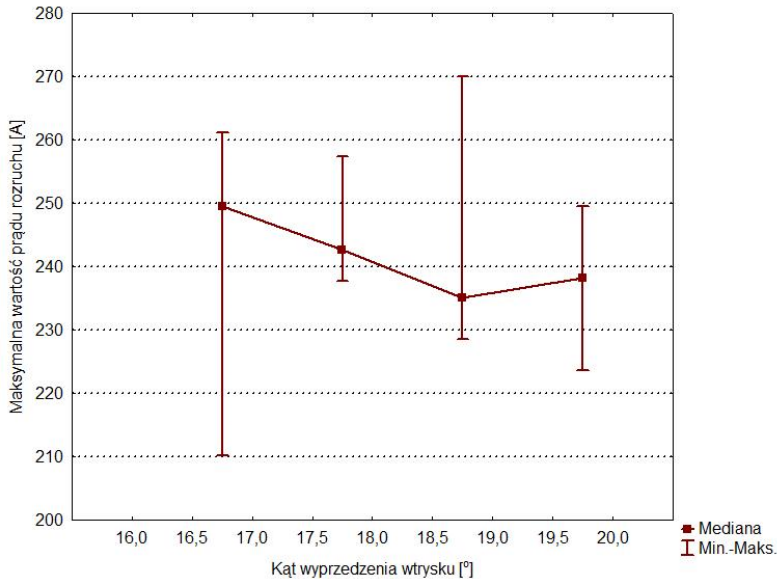
Badania procesu rozruchu silnika przeprowadzono w sposób pośredni poprzez rejestrację parametrów pracy układu rozruchowego (rozrusznika) oraz

zmiany napięć na kwasowo-ołowiowym akumulatorze rozruchowym. Wzrost mocy (prądu) pobieranego przez rozrusznik świadczy o większych oporach ruchu związanych z wtryskiem paliwa i sprężaniem ładunku w silniku. Istotna jest też praca wykonana przez rozrusznik, która związana jest bezpośrednio z czasem trwania rozruchu (tożsamym z czasem pracy rozrusznika – t_s). Ponadto przeanalizowano zależności ciśnień uzyskiwanych w komorze spalania silnika w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa.

Przebadano zależność parametrów pracy rozrusznika i akumulatora rozruchowego (maksymalny prąd rozruchu – I_{\max} , różnica napięć na akumulatorze rozruchowym, spadek napięcia na akumulatorze rozruchowym, moc średnia pobierana przez rozrusznik, czas pracy rozrusznika – t_s , praca rozrusznika) zwanych dalej parametrami rozruchu przy ustalonych ustawieniach wtryskiwacza (dawka paliwa na cykl oraz ciśnienie otwarcia wtryskiwacza) w funkcji parametrów kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa.

3.2.1. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na maksymalny prąd rozruchu

W tym rozdziale przebadano wpływ zmiany nastaw wtrysku paliwa na wartość maksymalnego prądu rozruchu. Na rysunkach 4.5÷4.8, zaprezentowano zależności pomiędzy zarejestrowaną maksymalną wartością prądu rozruchu – I_{\max} , a kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa przy różnych wartościach dawki paliwa i ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. Maksymalny prąd rozruchu – I_{\max} jest parametrem obrazującym pokonanie tarcia statycznego poprzez elementy ruchome silnika spalinowego o ZS napędzanego przez rozrusznik, czyli jest to miara oporu bezpośredniego rozruchu. Dla każdej z uzyskanych zależności wykonano porównanie wpływu kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa na uzyskiwaną wartość maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} . Do porównania wykorzystano test nieparametryczny Kruskala–Wallisa. W tabeli 3.2, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach z nominalną dawką paliwa: N i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. W pierwszej kolumnie podano wartość kąta wyprzedzenia wtrysku. W drugiej liczbę uzyskanych wyników (liczbę uzyskanych wartości prądów rozruchu). W trzeciej sumę rang. Podano też wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 17,9066$ oraz poziom prawdopodobieństwa testowego $p = 0,0005$. Uzyskane wyniki wskazują na odrzucenie hipotezy zerowej o równości wszystkich median, co oznacza, że wyniki pomiarów wartości prądu rozruchu – I_{\max} , przedstawione na rysunku 3.4, dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa różnią się istotnie statystycznie od siebie.



Rys. 3.4. Uzyskana empiryczna zależność maksymalnego prądu rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.2. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku przy rozruchach z dawką: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji prądów rozruchu [-]	Suma rang
16,6	63	7805,000
17,6	62	9677,500
18,6	62	6426,000
19,6	62	7216,500
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 249$) = 17,9066	
	$p = 0,0005$	

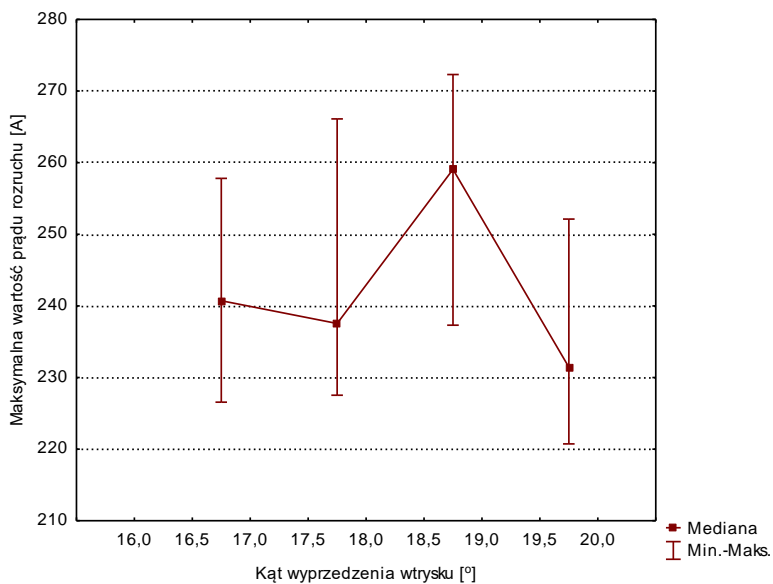
W celu sprawdzenia, które z median opisujących rozkłady wartości prądów rozruchu – I_{\max} różnią się między sobą wykorzystano procedurę wzajemnego porównania średnich rang. Wyniki wymienionego porównania przedstawiono w tabeli 3.3. W dalszych rozważaniach, ustalono poziom istotności $p < 0,05$ dla wyników opisujących wzajemnie istotnie różniące się mediany wartości maksymalnych prądów rozruchu – I_{\max} .

Tabela 3.3. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala-Wallis: H (stopnie swobody = 3, $N = 249$) = 17,9066, $p = 0,0005$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0747	0,6969	1,0000
17,6	0,0747	–	0,0003	0,0129
18,6	0,6969	0,0003	–	1,0000
19,6	1,0000	0,0129	1,0000	–

Podobne analizy wykonano dla pozostałych zależności pomiędzy maksymalną wartością prądów rozruchu w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa i zmiennych dawki paliwa oraz ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. Wyniki prawdopodobieństwa oraz porównanie testu Kruskala-Wallisa przedstawiono w tabelach 3.4÷3.9. Analizując zestawione w tych tabelach dane można stwierdzić, że wskazują one na występowanie istotnych statystycznie różnic dla wartości prądu rozruchu – I_{\max} , w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa bez względu na wartości dawki paliwa i ciśnienia otwarcia wtryskiwacza.

Na rysunku 3.5, przedstawiono wykres zależności maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa – 2 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza wynoszącym 21 MPa.



Rys. 3.5. Uzyskana empiryczna zależność maksymalnego prądu rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Z przedstawionych danych widać, że największe wartości maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} uzyskano przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa wynoszącym 18,6 °OWK.

W tabeli 3.4, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości prądów rozruchu – I_{\max} przedstawiono w tabeli 3.5.

Tabela 3.4. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach z dawką: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

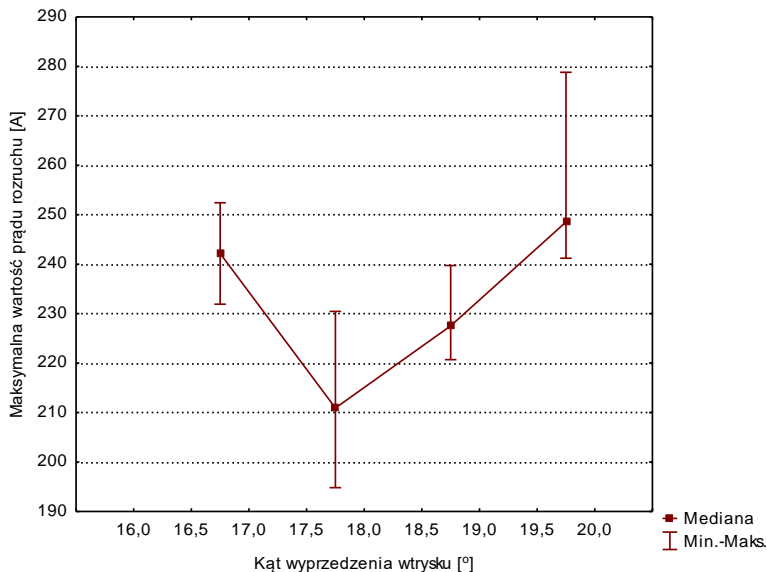
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji prądów rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	7784,00
17,6	62	7174,50
18,6	65	13395,00
19,6	62	3272,50
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 251$) = 143,4060 $p = 0,0001$	

Tabela 3.5. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 251$) = 143,4060, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	1,0000	0,0001	0,0001
17,6	1,0000	–	0,0001	0,0008
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0001
19,6	0,0001	0,0008	0,0001	–

Na rysunku 3.6., przedstawiono wykres zależności maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Z przedstawionych danych widać, że największe wartości maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} uzyskano przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa wynoszącym 19,6 °OWK.

W tabeli 3.6, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy parametrach jak dla rysunku 3.6. W tabeli 3.7, przedstawiono wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości prądów rozruchu – I_{\max} dla porównywanych parametrów.



Rys. 3.6. Uzyskana empiryczna zależność maksymalnego prądu rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.6. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach z dawką: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

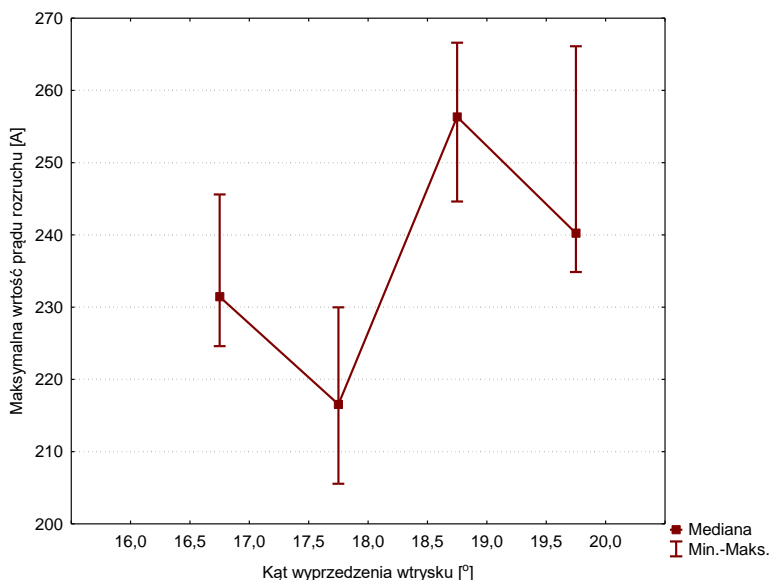
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji prądów rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	10115,00
17,6	61	1938,00
18,6	61	5598,50
19,6	61	12483,50
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 245$) = 213,8401	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.7. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 245$) = 213,8001, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0001	0,0001	0,0069
17,6	0,0001	–	0,0018	0,0001
18,6	0,0001	0,0018	–	0,0001
19,6	0,0069	0,0001	0,0001	–

Na rysunku 3.7, przedstawiono wykres zależności maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce

paliwa: 2 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Z przedstawionych danych widać, że największe wartości maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} uzyskano przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa wynoszącym 18,6 °OWK.



Rys. 3.7. Uzyskana empiryczna zależność maksymalnego prądu rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

W tabeli 3.8, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości prądów rozruchu – I_{\max} dla powyższych parametrów przedstawiono w tabeli 3.9.

Tabela 3.8. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach z dawką: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji prądów rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	5945,50
17,6	60	1892,50
18,6	61	12972,50
19,6	61	9079,50
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 244$) = 216,5449	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.9. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala-Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 244$) = 216,5449, $p = 0,0001$

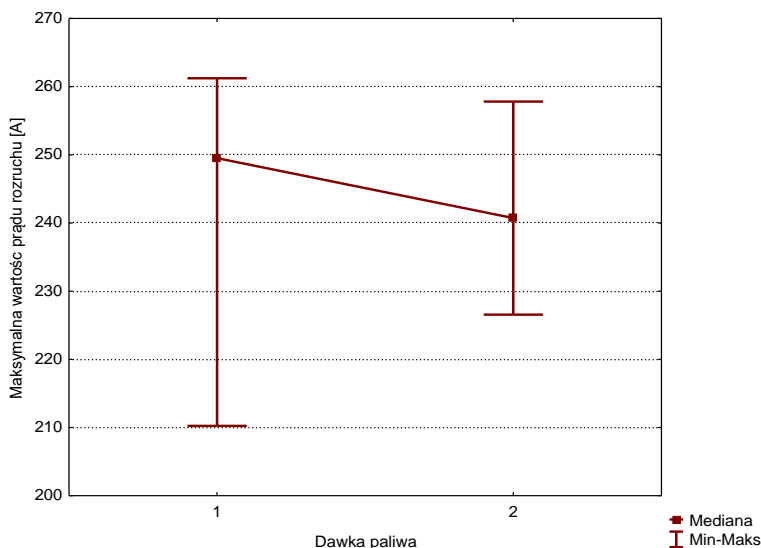
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0003	0,0001	0,0002
17,6	0,0003	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0004
19,6	0,0002	0,0001	0,0004	–

Na podstawie przedstawionej analizy wyników badań (rysunki 3.4÷3.7), można stwierdzić, widoczny brak prawidłowości w przebiegu zmian wartości pierwszych maksymalnych prądów rozruchu – I_{\max} w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy ustalonych parametrach dawki paliwa 1 i 2 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza o wartościach 21 i 26 MPa. Potwierdzają to uzyskane wyniki testów Kruskala–Wallisa, które wskazują na globalny brak wzajemnych zależności pomiędzy ustawioną wartością kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, a maksymalną wartością prądu rozruchu – I_{\max} . Wynika z tego, że wartość maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} ma charakter losowy – nieprzewidywalny.

Przeprowadzona analiza wyników wykazała, że najlepszymi ustalonymi parametrami wtrysku paliwa z punktu widzenia wystąpienia udanego rozruchu są: nominalna dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa oraz kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa wynoszący 17,6 °OWK.

Na rysunku 3.8, przedstawiono wykres zależności maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} od dawki paliwa przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6°, i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza wynoszącym 21 MPa.

W tabeli 3.10, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla dwóch wartości dawki paliwa przy rozruchach dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, ciśnienia otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości prądów rozruchu – I_{\max} dla powyższych parametrów przedstawiono w tabeli 3.11.



Rys. 3.8. Uzyskana empiryczna zależność maksymalnego prądu rozruchu od dawki paliwa, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.10. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla różnych dawek paliwa przy rozruchach z kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa: $16,6^\circ$ i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Dawka paliwa [nr]	Liczba obserwacji prądów rozruchu [-]	Suma rang
1	63	4028,000
2	62	3847,000
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 0,0849	
	$p=0,7709$	

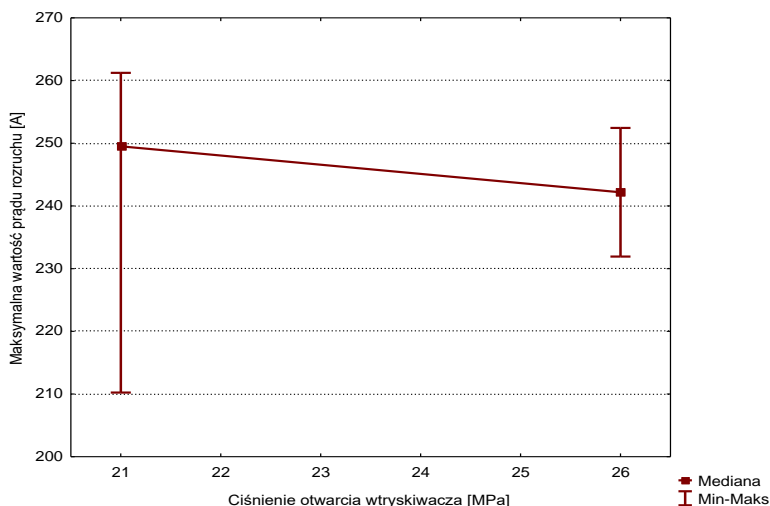
Tabela 3.11. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 1, $N = 125$)=0,0849, $p = 0,7709$

Dawka paliwa	1	2
1		0,7708
2	0,7708	

Dla zależności I_{\max} od dawki paliwa wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 0,0849$ przy poziomie istotności $p = 0,7709$, co nie pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i wskazują, że dawka paliwa nie ma istotnego wpływu na wartość maksymalnego prądu rozruchu. Co potwierdza znany z literatury [42, 82] fakt, że wartość prądu zależy głównie od tarcia statycznego w chwili rozpoczynania ruchu elementów silnika.

Na rysunku 3.9, przedstawiono wykres zależności maksymalnego prądu rozruchu – I_{\max} od wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, i dawce paliwa: 1.

W tabeli 3.12, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla dwóch wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy rozruchach dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa: $16,6^\circ$, dawki paliwa: 1. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości prądów rozruchu dla powyższych parametrów przedstawiono w tabeli 3.13.



Rys. 3.9. Uzyskana empiryczna zależność maksymalnego prądu rozruchu od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, dawka paliwa: 1

Tabela 3.12. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów maksymalnych prądów rozruchu otrzymanych dla ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy rozruchach z kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa: $16,6^\circ$ i dawką paliwa: 1

Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	Liczba obserwacji prądów rozruchu [-]	Suma rang
21	63	4042,000
26	62	3833,000
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 0,1299	
	$p=0,7184$	

Tabela 3.13. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala-Wallis: H (stopnie swobody = 1, $N = 125$) = 0,1299, $p = 0,7184$

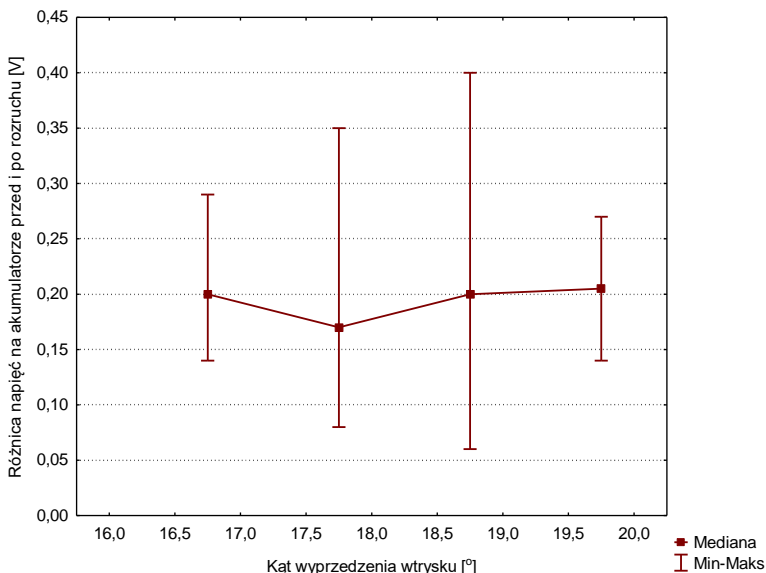
Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	21	26
21		0,7185
26	0,7185	

Na podstawie analizy danych przedstawionych na wykresie (rysunek 3.9), można stwierdzić, że maksymalna wartość prądu rozruchu maleje wraz ze wzrostem ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. Dla zależności I_{\max} od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 0,1299$ przy poziomie istotności $p = 0,7185$, co nie pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i wskazując, że ciśnienia otwarcia wtryskiwacza nie ma istotnego wpływu na wartość maksymalnego prądu rozruchu.

3.2.2. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na parametry akumulatora rozruchowego

Kolejnym krokiem w analizie wyników procesu rozruchu silnika o ZS było zbadanie zależności pomiędzy wybranymi parametrami akumulatora rozruchowego (różnica napięć na akumulatorze rozruchowym przed i po rozruchu oraz spadek napięcia na akumulatorze rozruchowym podczas rozruchu), a kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa. Różnica napięć na akumulatorze przed i po rozruchu, definiowana jest jako różnica wartości napięcia maksymalnego – U_{\max} i wartości napięcia – U_k na końcu rejestracji danych po zakończeniu próby rozruchu lub restartu. Wartości parametrów – U_{\max} i U_k zaprezentowano na rysunku 2.2. Różnicę napięć na akumulatorze przed i po rozruchu możemy traktować jako miarę rozładowania akumulatora podczas rozruchu i jednocześnie wskaźnik zużytej energii elektrycznej. Im zarejestrowana różnica napięcia jest większa tym rozruch silnika zachodził w trudniejszych warunkach początkowych silnika. Przekłada się to bezpośrednio na wydłużenie czasu rozruchu silnika spalinowego.

Na rysunkach 3.10÷3.13, zaprezentowano wyniki zmierzonych różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Na rysunku 3.10, przedstawiono wykres zależności różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: N oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.



Rys. 3.10. Różnica napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

W tabeli 3.14, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchu z nominalną dawką paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości napięć przedstawiono w tabeli 3.15.

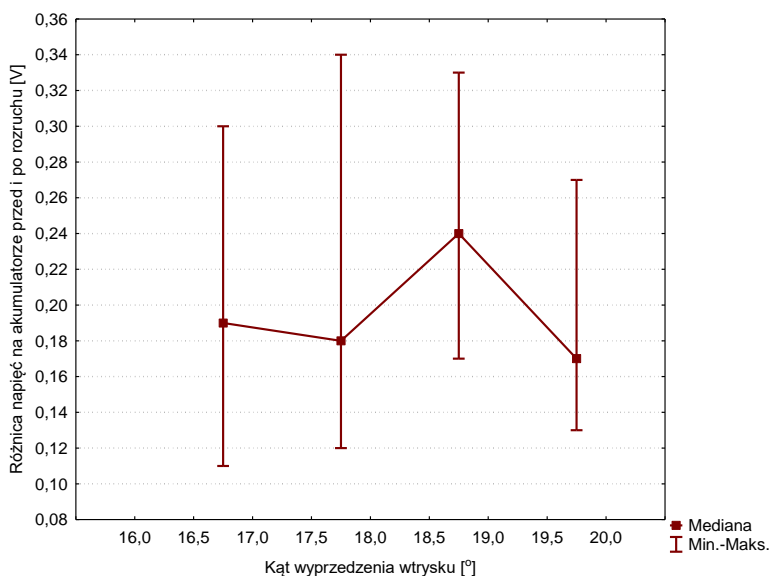
Tabela 3.14. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu [-]	Suma rang
16,6	63	8587,000
17,6	62	5179,000
18,6	62	8533,000
19,6	62	8826,000
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 249$) = 27,73082	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.15. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala-Wallis: H (stopnie swobody = 3, $N = 249$) = 27,7308, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0003	1,0000	1,0000
17,6	0,0003	–	0,0002	0,0001
18,6	1,0000	0,0002	–	1,0000
19,6	1,0000	0,0001	1,0000	–

Na rysunku 3.11, przedstawiono wykres zależności różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.



Rys. 3.11. Różnica napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

W tabeli 3.16, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchu ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przedstawiono w tabeli 3.17.

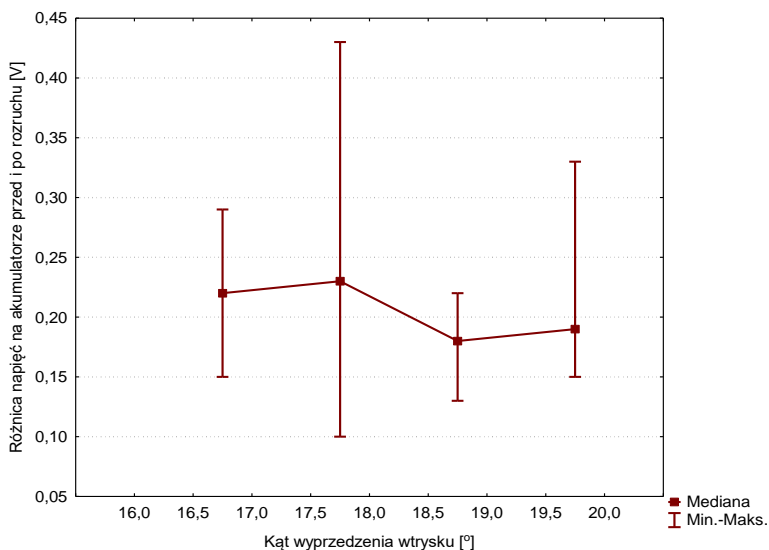
Tabela 3.16. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	7624,00
17,6	62	6071,50
18,6	65	13097,00
19,6	62	4833,50
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 251$) = 107,5594 $p = 0,0001$	

Tabela 3.17. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 251$) = 107,5594, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,3289	0,0001	0,0034
17,6	0,3289	–	0,0001	0,7542
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0001
19,6	0,0034	0,7542	0,0001	–

Na rysunku 3.12, przedstawiono wykres zależności różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.



Rys. 3.12. Różnica napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

W tabeli 3.18, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchu z nominalną dawką paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przedstawiono w tabeli 3.19.

Tabela 3.18. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

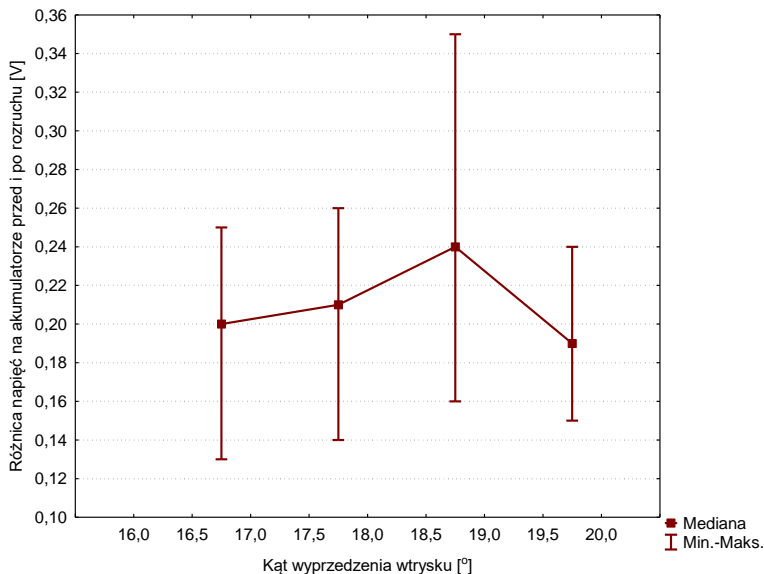
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	9748,50
17,6	61	10488,00
18,6	61	3547,00
19,6	61	6351,50
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 245$) = 99,2796 $p = 0,0001$	

Tabela 3.19. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 245$) = 99,2796, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	1,0000	0,0001	0,0002
17,6	1,0000	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0021
19,6	0,0002	0,0001	0,0021	–

Na rysunku 3.13, przedstawiono wykres zależności różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.

W tabeli 3.20, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchu ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Wyniki procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przedstawiono w tabeli 3.21.



Rys. 3.13. Różnica napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.20. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

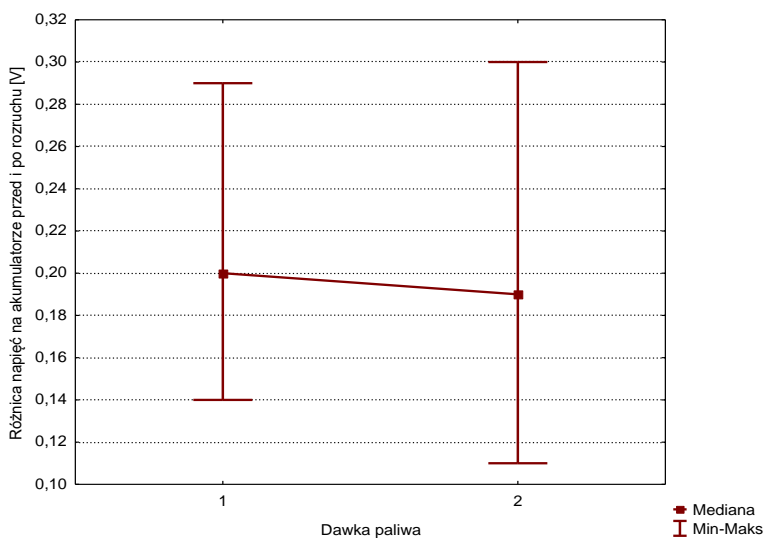
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	6363,50
17,6	60	6485,50
18,6	61	12079,00
19,6	61	4962,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 244$) = 98,5181	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.21. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 244$) = 98,5181, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	1,0000	0,001	0,5662
17,6	1,0000	–	0,001	0,2229
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0001
19,6	0,5662	0,2229	0,001	–

Analiza uzyskanych wyników z tabel 3.14÷3.21, nieparametrycznego testu Kruskala–Wallisa i wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych wskazuje na występowanie istotnych statystycznie różnic w wartościach mediany różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przed i po rozruchu. Rozpatrując powyższe stwierdzono, że najmniejsza różnica spadku napięcia na akumulatorze rozruchowym występuje przy parametrach rozruchu: nominalna dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa oraz kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa wynoszącym $17,6^\circ$ OWK.

Na rysunku 3.14, przedstawiono wykres zależności różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od dawki paliwa dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$ i ciśnienia otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.



Rys. 3.14. Różnica napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od dawki paliwa, dla parametrów rozruchu: kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza 21 MPa

W tabeli 3.22, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przed i po rozruchu w zależności od dawki paliwa przy rozruchu dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza 21 MPa. Wyniki procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości różnicy napięć na akumulatorze rozruchowym przedstawiono w tabeli 3.23.

Tabela 3.22. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu dla różnych dawek paliwa, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Dawka paliwa [nr]	Liczba obserwacji różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu [-]	Suma rang
1	63	4433,500
2	62	3441,500
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 5,2875 $p = 0,0215$	

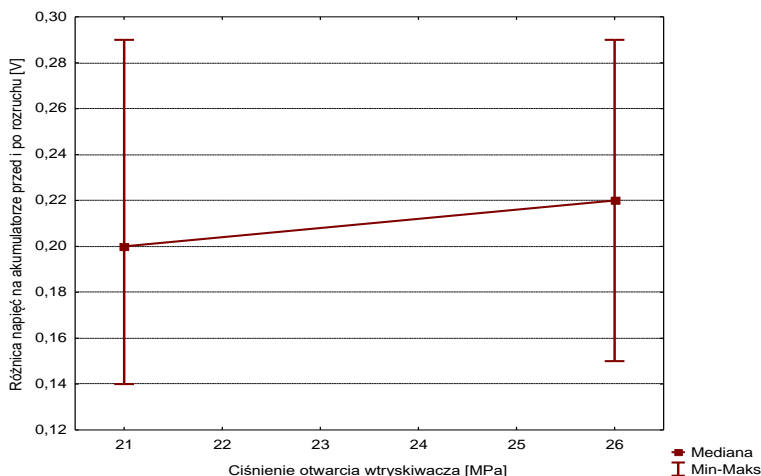
Tabela 3.23. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 1, $N = 125$) = 5,2875, $p = 0,0215$

Dawka paliwa	1	2
1		0,0218
2	0,0218	

Dla zależności różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu od dawki paliwa wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 5,2875$, przy poziomie istotności $p = 0,0215$, co pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i wskazuje na istnienie wpływu dawki paliwa na wartość różnicy napięć na akumulatorze, która jest pośrednią miarą ilości energii zużytej podczas rozruchu silnika spalinowego. Jak potwierdza praktyka eksploatacyjna zwiększenie dawki paliwa ułatwia rozruch silnika spalinowego o ZS.

Na rysunku 3.15, przedstawiono wykres zależności różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu od wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6°, i nominalnej dawce paliwa: 1.

W tabeli 3.24, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu otrzymanych dla dwóch wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy rozruchach dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, dawki paliwa: 1. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu dla powyższych parametrów przedstawiono w tabeli 3.25.



Rys. 3.15. Różnica napięć na akumulatorze przed i po rozruchu w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza dla parametrów rozruchu: kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6°, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza 21 MPa

Tabela 3.24. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu względem ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	Liczba obserwacji różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu [-]	Suma rang
1	63	3283,500
2	62	4591,500
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 11,5021	
	$p = 0,0007$	

Tabela 3.25. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 1, $N = 125$) = 11,5021, $p = 0,0007$

Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	21	26
21		0,0007
26	0,0007	

Na podstawie analizy danych przedstawionych na wykresie (rysunek 3.15), można stwierdzić, że różnica napięć na akumulatorze przed i po rozruchu wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. Dla zależności różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 11,5021$ przy poziomie istotności $p = 0,0007$, co pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej

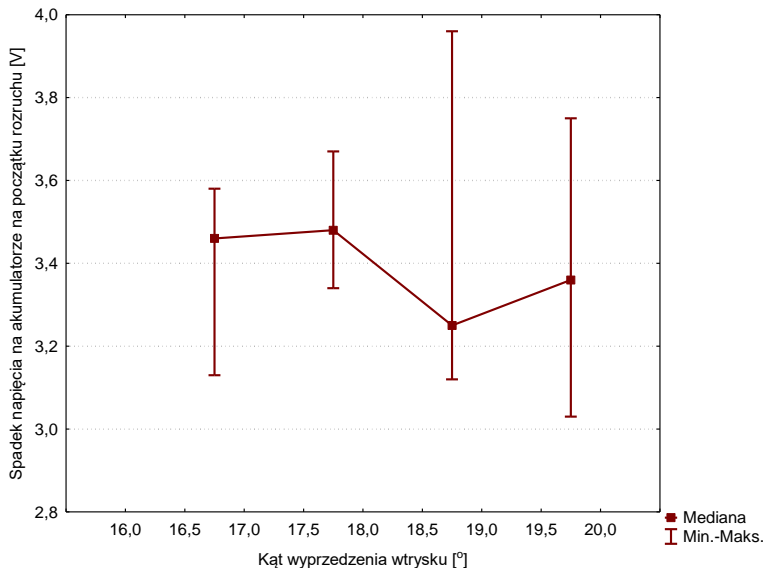
i wskazuję, że wartość ciśnienia otwarcia wtryskiwacza wpływa istotnie statystycznie na wartość różnicy napięć na akumulatorze przed i po rozruchu.

Kolejnym badanym parametrem elektrycznym był spadek napięcia na akumulatorze rozruchowym na początku rozruchu, definiowany jako wartość napięcia maksymalnego – U_{\max} pomniejszona o wartość napięcia minimalnego – U_{\min} podczas próby rozruchu. Wartości parametrów U_{\max} i U_{\min} zaprezentowano na rysunku 2.2. Spadek napięcia na akumulatorze rozruchowym na początku rozruchu jest pośrednią miarą oporów ruchu na początku rozruchu. Czyli decyduje o nim wartość tarcia statycznego w zespole TPC oraz lepkość oleju silnikowego w chwili rozruchu. Ponadto związane jest to z pokonaniem oporów ruchu zachodzących podczas zazębienia zębniaka rozrusznika z wieńcem zębatym koła zamachowego silnika oraz ruszeniem z miejsca położenia tłoka.

Na rysunkach 3.16÷3.19, przedstawiono zależność empiryczną spadku napięcia na akumulatorze rozruchowym na początku rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Wyniki prawdopodobieństwa oraz porównanie testu Kruskala–Wallisa zestawiono w kolejnych tabelach 3.26÷3.33.

Na rysunku 3.16, przedstawiono wykres zależności spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.

W tabeli 3.26, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchu z nominalną dawką paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu przedstawiono w tabeli 3.27.



Rys. 3.16. Spadek napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.26. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

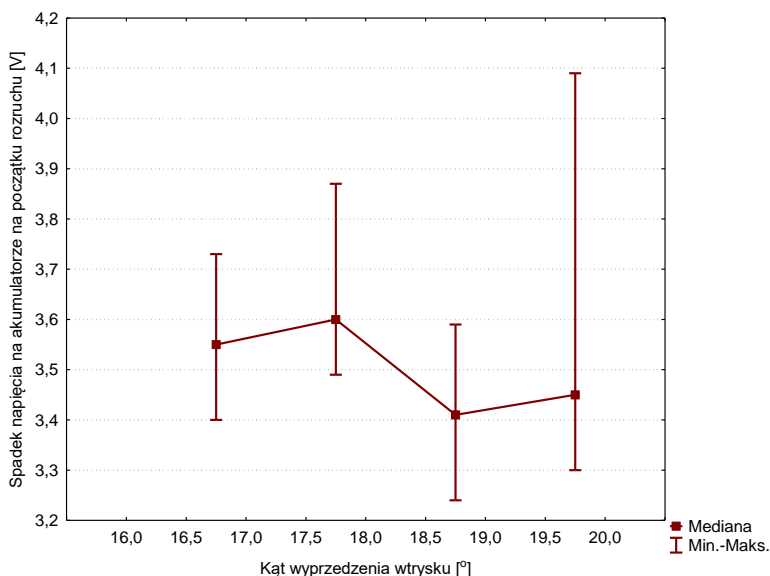
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji spadku napięcia na akumulatorze na początku rozruchu [-]	Suma rang
16,6	63	7708,50
17,6	62	10561,00
18,6	62	4853,50
19,6	62	8002,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 249$) = 50,9581	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.27. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 249$) = 50,9581, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0012	0,0038	1,0000
17,6	0,0012	–	0,0001	0,0086
18,6	0,0038	0,0001	–	0,0006
19,6	1,0000	0,0086	0,0006	–

Na rysunku 3.17, przedstawiono wykres zależności spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.

W tabeli 3.28, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchu ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu przedstawiono w tabeli 3.29.



Rys. 3.17. Spadek napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

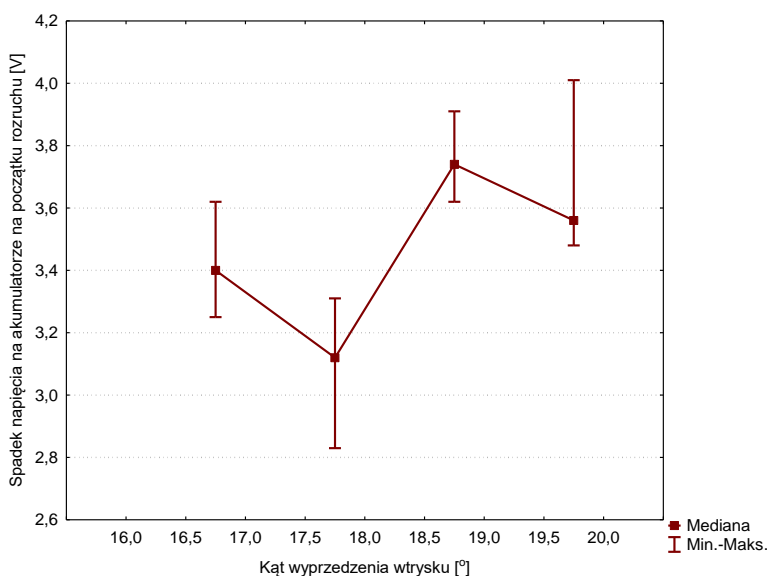
Tabela 3.28. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, parametry rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji spadku napięcia na akumulatorze na początku rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	9435,50
17,6	62	11990,00
18,6	65	4230,00
19,6	62	5970,50
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 251$) = 117,7090	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.29. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala-Wallis: H (stopnie swobody = 3, $N = 251$) = 117,7090, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0095	0,0001	0,0002
17,6	0,0095	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0925
19,6	0,0002	0,0001	0,0925	–

Na rysunku 3.18, przedstawiono wykres spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.



Rys. 3.18. Spadek napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

W tabeli 3.30, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 oraz ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. W tabeli 3.31, zestawiono wyniki wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych testu Kruskala–Wallisa spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu.

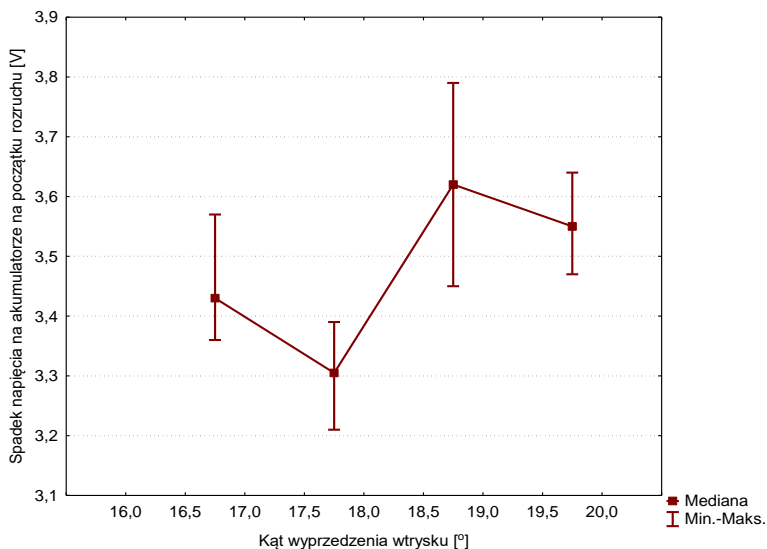
Tabela 3.30. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji spadku napięcia na akumulatorze na początku rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	5990,50
17,6	61	1893,50
18,6	61	13030,50
19,6	61	9220,50
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 245$) = 220,6918 $p = 0,0001$	

Tabela 3.31. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 245$) = 220,6918, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0002	0,0001	0,0002
17,6	0,0002	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0001	0,0001	–	0,00001
19,6	0,0002	0,0001	0,00001	–

Na rysunku 3.19, przedstawiono wykres spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.



Rys. 3.19. Spadek napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

W tabeli 3.32, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 oraz ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. W tabeli 3.33, zestawiono wyniki wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych testu Kruskala–Wallisa spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu.

Tabela 3.32. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji spadku napięcia na akumulatorze na początku rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	5830,00
17,6	60	1858,50
18,6	61	12316,50
19,6	61	9885,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 244$) = 207,4454 $p = 0,0001$	

Tabela 3.33. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 244$) = 207,4454, $p = 0,0001$

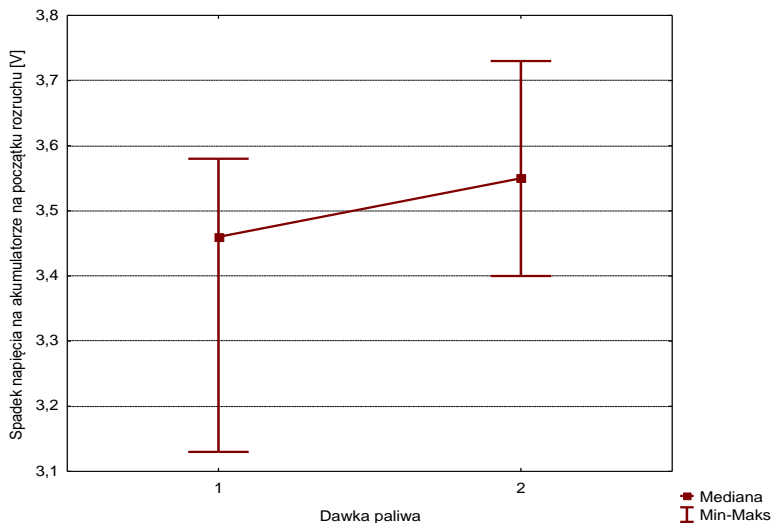
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0001	0,0001	0,0001
17,6	0,0001	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0109
19,6	0,0001	0,0001	0,0109	–

Na podstawie analizy wyników wykazano występowanie istotnych statystycznie różnic (patrz tabele 3.27, 3.29, 3.31 i 3.33) dla zaprezentowanych na rysunkach 3.16÷3.19, zależności wartości median spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Najmniejszy spadek napięcia na akumulatorze rozruchowym w początkowej fazie rozruchu występuje przy parametrach rozruchu: nominalna dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa oraz kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 17,6 °OWK.

Na rysunku 3.20, przedstawiono wykres spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od dawki paliwa dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6° i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.

W tabeli 3.34, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od dawki paliwa dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6° i ciśnieniu otwarcia

wtryskiwacza: 21 MPa. W tabeli 3.35, zestawiono wyniki wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych testu Kruskala–Wallisa spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu.



Rys. 3.20. Spadek napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od dawki paliwa, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.34. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze w zależności od dawki paliwa, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6°, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Dawka paliwa [nr]	Liczba obserwacji spadku napięcia na akumulatorze na początku rozruchu [-]	Suma rang
1	63	2621,500
2	62	5253,500
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 44,3241 $p = 0,0001$	

Tabela 3.35. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 1, $N = 125$) = 44,3241, $p = 0,0001$

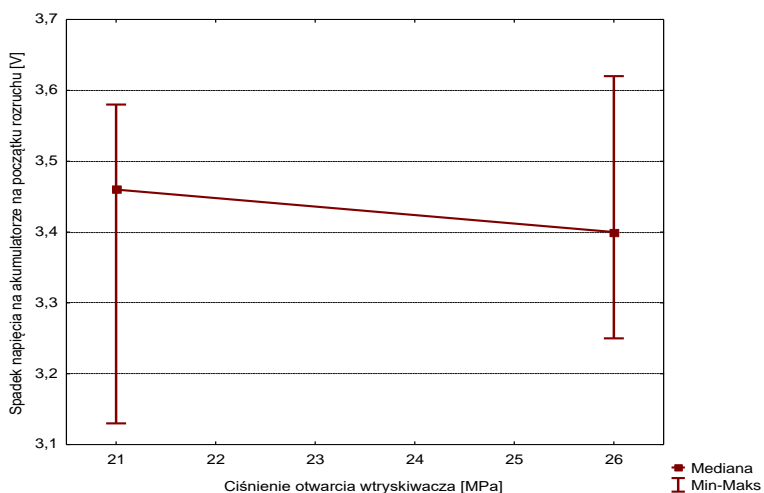
Dawka paliwa	1	2
1		0,0001
2	0,0001	

Dla zależności spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od dawki paliwa wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa

$H = 44,3241$, przy poziomie istotności $p = 0,0001$, co pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i wskazuje na istnienie wpływu dawki paliwa na wartość spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu. Zwiększenie dawki paliwa w trakcie rozruchu powoduje wzrost ilości odparowanego paliwa, zwiększa opory ruchu podczas sprężania i powinno skutkować wzrostem ciśnienia w komorze spalania silnika.

Na rysunku 3.21, przedstawiono wykres spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$ i nominalnej dawki paliwa: 1.

W tabeli 3.36, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$ i dawki paliwa: 1. W tabeli 3.37, zestawiono wyniki wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych testu Kruskala–Wallisa spadku napięcia na akumulatorze podczas rozruchu.



Rys. 3.21. Spadek napięcia na akumulatorze podczas rozruchu w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: $16,6^\circ$, dawka paliwa: 1

Tabela 3.36. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów spadku napięcia na akumulatorze w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6°, dawka paliwa: 1

Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	Liczba obserwacji spadku napięcia na akumulatorze na początku rozruchu [-]	Suma rang
21	63	3814,500
26	62	4060,500
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 0,5826 $p = 0,4453$	

Tabela 3.37. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 1, $N = 125$) = 0,5826, $p = 0,4453$

Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	21	26
21		0,4456
26	0,4456	

Na podstawie analizy danych przedstawionych na wykresie (rysunek 3.21), można stwierdzić, że spadek napięcia na akumulatorze przed i po rozruchu maleje wraz ze wzrostem ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. Dla zależności spadku napięcia na akumulatorze przed i po rozruchu od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 0,5826$ przy poziomie istotności $p = 0,4453$, nie pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i wskazują, że wartość ciśnienia otwarcia wtryskiwacza nie wpływa istotnie statystycznie na wartość spadku napięcia na akumulatorze przed i po rozruchu.

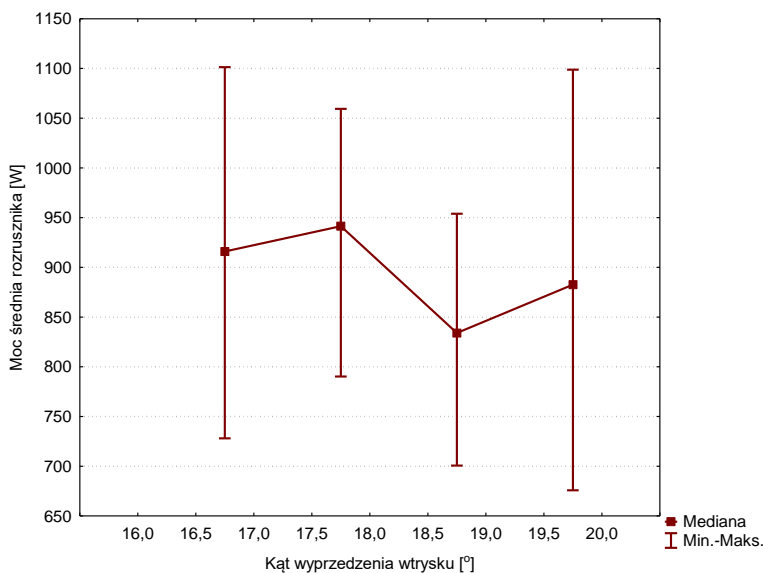
3.2.3. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na moc średnią rozrusznika

Kolejnym krokiem w analizie było sprawdzenie zmian mocy średniej pobieranej przez rozrusznik. Moc średnią rozrusznika w czasie jego pracy wyznaczono jako iloczyn średniej wartości natężenia prądu i średniej wartości napięcia. Na rysunkach 3.22÷3.25, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy próbach rozruchu jednocylinrowego silnika o ZS. Wyniki prawdopodobieństwa oraz porównanie testu Kruskala–Wallisa dla rozpatrywanej wartości mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przedstawiono w kolejnych tabelach 3.38÷3.45.

Na rysunku 3.22, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.

W tabeli 3.38, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy

rozruchach z nominalną dawką paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości mocy średniej rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.39.



Rys. 3.22. Moc średnia rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

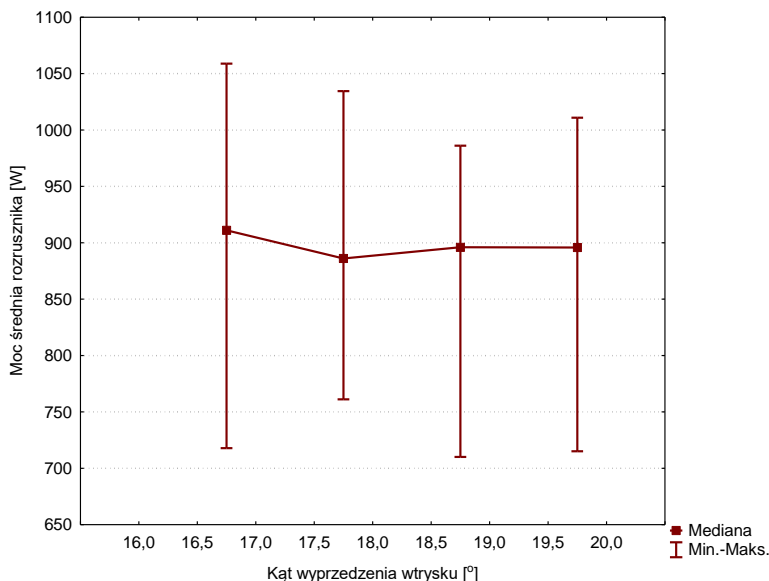
Tabela 3.38. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji mocy średniej rozrusznika [-]	Suma rang
16,6	63	9582,00
17,6	62	10641,00
18,6	62	3975,00
19,6	62	6927,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 249$) = 81,3166	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.39. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 249$) = 81,3166, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,7771	0,0001	0,0104
17,6	0,7771	–	0,0001	0,0002
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0014
19,6	0,0104	0,0002	0,0014	–

Na rysunku 3.23, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.



Rys. 3.23. Moc średnia rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

W tabeli 3.40, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości mocy średniej rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.41.

Tabela 3.40. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

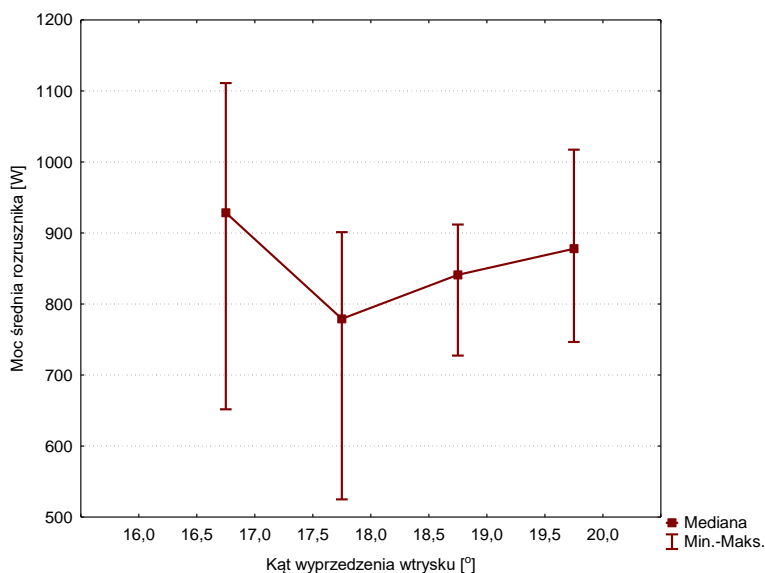
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji mocy średniej rozrusznika [-]	Suma rang
16,6	62	9203,000
17,6	62	6921,000
18,6	65	7987,000
19,6	62	7515,000
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 251$) = 8,7401 $p = 0,033$	

Tabela 3.41. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala-Wallis: H (stopnie swobody = 3, $N = 251$) = 8,7401, $p = 0,033$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0286	0,2842	0,2209
17,6	0,0286	–	1,0000	1,0000
18,6	0,2842	1,0000	–	1,0000
19,6	0,2209	1,0000	1,0000	–

Na rysunku 3.24, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.

W tabeli 3.42, podano wyniki testu Kruskala-Wallis porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach z nominalną dawką paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości mocy średniej rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.43.



Rys. 3.24. Moc średnia rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

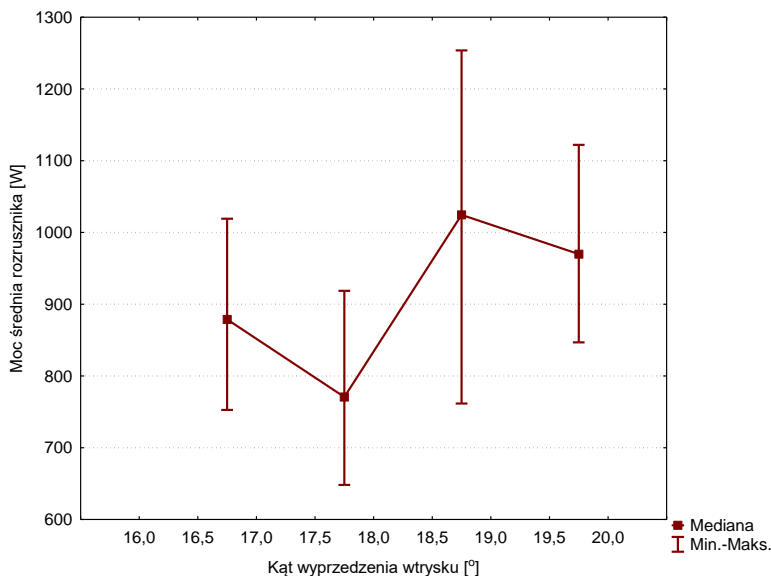
Tabela 3.42. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji mocy średniej rozrusznika [-]	Suma rang
16,6	62	11535,00
17,6	61	3144,00
18,6	61	6127,00
19,6	61	9329,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 245$) = 128,1524 $p = 0,0001$	

Tabela 3.43. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 245$) = 128,1524, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0001	0,0001	0,0575
17,6	0,0001	–	0,0009	0,0001
18,6	0,0001	0,0009	–	0,0003
19,6	0,0575	0,0001	0,0003	–

Na rysunku 3.25, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.



Rys. 3.25. Moc średnia rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

W tabeli 3.44, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.

Tabela 3.44. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji mocy średniej rozrusznika [-]	Suma rang
16,6	62	6087,000
17,6	60	2495,000
18,6	61	11672,000
19,6	61	9636,000
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 244$) = 159,6602	
	$p = 0,0001$	

Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości mocy średniej rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.45.

Tabela 3.45. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 244$) = 159,6602, $p = 0,0001$

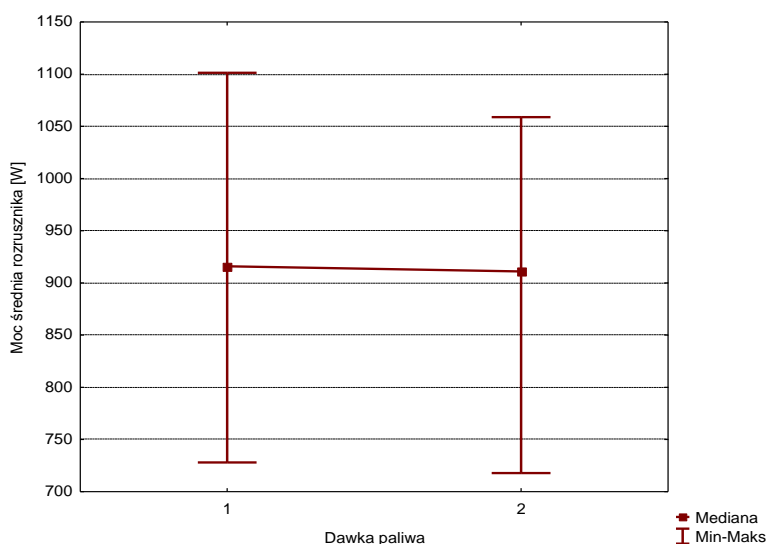
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0003	0,0001	0,0002
17,6	0,0003	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0541
19,6	0,0002	0,0001	0,0541	–

Analizując przedstawione wyniki badań można stwierdzić, że występują istotne statystycznie różnice pomiędzy wartością median mocy średniej rozrusznika a kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej: 1 i zwiększonej dawce paliwa: 2, dla ciśnienia otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa (patrz tabele 3.43 i 3.45). Ponadto ujawniono występowanie istotnej statystycznie różnicy przy ustawieniach parametrów wtrysku paliwa: nominalna dawka paliwa: 1, i ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa (patrz tabela 3.39). W przypadku pozostałych ustawień parametrów wtrysku paliwa nie zaobserwowano występowania istotnie statystycznych różnic. Wynika z tego, że możliwe jest sterowanie wartością mocy średniej pobieranej przez rozrusznik w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa w określonym zakresie regulacji parametrami wtrysku paliwa (dawka paliwa: 1 i 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa). Według przeprowadzonej analizy najmniejszą moc

średnią rozrusznika (ok. 780 W) uzyskano przy nominalnej dawce paliwa: 1, ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa oraz kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa: 17,6°.

Na rysunku 3.26, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne mocy średniej rozrusznika w zależności od dawki paliwa przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6° i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.

W tabeli 3.46, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika dla dawki paliwa przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6° i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości mocy średniej rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.47.



Rys. 3.26. Moc średnia rozrusznika w zależności od dawki paliwa, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.46. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika w zależności od dawki paliwa, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Dawka paliwa [nr]	Liczba obserwacji mocy średniej rozrusznika [-]	Suma rang
1	63	4127,000
2	62	3748,000
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 0,6087	
	$p = 0,4353$	

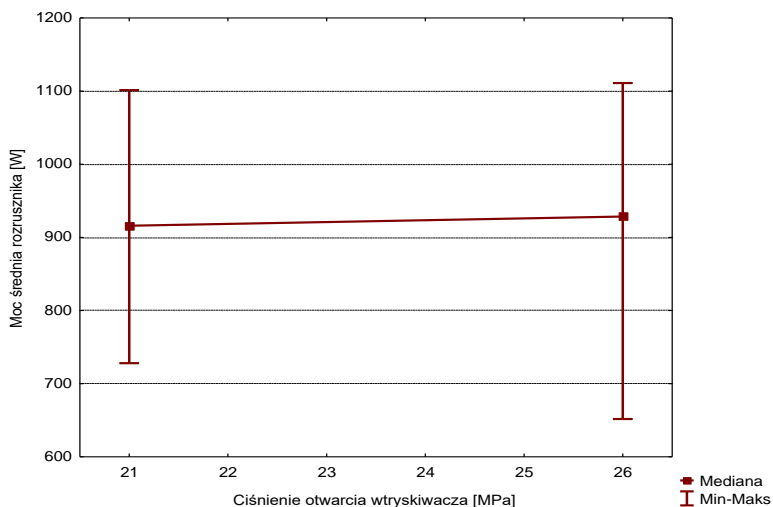
Tabela 3.47. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala-Wallis: $H(\text{stopnie swobody} = 1, N = 125) = 0,6087, p = 0,4353$

Dawka paliwa	1	2
1		0,4353
2	0,4353	

Dla zależności mocy średniej rozrusznika od dawki paliwa wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 0,6087$, przy poziomie istotności $p = 0,4353$, co nie pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i wskazuje na brak istotnego wpływu dawki paliwa na wartość mocy średniej rozrusznika.

Na rysunku 3.27, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne mocy średniej rozrusznika w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa: $16,6^\circ$ i nominalnej dawce paliwa: 1.

W tabeli 48, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika dla ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy kącie wyprzedzenia wtrysku paliwa: $16,6^\circ$ i dawce paliwa: 1. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości mocy średniej rozrusznika przedstawiono w tabeli 49.



Rys. 3.27. Moc średnia rozrusznika w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: $16,6^\circ$, dawka paliwa: 1

Tabela 3.48. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów mocy średniej rozrusznika w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, dawka paliwa: 1

Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	Liczba obserwacji mocy średniej rozrusznika [-]	Suma rang
21	63	3821,000
26	62	4054,000
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 0,5341	
	$p = 0,4649$	

Tabela 3.49. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 1, $N = 125$) = 0,5341, $p = 0,4649$

Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	21	26
21		0,4649
26	0,4649	

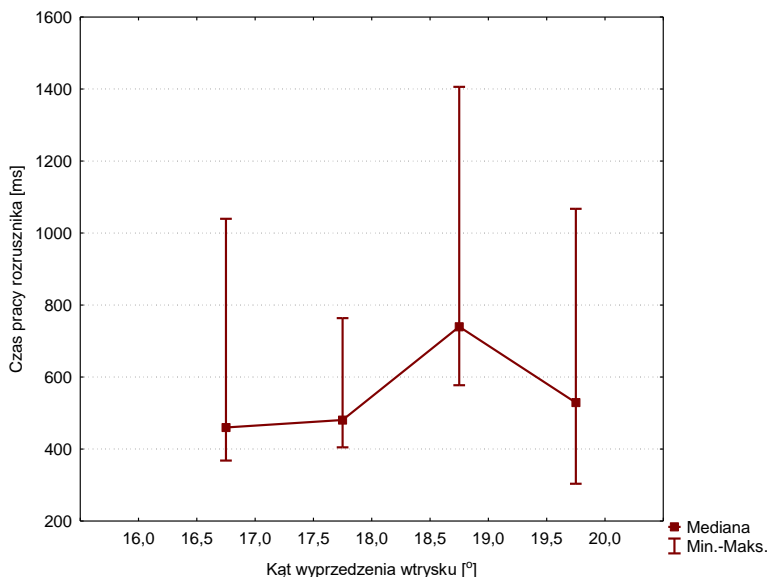
Dla zależności mocy średniej rozrusznika od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 0,5341$ przy poziomie istotności $p = 0,4649$, co nie pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i wskazując, że wartość ciśnienia otwarcia wtryskiwacza nie wpływa istotnie statystycznie na wartość mocy średniej rozrusznika.

3.2.4. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na czas pracy rozrusznika

Kolejnym krokiem analizy uzyskanych wyników stanowiskowych badań procesu rozruchu jednocylindrowego silnika o ZS było zbadanie zależności czasu pracy rozrusznika – t_s . Analiza tego parametru pozwala na ocenę długości trwania rozruchu badanego silnika o zapłonie samoczynnym.

Na rysunkach 3.28÷3.31, przedstawiono uzyskane zależności czasu pracy rozrusznika w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla ustalonych pozostałych parametrów rozruchu jednocylindrowego silnika o ZS.

Wyniki prawdopodobieństwa oraz porównanie testu Kruskala–Wallisa dla rozpatrywanej wartości czasu pracy rozrusznika – t_s , w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przedstawiono w kolejnych tabelach 3.50÷3.57.



Rys. 3.28. Czas pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

W tabeli 3.50, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach z nominalną dawką paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady uzyskanych wartości czasu pracy rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.51.

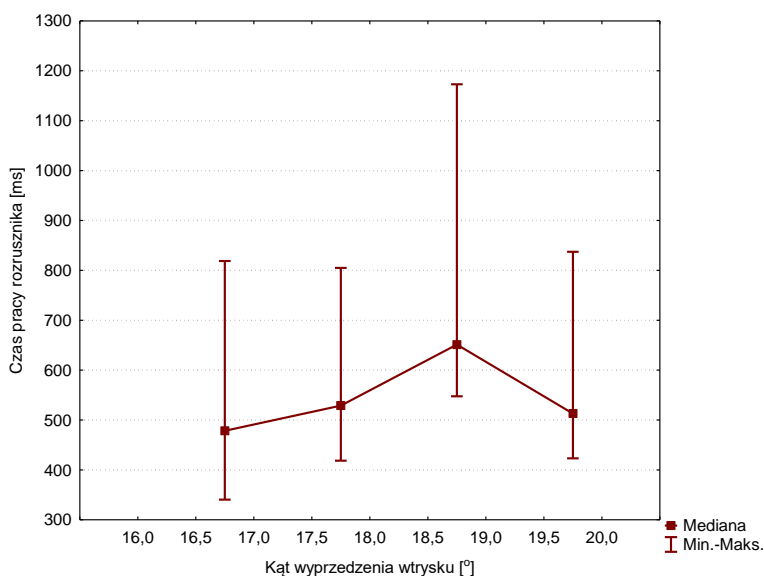
Tabela 3.50. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji czasu pracy rozrusznika [-]	Suma rang
16,6	63	4195,00
17,6	62	5694,00
18,6	62	13231,00
19,6	62	8005,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 249$) = 148,2887	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.51. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala-Wallis: H (stopnie swobody = 3, $N = 249$) = 148,2887, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,3001	0,0001	0,0001
17,6	0,3001	–	0,0001	0,0238
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0001
19,6	0,0001	0,0238	0,0001	–

Na rysunku 3.29, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne czasu pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.



Rys. 3.29. Czas pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

W tabeli 3.52, podano wyniki testu Kruskala-Wallis porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości czasu pracy rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.53.

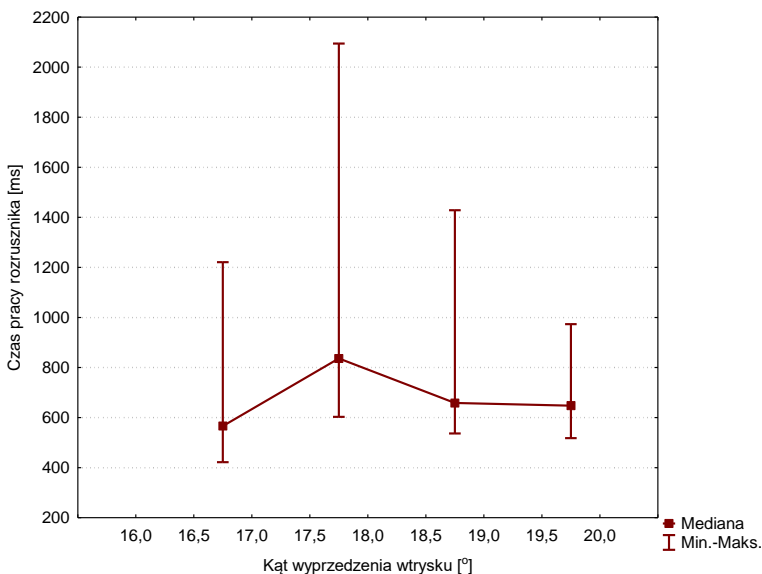
Tabela 3.52. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji czasu pracy rozrusznika [-]	Suma rang
16,6	62	4393,50
17,6	62	7164,50
18,6	65	13349,00
19,6	62	6719,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 251$) = 118,440	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.53. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 251$) = 118,440, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0037	0,0001	0,0242
17,6	0,0037	–	0,0001	1,0000
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0001
19,6	0,0242	1,0000	0,0001	–

Na rysunku 3.30, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne czasu pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.



Rys. 3.30. Czas pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

W tabeli 3.54, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach z nominalną dawką paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady uzyskanych wartości czasu pracy rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.55.

Tabela 3.54. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

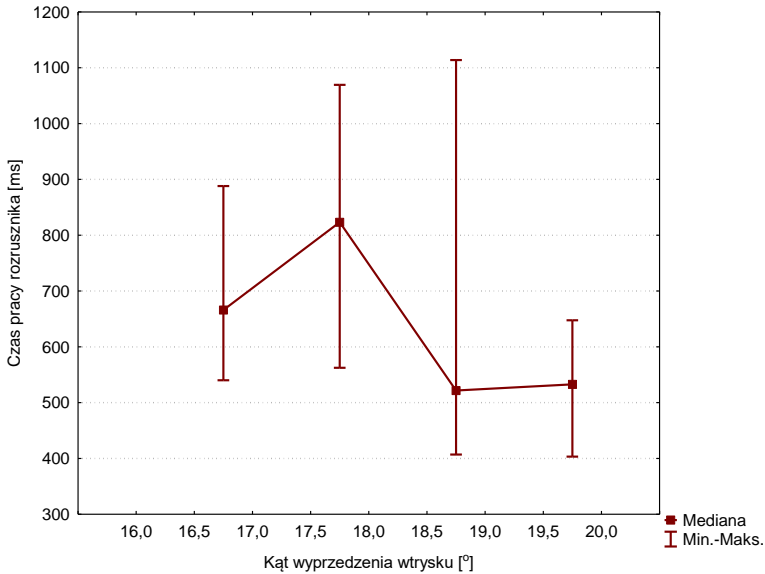
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji czasu pracy rozrusznika [-]	Suma rang
16,6	62	3935,00
17,6	61	12011,50
18,6	61	7505,00
19,6	61	6683,50
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 245$) = 112,3234 $p = 0,0001$	

Tabela 3.55. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 245$) = 112,3234, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0001	0,0002	0,0021
17,6	0,0001	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0002	0,0001	–	1,0000
19,6	0,0021	0,0001	1,0000	–

Na rysunku 3.31, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne czasu pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.

W tabeli 3.56, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości czasu pracy rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.57.



Rys. 3.31. Czas pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.56. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji czasu pracy rozrusznika [-]	Suma rang
16,6	62	9646,50
17,6	60	11893,50
18,6	61	4016,00
19,6	61	4334,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 244$) = 154,4769 $p = 0,0001$	

Tabela 3.57. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 244$) = 154,4769, $p = 0,0001$

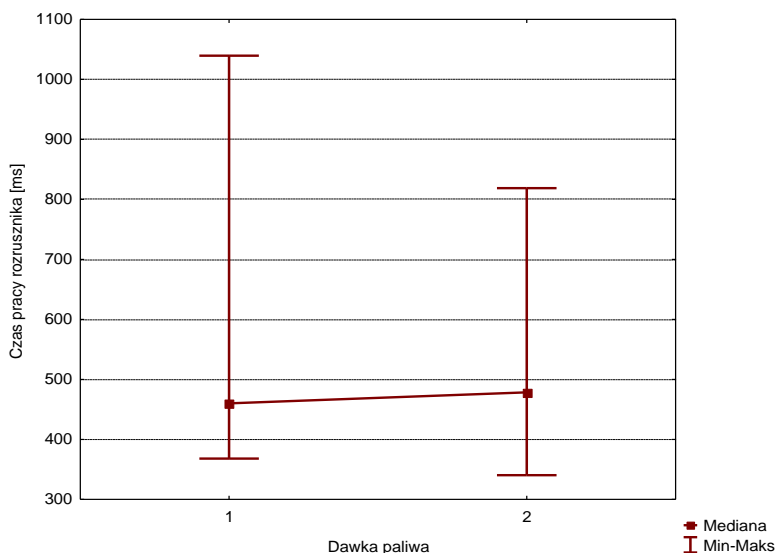
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0052	0,0001	0,0001
17,6	0,0052	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0001	0,0001	–	1,0000
19,6	0,0001	0,0001	1,0000	–

Analizując przedstawione wyniki badań można stwierdzić, że występują istotne statystycznie różnice pomiędzy czasem pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy ustawieniach parametrów wtrysku

paliwa: dawka paliwa: 1 i 2, dla ciśnienia otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa oraz 26 MPa. Najkrótszy czas pracy rozrusznika uzyskano przy następujących parametrach rozruchu: nominalna dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa oraz kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6 °OWK. Średni czas pracy rozrusznika przy tych parametrach wynosił: $t_s = 420$ ms. Należy podkreślić, że z eksploatacyjnego punktu widzenia, uzyskanie najkrótszego czasu rozruchu jest bardzo istotne.

Na rysunku 3.32, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne dla czasu pracy rozrusznika w zależności od dawki paliwa przy parametrach rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6° i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.

W tabeli 3.58, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika w zależności od dawki paliwa przy rozruchach dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6° i ciśnienia otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości czasu pracy rozrusznika przy wskazanych parametrach przedstawiono w tabeli 3.59.



Rys. 3.32. Czas pracy rozrusznika w zależności od dawki paliwa, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.58. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika w zależności od dawki paliwa, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.

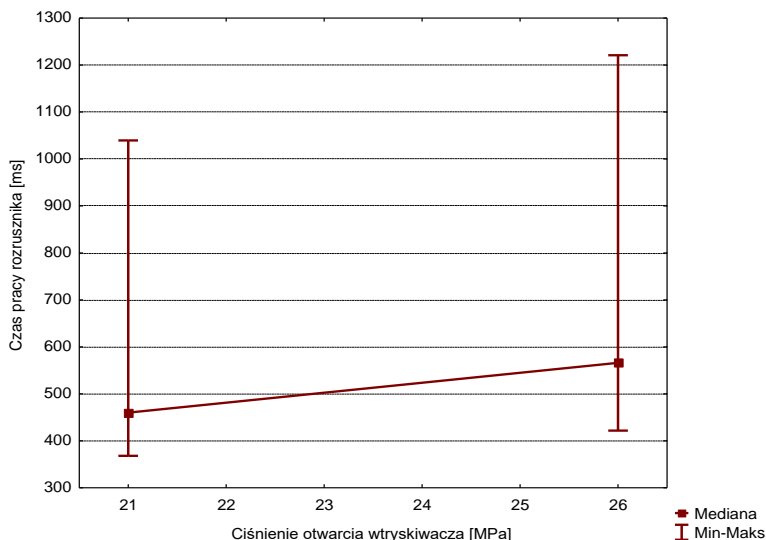
Dawka paliwa [nr]	Liczba obserwacji czasu pracy rozrusznika [-]	Suma rang
1	63	3643,000
2	62	4232,000
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 2,5993	
	$p = 0,1069$	

Tabela 3.59. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 1, $N = 125$) = 2,5993, $p = 0,1069$

Dawka paliwa	1	2
1		0,1069
2	0,1069	

Dla zależności wartości czasu pracy rozrusznika od dawki paliwa wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 2,5993$, przy poziomie istotności $p = 0.1069$, co nie pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i wskazuje że dawka paliwa nie ma istotnego wpływu na wartość czasu pracy rozrusznika.

Na rysunku 3.33, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne dla czasu pracy rozrusznika od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy parametrach rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6° oraz dawka paliwa: 1.



Rys. 3.33. Czas pracy rozrusznika w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: 16,6°, dawki paliwa: 1

W tabeli 3.60, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy rozruchach dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$ i nominalnej dawce paliwa: 1. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości czasu pracy rozrusznika przy wskazanych parametrach przedstawiono w tabeli 3.61.

Tabela 3.60. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów czasu pracy rozrusznika w zależności od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza, dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa: $16,6^\circ$, dawki paliwa: 1

Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	Liczba obserwacji czasu pracy rozrusznika [-]	Suma rang
21	63	2478,000
26	62	5397,000
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 1, $N = 125$) = 54,2345	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.61. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 1, $N = 125$) = 54,2345, $p = 0,0001$

Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza [MPa]	21	26
21		0,001
26	0,001	

Dla zależności mocy średniej rozrusznika od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza wartość statystyki testowej Kruskala–Wallisa $H = 54,2345$ przy poziomie istotności $p = 0,0001$, co pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i wskazuje na istnienie wpływu wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza na wartość czasu pracy rozrusznika.

3.2.5. Wpływ nastaw wtrysku paliwa na pracę rozruchu

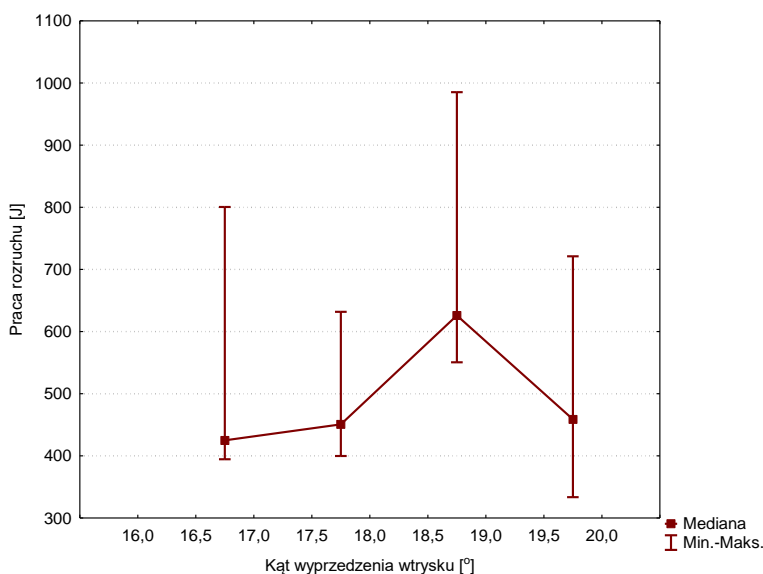
Kolejną analizą uzyskanych wyników stanowiskowych badań procesu rozruchu jednocylindrowego silnika o ZS w warunkach temperatury otoczenia było określenie pracy wykonanej przez rozrusznik podczas rozruchu. Praca rozruchu rozumiana jest jako iloczyn mocy średniej rozrusznika i czasu rozruchu (pracy rozrusznika), zatem jest to praca wykonana przez rozrusznik podczas procesu rozruchu silnika spalinowego.

Na wykresach na rysunkach 3.34÷3.37, przedstawiono uzyskane zależności pracy rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Wyniki prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych oraz porównanie testu Kruskala–Wallisa dla rozpatrywanej wartości czasu pracy rozrusznika

w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przedstawiono w kolejnych tabelach 3.62÷3.69.

Na rysunku 3.34, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne dla pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.

W tabeli 3.62, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów pracy rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach z nominalną dawką paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości pracy rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.63.



Rys. 3.34. Praca rozrusznika podczas pierwszego rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.62. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

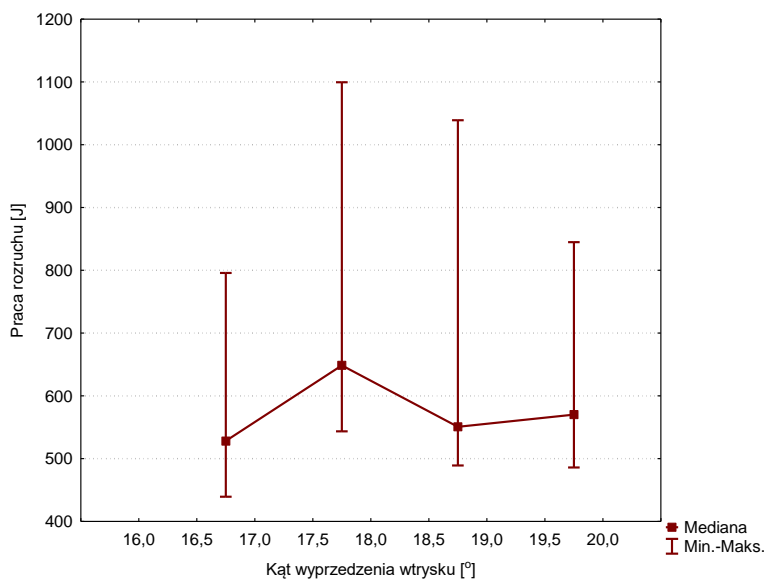
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji pracy rozruchu [-]	Suma rang
16,6	63	3464,00
17,6	62	6785,00
18,6	62	13257,00
19,6	62	7619,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 249$) = 156,7774	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.63. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala-Wallis: H (stopnie swobody = 3, $N = 249$) = 156,7774, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0002	0,001	0,0001
17,6	0,0002	–	0,001	1,0000
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0001
19,6	0,0001	1,0000	0,001	–

Na rysunku 3.35, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne dla pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.

W tabeli 3.64, podano wyniki testu Kruskala-Wallisa porównania rozkładów pracy rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach z nominalną dawką paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości pracy rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.66.



Rys. 3.35. Praca rozrusznika podczas pierwszego rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

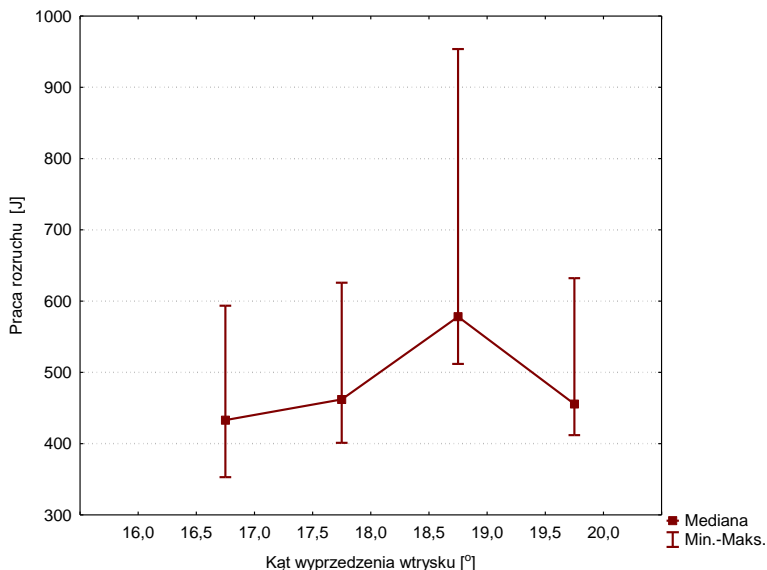
Tabela 3.64. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji pracy rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	4356,00
17,6	61	11828,00
18,6	61	6266,00
19,6	61	7685,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 245$) = 100,4965	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.65. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 245$) = 100,4965, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0001	0,0666	0,0002
17,6	0,0001	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0666	0,0001	–	0,4193
19,6	0,0002	0,0001	0,4193	–

Na rysunku 3.36, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne dla pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.



Rys. 3.36. Praca rozrusznika podczas pierwszego rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

W tabeli 3.66, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów pracy rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości pracy rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.67.

Tabela 3.66. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

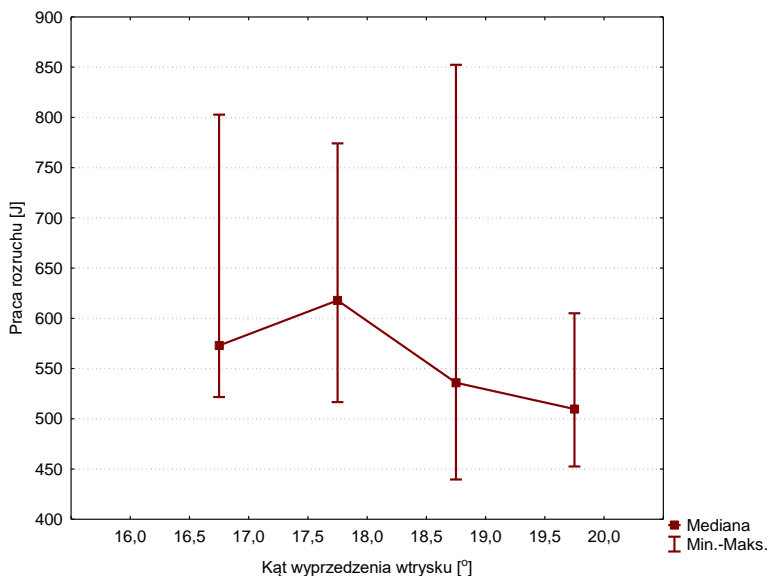
Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji pracy rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	4012,00
17,6	62	7131,00
18,6	65	13868,00
19,6	62	6615,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 251$) = 144,0882	
	$p = 0,0001$	

Tabela 3.67. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 251$) = 144,0882, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0007	0,001	0,0077
17,6	0,0007	–	0,001	1,0000
18,6	0,0001	0,0001	–	0,0001
19,6	0,0077	1,0000	0,001	–

Na rysunku 3.37, przedstawiono uzyskane zależności empiryczne dla pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy zwiększonej dawce paliwa: 2 i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.

W tabeli 3.68, podano wyniki testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów pracy rozrusznika dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku paliwa przy rozruchach ze zwiększoną dawką paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Wyniki z procedury wzajemnego porównania średnich rang z median opisujących rozkłady wartości pracy rozrusznika przedstawiono w tabeli 3.69.



Rys. 3.37. Praca rozrusznika podczas pierwszego rozruchu w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.68. Podsumowanie testu Kruskala–Wallisa porównania rozkładów pracy rozrusznika w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2 i ciśnieniem otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	Liczba obserwacji pracy rozruchu [-]	Suma rang
16,6	62	9475,00
17,6	60	11178,00
18,6	61	5816,00
19,6	61	3421,00
Test Kruskala–Wallisa	H (liczba stopni swobody = 3, $N = 244$) = 123,5147 $p = 0,0001$	

Tabela 3.69. Wartości prawdopodobieństwa p dla porównań wielokrotnych. Test Kruskala–Wallisa: H (stopnie swobody = 3, $N = 244$) = 123,5147, $p = 0,0001$

Kąt wyprzedzenia wtrysku [°]	16,6	17,6	18,6	19,6
16,6	–	0,0529	0,0002	0,0001
17,6	0,0529	–	0,0001	0,0001
18,6	0,0002	0,0001	–	0,0128
19,6	0,00001	0,0001	0,0128	–

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można stwierdzić, występowanie istotnych statystycznie różnic w pracy rozrusznika w zależności

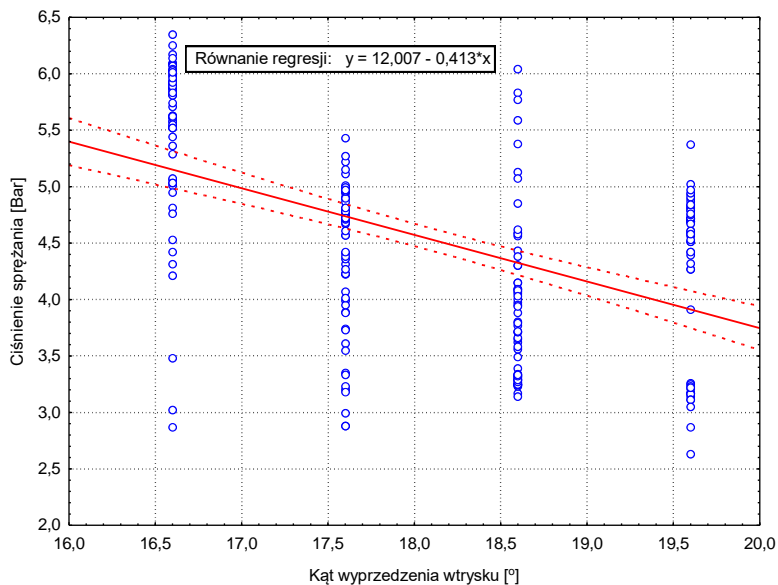
od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Zauważono, że ze względu na ustawienie kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa najmniejsza praca rozrusznika wykonana jest przy wartości kąta $16,6^\circ$ OWK oraz przy ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza wynoszącym 21 MPa. Występuje to przy obu ustawieniach dawki paliwa: 1 i 2.

3.2.6. Analiza regresji ciśnień w komorze spalania dla wybranych parametrów rozruchu

W tym rozdziale przedstawiono analizę zmian wartości ciśnień w komorze spalania w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa jednocylindrowego silnika spalinowego o ZS. W tym celu zastosowano prostą analizę regresji liniowej. W regresji liniowej zakłada się, że wzrostowi jednej zmiennej (predyktor) towarzyszy wzrost lub spadek na drugiej zmiennej. Analiza regresji liniowej ma na celu wyliczenie takich współczynników regresji aby model jak najlepiej przewidywał wartość zmiennej zależnej i aby błąd oszacowania był jak najmniejszy.

Uzyskane wyniki analizy przedstawiono na kolejnych wykresach w postaci równań regresji dla: ciśnienia sprężania – p_s , ciśnienia pierwszego cyklu spalania – p_1 oraz ciśnienia w kolejnych cyklach spalania – p_{nor} (zobacz rysunek 2.2), w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Zależności te przedstawiono na kolejnych rysunkach 3.38÷3.49. Natomiast podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnień w komorze spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa w trakcie rozruchu jednocylindrowego silnika o ZS przedstawiono w kolejnych tabelach 3.70÷3.81.

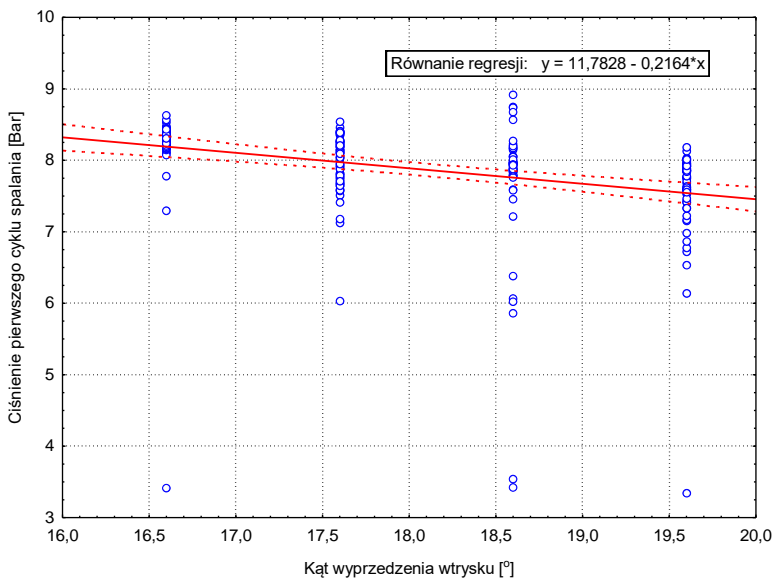
Na rysunkach 3.38÷3.40, przedstawiono uzyskane empiryczne zależności ciśnienia sprężania – p_s , ciśnienia pierwszego cyklu spalania – p_1 oraz ciśnienia w kolejnych cyklach spalania – p_{nor} w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy ustalonych parametrach rozruchu: nominalna dawka paliwa: 1, i ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. W tabelach 3.70÷3.72, przedstawiono podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnień w komorze spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa podczas rozruchu.



Rys. 3.38. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia sprężania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.70. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia sprężania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

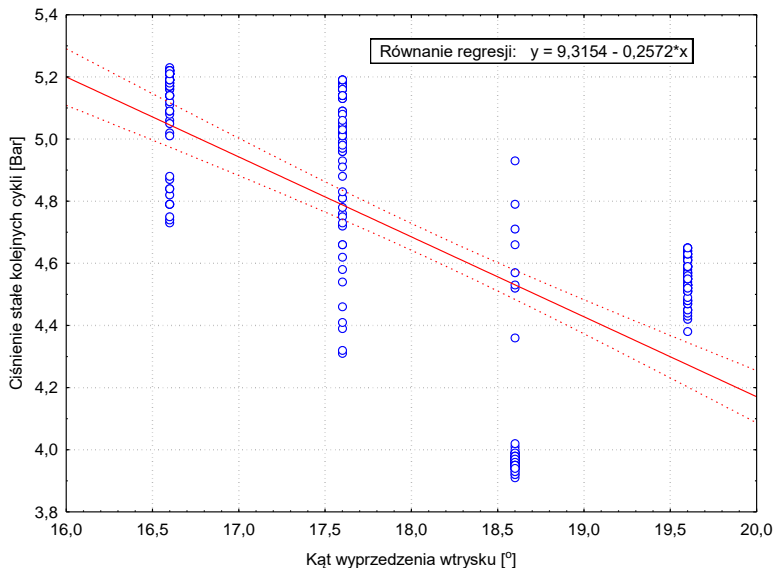
	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki <i>t</i> -Studenta	Poziom <i>p</i>
Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>	-0,413	0,0448	-9,2748	0,0001
Wyraz wolny <i>b</i>	12,007	0,8106	14,8473	0,0001
<i>r</i> – współczynnik korelacji	0,5091			
<i>r</i> ² – moc korelacji	0,2591			
Wartość statystyki <i>F</i> -Snedecora	86,023			
Poziom <i>p</i>	0,0001			
Błąd estymacji	0,9898			



Rys. 3.39. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia pierwszego cyklu spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.71. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia pierwszego cyklu spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki <i>t</i> -Studenta	Poziom <i>p</i>
Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>	-0,2164	0,0395	-5,4801	0,0001
Wyraz wolny <i>b</i>	11,7828	0,7157	16,4634	0,0001
<i>r</i> – współczynnik korelacji		0,3299		
<i>r</i> ² – moc korelacji		0,1088		
Wartość statystyki <i>F</i> -Snedecora		30,031		
Poziom <i>p</i>		0,0001		
Błąd estymacji		0,6974		



Rys. 3.40. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia stałego kolejnych cykli spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

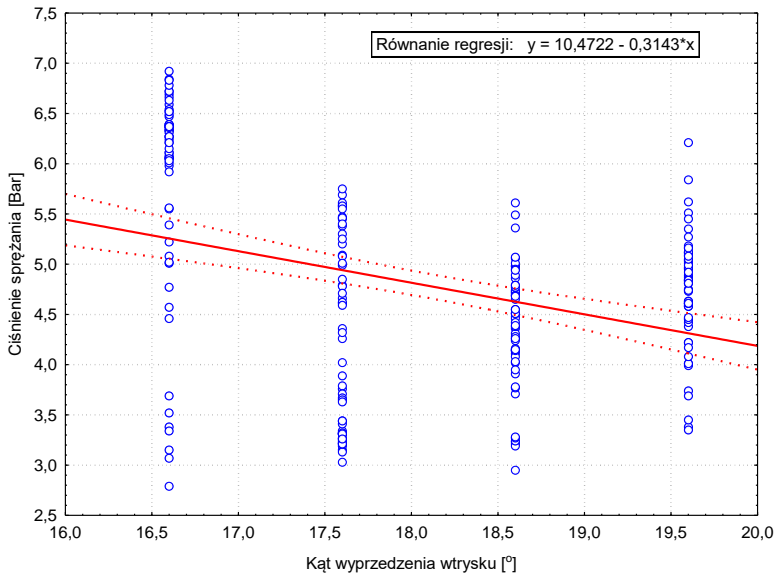
Tabela 3.72. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia stałego kolejnych cykli spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki t -Studenta	Poziom p
Współczynnik kierunkowy prostej a	-0,2572	0,0195	-13,2219	0,0001
Wyraz wolny b	9,3154	0,3527	26,4152	0,0001
r – współczynnik korelacji	0,6446			
r^2 – moc korelacji	0,4155			
Wartość statystyki F -Snedecora	174,82			
Poziom p	0,0001			
Błąd estymacji	0,3437			

Analizując przedstawione na wykresach (rysunki 3.38 i 3.40) dane można zauważyć, że wartości ciśnienia (p_s , p_{nor}) wyraźnie maleją wraz ze wzrostem wartości kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla analizowanych parametrów rozruchu przy nominalnej dawce paliwa oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. W przypadku ciśnienia pierwszego cyklu spalania – p_1 tendencja jest podobna, natomiast spadek uzyskanych wartości jest znacznie mniejszy (rysunek

3.39). Przedstawione tendencje potwierdzają umieszczone w tabelach 3.70÷3.72, wartości współczynnika kierunkowej prostej.

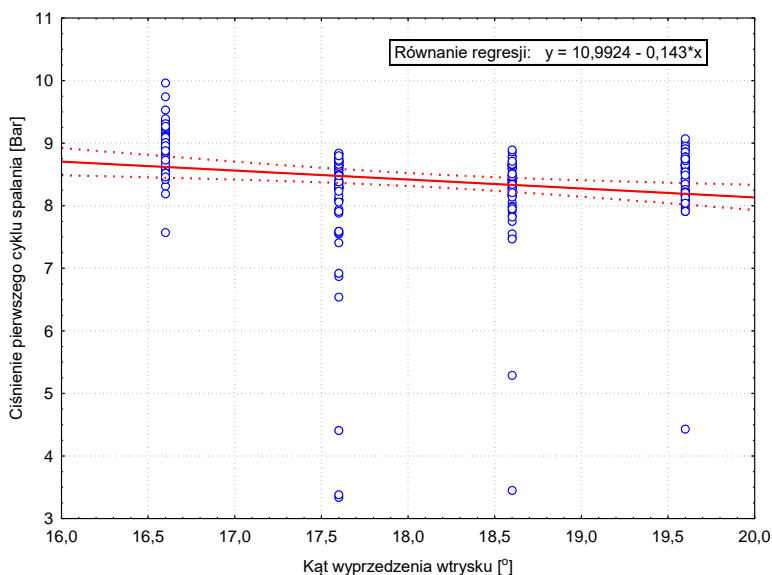
Na rysunkach 3.41÷3.43, przedstawiono zależności ciśnienia sprężania – p_s , ciśnienia pierwszego cyklu spalania – p_1 oraz ciśnienia w kolejnych cyklach spalania – p_{nor} w funkcji kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przy nominalnej dawce paliwa: 1, i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. W tabelach 3.73÷3.75, przedstawiono podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnień w komorze spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa podczas rozruchu.



Rys. 3.41. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia sprężania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.73. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia sprężania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

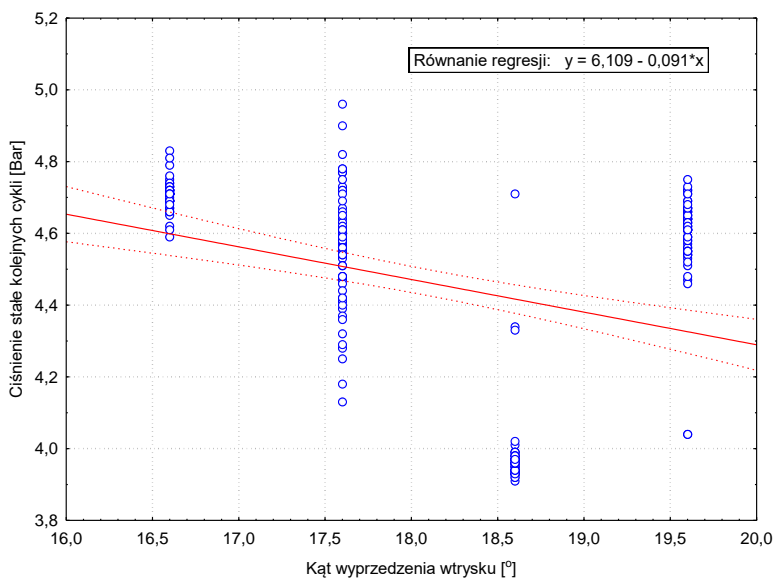
	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki t -Studenta	Poziom p
Współczynnik kierunkowy prostej a	-0,3143	0,0548	-5,7619	0,0001
Wyraz wolny b	10,4722	0,9932	10,5668	0,0001
r – współczynnik korelacji	0,3474			
r^2 – moc korelacji	0,1207			
Wartość statystyki F -Snedecora	33,200			
Poziom p	0,0001			
Błąd estymacji	0,9599			



Rys. 3.42. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia pierwszego cyklu spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.74. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia pierwszego cyklu spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki t -Studenta	Poziom p
Współczynnik kierunkowy prostej a	-0,143	0,0467	-3,0792	0,0024
Wyraz wolny b	10,9924	0,8462	13,0065	0,0001
r – współczynnik korelacji	0,1942			
r^2 – moc korelacji	0,0378			
Wartość statystyki F -Snedecora	9,4813			
Poziom p	0,0001			
Błąd estymacji	0,8178			



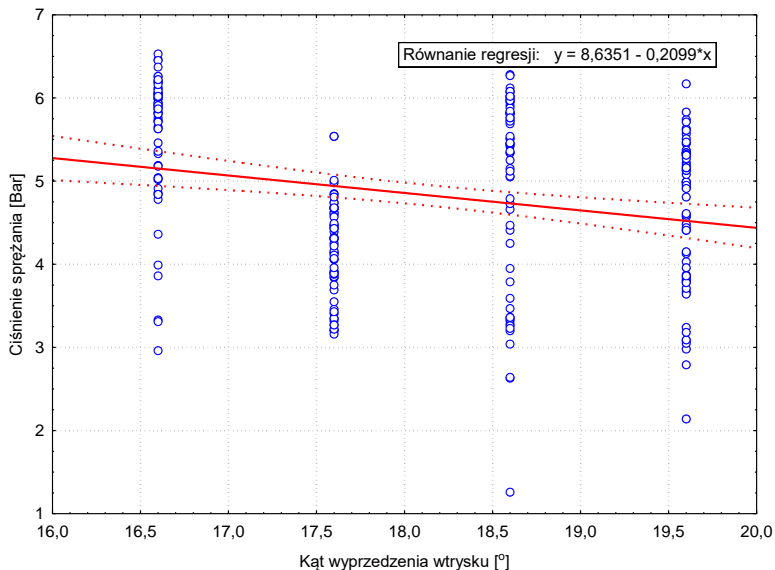
Rys. 3.43. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia stałego kolejnych cykli spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.75. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia stałego kolejnych cykli spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 1, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki <i>t</i> -Studenta	Poziom <i>p</i>
Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>	-0,091	0,0165	-5,5351	0,0001
Wyraz wolny <i>b</i>	6,109	0,2980	20,5036	0,0001
<i>r</i> – współczynnik korelacji	0,3353			
<i>r</i> ² – moc korelacji	0,1124			
Wartość statystyki <i>F</i> -Snedecora	30,635			
Poziom <i>p</i>	0,0001			
Błąd estymacji	0,2878			

Analizując przedstawione na wykresach (rysunki 3.41÷3.43) dane podobnie jak poprzednio można zauważyć, że wartości ciśnienia (p_s , p_1 , p_{nor}) również maleją wraz ze wzrostem wartości kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla analizowanych parametrów rozruchu przy zwiększonej dawce paliwa: 1 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. Przedstawione tendencje potwierdzają umieszczone w tabelach 3.73÷3.75, wartości współczynnika kierunkowej prostej.

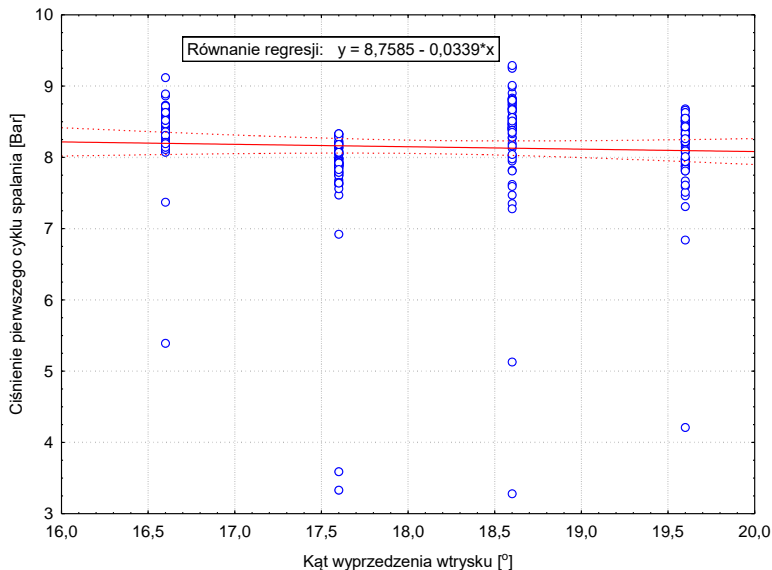
Na rysunkach 3.44÷3.46, przedstawiono uzyskane empiryczne zależności ciśnienia sprężania – p_s , ciśnienia pierwszego cyklu spalania – p_1 oraz ciśnienia w kolejnych cyklach spalania – p_{nor} przy zwiększonej dawce paliwa: 2, i ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa. W tabelach 3.76÷3.78, przedstawiono podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnień w komorze spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa podczas rozruchu.



Rys. 3.44. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia sprężania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.76. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia sprężania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

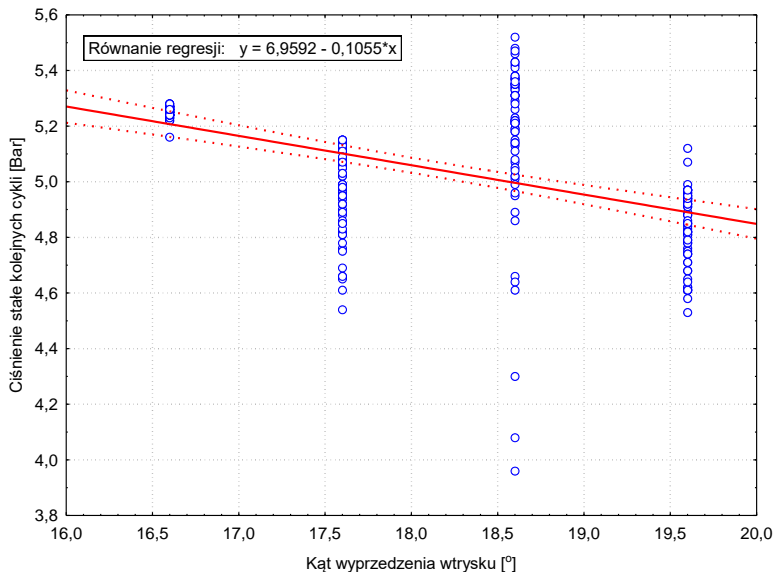
	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki <i>t</i> -Studenta	Poziom <i>p</i>
Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>	-0,2099	0,0567	-3,7069	0,0003
Wyraz wolny <i>b</i>	8,6351	1,0271	8,4076	0,0001
<i>r</i> – współczynnik korelacji	0,2287			
<i>r</i> ² – moc korelacji	0,0523			
Wartość statystyki <i>F</i> -Snedecora	13,741			
Poziom <i>p</i>	0,0003			
Błąd estymacji	0,9981			



Rys. 3.45. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia pierwszego cyklu spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.77. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia pierwszego cyklu spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki <i>t</i> -Studenta	Poziom <i>p</i>
Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>	-0,0339	0,0424	-0,8001	0,4245
Wyraz wolny <i>b</i>	8,7585	0,7682	11,4014	0,0001
<i>r</i> – współczynnik korelacji	0,0507			
<i>r</i> ² – moc korelacji	0,0026			
Wartość statystyki <i>F</i> -Snedecora	0,6401			
Poziom <i>p</i>	0,4245			
Błąd estymacji	0,7466			



Rys. 3.46. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia stałego kolejnych cykli spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

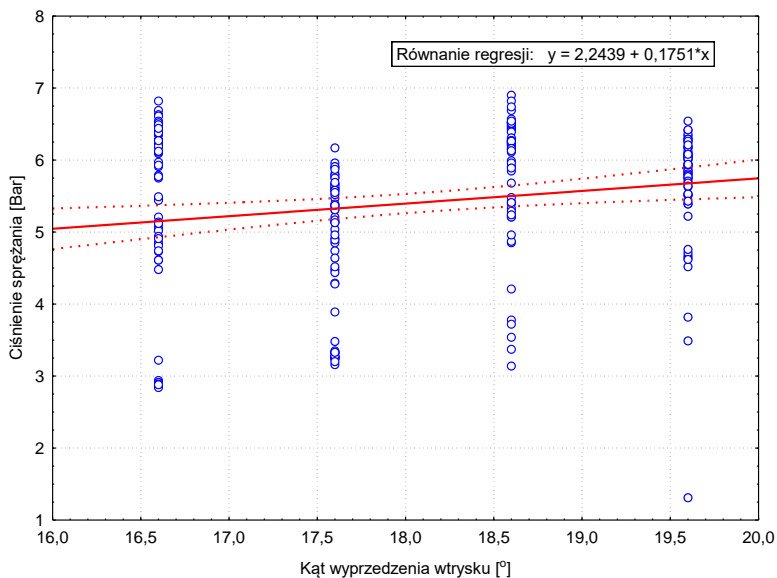
Tabela 3.78. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia stałego kolejnych cykli spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki <i>t</i> -Studenta	Poziom <i>p</i>
Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>	-0,1055	0,0124	-8,5116	0,0001
Wyraz wolny <i>b</i>	6,9592	0,2251	30,9377	0,0001
<i>r</i> – współczynnik korelacji	0,4748			
<i>r</i> ² – moc korelacji	0,2254			
Wartość statystyki <i>F</i> -Snedecora	72,447			
Poziom <i>p</i>	0,0001			
Błąd estymacji	0,2186			

Analizując przedstawione na wykresach (rysunki 3.44÷3.46) dane można zauważyć, że badane wartości ciśnienia (p_s , p_1 , p_{nor}) maleją wraz ze wzrostem wartości kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu przy zwiększonej dawce paliwa: 2 oraz ciśnieniu otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa.

Na rysunkach 3.47÷3.49, przedstawiono uzyskane empiryczne zależności ciśnienia sprężania – p_s , ciśnienia pierwszego cyklu spalania – p_1 oraz ciśnienia w kolejnych cyklach spalania – p_{nor} przy ustalonych parametrach rozruchu:

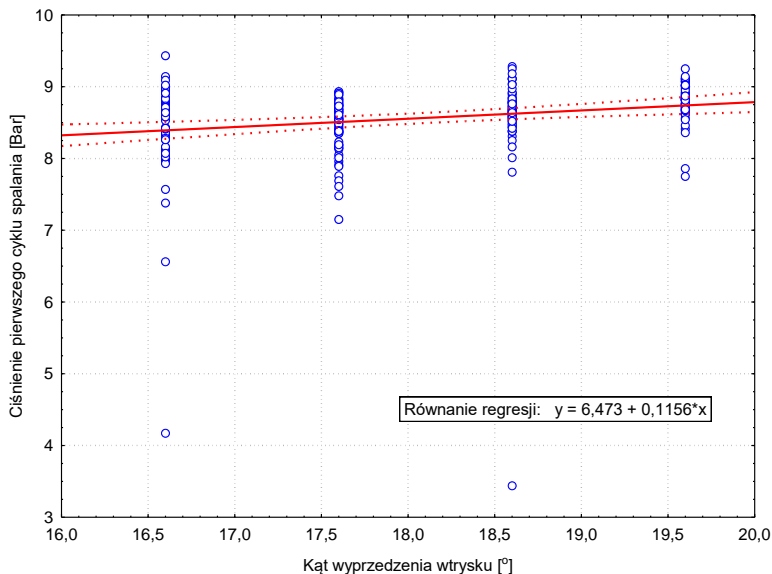
dawka paliwa: 2, i ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa. W tabelach 3.79÷3.81, przedstawiono podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnień w komorze spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa podczas rozruchu.



Rys. 3.47. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia sprężania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.79. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia sprężania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

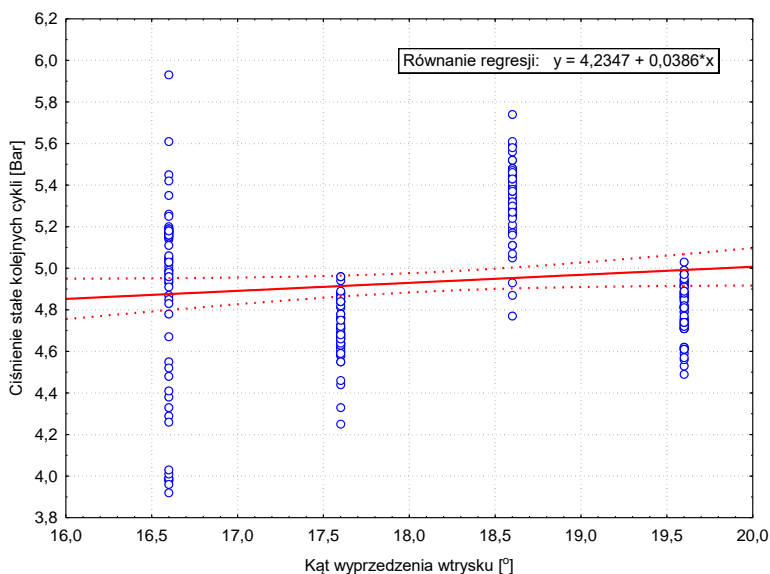
	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki t -Studenta	Poziom p
Współczynnik kierunkowy prostej a	0,1751	0,0603	2,9069	0,0041
Wyraz wolny b	2,2439	1,0920	2,0543	0,0410
r – współczynnik korelacji	0,1841			
r^2 – moc korelacji	0,0339			
Wartość statystyki F -Snedecora	8,4497			
Poziom p	0,0041			
Błąd estymacji	1,0550			



Rys. 3.48. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia pierwszego cyklu spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.80. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia pierwszego cyklu spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki <i>t</i> -Studenta	Poziom <i>p</i>
Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>	0,1156	0,0322	3,5948	0,0004
Wyraz wolny <i>b</i>	6,473	0,5829	11,10576	0,0001
<i>r</i> – współczynnik korelacji	0,2256			
<i>r</i> ² – moc korelacji	0,0509			
Wartość statystyki <i>F</i> -Snedecora	12,922			
Poziom <i>p</i>	0,0004			
Błąd estymacji	0,5631			



Rys. 3.49. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia stałego kolejnych cykli spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

Tabela 3.81. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia stałego kolejnych cykli spalania od kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa dla parametrów rozruchu: dawka paliwa: 2, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 26 MPa

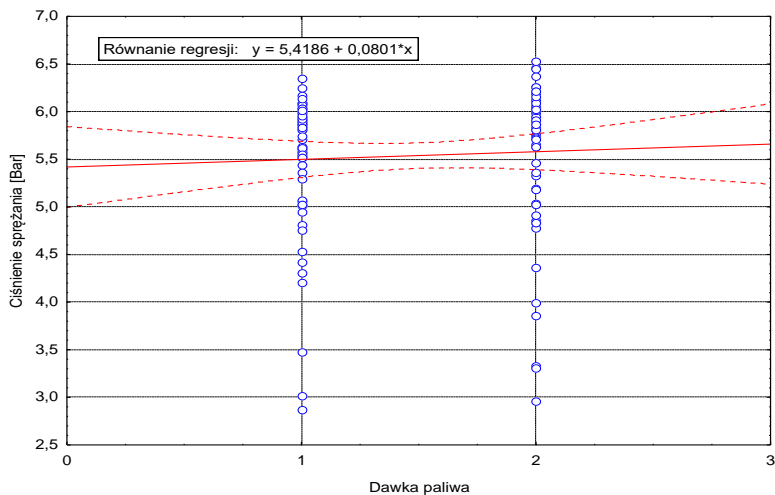
	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki <i>t</i> -Studenta	Poziom <i>p</i>
Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>	0,0386	0,0208	1,85763	0,0645
Wyraz wolny <i>b</i>	4,2347	0,3769	11,2369	0,0001
<i>r</i> – współczynnik korelacji	0,1189			
<i>r</i> ² – moc korelacji	0,0142			
Wartość statystyki <i>F</i> -Snedecora	3,4508			
Poziom <i>p</i>	0,0645			
Błąd estymacji	0,3641			

Na podstawie przeprowadzonej analizy regresji wartości ciśnień uzyskiwanych w komorze spalania można zaobserwować spadek wartości ciśnienia p_s i p_1 , wraz ze zwiększeniem kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa (dla wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza: 21 i 26 MPa oraz nominalnej dawki paliwa: 1). Niekorzystne warunki samozapłonu paliwa potęgują fakt jego gorszego rozpylenia i odparowania, powiązanego ze spadkiem wartości prędkości obrotowej pompy wtryskowej i wzrostem lepkości paliwa [17].

Powoduje to istotne zakłócenia w organizacji procesu spalania paliwa, co uwidacznia się w dużych wartościach ciśnienia p_1 . Mniejsza dawka paliwa: 1 skutkuje zmniejszeniem efektu doszczelniającego komorę spalania przez doprowadzone paliwo. Ponadto następuje wydłużenie czasu na odparowanie części osiadłego paliwa ze ścianek cylindra. Również w przypadku ciśnienia w kolejnych cyklach spalania – p_{nor} występuje spadek uzyskiwanych wartości ciśnienia w zależności od wzrostu wartości kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa. Natomiast dla ustalonych parametrów procesu rozruchu: zwiększona dawka paliwa: 2 i wyższe ciśnienie otwarcia wtryskiwacza wynoszące 26 MPa, następuje wzrost wartości analizowanych ciśnień (ostatnie 3 wykresy, rysunki 3.47÷3.49). Większa ilość paliwa w komorze spalania powoduje lepsze warunki dla doszczelnienia układu TPC i osiadania paliwa na ściankach cylindra. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia jest zmiana wartości współczynnika kierunkowego prostej a (patrz tabele 3.79÷3.81). Wtryskiwane do cylindra paliwo podczas procesu rozruch nie od razu jest spalane (brak wystąpienia samozapłonu), co jak zauważono w pracy [17] skutkuje większą emisją węglowodorów. Zwiększona dawka paliwa podczas rozruchu sprzyja poprawie warunków do wytworzenia samozapłonów. Wtedy w fazie rozruchu, w której występują samozapłony, część paliwa ulega spalaniu. Spalanie to odbywa się w bardzo niekorzystnych warunkach przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej oraz przy zimnych ściankach cylindra. Występuje więc intensywny efekt niecałkowitego i niezupełnego spalania oraz efekt wygaszania płomienia przy ściankach (efekt przyścienny), a także szczelinowy [17, 131]. W związku z tym następuje wzrost emisji węglowodorów oraz cząstek stałych PM, efektem czego jest większe zadymienie spalin.

Na rysunkach 3.50 i 3.51, przedstawiono uzyskane empiryczne zależności ciśnienia sprężania – p_s , oraz ciśnienia pierwszego cyklu spalania – p_1 od dawki paliwa przy ustalonych parametrach rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa.

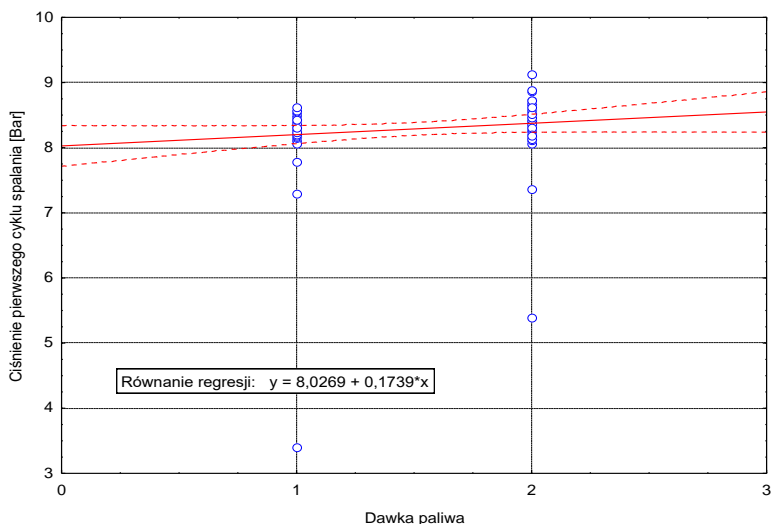
W tabelach 3.82÷3.83, przedstawiono podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnień w komorze spalania od dawki paliwa podczas rozruchu.



Rys. 3.50. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia sprężania od dawki paliwa dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.82. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia sprężania od dawki paliwa dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki t -Studenta	Poziom p
Współczynnik kierunkowy prostej a	0,0802	0,1357	0,5910	0,5557
Wyraz wolny b	5,4186	0,2139	25,3336	0,0001
r – współczynnik korelacji	0,0533			
r^2 – moc korelacji	0,0029			
Wartość statystyki F -Snedecora	0,3493			
Poziom p	0,5556			
Błąd estymacji	0,7581			

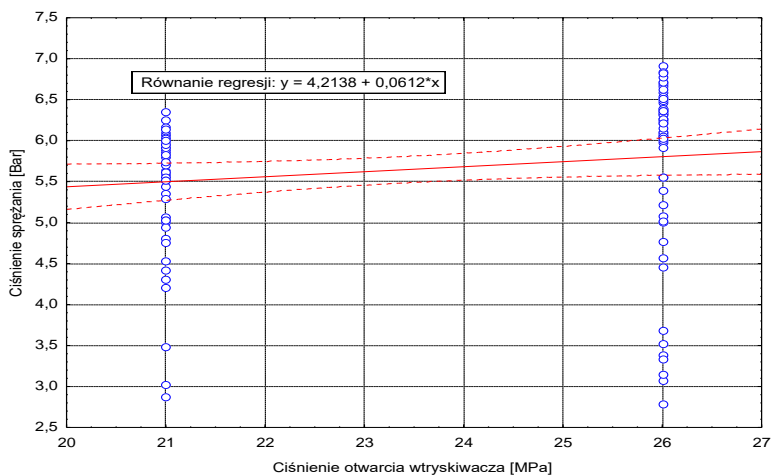


Rys. 3.51. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia pierwszego cyklu spalania od dawki paliwa dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

Tabela 3.83. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia pierwszego cyklu spalania od dawki paliwa dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza: 21 MPa

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki <i>t</i> -Studenta	Poziom <i>p</i>
Współczynnik kierunkowy prostej <i>a</i>	0,1739	0,0997	1,7446	0,0836
Wyraz wolny <i>b</i>	8,0269	0,1573	51,0560	0,0001
<i>r</i> – współczynnik korelacji	0,1554			
<i>r</i> ² – moc korelacji	0,0242			
Wartość statystyki <i>F</i> -Snedecora	3,0434			
Poziom <i>p</i>	0,0836			
Błąd estymacji	0,5572			

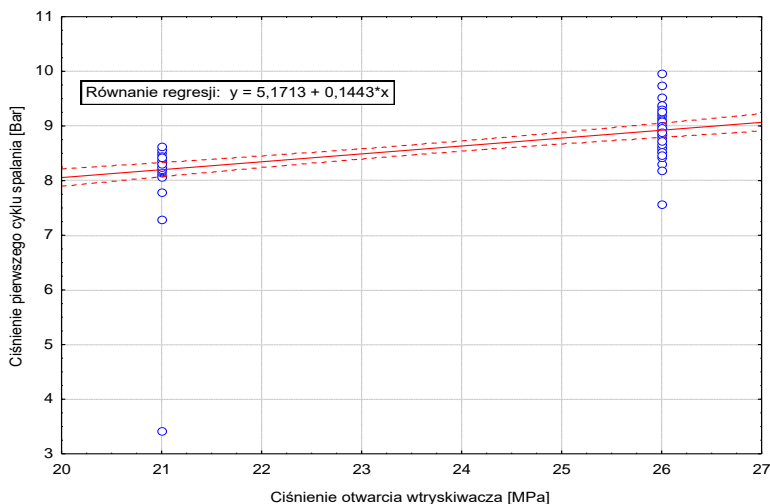
Na rysunkach 3.52 i 3.53, przedstawiono uzyskane empiryczne zależności ciśnienia sprężania – p_s , oraz ciśnienia pierwszego cyklu spalania – p_1 od wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza przy ustalonych parametrach rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$ i dawka paliwa: 1. W tabelach 3.84÷3.85, przedstawiono podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnień w komorze spalania od dawki paliwa podczas rozruchu.



Rys. 3.52. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia sprężania od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, dawki paliwa: 1

Tabela 3.84. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia sprężania od otwarcia wtryskiwacza dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa $16,6^\circ$, dawki paliwa: 1

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki t -Studenta	Poziom p
Współczynnik kierunkowy prostej a	0,0612	0,0326	1,8811	0,0624
Wyraz wolny b	4,2138	0,7682	5,4859	0,0001
r – współczynnik korelacji	0,1673			
r^2 – moc korelacji	0,0279			
Wartość statystyki F -Snedecora	3,5383			
Poziom p	0,0624			
Błąd estymacji	0,9092			



Rys. 3.53. Uzyskana empiryczna zależność ciśnienia pierwszego cyklu spalania od ciśnienia otwarcia wtryskiwacza dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6°, dawki paliwa: 1

Tabela 3.85. Podsumowanie wyników regresji liniowej ciśnienia pierwszego cyklu spalania od otwarcia wtryskiwacza dla parametrów rozruchu: kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa 16,6°, dawki paliwa: 1

	Wartość	Błąd standardowy	Wartość statystyki t -Studenta	Poziom p
Współczynnik kierunkowy prostej a	0,1443	0,0186	7,7569	0,0001
Wyraz wolny b	5,1714	0,4392	11,7759	0,0001
r – współczynnik korelacji	0,5732			
r^2 – moc korelacji	0,3285			
Wartość statystyki F -Snedecora	60,169			
Poziom p	0,0001			
Błąd estymacji	0,5199			

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej można sformułować następujący wniosek ogólny: paliwo wtryskiwane w trakcie początku rozruchu ma efekt doszczelniający komorę spalania. Dlatego też poprzez sterowanie wartościami dawki paliwa oraz ciśnienia otwarcia wtryskiwacza (wzrost lub ich zmniejszanie) można zmienić opory wynikłe z doszczelnienia się komory spalania stawiane podczas napędzania rozrusznikiem zespołów ruchowych silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym.

4. PODSUMOWANIE

Badania procesu rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym stanowią osobny obszar wiedzy w dziedzinie tłokowych silników spalinowych. Podczas rozruchu zachodzą zjawiska i procesy o istotnie różnych cechach od tych zachodzących w normalnych warunkach pracy silnika. Jak przedstawiono w części wprowadzającej istnieją metody badań rozruchowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym prowadzone na specjalnych stanowiskach badawczych oraz w określonym celu poznawczym. Jak zaznaczono w [95] celem rozwoju teorii rozruchu jest zapewnienie możliwości interpretacji, wyjaśnienia i przekazania wiedzy o przebiegu zjawisk i procesów obserwowanych w okresie uruchamiania silników spalinowych.

Analiza stanu wiedzy dotycząca rozruchu silników spalinowych o zapłonie samoczynnym wykazała, że istnieją odpowiednie rozwiązania techniczne pozwalające na uzyskanie automatycznego sterowania procesem rozruchu (układy Common Rail). Pomimo rozwoju tej dziedziny badań silnikowych wciąż występują problemy eksploatacyjne związane z czynnikami regulacyjnymi, dlatego podjęta w monografii problematyka jest stale aktualna. Przeprowadzono analizę wpływu wybranych parametrów regulacyjnych wtrysku paliwa (tj. kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, dawka paliwa oraz ciśnienie otwarcia wtryskiwacza) na parametry rozruchu (maksymalny prąd rozruchu, napięcie na zaciskach akumulatora, moc pobierana przez rozrusznik, praca wykonana przez rozrusznik, i czas trwania rozruchu) oraz ciśnienia w komorze spalania w trakcie przebiegu procesu rozruchu silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym w temperaturach otoczenia. Badania zrealizowano na jednocyndrowym silniku spalinowym o zapłonie samoczynnym, na którym zmieniano ustawienia parametrów wtrysku paliwa i badano ich wpływ na przebieg procesu rozruchu dla określonego stanu cieplnego silnika.

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej wyników można stwierdzić, że wzrostowi dawki paliwa towarzyszy wzrost następujących parametrów rozruchu: spadek napięcia na akumulatorze na początku rozruchu, czas pracy rozrusznika, ciśnienie sprężania, ciśnienie pierwszego cyklu spalania. W tabeli 4.1 zestawiono podsumowanie przeprowadzonych wyników analiz wystąpienie istotnie statystycznego wpływu dawki paliwa na wybrany parametr rozruchu oraz jak wpływ dawki paliwa na wartość medialną danego parametru.

Tabela 4.1. Zestawienie wpływu wzrostu dawki paliwa na analizowane parametry rozruchu

Parametr rozruchu	Wpływ wzrostu dawki paliwa	Wartość mediany	Procentowa wartość zmiany
Maksymalny prąd rozruchu I_{max}	Nie wpływa	Spadek mediany z 250 A do 241 A	-3,6%
Różnica napięć na akumulatorze przed i po rozruchu	Wpływa	Spadek mediany z 0,2 V do 0,19 V	-5%
Spadek napięcia na akumulatorze na początku rozruchu	Wpływa	Wzrost mediany z 3,47 V do 3,55 V	2,3%
Moc średnia rozrusznika	Nie wpływa	Spadek mediany z 915 W do 910 W	-0,55%
Czas pracy rozrusznika	Nie wpływa	Wzrost mediany z 470 ms do 485 ms	3,2%
Ciśnienie sprężania p_s	Nie wpływa	Wzrost mediany z 5,55 bar do 5,75 bar	3,6%
Ciśnienie pierwszego cyklu spalania p_1	Wpływa	Wzrost mediany z 8,3 bar do 8,4 bar	1,2%

Na podstawie analizy statystycznej uzyskanych wyników badań określono parametry regulacyjne dla badanego jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym, przy których proces jego rozruchu przebiega najkorzystniej w określonym stanie cieplnym. Są to odpowiednio: kąt wyprzedzenia wtrysku wynoszący 17,6 °OWK, nominalna dawka paliwa 1 oraz wyższe, wynoszące 26 MPa ciśnienie otwarcia wtryskiwacza. Wykazano, że realizując proces rozruchu przy tak ustawionych wartościach parametru wtrysku paliwa proces ten zachodzi także najkorzystniej z punktu widzenia zjawisk elektrycznych układu rozruchowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym.

Na podstawie przeprowadzonych analiz literaturowych oraz własnych eksperymentalnych badań rozruchu jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym można sformułować następujące wnioski końcowe:

1. Proces zimnego rozruchu jednocylindrowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym jest procesem niepowtarzalnym, a każda próba uruchomienia silnika spalinowego jest inna.
2. Istnieją takie parametry regulacyjne wtrysku paliwa, dla których proces zimnego rozruchu przebiega najkorzystniej.
3. Wykazano, że możliwe jest sterowanie natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik (I_{max}) w początkowej fazie procesu rozruchu, natomiast w dalszej jego fazie jest to już nie możliwe.
4. Potwierdzono występowanie „efektu doszczelniającego” komorę spalania przez wtryskiwane paliwo oraz wpływu stanu cieplnego na opory sprężania ładunku w cylindrze badanego silnika spalinowego.

5. Dokonano analizy regresji przebiegu ciśnień w komorze spalania w funkcji parametrów układu zasilania paliwem, dla których uzyskano wartości optymalne tych parametrów regulacyjnych dla warunków rozruchu badanego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym.

Z punktu widzenia operatora silnika spalinowego bardzo istotne jest uzyskanie powodzenia rozruchu. Uruchomienie silnika pozwala na pracę zasilanych za jego pomocą środków transportu czy innych urządzeń odbiorczych.

Podsumowując zrealizowane badania rozruchowe należy stwierdzić, że uzyskane wyniki badań nie wyczerpują możliwości analiz i rozwoju badań procesu rozruchu silników spalinowych. Na właściwości rozruchowe wpływa wiele czynników nie analizowanych w niniejszej pracy np.: wpływ różnego rodzaju paliw na właściwości rozruchowe czy doskonalenie metod diagnostycznych silników spalinowych za pomocą parametrów rozruchu, co może być istotne dla producentów rozruszników elektrycznych.

Bibliografia

- [1] Abramek K.F., *Change of a compression ratio and its influence on the gas scavenge effect*, „Archiwum Motoryzacji”, nr 2, 2008, p. 103–110.
- [2] Abramek K.F., *Ocena wpływ paliwa w początkowej fazie rozruchu silnika na intensywność przedmuchów gazów do skrzyni korbowej*, „Zeszyty Naukowe WSOWL”, nr 4(174), 2014, s. 98–103.
- [3] Abramek K.F., *Phenomenon of load losses at the engine start-up stage*, „TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa” – PAN OL, no. 8A, 2008, p. 7–11.
- [4] Abramek K.F., *Porównanie wybranych metod oceny stanu technicznego węzła Tłok-Pierścienie-Cylinder*, „MOTROL”, nr 8A, 2006, s. 7–12.
- [5] Abramek K.F., *Wpływ prędkości obrotowej na właściwości rozruchowe silników z zapłonem samoczynnym*, „MOTROL”, nr 8, 2006, s. 5–11.
- [6] Abramek K.F., *Zmiana stopnia sprężania i jej wpływ na właściwości rozruchowe silników z zapłonem samoczynnym*, „Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie”, nr 10(82), 2006, s. 11–19.
- [7] Abramek K.F., Stoeck T., Osipowicz T., *Statistical evaluation of the corrosive wear of fuel injector elements used in Common Rail Systems*, „Strojnicki vestnik – Journal of Mechanical Engineering”, vol. 61, no. 2, 2015, p. 91–98.
- [8] Ambrozik A., Ambrozik T., Łagowski P., *Fuel impact on emissions of harmful components of the exhaust gas from the CI engine during cold start-up*, „Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”, vol. 17, no. 1, 2015, p. 95–99.
- [9] Ambrozik A., Jankowski A., Ślęzak M., *Heat release of diesel engine fuelled with RME*, „Journal of KONES Powertrain and Transport”, vol. 17, no. 4, 2010, p. 9–18.
- [10] Armas O., García-Contreras R., Ramos Á., *Pollutant emissions from engine starting with ethanol and butanol diesel blends*, „Fuel Processing Technology”, vol. 100, 2012, p. 63–72.
- [11] Averbukh M., Rivin B., Vinogradov J., *On-Board battery condition diagnostics based on mathematical modeling of an engine starting system*, „SAE Technical Paper” 2007-01-1476.
- [12] Balytskyi O.I., Abramek K.F., *Diagnostic parameter of wear of a piston-bush-cylinder system*, „Materials Science”, vol. 49, no. 2, 2013, p. 234–236.
- [13] Balytskyi O.I., Abramek K.F., Shtoeck T., Osipowicz T., *Diagnostics of degradation of the lock of a sealing ring according to the loss of working gases of an internal combustion engine*, „Materials Science”, vol. 50, no. 1, 2014, p. 156–159.

- [14] Bermudez V., Lujan J.M. Pla B., Linares W.G., *Comparative study of regulated and unregulated gaseous emissions during NEDC in a light-duty diesel engine fueled with Fischer Tropsch and biodiesel fuels*, Biomass and Bioenergy, vol. 35, is. 2, 2011, p. 789–798.
- [15] Bielaczyc P, Merkisz J, Pielecha J., *A method of reducing the exhaust emissions from DI diesel engines by the introduction of a fuel cut off system during cold start*, „SAE Technical Papers” 2001-01-3283.
- [16] Bielaczyc P, Merkisz J, Pielecha J., *Investigation of exhaust emissions from DI diesel engine during cold and warm start*, „SAE Technical Papers” 2001-01-1260.
- [17] Bielaczyc P., Merkisz J., Pielecha J., *Stan cieplny silnika spalinowego a emisja związków szkodliwych*, Poznań 2001.
- [18] Blanc M., Geiger S., Houben H., Hovestadt T., Toedter O., *Second generation ISS diesel cold start technology with pre-heated intake air*, „MTZ”, vol. 67, no. 5, 2006, p. 10–13.
- [19] Broatch A., Lujan J.M., Ruiz S., Olmeda P., *Measurement of hydrocarbon and carbon monoxide emissions during the starting of automotive DI diesel engines*, „International Journal of Automotive Technology”, vol. 9, is. 2, 2008, p. 129–140.
- [20] Broatch A., Ruiz S., Margot X., Gil A., *Methodology to estimate the threshold in-cylinder temperature for self-ignition of fuel during cold start of Diesel engines*, „Energy”, vol. 35, is. 5, 2010, p. 2251–2260.
- [21] Broatch A., Tormos B., Olmeda P., Novella R., *Impact of biodiesel fuel on cold starting of automotive direct injection diesel engines*, „Energy”, no. 73, 2014, p. 653–660.
- [22] Caban J., *Badania elektrycznych parametrów procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym*, „Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska”, vol. 5 z. 3, 2015, s. 79–85.
- [23] Caban J., *Wpływ parametrów wtrysku paliwa na przebieg procesu rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym*, Rozprawa Doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2018.
- [24] Caban J., Drożdziel P., Ignaciuk P., Kordos P., *The impact of changing the fuel dose on chosen parameters of the diesel engine start-up process*, Transport Problems, vol. 14, no. 4, 2019, s. 51–62.
- [25] Caban J., Drożdziel P., Kordos P., *Some results of test stand investigation of diesel engine start-up process*, 18th International Scientific Conference „Armament and Technics of Land Forces”, 7-8.11.2012, Liptovský Mikuláš, Slovakia, 2012, p. 8–14.
- [26] Caban J., Gardyński L., Wrona R., *Badania uszkodzeń wałów korbowych w trakcyjnych silnikach o zapłonie samoczynnym*, „Zeszyty Naukowe WSOWL”, vol. 169, nr 3, 2013, s. 77–87.

- [27] Chmielewski Z., *Eksploatacyjne zużycie silnika spalinowego o ZS*, „TTS Technika Transportu Szybowego”, nr 12, 2015, s. 1808–1812.
- [28] Cichocki W., Garbacik A.K., *Warunki stosowania pomocniczych urządzeń do rozruchu silników spalinowych ZS*, Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”, Szczecin 1998, s. 29–35.
- [29] Cieślakowski B., *Kształtowanie cech fizycznych i chemicznych biopaliw RME w aspekcie doboru odmian rzepaku i eksploatacji pojazdów rolniczych*, „Acta Agrophysica”, t. 15, nr 1, 2010, s. 33–43.
- [30] Ciurys M., Dudzikowski I., *Model matematyczny rozrusznika samochodowego z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, „Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały”, vol. 59, nr 26, 2006, s. 120–133.
- [31] Cui Y., Peng H., Deng K., Shi L., *The effects of unburned hydrocarbon recirculation on ignition and combustion during diesel engine cold starts*, „Energy”, vol. 64, 2014, p. 323–329.
- [32] Cupiał K., Dużyński A., Grzelak J., *Warunki skutecznego rozruchu silnika biogazowego*, „Eksploatacja silników spalinowych”, z. 13, „Problemy rozruchu silników spalinowych”, 2005, s. 37–45.
- [33] Czarnigowski J. *A neural network model-based observer for idle speed control of ignition in SI engine*, „Engineering Applications of Artificial Intelligence”, vol. 23, is. 1, 2010, p. 1–7.
- [34] Desantes J.M., Garcia-Oliver J.M., Pastor J.M., Ramirez-Hernandez J.G., *Influence of nozzle geometry on ignition and combustion for high-speed direct injection diesel engines under cold start conditions*. „Fuel”, vol. 90, is. 11, 2011, p. 3359–3368.
- [35] Drożdziel P., *Rozruchy silnika spalinowego w warunkach nadzorowanej eksploatacji samochodu*, „Tekna Komisji Budowy i Eksploatacji Maszyn, Elektrotechniki, Budownictwa” PAN O/Lublin, t. I, 2003, s. 34–38.
- [36] Drożdziel P., *Start-up of a diesel engine*, „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”, no. 2(34), 2007, p. 51–59.
- [37] Drożdziel P., *Widmo rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jako kryterium oceny warunków użytkowania samochodu*, Warszawa 2009.
- [38] Drożdziel P., *Wybrane parametry pracy i rozruchu silnika spalinowego jako elementy kryterium oceny systemu transportu samochodowego*, „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”, nr 4(32), 2006, s. 6–10.
- [39] Drożdziel P., *Wybrane zagadnienia rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym*, Warszawa 2007.

- [40] Drożdziel P., *Związki pomiędzy wybranymi parametrami rozruchu silnika spalinowego a warunkami eksploatacyjnymi samochodu* „Eksploatacja silników spalinowych”, z. 13, „Rozruch silników spalinowych”, 2005, s. 47–52.
- [41] Drożdziel P., Krzywonos L., *Badania wybranych parametrów rozruchu samochodowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*, „Eksploatacja silników spalinowych”, z. 13, „Rozruch silników spalinowych”, 2005, s. 53–60.
- [42] Drożdziel P., Krzywonos L., Liščak Š., *Selected aspects of diesel engines start-ups*, Lublin 2013.
- [43] Dudzikowski I., Salamon J., Gierak D., *Dynamic and stationary operating states of motor-car starters excited by permanent magnets*, 6th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical System UEES'04, Alushta, Ukraine 2004, p. 59–70.
- [44] Dziubiński M., *Systemy badawcze układu rozruchowego w środkach transportu*, Lublin 2016.
- [45] Dziubiński M., Krasowski E., Plizga K., *Metody rozpoznawania uszkodzeń rozruszników samochodowych*, XXXIII Zimowa Szkoła Niezawodności „Metody badań przyczyn i skutków uszkodzeń”. Sekcja Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN, Szczyrk 2005 s. 106–117.
- [46] Europe H1 2017: diesel car registrations at their lowest share since 2009 (<http://www.jato.com/europe-h1-2017-diesel-car-registrations-lowest-share-since-2009/>) (dostęp z dn. 05.07.2017)
- [47] Fijałkowski S., *Aproksymacja zmian podstawowych znamion działania turbozespołu doładowującego w czasie rozruchu*, „Teka Komisji Budowy i Eksploatacji Maszyn, Elektrotechniki, Budownictwa” PAN O/Lublin, t. I, 2003, s. 184–189.
- [48] Gardyński L., Kiernicki Z., Jakóbiec J., *Wpływ stopnia mieszania oleju napędowego i rzepakowego oraz lekkich olejów opalowych na zużycie elementów aparatury wtryskowej*, 28th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES'2002, Jurata, Warsaw, Institute of Aeronautics BK, 2002, s. 34–40.
- [49] Gęca M., Caban J., Hunicz J., Kasperek D., *Badania modelowe układu katalizacyjnego oczyszczania spalin silnika o zapłonie samoczynnym*, „Logistyka”, nr 3, 2015, s. 1459–1464.
- [50] Giakoumis E.G, Rakopoulos C.D., Dimaratos A.M., Rakopoulos D.C., *Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends*, „Progress in Energy and Combustion Science”, vol. 38, is. 5, 2012, p. 691–715.

- [51] Gołębiowski W., Wolak A., Zając G. *The influence of the presence of a diesel particulate filter (DPF) on the physical and chemical properties as well as the degree of concentration of trace elements in used engine oils*, „Petroleum Science and Technology”, vol. 37, is. 7, 2019, p. 746–755.
- [52] Górski K., Hernik A., Lotko W., Longwic R., *Wpływ zmian temperatury akumulatora kwasowo-ołowiowego na jego wybrane parametry elektryczne*, „Autobusy”, nr 12, 2016, s. 959–962.
- [53] Górski K., Hernik A., Lotko W., Longwic R., *Zmiany wybranych parametrów elektrycznych akumulatorów kwasowo-ołowiowych w okresie ich długotrwałego przechowywania*, „Autobusy”, nr 12, 2016, s. 963–966.
- [54] Gunther H., *Diagnostowanie silników wysokoprężnych*, Warszawa 2009.
- [55] Guzik M., *Analiza współpracy pierścienia tłokowego z półką tłoka*, Rozprawa Doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2012.
- [56] Jansons M., Zha K., Florea R., Taraza D., Henein N., Bryzik W., *Effect of swirl ratio and wall temperature on pre-injection chemiluminescence during starting of an optical diesel engine*, „SAE International Journal of Engines”, vol. 2, is. 2, 2009-01-2712, p. 173–185.
- [57] Jasica G., Wistuba H., *Niezawodnościowe aspekty procesu tribologicznego w parze gładź cylindra-pierścienie tłoka przy ograniczonym smarowaniu*, „Tribologia”, nr 4, 2001, s. 599–609.
- [58] Kalam M.A., Masjuki H.H., *Emissions and deposit characteristics of a small engine when operated in preheated crude palm oil*, „Biomass & Bioenergy”, vol. 27, is. 3, 2004, p. 289–297.
- [59] Kang W., Choi B., Jung S., Park S. *PM and NOx reduction characteristics of LNT/DPF + SCR/DPF hybrid system*, „Energy”, vol. 143, 2018, p. 439–447.
- [60] Kikuchi T., Ito S., Nakayama Y., *Piston friction analysis Rusing a direct-injection single-cylinder gasoline engine*, „JSAE Review”, no. 24, 2003, p. 53–58.
- [61] Kilar H., Uzdowski M., *Wpływ niskich temperatur na opory wewnętrzne zespołów spalinowego silnika tłokowego*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1986.
- [62] Kolanek Cz., Mendyka 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, s. 75–80.
- [63] Koliński K., *Podgrzewany reaktor katalityczny podczas zimnego rozruchu silnika o ZS*, „Autobusy”, nr 12, 2016, s. 261–267.
- [64] Koliński K., *Work study catalytic converter during starting a cold engine*, „Journal of KONES Powertrain and Transport”, vol. 22, no. 1, 2015, p. 157–166.

- [65] Korczewski Z., Zacharewicz M., *Organizacja badań diagnostycznych okrętowego tłokowego silnika spalinowego o ograniczonej podatności kontrolnej*, „Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej”, nr 2(177), 2009, s. 41–56.
- [66] Kordos P., *Stanowiskowa metoda badań niezawodności samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym*, Rozprawa Doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2005.
- [67] Kordos P., *Wpływ warunków pracy silnika spalinowego podczas badań stanowiskowych na zużycie tulei cylindrowej*, „Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”, nr 4(32), 2006, s. 11–15.
- [68] Korin E., Reshef R., Tshernichovesky D., Sher E., *Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of catalytic converter embedded in a phase-change material*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering”, vol. 213, is. 6, 1999, p. 575–583.
- [69] Koszałka, G., Hunicz, J., Kordos, P., *A research stand for the testing of the sealing properties of the piston–rings–cylinder assembly in a combustion engine*, „Combustion Engines”, no. 2(153), 2013, p. 54–62.
- [70] Kowalewicz A., *Podstawy procesów spalania*, Warszawa 2000.
- [71] Kowalski K., *Wybrane problemy rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego paliwami zastępczymi*, „Eksploracja silników spalinowych”, z. 13, „Problemy rozruchu silników spalinowych”, 2005, s. 83–92.
- [72] Kruczyński S., Ślęzak M., Gis W., Orliński P., *Evaluation of the impact of combustion hydrogen addition on operating properties of self-ignition engine*, „Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”, vol. 18, is. 3, 2016, p. 343–347.
- [73] Kuranc A., *The ecological aspect of a cold and hot starting of a spark ignition combustion engine*, „Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”, no. 2(38), 2008, p. 40–44.
- [74] Lapuerta M., Arams O., Garcia-Contreras R., *Stability of diesel-bioethanol blends for use in diesel engine*, „Fuel”, vol. 86, is. 10–11, 2007, p. 1351–1357.
- [75] Lewkowicz R., Piątkowski P., Kiedrowski T., Ściegienka R., *Badania wpływu rozruchu i jakości olejów silnikowych na zużycie pierścieni tłokowych*, „Autobusy”, nr 12, 2016, s. 1127–1132.
- [76] Lotko W., Górski K., Longwic R., *Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo-tert butylowym*, Warszawa 2010.

- [77] MacMillan D., la Rocca A., Shayler P.J., Murphy M., Pegg I.G., *The effect of reducing compression ratio on the work output and heat release characteristics of a DI diesel under cold start conditions*, „SAE Technical Paper” 2008-01-1306.
- [78] Masjuki H.H., Kalam M.A., Maleque M.A., Kubo A., Nonaka T., *Performance, emissions and wear characteristics of an indirect injection diesel engine using coconut oil blended fuel*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering”, vol. 215, is. 3, 2001, p. 393–404.
- [79] Mathis U., Mohr M., Forss A.M., *Comprehensive particle characterization of modern gasoline and diesel passenger cars at low ambient temperatures*, „Atmospheric Environment”, vol. 39, is. 1, 2005, p. 107–117.
- [80] Matwiczuk A., Zając G., Kowalski R., Kachel-Jakubowska M., Gagóś M., *Spectroscopic studies of the quality of fatty acid methyl esters derived from waste cooking oil*, „Polish Journal of Environmental Studies”, vol. 26, is. 6, 2017, p. 2643–2650.
- [81] Merkisz J., Pielecha I. Fuć P., *Badania i analizy zużycia energii i emisji zanieczyszczeń przez pojazdy w sieci drogowej*, „PAN, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Studia z zakresu inżynierii”, nr 84, Kraków 2013.
- [82] Mysłowski J., *Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym*, Warszawa 1996.
- [83] Mysłowski J., Talaga K., *Thermal loads of a piston in a diesel engine during startup*, „Combustion Engines”, no. 2(133), 2008, p. 20–25.
- [84] Myung C.L, Park S., *Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: A review*, „International Journal of Automotive Technology”, vol. 13, is. 1, 2012, p. 9–22.
- [85] Naylor M., Kadali P., Wang J., *Diesel engine tribology*, Modern Tribology Handbook. Chapter 33, vol. I & II, CRC Press LCC, 2001.
- [86] Niewczas A., Koszałka G., *Niezawodność silników spalinowych – wybrane zagadnienia*, Lublin 2003.
- [87] Nowakowski T., *Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych*, Wrocław 1999.
- [88] Pacaud P., Perrin H., Laget O., *Cold start on diesel engine: is low compression ratio compatible with cold start requirements?* „SAE Technical Paper” 2008-01-1310.
- [89] Payri F., Broatch A., Salavert J.M., Martín J., *Investigation of Diesel combustion using multiple injection strategies for idling after cold start of passenger-car engines*, „Experimental Thermal and Fluid Science”, vol. 34, is. 7, 2010, p. 857–865.

- [90] Payri F., Broatch A., Serrano J.R., Rodriguez L.F., Esmoris A., *Study of the potential of intake air heating in automotive DI diesel engines*, „SAE Technical Paper” 2006-01-1233.
- [91] Payri F., Lujan J.M., Martin J., Abbad A., *Digital signal processing of in-cylinder pressure for combustion diagnosis of internal combustion engines*, „Mechanical Systems and Signal Processing”, vol. 24, is. 6, 2010, p. 1767–1784.
- [92] Peng H., Cui Y., Shi L., Deng K., *Effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions during cold start of direct injection (DI) diesel engine*, „Energy”, vol. 33, is. 3, 2008, p. 471–479.
- [93] Plizga K., *Metody diagnozowania rozruszników samochodowych*, „MOTROL”, nr 10, 2008, s. 102–109.
- [94] Posta J., Peterka B., Ales Z., Pexa M., Pavlu J., Vutan H. *Lubricity of thermo-oxidized engine oils*, „MM Science Journal”, vol. 2016, November 2016, p. 1214–1217.
- [95] Pszczółkowski J., *Analiza i modelowanie procesu rozruchu silników o zapłonie samoczynnym*, Warszawa 2009.
- [96] Pszczółkowski J., *Charakterystyki rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym*, Zbąszynek 2004.
- [97] Pszczółkowski J., *Procesy rozruchu i nagrzewania silnika o zapłonie samoczynnym*, Conference Proceedings: 27th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 2001. Instytut Lotnictwa w Warszawie i Wyższa Szkoła Marynarki Wojennej w Gdyni, Jastrzębia Góra 2001, s. 94–102.
- [98] Pszczółkowski J., Dyga G., *Badanie zmian parametrów napędzania wału korbowego silnika*, „TTS Technika Transportu Szynowego”, nr 9, 2012, s. 3701–3710.
- [99] Pszczółkowski J., Koliński K., *Cechy prędkości obrotowej wału korbowego i jej wpływ na rozruch silnika o zapłonie samoczynnym*, Materiały IX Międzynarodowego Sympozjum IPMiT. Rynia 22-24.06.2005. Wyd. BEL Studio Sp. z o. o., Warszawa 2005, s. 615–624.
- [100] Randazzo M.L., Sodre J.R., *Cold start and fuel consumption of a vehicle fuelled with blends of diesel oil-soybean biodiesel-ethanol*, „Fuel”, vol. 90, is. 11, 2011, p. 3291–3294.
- [101] Roberts A., Brooks R., Shipway P., *Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions*, „Energy Conversion and Management”, vol. 82, 2014, p. 327–350.
- [102] Rofail R., Henein N., *Simulation of the effect of recirculated gases on ignition delay during cold starting of a direct injection diesel engine*, „SAE International” 2011-01-0838.

- [103] Rychter M., *Analyses of temperature and pressure condition in CI engine's exhaust pipe in light of application NOx sensor to determine of catalytic converter efficiency*, „Journal of KONES Powertrain and Transport”, vol. 15, no. 3, 2008, p. 451–463.
- [104] Rychter M., *Monitorowanie silnika o zapłonie samoczynnym w systemie OBD na podstawie emisji spalin w kontekście poprawy właściwości ekologicznych silnika*, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2004.
- [105] Sejkorova M., Šarkan B., Caban J., Marczuk A. *On relationship between infrared spectra of worn out engine oils and their kinematic viscosity*, „Przemysł Chemiczny”, vol. 97, nr 1, 2018, s. 49–54.
- [106] Sejkorova M., Šarkan B., Madleňák R., Caban J., Marczuk A., Verner J., Hysrlova J. *Effect of ferrocene addition to a gas oil on smoke opacity and engine noise*, „Przemysł Chemiczny”, vol. 97, nr 8, 2018, s. 1312–1315.
- [107] Serdecki W., *Badania silników spalinowych*, Poznań 2012.
- [108] Serdecki W., *Badanie współpracy elementów układu tłokowo-cylindrowego silnika spalinowego*, Poznań 2002.
- [109] Serdecki W., *Wpływ zmian nacisku sprężystego pierścienia tłokowego na parametry filmu olejowego*, Conference Proceedings: 26th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 2000, Nałęczów 2000, s. 301–309.
- [110] Singh P., Goel V., Chauhan S.R. *Impact of dual biofuel approach on engine oil dilution in CI engines*, „Fuel”, vol. 207, 2017, p. 680–689.
- [111] Sobieszcański M., *Oprogramowanie mikroprocesorowego sterownika silnika o zapłonie iskrowym w zakresie rozruchu i nagrzewania*, „Eksplatacja silników spalinowych”, z. 6, „Problemy rozruchu silników spalinowych”, 2002, s. 127–132.
- [112] Sochaczewski R., *Impact of an gas injection start angle on the fuel distribution in a diesel engine combustion chamber*, „Combustion Engines”, no. 3(154), 2013, p. 414–420.
- [113] Sroka Z., *Durability of engine components due to alternative fuels*, „Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”, no. 4(36), 2007, p. 9–15.
- [114] Sroka Z., *Układy tribologiczne w systemach funkcjonalnych silnika spalinowego*, „Problemy Maszyn Roboczych”, z. 22, 2003, s. 85–96.
- [115] Struś M., Olchowik W., *Własności rozruchowe silnika spalinowego o ZS w aspekcie przebiegu przyspieszenia wału korbowego w funkcji kąta obrotu*, „Eksplatacja silników spalinowych”, z. 6, „Problemy rozruchu silników spalinowych”, 2002, s. 133–138.
- [116] Šarkan B., Stopka O., Gnap J., Caban J. *Investigation of exhaust emissions of vehicles with the spark ignition engine within emission control*,

- Transbaltica 2017, Transportation Science And Technology, Proceedings of the 10th International Scientific Conference, Vilnius 4-5.05.2017, „Procedia Engineering”, vol. 187, 2017, p. 775–782.
- [117] Ślęzak M., Gis W., Kruczyński P., *Evaluation of the impact of the ethanol content in gasoline on emissions of non-methane volatile organic compounds from transport vehicles*, „Przemysł Chemiczny”, vol. 95, no. 5, 2016, p. 1029–1031.
- [118] Tarkowski P., Fijałkowski S., *Rola układu paliwowego silnika o ZS w rozruchach w niskich temperaturach*, „Teki Komisji Naukowo-Problemowej Motoryzacji”, PAN O/Kraków, z. 15, 1998, s. 205–212.
- [119] Telatyński R., *Wspomaganie rozruchu silników spalinowych poprzez wykorzystanie ciepła zakumulowanego podczas poprzedniej pracy*, Materiały Sympozjum – „Rozruch silników spalinowych”, Szczecin 1996, s. 127–131.
- [120] Torregrosa A.J., Broatch A., Novella R., Mónico L.F., *Suitability analysis of advanced diesel combustion concepts for emissions and noise control*, „Energy”, vol. 36, is. 2, 2011, p. 825–838.
- [121] Torregrosa A.J., Broatch A., Pla B., Mónico L.F., *Impact of Fischer Tropsch and biodiesel fuels on trade-offs between pollutant emissions and combustion noise in diesel engines*, Biomass and Bioenergy, vol. 52, 2013, p. 22–33.
- [122] Urs M. Mohr M., Forss A.M., *Comprehensive particle characterization of modern gasoline and diesel passenger cars at low ambient temperature*, „Atmospheric Environment”, vol. 39, is. 1, 2005, p. 107–117.
- [123] User manual of engine Ruggerini Diesel, 2004.
- [124] Vehicles in use Europe, January 2021, ACEA Report. (<https://www.acea.auto/files/report-vehicles-in-use-europe-january-2021-1.pdf>) (dostęp z dn. 19.08.2021)
- [125] Wajand J.A., *Doświadczalne tłokowe silniki spalinowe*, Warszawa 2003.
- [126] Wajand J.A., *Silniki o zapłonie samoczynnym*, Warszawa 1988.
- [127] Wendeker M., *Sterowanie wtryskiem benzyny w silniku samochodowym*, Lublin 1999.
- [128] Weilenmann M., Soltic P., Saxer Ch., Forss A. M., Heeb N., *Regulated and nonregulated diesel and gasoline cold start emissions at different temperature*, „Atmospheric Environment”, vol. 39, is. 13, 2005, p. 2433–2441.
- [129] Wolak A., Zajac G., Żółty M. *Changes of properties of engine oils diluted with diesel oil under real operating conditions*, „Combustion Engines”, vol. 173, no. 2, 2018, p. 34–40.

- [130] Xu G.H., Lee J.H., Liang H., Georing D., *Tribological properties of solid-lubricating coating on cylinder bore at low temperature*, „Wear”, vol. 257, is. 1–2, 2004, p. 59–65.
- [131] Zabłocki B., *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych*, Warszawa 1976.
- [132] Zając G., Węgrzyn A., *Analysis of work parameters changes of diesel engine powered with diesel fuel and faee blends*, „Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”, vol. 38, nr 2, 2008, s. 17–24.
- [133] BN-74/2345-09 *Silniki o zapłonie samoczynnym. Określenie granicznej temperatury rozruchu*.
- [134] BN-82/1374-10 *Silniki spalinowe. Badania stanowiskowe. Określanie właściwości rozruchowych w niskich temperaturach*.
- [135] BN-84/1301-08 *Silniki o zapłonie samoczynnym. Wtryskiwacze. Wymagania i badania*.
- [136] OST 37.001.075-77 *Silniki samochodowe. Wymagania dotyczące własności rozruchowych*.
- [137] PN-88/C-04150 *Przetwory naftowe – Oznaczenie lepkości strukturalnej olejów silnikowych w niskich temperaturach symulatorem zimnego rozruchu*.
- [138] PN-EN 116:2001 *Przetwory naftowe – Oznaczenie temperatury zablokowania zimnego filtra*.
- [139] PN-EN 590:2005 *Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań*.