



**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**  
**Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu**



**mgr inż. Filip Markiewicz**

**Analiza emisji związków toksycznych spalin silników  
maszyn i urządzeń przenośnych w rzeczywistych  
warunkach eksploatacji**

*PRACA DOKTORSKA*

*Promotor:*  
prof. dr hab. inż. Piotr LIJEWSKI

*Promotor pomocniczy:*  
dr inż. Michał DOBRZYŃSKI

Poznań 2024

## Spis treści

Streszczenie .....	3
Abstract. ....	5
Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń .....	7
1. Wprowadzenie i geneza pracy .....	9
2. Maszyny i urządzenia przenośne .....	14
2.1. Klasyfikacja maszyn i urządzeń przenośnych .....	14
2.1.1. Zastosowanie w pracach leśnych.....	14
2.1.2. Zastosowanie w pracach ogrodowych.....	16
2.1.3. Zastosowanie w pracach budowlanych .....	20
2.2. Rozwiązania konstrukcyjne w maszynach i urządzeniach przenośnych .....	21
3. Regulacje prawne oraz przepisy dotyczące emisji z silników wykorzystywanych do napędu małych urządzeń o zastosowaniach pozadrogowych .....	26
3.1. Wprowadzenie .....	26
3.2. Limity emisji związków toksycznych.....	27
3.3. Metody badań homologacyjnych .....	36
3.4. Badania w warunkach rzeczywistych .....	39
4. Przegląd literaturowy .....	41
5. Cel i problem badawczy.....	46
6. Badania własne.....	49
6.1. Obiekty badań .....	49
6.2. Zastosowana aparatura badawcza .....	53
6.3. Metodyka badań własnych.....	56
6.4. Analiza emisji związków szkodliwych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji .	57
6.5. Analiza parametrów pracy silników w rzeczywistych warunkach eksploatacji .....	72
6.6. Propozycje zmian w badaniach silników maszyn i urządzeń przenośnych .....	89
7. Wnioski i kierunki dalszych badań .....	93
Literatura .....	96

## **Streszczenie**

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane problemy dotyczące badań emisji związków toksycznych spalin z silników napędzających urządzenia przenośne, wykorzystywane w pracach leśnych, ogrodniczych i budowlanych oraz ich oddziaływanie na środowisko naturalne. Na początku pracy został przedstawiony spis skrótów oraz oznaczeń wykorzystywanych w rozprawie. Praca doktorska zawiera 7 rozdziałów i 104 strony. W pierwszym rozdziale, we wprowadzeniu został przedstawiony główny zarys i pogląd na cały zakres pracy. Kolejno, została omówiona grupa urządzeń, która do tego typu urządzeń się zalicza, następnie zostały omówione rozwiązania konstrukcyjne tego typu maszyn oraz silników w tych maszynach zastosowanych. W trzeciej części niniejszego opracowania zostały przedstawione obecnie obowiązujące przepisy, które dotyczą ograniczenia emisji w silnikach spalinowych o zastosowaniach pozadrogowych oraz regulacje prawne państw o szczególnie dużym znaczeniu, głównie z uwagi na siłę ich rynków w dziedzinie urządzeń i maszyn przenośnych. Zostały tu przedstawione sposoby i ściśle określone testy służące do oceny stanu silnika tego typu silników maszyn i urządzeń pod względem emisyjności. Opisane zostały obowiązujące procedury badawcze uwzględniające testy badawcze dla danych grup urządzeń o określonej pojemności silnika oraz ich określonej mocy. Kolejna część stanowi rozważania na temat już wcześniej przebadanych urządzeń przenośnych oraz sposób podejścia do badań, w jaki sposób zostały one przebadane i co udało się do tej pory zrobić w tej grupie urządzeń i maszyn. Po dokonaniu przeglądu oraz po analizie własnych doświadczeń związanych z silnikami zastosowanymi do konkretnych maszyn przenośnych został sformułowany cel pracy oraz jej zakres. Określono tematykę oraz zaprezentowano tendencje, która wpłynęła na zainteresowanie danym tematem, który tym samym został rozpoznany i jest on wstępem oraz propozycją dalszego rozwijania tematyki małych silników z urządzeń przenośnych.

W kolejnych rozdziałach pracy zostały zamieszczone oraz opisane kolejno przeprowadzane badania związków toksycznych spalin z maszyn i urządzeń przenośnych. Badania zostały przeprowadzone w rzeczywistych warunkach pracy, tak aby każde z poszczególnych urządzeń podczas pomiaru wykonywało pracę w sposób całkowicie odzwierciedlające codzienną pracę danego urządzenia. Do pomiarów zostały wykorzystane najnowocześniejsze analizatory oraz aparatura typu PEMS (*Portable Emission Measurement System*). Dzięki temu zostały zmierzone rzeczywiste emisje spalin występujące podczas eksploatacji tego typu maszyn i urządzeń.

Wykorzystanie aparatury badawczej mobilnej pozwalającej na wykonanie pomiarów w ruchu pozwoliło zmierzyć oraz przeanalizować wyniki pomiarów. Pozwoliło również na porównanie wyników do testów i limitów wynikających z homologacji danych maszyn i urządzeń w warunkach laboratoryjnych. Dokonano oceny i analizy wyników, na podstawie których sformułowane zostały wytyczne dla operatora danej grupy urządzeń. Ma to na celu osiągnięcie jeszcze lepszych wyników pracy przy mniejszej emisji do środowiska. Warto zwrócić uwagę, że w maszynach sterowanych przez operatora przy tak zmiennej charakterystyce pracy oraz zważając na gwałtowne zmiany obciążenia silnika spalinowego, sposób w jaki operator prowadzi maszynę czy też sposób w jaki konkretną maszynę czy urządzeni użytkuje ma duży wpływ na wielkość emisji spalin. Dlatego temu problemowi został poświęcony cały rozdział.

Ostatnia część pracy ukazuje omówienie tego, co udało się dotychczas wykonać oraz podsumowanie całej pracy. Omówione zostały dalsze kierunki badań w tej tematyce. Praca zawiera propozycje zmian, mających na celu zmniejszenie negatywnego oddziaływania maszyn i urządzeń przenośnych na środowisko naturalne oraz na operatora czyli człowieka. Wnioski wynikające z pomiarów związków szkodliwych spalin z urządzeń i maszyn przenośnych zostały przedstawione na końcu pracy.

## **Abstract**

This dissertation presents selected problems concerning the study of toxic emissions from engines driving portable equipment used in forestry, horticultural and construction work and their impact on the environment. At the beginning of the work, a list of abbreviations and designations used in the dissertation is presented. The dissertation contains 7 chapters and 104 pages. In the first chapter, the introduction provides a main overview and view of the entire scope of the work. Next, the group of devices that belong to this type of equipment was discussed, followed by a discussion of the design solutions of this type of machinery and the engines used in these machines. The third part of this paper presents the current legislation that relates to limiting emissions in internal combustion engines for off-highway applications, as well as the regulations of countries of particular importance, mainly due to the strength of their markets in the field of mobile equipment and machinery. Methods and well-defined tests for evaluating the engine condition of such machine engines and equipment in terms of emissions performance are presented here. The applicable test procedures are described, taking into account the research tests for given groups of devices with a certain engine capacity and their specified power. The next section is a consideration of the portable machines that have already been tested, and how they have been approached, how they have been tested, and what has been done so far on this group of equipment and machines. After the review and analysis of our own experience related to engines applied to specific portable machines, the purpose of the work and its scope were formulated. The subject matter was defined and the trends that influenced the interest in the given topic were presented, which was thus recognized, and it is an introduction and proposal for further development of the subject of small engines from portable devices.

The following chapters of the paper include and describe successively conducted tests of toxic compounds of exhaust gases from mobile machinery and equipment. The tests were carried out under real working conditions, so that each of the individual devices during the measurement performed work in a way that fully reflects the daily operation of the device in question. State-of-the-art analyzers and PEMS (*Portable Emission Measurement System*) equipment were used for the measurements. As a result, real exhaust emissions occurring during operation of this type of machinery and equipment were measured.

The use of mobile test equipment that allows measurements to be taken on the move, made it possible for the results to be measured and analyzed. It also made it possible to compare the results to the tests and limits resulting from the approval of given machines and equipment in

laboratory conditions. The results were evaluated and analyzed, on the basis of which guidelines were formulated for the operator of a given group of equipment. The aim is to achieve even better working results with lower emissions to the environment. It is worth pointing out that in operator-controlled machines with such variable operating characteristics and considering rapid changes in the load of the internal combustion engine, the way in which the operator drives the machine or the way in which a particular machine or equipment is used has a major impact on exhaust emissions. Therefore, an entire chapter is devoted to this problem.

The last part of the work shows a discussion of what has been accomplished so far and a sub-summary of the entire work. Further research directions in this topic are discussed. The work includes proposals for changes aimed at reducing the negative impact of machinery and mobile equipment on the environment and on the operator, i.e. the human being. Conclusions resulting from measurements of harmful compounds of exhaust fumes from mobile machinery and equipment are presented at the end of the work.

## Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń

<b>AFV</b>	–	<i>Alternative Fuel Vehicle</i> – pojazd zasilany paliwem alternatywnym
<b>CNG</b>	–	<i>Compressed Natural Gas</i> – sprężony gaz ziemny
<b>CO</b>	–	tlenek węgla
<b>CO<sub>2</sub></b>	–	dwutlenek węgla
<b>CVS</b>	–	<i>Constant Volume Sample</i> – stała objętość próbki (układ rozcieńczający spaliny powietrzem o stałym natężeniu przepływu)
<b>DMC</b>	–	dopuszczalna masa całkowita
<b>DPF</b>	–	<i>Diesel Particulate Filter</i> – filtr cząstek stałych
<b>ECE</b>	–	<i>Economic Commission for Europe</i> – Europejska Komisja Gospodarcza
<b>EEC</b>	–	<i>European Economic Community</i> – Europejska Wspólnota Gospodarcza
<b>EEV</b>	–	<i>Enhanced Environmentally-friendly Vehicle</i> – pojazd przyjazny środowisku
<b>EGR</b>	–	<i>Exhaust Gas Recirculation</i> – recyrkulacja spalin
<b>ELR</b>	–	<i>European Load Response</i> – europejski test obciążenia
<b>EOBD</b>	–	<i>European On Board Diagnostic</i> – europejski system diagnostyki pokładowej
<b>ESC</b>	–	<i>European Stationary Cycle</i> – europejski test statyczny
<b>ETC</b>	–	<i>European Transient Cycle</i> – europejski test dynamiczny
<b>EU</b>	–	<i>European Union</i> – Unia Europejska
<b>Euro</b>	–	normy emisji spalin w Europie
<b>FAME</b>	–	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i> – estry metylowe kwasów tłuszczowych olejów roślinnych
<b>FC</b>	–	<i>Fuel Consumption</i> – zużycie paliwa
<b>HAV</b>	–	<i>Hand-Arm Vibrations</i> – drgania dłoni i przedramienia
<b>HC</b>	–	<i>Hydrocarbons</i> – węglowodory
<b>HDD</b>	–	<i>Heavy-Duty Diesel</i> – silnik ZS do ciężkich zastosowań
<b>HDE</b>	–	<i>Heavy-Duty Engines</i> – silniki do ciężkich zastosowań
<b>HDV</b>	–	<i>Heavy-Duty Vehicle</i> – pojazd ciężarowy
<b>LNG</b>	–	<i>Liquefied Natural Gas</i> – skroplony gaz ziemny
<b>LPG</b>	–	<i>Liquefied Petroleum Gas</i> – gaz płynny propan-butan

<b>LZO</b>	–	lotne związki organiczne
<b>NDIR</b>	–	<i>Nondispersive Infrared Sensor</i> – analizator niedyspersyjny na podczerwień
<b>NG</b>	–	<i>Natural Gas</i> – gaz ziemny
<b>NO</b>	–	tlenek azotu
<b>NO<sub>2</sub></b>	–	dwutlenek azotu
<b>NO<sub>x</sub></b>	–	tlenki azotu
<b>OBD</b>	–	<i>On Board Diagnostics</i> – diagnostyka pokładowa (pokładowy system diagnostyczny)
<b>OECD</b>	–	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i> – Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju
<b>PEMS</b>	–	<i>Portable Emission Measurement System</i> – urządzenie do pomiarów mobilnych emisji spalin
<b>PM</b>	–	<i>Particulate Matter</i> – cząstki stałe
<b>ppm</b>	–	<i>parts per million</i> – liczba części na milion
<b>RDE</b>	–	<i>Real Driving Emissions</i> – emisja w rzeczywistych warunkach jazdy
<b>RME</b>	–	<i>Rapeseed Methyl Esters</i> – estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego
<b>SCR</b>	–	<i>Selective Catalytic Reduction</i> – selektywna redukcja katalityczna
<b>SORT</b>	–	<i>Standardised On-Road Tests</i> – test jezdny dla autobusów miejskich
<b>THC</b>	–	<i>Total Hydrocarbons</i> – całkowita (sumaryczna) emisja węglowodorów
<b>UITP</b>	–	<i>International Association of Public Transport</i> – Międzynarodowe Stowarzyszenie Transportu Publicznego
<b>ZI</b>	–	zapłon iskrowy
<b>ZS</b>	–	zapłon samoczynny

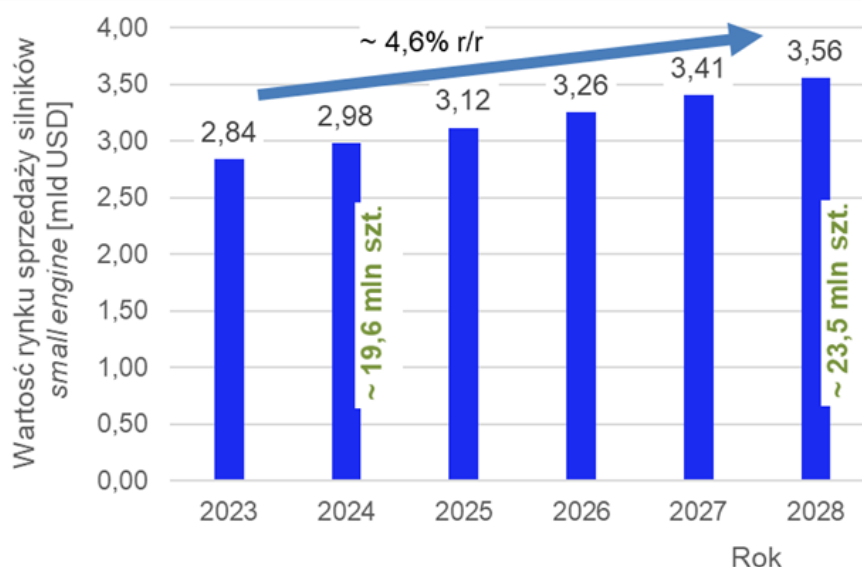


## 1. Wprowadzenie i geneza pracy

Rozwój gospodarczy obserwowany w Europie w ostatnich latach, a szczególnie w krajach Europy środkowo-wschodniej sprawił, że człowiek jako pracownik nabył więcej praw i przywilejów. Rozwój ten podyktował podwyższenie standardów pracy, a tym samym wyeliminował wykonywanie przez człowieka najprostszycy czynności ręcznych. Większość czynności człowiek wykonuje za pomocą narzędzi oraz wyspecjalizowanych maszyn i urządzeń, które coraz częściej służą do precyzyjnego wykonywania określonej pracy, czy też ściśle ustalonego zadania. Czynności, które wymagają zaangażowania określonej energii niewykonalnej przez człowieka lub wymagające od człowieka nadmiernego użycia siły mięśni zostały zastąpione urządzeniami napędzanymi przez silniki elektryczne oraz silniki spalinowe. Są to zwykle silniki o małych objętościach skokowych nie przekraczających  $0,250 \text{ dm}^3$  i mocach mniejszych od 20 kW, w nomenklaturze anglojęzycznej powszechnie nazywane *small engines*. Urządzenia wyposażone w silniki spalinowe stanowią grupę urządzeń i maszyn, które pozwalają na zastosowanie ich w każdych warunkach oraz nie ograniczają dostępności wykonywanej czynności sprawiają, że określoną pracę można wykonać bez względu na dostępność energii elektrycznej. Fakt ten jest podstawowym czynnikiem, dla którego rozwój maszyn i urządzeń napędzanych silnikiem spalinowym ma znaczący udział w rynku oraz w produkcji urządzeń i maszyn wykorzystywanych do pomocy w pracy człowiekowi. Liczne analizy rynkowe wskazują na fakt, że liczba eksploatowanych maszyn i urządzeń przenośnych zasilanych silnikami spalinowymi stale się zwiększa. W roku 2018 sprzedaż maszyn i urządzeń przenośnych zasilanych silnikami spalinowymi wyniosła około 15,5 mln sztuk, w roku 2024 szacuje się, że wielkość sprzedaży wyniesie około 19,6 mln sztuk, natomiast w roku 2026 już około 23,5 mln sztuk. Globalny rynek silników o małej objętości skokowej jest szacowany obecnie na około 2,98 mld USD, natomiast coroczny wzrost tego rynku szacuje się na 4,6 %, należy podkreślić, że wartość tego rynku jest ściśle związana z liczbą produkowanych silników (rys. 1.1) [102]. Tendencja ta, według przewidywań, będzie się utrzymywała w kolejnych latach. Duży wpływ na tę dynamikę mają kraje rozwijające się, wśród których warto wymienić kraje Europy środkowo-wschodniej, Indie, czy Chiny [34, 73].

Nie ulega wątpliwości, że ostatnich kilkunastu latach jednym z najbardziej popularnych i pożądanycy kierunków badań silników spalinowych jest dążenie do rozwiązania problemu pomiaru emisji związków szkodliwych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji, a dzięki

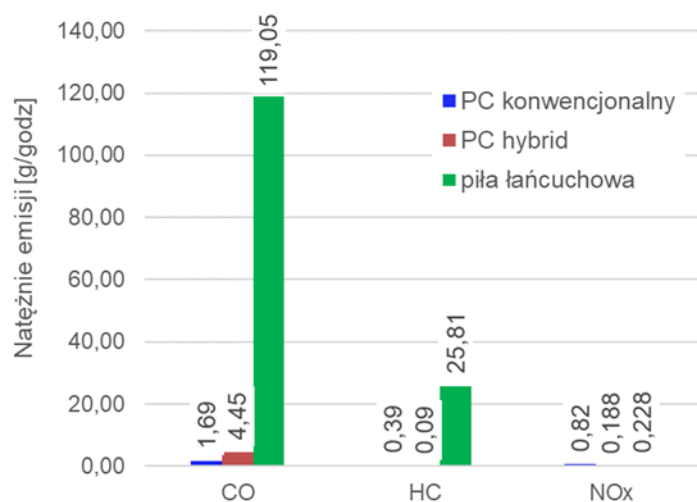
temu dalsze ograniczanie negatywnego oddziaływania silników spalinowych na środowisko naturalne. Coraz bardziej restrykcyjne regulacje prawne, które w znacznej mierze są skoncentrowane na zmniejszeniu dopuszczalnych wartości emisji związków toksycznych spalin, to bezpośrednia przyczyna zainteresowania całego środowiska tą tematyką. Konstruktorzy i producenci pracują nad coraz nowszymi rozwiązaniami, które mają za zadanie przyczynić się do spełnienia norm przewidzianych w przepisach [10, 69, 72, 82].



Rys. 1.1. Prognozy rozwoju rynku silników o małej objętości skokowej [102]

Należy zwrócić uwagę, że maszyny i urządzenia przenośne, które są przedmiotem badań i analiz niniejszej pracy, są zasilane głównie silnikami o zapłonie iskrowym (ZI). Wprawdzie, z pewnym uproszczeniem można przyjąć – na podstawie chociażby badań opisywanych w agendach Światowej Organizacji Zdrowia WHO (*World Health Organization*) – że to silniki o zapłonie samoczynnym (ZS) są największym obciążeniem dla środowiska naturalnego oraz organizmu człowieka, powodując m.in. choroby nowotworowe, jednak silniki ZI o małych objętościach skokowych stają się przedmiotem coraz większego zainteresowania, co wynika z zagrożenia oddziaływania tych silników na środowisko naturalne, a szczególnie operatorów maszyn, narażonych bezpośrednio na wdychanie związków szkodliwych spalin [6, 37, 40, 83]. Należy zauważyć, że limity emisji związków toksycznych spalin dla silników o małej objętości skokowej są bardziej liberalne w porównaniu np. z silnikami pojazdów drogowych, dotyczy to przede wszystkim wartości dopuszczalnych emisji poszczególnych związków, ale także metod badań

(przepisy). Kolejnym czynnikiem przemawiającym za koniecznością badań w zakresie emisji z silników maszyn i urządzeń przenośnych jest poziom emisji z tych silników. W celu podkreślenia wagi problemu na rysunku 1.2 zamieszczono porównanie masy emitowanych w ciągu godziny głównych związków toksycznych spalin CO, HC, NO<sub>x</sub>, z silników pojazdów kategorii PC (*Passanger Car*) z napędem konwencjonalnym i hybrydowym oraz z silnika piły łańcuchowej, zestawienie to dotyczy rzeczywistych warunków eksploatacji. Z porównania tego wynika jednoznacznie, że silnik piły emituje znacząco większą masę HC i CO.



Rys. 1.2. Porównanie natężenia emisji związków toksycznych spalin dla silników różnych kategorii

Silniki spalinowe zastosowane do urządzeń i maszyn o przeznaczeniu pozadrogowym dzielą się na wiele podgrup. Posiadają różne zastosowanie, a ich przeznaczenie wpływa bezpośrednio na ich budowę. Ze względu na różną budowę oraz osprzęt jaki zastosowano do danego silnika urządzenia te są zazwyczaj dedykowane do jednej określonej czynności.

Jak napisano wyżej, do maszyn i urządzeń o zastosowaniu pozadrogowym wykorzystywane są silniki o zapłonie iskrowym oraz o zapłonie samoczynnym. Te o zapłonie iskrowym wykorzystywane są do urządzeń, które wymagają tego, by operator trzymał urządzenie w rękach, czy też miał urządzenie podwieszane na szelkach, tak by równomiernie rozłożyć ciężar urządzenia na ciele człowieka. Jednocześnie należy pamiętać, że urządzenie powinno być możliwe jak najmniej obciążające człowieka.

Badania silników maszyn i urządzeń przenośnych w aspekcie emisji związków toksycznych spalin wykonuje się przede wszystkim w warunkach laboratoryjnych. Zmierzone wartości związków toksycznych spalin wykorzystywane są tylko do homologacji urządzenia, a badania te wykonywane są na reprezentowanym przez określoną grupę urządzeń silniku. Metoda badań jest znormalizowana i nie stanowi ona gwarancji, że w codziennej eksploatacji urządzenia poziom emisji związków toksycznych spalin zostanie zachowany. Zmienne warunki obciążenia podczas rzeczywistej eksploatacji uzasadniają podejmowanie działań umożliwiających określenie poziomu emisji w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Badania w rzeczywistych warunkach eksploatacji dla różnych kategorii silników stają się standardem. W tym aspekcie należy dokonać weryfikacji, jaki jest stan wiedzy i techniki w zakresie badań silników maszyn i urządzeń przenośnych. Godnym zauważenia jest fakt, że coraz częściej pomiary wykonywane są z wykorzystaniem mobilnej aparatury PEMS (*Portable Emission Measurement System*), pomimo że aktualnie nie jest to wymagane podczas homologacji [33, 39, 42, 46]. W rozprawie opisano jedne z pierwszych tego typu badań, z wykorzystaniem aparatury PEMS dla silników maszyn i urządzeń przenośnych, na podstawie których można sformułować pewne wnioski i spostrzeżenia.

Opisane w pracy spostrzeżenia są wstępem do prac mających na celu opracowanie metodyki badań emisji związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji silników maszyn i urządzeń przenośnych. W kolejnych latach należy się bowiem spodziewać, że rozwój przepisów homologacyjnych będzie zmierzał właśnie w tym kierunku. Z tego powodu starania, by zostały opracowane ostateczne procedury badawcze, uwzględniające wszystkie aspekty eksploatacji urządzeń, są wysoce pożądane [9, 11 – 14, 18, 19, 95, 96].

Warto podkreślić także aspekt znaczenia stanu technicznego silnika, okresu jego eksploatacji oraz czynników związanych ze zużyciem elementów – mają one bowiem odzwierciedlenie w poziomie emisji związków toksycznych spalin. Także z tego powodu cenne są starania naukowców i inżynierów, by określić rzeczywistą emisję oraz opracować metodykę badań kontrolnych dla tej grupy maszyn [52, 80].

Dla oceny ekologicznej silników największe znaczenie mają badania drogowe, a w przypadku silników o zastosowaniach pozadrogowych, a więc także obiektów badań w niniejszej pracy, coraz większe znaczenie zyskują badania polowe, gdyż tylko w takich warunkach można uzyskać pełną informację o rzeczywistej emisji związków szkodliwych spalin. Wykonując takie pomiary należy wykonać szereg czynności oraz rozwiązać problemy związane z montażem aparatury. Jednocześnie należy uwzględnić wysoki koszt specjalistycznej aparatury pomiarowej i

konieczność przystosowania jej, tak aby możliwe było wykonywanie rejestracji pomiarów podczas pracy w rzeczywistych warunkach. Realizując te wszystkie założenia i pokonując napotkane problemy zyskuje się wiarygodne wyniki pomiarów, niemożliwe do uzyskania w badaniach na hamowni silnikowej, w warunkach laboratoryjnych symulując rzeczywiste stany pracy.

W rozprawie zostały rozpoznane oraz przebadane zaledwie niektóre jednostki napędowe z szerokiej grupy urządzeń oraz maszyn przenośnych, w których stosowane są silniki spalinowe. Analiza rozpoznawcza pozwala na poznanie tematyki oraz podjęcie kolejnych, już skonkretyzowanych kroków, w celu zaproponowania sposobu ograniczenia emisji związków toksycznych spalin.

## 2. Maszyny i urządzenia przenośne

### 2.1. Klasyfikacja maszyn i urządzeń przenośnych

#### 2.1.1. Zastosowanie w pracach leśnych

Maszyny, które wykorzystuje się podczas prac leśnych, to obszerna i różnorodna grupa urządzeń mechanicznych. Przeznaczone są one do bezpiecznego i efektywnego pozyskiwania oraz transportowania drewna do miejsca przeznaczenia. Ze względu na pełnione funkcje maszyny leśne możemy podzielić na maszyny do czynności technologicznych, służące m.in. do ścinania czy okrzesywania drewna oraz maszyny do operacji transportowych, służące do przewożenia pozyskanego drewna. Wszystkie tego typu maszyny wykonują prace ciężkie, a więc silniki, które w tego typu maszynach się znajdują posiadają duże moce. Przedstawicielami tej grupy są harwestery, które jak wcześniej zostało wspomniane służą do ścinania drzew, ogałacania ich z gałęzi oraz porządkowania i transportu. Kolejne to forwardery, które służą do zrywki drzew, czyli do przetransportowania pozyskanego materiału tj. drewna okrągłego z miejsca jego pozyskania na drogę wywozową oraz maszyny łączące w sobie obie wymienione funkcje czyli harwardery (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Harvester oraz forwarder podczas wykonywania prac

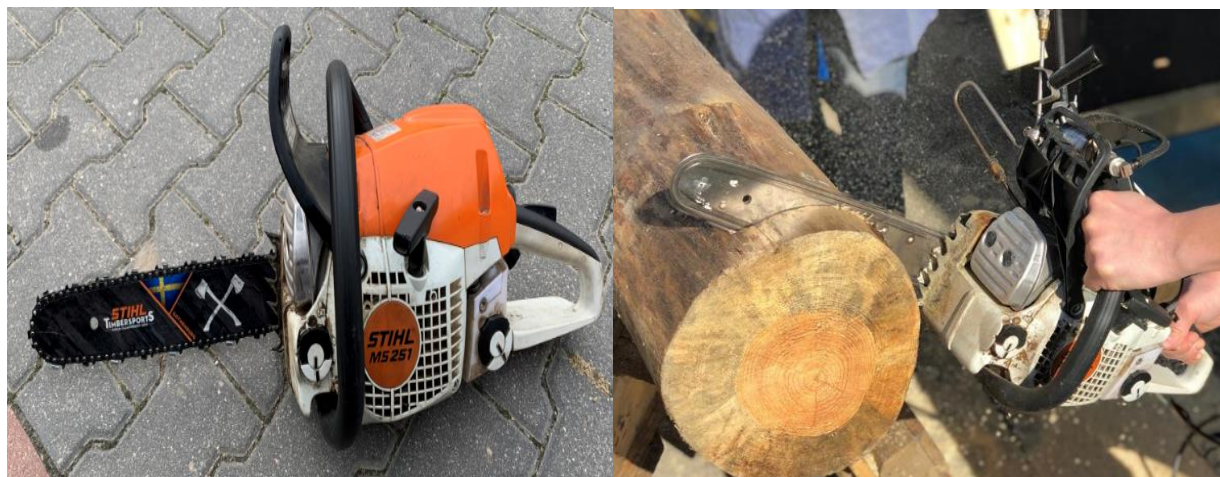
Maszyny leśne są napędzane głównie silnikami o mocy w zakresie od 70 kW, aż do mocy silnika 140 kW. Istnieją również mniejsze urządzenia wykorzystywane w sektorze leśnictwa, które mają zdecydowanie mniejsze moce, należące do grupy maszyn i urządzeń przenośnych i znacząco ułatwiają pracę w lesie. Reprezentantem tego typu maszyn napędzanych przez małe

silniki spalinowe są rębaki. Są to urządzenia, które pozwalają na szybkie przerobienie materiału drzewnego na mniejsze kawałki (rys. 2.2).



*Rys. 2.2. Rębak do drewna podczas pracy*

Kolejnym narzędziem znacznie ułatwiającym pracę w leśnictwie jest piła łańcuchowa (rys. 2.3). Jest to urządzenie, które jest jednym z najczęściej używanych urządzeń przenośnych, służących do pozyskiwania i obróbki drewna. Piły łańcuchowe możemy podzielić na spalinowe, elektryczne oraz akumulatorowe.



Rys. 2.3. Pila łańcuchowa podczas wykonywania pracy

### 2.1.2. Zastosowanie w pracach ogrodowych

Dzięki postępowi technologicznemu, istnieje wiele maszyn ogrodniczych, które czynią pracę w ogrodzie łatwiejszą i bardziej efektywną. Wśród narzędzi ogrodowych z układami napędowymi możemy wyróżnić m.in.:

- kosiarki,
- traktory ogrodowe,
- wertykulatory,
- wykaszarki, podkaszarki, kosy,
- piły łańcuchowe,
- nożyce do żywopłotu,
- glebogryzarki,
- dmuchawy.

W niniejszej pracy przebadano pracę kosiarki, kosy, glebogryzarki, piły łańcuchowej, a także dmuchawy.

Kosiarki to maszyny ogrodowe, posiadające silnik do napędzania noży tnących, które służą do koszenia trawy. Kosiarki spalinowe posiadają silniki dwu- lub czterosuwowe, w pierwszych stosuje się mieszaninę benzyny i oleju w celu korzystniejszego smarowania, w drugich wyłącznie benzynę. Kosiarki spalinowe dostępne są w różnych rozmiarach i typach tj. kosy spalinowe, kosiarki samojezdne oraz kosiarki z napędem hydrostatycznym (rys. 2.4).





*Rys. 2.4. Kosiarka do trawy*

W trudno dostępnych miejscach oraz do ścinania wysokich traw najlepszą alternatywą jest kosa spalinowa (rys. 2.5). Ze względu na moc silnika wyróżniamy małe podkaszarki przeznaczone do prac wykończeniowych, uniwersalne kosy do koszenia podwórka oraz wycinacze do zarośli do wymagających terenów zielonych. Kosy spalinowe są zwykle przeznaczone do koszenia powierzchni ciężko dostępnych dla tradycyjnych kosiarek.



*Rys. 2.5. Kosa spalinowa podczas badań*

Do pielęgnacji dużych terenów zielonych często wykorzystywane są tzw. traktory ogrodowe (rys. 2.6). Są to samojezdne kosiarki, służące do koszenia trawników na bardzo dużych powierzchniach. Traktorki ogrodowe mogą mieć różną szerokość koszenia oraz moc silnika, co pozwala na dopasowanie ich do indywidualnych potrzeb. Obecnie traktorki ogrodowe są wielozadaniowe, oprócz możliwości koszenia trawy posiadają wiele dodatkowych funkcji np. wertykulacja trawnika, a nawet możliwość odśnieżania.



*Rys. 2.6. Traktor ogrodowy podczas badań*

Odrębną grupę maszyn, przydatnych podczas prac w ogrodzie stanowią glebogryzarki (rys. 2.7). Są to urządzenia przeznaczone do napowietrzania i spulchniania gleby. Wyróżniamy różne rodzaje glebogryzarek ogrodowych: spalinowe, elektryczne oraz ręczne.



*Rys. 2.7. Glebogryzarka podczas pracy*

Ostatnim urządzeniem ogrodowym przebadanym w niniejszej pracy jest dmuchawa spalinowa (rys. 2.8). Jest to maszyna, służąca do oczyszczania dużych powierzchni z liści i skoszonej trawy. Wykorzystanie jej znacząco skraca czas pracy. Na rynku można znaleźć wiele modeli dmuchaw ogrodowych o różnych źródłach zasilania, jednak największą popularnością cieszą się dmuchawy spalinowe.



Rys. 2.8. Dmuchała spaliniowa podczas badań

### 2.1.3. Zastosowanie w pracach budowlanych

Rynek maszyn budowlanych jest bardzo zróżnicowany i coraz bardziej się rozwija. Istnieje wiele podziałów maszyn m.in. ze względu na sposób sterowania, napęd, moc ich silników, a także pracę jaką dany sprzęt ma do wykonania. Do najbardziej powszechnych maszyn budowlanych zalicza się te przeznaczone do robót ziemnych. Należą do nich koparki, ładowarki oraz maszyny do odspajania i zagęszczania gruntu np. spycharki, równiarki, zagęszczarki czy walce.



Rys. 2.9. Zagęszczarka napędzana silnikiem spaliniowym

W zależności od wykonywanych prac, w budownictwie, używane są także różnorodne maszyny do robót drogowych, maszyny do hydromechanizacji i odwadniania, urządzenia do robót palowych, maszyny do przeróbki kruszyw, maszyny do produkcji i transportu masy betonowej oraz maszyny do robót zbrojarskich. Istotną rolę pełnią również maszyny do transportu zarówno samochodowego np. ciągniki jak i bliskiego np. ładowarki przenośnikowe. Obszerną i znaczącą grupę maszyn budowlanych stanowią urządzenia o mniejszych gabarytach i mocach. Są to maszyny do robót wykończeniowych czyli frezarki do betonu oraz wszelkie urządzenia do robót tynkarskich, instalacyjnych. Osobną grupą maszyn budowlanych są urządzenia pomocnicze np. agregaty prądotwórcze, agregaty grzewcze.



*Rys. 2.10. Generatory prądotwórcze zasilane silnikami ZI i ZS*

Maszyny budowlane pracują w różnych warunkach, a silnikom napędzającym je stawiane są różnorodne wymagania np. zmienne obciążenie, praca w ruchu. Jest to bardzo obszerna i zróżnicowana grupa maszyn, a w niniejszej rozprawie badaniom zostały poddane wybrane urządzenia z silnikami małej mocy.

## **2.2. Rozwiązania konstrukcyjne w maszynach i urządzeniach przenośnych**

Małe maszyny służą do wykonywania różnych czynności czy też prac, wyręczając i ułatwiając wykonywanie czynności człowiekowi. Aby wykonać pracę musimy włożyć określoną energię, a za wytworzenie energii odpowiedzialny jest układ napędowy. W skład układu napędowego wchodzi takie elementy jak źródło zasilania, element przekazujący moment obrotowy, sprzęgło oraz napędzany element wykonawczy. Zasilanie w maszynach oraz urządzeniach, którym się

zajmujemy zazwyczaj rozwiązane jest przez wykorzystanie silnika spalinowego. Silnik to urządzenie zamieniające energię chemiczną paliwa na pracę mechaniczną. Przykładowymi i najbardziej popularnymi formami energii, którymi zasilany jest silnik to energia elektryczna oraz energia cieplna czyli spalinowa. W zależności od urządzenia występują w tych układach zarówno silniki o zapłonie iskrowym jak i silniki o zapłonie samoczynnym. Na potrzeby niniejszej pracy wykorzystane były przede wszystkim maszyny i urządzenia z silnikami spalinowymi o zapłonie iskrowym, biorąc pod uwagę zastosowanie tego typu silników do układów napędowych wykorzystujących mniejsze moce tj. poniżej 10 kW. Elementem przekazującym moment obrotowy z silnika jest wał napędowy lub półoś napędowa, zależnie od sposobu oraz rodzaju wykonywanych prac. Wał napędowy to element układu przeniesienia napędu z silnika na element wykonawczy. W małych silnikach wykorzystywanych do napędu maszyn i urządzeń ręcznych, wał napędowy jest najczęściej zakończony mechanizmem redukującym obroty silnika do określonej zadanej prędkości obrotowej lub bezpośrednio zakończony elementem służącym do wykonywania określonej pracy. Kolejnym elementem systemu napędowego jest sprzęgło będące mechanizmem stosowanym do połączenia ze sobą wałów celem przekazania momentu obrotowego pochodzącego z silnika. Jest odpowiedzialne za płynne zmiany prędkości obrotowej czy też za rozpoczęcie wykonywania czynności roboczej jak i jej zakończenie. Dodatkową funkcją sprzęgła jest bezpieczeństwo urządzenia i użytkownika. Sprzęgło jest łącznikiem momentu obrotowego z wału napędowego silnika na wał napędzany elementu wykonawczego. To właśnie element wykonawczy jest ostatnim elementem układu napędowego i jest odpowiedzialny za wykonywanie prac ściśle określonych i sprecyzowanych czynności, do których dane urządzenia zostały stworzone i przeznaczone. Różne rodzaje oraz kształty elementów wykonawczych świadczą o masowości pracy wykonywanych za pomocą tego typu urządzeń oraz o tym, że rynek światowy ma zapotrzebowanie na urządzenia przenośne, które pomagają człowiekowi w wykonywaniu wszelakich codziennych czynności ułatwiających i upraszczających wszelakie prace [2, 4, 5, 8].

Małe maszyny podzielone są na dwie grupy. Pierwsza to te, które operator obsługuje trzymając w rękach podczas pracy (rys. 2.11). Z tego względu ich budowa jest zminimalizowana, a elementy zastosowane do ich konstrukcji są małych rozmiarów. Spowodowane jest to przepisami skierowanymi na operatora danego urządzenia czyli ograniczeniami masy urządzenia.



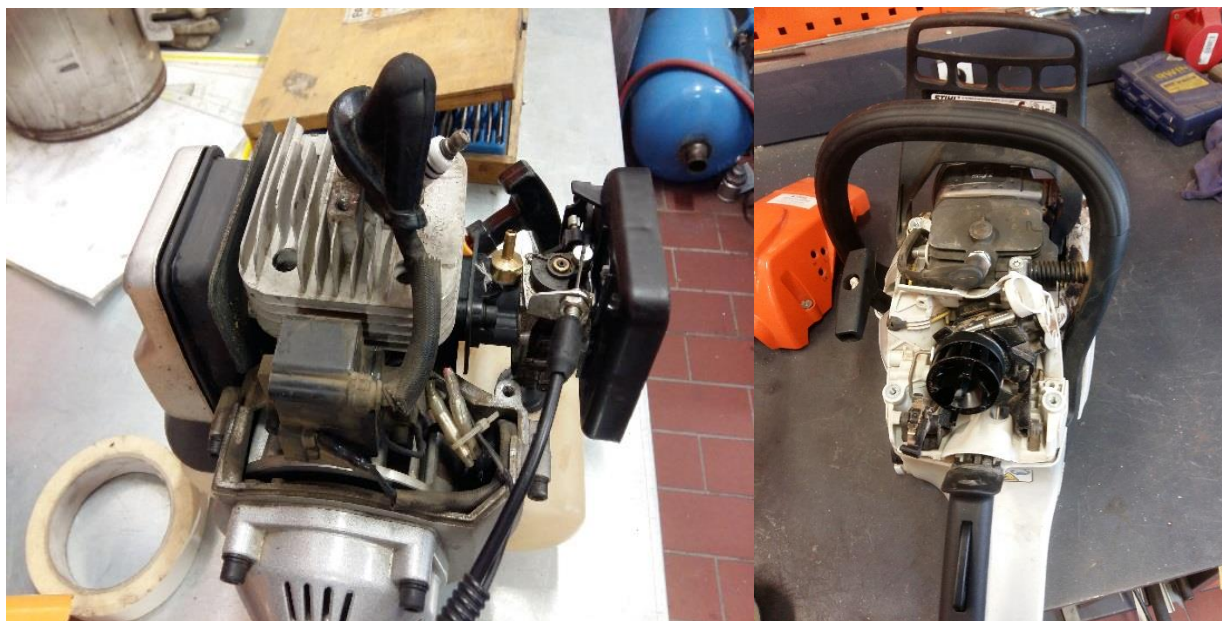
Rys. 2.11. Kosa spalinowa i dmuchawa podczas realizowania prac

Dlatego większość urządzeń ręcznych wyposażonych jest w silnik o zapłonie iskrowym, a dodatkowo w celu zminimalizowania masy stosowane są silniki pracujące w cyklu dwusuwowym. Są one zdecydowanie lżejsze od silników o zapłonie iskrowym czterosuwowych. Drugą grupą są małe maszyny, które podczas pracy są tylko obsługiwane przez operatora (rys. 2.12). W tym przypadku najczęściej spotykamy maszyny wyposażone w silnik o zapłonie iskrowym pracujący w cyklu czterosuwowym. W sytuacji, w której nie ma potrzeby ograniczenia masy urządzenia, lepszym rozwiązaniem są właśnie takie silniki.



Rys. 2.12. Kosiarka spalinowa podczas wykonywania pracy

W dalszej części pracy zostaną przedstawione oba rozwiązania. Tym samym opisane będą zależności pomiędzy różnego rodzaju rozwiązaniami, pozwoli to na ustalenie wniosków odnośnie korzystniejszych rozwiązań w aspekcie emisji związków toksycznych spalin. Dalsza część pracy stanowi o różnych rodzajach rozwiązań oraz o konstrukcjach wykorzystywanych na rynku. Ich budowa, konstrukcja jest mało rozbudowana. Spowodowane jest to brakiem konieczności kontroli emisji związków toksycznych spalin z tego typu silników podczas ich eksploatacji. Stąd też, silniki te nie są wyposażane w układy oczyszczania spalin, czy też nie posiadają systemów ograniczających emisję zanieczyszczeń do środowiska naturalnego. Budowa silnika jest ograniczona do podstawowych elementów konstrukcyjnych, a jedynym utrudnieniem w konstrukcji tego typu jednostek jest ich minimalizacja masy, stąd elementy tych silników wykonywane są ze stopów lekkich, przeważnie aluminium.



Rys. 2.13. Silnik kosi spalinowej oraz piły łańcuchowej

Silniki maszyn i urządzeń przenośnych budową i konstrukcją oraz zakresem stosowanych nowych rozwiązań i technologii różnią się znacznie od silników pojazdów drogowych, podstawowa różnica to gabaryty, czyli także objętość skokowa (rys. 2.13). Silniki wykorzystywane do napędu maszyn i urządzeń przenośnych, ze względu na metodę doprowadzenia ładunku do komory spalania są silnikami wolnossącymi i najczęściej są zasilane poprzez tworzenie mieszanki paliwowo-powietrznej przy zastosowaniu gaźnika. Bardzo rzadko stosowane są układy wtryskowe i co jest z tym związane elektroniczne sterowanie pracą silnika. Następstwem tego jest



również brak czujnika tlenu w spalinach, tzw. sondy lambda oraz pozasilnikowych układów oczyszczania spalin. Tak jak zostało to nadmienione powyżej, standardowym rozwiązaniem są silniki o zapłonie iskrowym, natomiast w sytuacji gdy silniki są wykorzystywane do urządzeń cięższych czy też narażonych na długotrwałą pracę, jak na przykład zagęszczarki czy agregaty prądowocze (generatory) dużej mocy, silniki o zapłonie iskrowym są zastępowane silnikami o zapłonie samoczynnym. W pracy przedstawiono zarówno agregat prądowoczy ZI, jak i ZS. Kolejny aspekt, który ma znaczący wpływ na budowę oraz zaawansowanie konstrukcyjne silników spalinowych stosowanych w małych konstrukcjach, jest ściśle uzależniony od norm nakładanych na producentów tego typu urządzeń. Ze względu na koszty oraz masę silniki o małych objętościach skokowych nie są wyposażone w systemy diagnostyczne, stąd też nie ma konieczności wyposażania ich w układy kontrolujące skład mieszanki paliwowo-powietrznej, czy też sprawujące kontrolujące skład spalin. Silniki są wyposażone tylko w elementy i układy, które są niezbędne do poprawnej i stabilnej pracy, tak by były one zdolne do napędu maszyny, do której zostały przeznaczone. Wszystkie tego typu układy napędowe charakteryzują się stosunkowo prostą konstrukcją (rys. 2.14).



*Rys. 2.14. Silnik traktora ogrodowego i zagęszczarki*

### **3. Regulacje prawne oraz przepisy dotyczące emisji z silników wykorzystywanych do napędu małych urządzeń o zastosowaniach pozadrogowych**

#### **3.1. Wprowadzenie**

Silniki maszyn i urządzeń przenośnych należą do szerszej kategorii silników o zastosowaniach pozadrogowych, dlatego aby zaakcentować przede wszystkim różnice w metodach badań tych silników, ale także różnice wartości dopuszczalnych emisji związków toksycznych, przedstawiono je na tle metod wymaganych dla innych silników o zastosowaniach pozadrogowych, przede wszystkim silników pojazdów NRMM (*Non-Road Mobile Machinery*). Zamieszczony w niniejszej pracy przegląd przepisów obejmuje wybrane, najważniejsze aspekty regulacji dotyczących emisji związków toksycznych spalin z silników o zastosowaniach pozadrogowych zarówno ZS, większej mocy znamionowej, jak i ZI o mniejszej mocy i objętości skokowej. Wytyczne odnoszące się do badań emisji związków szkodliwych spalin z silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych zawarte są w dyrektywie 97/68/EC i 2002/08/EC [96]. Opracowane później dyrektywy [20, 21, 22, 26 - 29] wprowadzały zmiany i uzupełnienia, które wynikały głównie z postępu technicznego w zakresie budowy silników oraz zwiększania stopnia ujednoczenia przepisów w skali globalnej. Stąd też często wprowadzane przepisy były wspólnymi ustaleniami Komisji Europejskiej i Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska EPA (*Environmental Protection Agency*) [98]. Dążenie do ujednoczenia przepisów jest działaniem pożądanym nie tylko w skali europejskiej, ale na całym świecie. Ostatnia dyrektywa dotycząca emisji związków toksycznych spalin z silników o zastosowaniach pozadrogowych była opublikowana w grudniu 2012 roku [21].

W dyrektywie tej zwrócono szczególną uwagę na problem ograniczania emisji NO<sub>x</sub>. Jest to związane z koniecznością zastosowania układów SCR (*Selective Catalytic Reduction*), ale dotyczy to oczywiście tylko silników ZS o mocy większej niż 19 kW. Ważnym zapisem tej dyrektywy, na który należy zwrócić uwagę, jest stwierdzenie o konieczności włączenia do dyrektywy 97/68/EC przepisów bazujących na dyrektywie 595/2009/WE silników pojazdów drogowych HDV (*Heavy Duty Vehicle*). Zapis ten pojawił się z powodu wprowadzenia do procedur homologacyjnych badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji. W związku z tym należy spodziewać się, że dla silników o zastosowaniach pozadrogowych przyjmowane będą rozwiązania znane dotychczas z zastosowań dla silników pojazdów drogowych HDV.

W Japonii za ustalenia legislacyjne dotyczące emisji związków toksycznych spalin odpowiedzialnych jest kilka podmiotów, m.in. Ministerstwo Środowiska oraz Ministerstwo Infrastruktury i Transportu, ponadto są one konsultowane z organizacjami pozarządowymi. Przepisy obowiązujące w krajach Unii Europejskiej, Stanach Zjednoczonych i Japonii są bardzo często podstawą ustaleń przyjmowanych w innych krajach lub wręcz są przyjmowane wprost. Przykładem są Chiny i Indie. Tamtejsze przepisy bazują na regulacjach europejskich i amerykańskich, a najważniejsze różnice związane są z datami wprowadzania kolejnych limitów i podziałem silników ze względu na moc. Ponadto oprócz ogólnie obowiązujących przepisów wprowadzono także indywidualne regulacje obowiązujące w niektórych krajach, stanach czy regionach. Przykładem jest stan Kalifornia w Stanach Zjednoczonych Ameryki, gdzie niezależnie od przepisów federalnych realizowane są przedsięwzięcia mające na celu zmniejszenie negatywnego oddziaływania środków transportu na środowisko naturalne, również dla pojazdów NRMM [98].

### 3.2. Limity emisji związków toksycznych

Pierwsze limity emisji związków toksycznych w przepisach europejskich dla omawianej grupy pojazdów pojawiły się w latach 90-tych XX wieku. Wprowadzono je w kolejnych etapach: *Stage I*, *Stage II*, które to były zawsze uwarunkowane mocą silnika (tab. 3.1) [26, 29].

Tabela 3.1. Limity emisji związków toksycznych spalin *Stage I* i *Stage II* w Europie dla silników o zastosowaniach pozadrogowych oraz daty ich wprowadzenia [96]

Moc silnika kW	Data wprowadzenia		CO g/kWh	HC g/kWh	NO <sub>x</sub> g/kWh	PM g/kWh
	NTA	ANR				
<i>Stage I</i>						
>130–560	1.07.1998	1.01.1999	5,0	1,3	9,2	0,54
>75–130	1.01.2001	1.07.2001	5,0	1,3	9,2	0,7
≥37–75	1.01.2001	1.07.2001	6,5	1,3	9,2	0,85
<i>Stage II</i>						
>130–560	1.01.2001	1.07.2002	3,5	1,0	6,0	0,2
>75–130	1.01.2002	1.07.2003	5,0	1,0	6,0	0,3
>37–75	1.01.2003	1.01.2004	5,0	1,3	7,0	0,4
≥18–37	1.01.2001	1.01.2002	5,5	1,5	8,0	0,8

W roku 2002 Parlament Europejski przyjął dyrektywę 2002/88/EC, na mocy której wprowadzono standardy emisji dla małych silników ZI o mocy mniejszej niż 19 kW. Ponadto w dokumencie tym uwzględniono także silniki lokomotyw i jednostek pływających po

wodach śródlądowych. Przepisy zawarte w dyrektywie tej były w dużym stopniu zbieżne z przepisami obowiązującymi w Stanach Zjednoczonych Ameryki [26, 98].

W następnych latach wprowadzono (lub będą wprowadzone) limity *Stage III* oraz *Stage IV*. Wprowadzanie tych regulacji rozłożono na lata 2006–2014 (tab. 3.2). Ponadto *Stage III* podzielono na: *IIIA* i *IIIB*. W *Stage IIIB* wprowadzono bardzo rygorystyczne limity emisji NO<sub>x</sub> i PM, emisja PM została zmniejszona o około 90 % w stosunku do limitów *Stage II* [20, 22, 27].

Dla silników ciągników i maszyn rolniczych oraz leśnych przyjęto inne daty wprowadzania norm emisji. W roku 2010 na mocy dyrektywy 2010/25/EU dla niektórych zastosowań silników (kategoria T2, C2 i T4.1 – kategoryzacja zgodna z dyrektywą 2003/37/EC) przyjęto pięcioletnie opóźnienie wprowadzenia limitów emisji *Stage IIIB* i *Stage IV* w stosunku do wcześniej zaproponowanych dat wprowadzenia [20].

Tabela 3.2. Limity emisji związków toksycznych spalin *Stage III* i *Stage IV* w Europie dla silników o zastosowaniach pozadrogowych oraz daty ich wprowadzenia [96]

Moc silnika kW	Data wprowadzenia		CO g/kWh	HC g/kWh	NO <sub>x</sub> g/kWh	HC+NO <sub>x</sub> g/kWh	PM g/kWh
	NTA	ANR					
<i>Stage IIIA</i>							
>130–560	31.12.2005	31.12.2006	3,5	–	–	4,0	0,2
>75–130	31.12.2006	31.12.2007	5,0	–	–	4,0	0,3
>37–75	31.12.2005	31.12.2006	5,0	–	–	4,7	0,4
>19–37	30.06.2005	31.12.2005	5,5	–	–	7,5	0,6
<i>Stage IIIB</i>							
>130–560	31.12.2011	31.12.2012	3,5	0,19	2,0	–	0,025
>75–130	31.12.2010	31.12.2011	5,0	0,19	3,3	–	0,025
>56–75	31.12.2010	31.12.2011	5,0	0,19	3,3	–	0,025
>37–56	31.12.2009	31.12.2010	5,0	–	–	4,7	0,025
<i>Stage IV</i>							
>130–560	30.09.2013	30.09.2014	3,5	0,19	0,4	–	0,025
>75–130	31.12.2012	31.12.2013	5,0	0,19	0,4	–	0,025

W Stanach Zjednoczonych pierwsze przepisy federalne dla nowych silników pojazdów *non-road* przyjęto w 1994 roku (*Tier 1*) dla silników o mocy powyżej 37 kW, a więc nieco wcześniej niż w Europie (tab. 3.3). Limity *Tier 1* wprowadzono stopniowo w latach 1996–2000, w zależności od mocy silnika. W roku 1996 podpisano porozumienie dotyczące ograniczania emisji z silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych. Sygnatariuszami tego dokumentu byli EPA,

CARB (*California Air Resources Board*) i producenci maszyn oraz silników: Caterpillar, Cummins, John Deere, Detroit Diesel, Deutz, Isuzu, Komatsu, Kubota, Mitsubishi, Navistar, New Holland, Wis-Con, Yanmar. W roku 1998 wprowadzono limity (*Tier 1*) dla silników o mocy poniżej 37 kW oraz przedstawiono limity *Tier 2* i *Tier 3*, wprowadzane w latach 2000-2008, dla wszystkich silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych. Natomiast, w 2004 roku określono kolejne limity *Tier 4* wprowadzane w latach 2008-2014 (tab. 3.4 oraz tab. 3.5) [98].

Tabela 3.3. Limity emisji związków toksycznych spalin *Tier 1, 2 i 3* w Stanach Zjednoczonych dla silników o zastosowaniach pozadrogowych oraz daty ich wprowadzenia [96]

Moc silnika kW	Model roku	CO g/kWh	HC g/kWh	NMHC+NO <sub>x</sub> g/kWh	NO <sub>x</sub> g/kWh	PM g/kWh
<i>Tier 1</i>						
≤8	2000	8,00	–	10,50	–	1,00
>8–19	2000	6,60	–	9,50	–	0,80
>19–37	1999	5,50	–	9,50	–	0,80
>37–75	1998	–	–	–	9,20	–
>75–130	1997	–	–	–	9,20	–
>130–225	1996	11,40	1,30	–	9,20	0,54
>225–450	1996	11,40	1,30	–	9,20	0,54
>450–560	1996	11,40	1,30	–	9,20	0,54
>560	2000	11,40	1,30	–	9,20	0,54
<i>Tier 2</i>						
≤8	2005	8,00	–	7,50	–	0,80
>8–19	2005	6,60	–	7,50	–	0,80
>19–37	2004	5,50	–	7,50	–	0,60
>37–75	2004	5,00	–	7,50	–	0,40
>75–130	2003	5,00	–	6,60	–	0,30
>130–225	2003	3,50	–	6,60	–	0,20
>225–450	2001	3,50	–	6,40	–	0,20
>450–560	2002	3,50	–	6,40	–	0,20
>560	2006	3,50	–	6,40	–	0,20
<i>Tier 3</i>						
>37–75	2008	5,00	–	4,70	–	Obowiązuje <i>Tier 2</i>
>75–130	2007			4,00		
>130–225	2006					
>225–450	2006					
>450–560	2006					

Tabela 3.4. Limity emisji związków toksycznych spalin *Tier 4* w Stanach Zjednoczonych dla silników o zastosowaniach pozadrogowych oraz daty ich wprowadzenia [96]

Moc silnika kW	Model roku	CO g/kWh	HC g/kWh	NMHC+NO <sub>x</sub> g/kWh	NO <sub>x</sub> g/kWh	PM g/kWh
<i>Tier 4</i>						
≤8	2008	8,00	–	7,50	–	0,40 <sup>a</sup>
>8–19	2008	6,60	–	7,50	–	0,40
>19–37	2008	5,50	–	7,50	–	0,3
	2013	5,50	–	4,70	–	0,03
>37–56	2008	5,00	–	–	–	0,3 <sup>b</sup>
	2013	5,00	–	–	–	0,03
>56–130	2012-2014 <sup>c</sup>	5,00	0,19	–	0,40	0,02
>130–560	2011-2014 <sup>d</sup>	3,50	0,19	–	0,40	0,02

Tabela 3.5. Limity emisji związków toksycznych spalin *Tier 4* w Stanach Zjednoczonych dla silników o zastosowaniach pozadrogowych, mocy powyżej 560 kW oraz daty ich wprowadzenia [96]

Data wprowadzenia	Kategoria	CO g/kWh	NMHC g/kWh	NO <sub>x</sub> g/kWh	PM g/kWh
2011-2014	silniki agregatowe > 900 kW	3,50	0,40	0,67	0,10
	pozostałe			3,50	
2015	silniki agregatowe		0,190	0,67	0,03
	pozostałe			3,50	0,04

Norma *Tier 4* zakłada zmniejszenie dopuszczalnej emisji PM i NO<sub>x</sub> o około 90%, w stosunku do *Tier 2*. Tak rygorystyczne rozwiązanie będzie wymagało zastosowania najnowszych osiągnięć z dziedziny budowy silników spalinowych. Norma ta określa także ograniczenia zawartości siarki w oleju napędowym dla paliw stosowanych w silnikach lokomotyw spalinowych. W przepisach określono również dopuszczalne wartości zacinienia spalin dla silników pojazdów NRMM (tab. 3.6) [98].

Tabela 3.6. Limity zacinienia spalin dla silników ZS o zastosowaniach pozadrogowych w Stanach Zjednoczonych [96]

Zacinienie spalin		
Przyspieszenie	Stała prędkość	Maksymalne obciążenie
20%	15%	50%

W Stanach Zjednoczonych producenci silników mogą dla swoich produktów uzyskać certyfikat *Blue Sky Series*, co oznacza silnik o bardzo dobrych parametrach ekologicznych. Wymaga to jednak spełnienia jeszcze bardziej rygorystycznych wymogów ekologicznych (dot. *Tier 1 – 3*, tab. 3.7).

Tabela 3.7. Dobrowolne limity emisji związków toksycznych spalin w Stanach Zjednoczonych *Blue Sky Series* dla silników o zastosowaniach pozadrogowych [96]

Moc silnika kW	NMHC+NO <sub>x</sub> g/kWh	PM g/kWh
≤8	4,60	0,48
>8–19	4,50	0,48
>19–37	4,50	0,36
>37–75	4,70	0,24
>75–130	4,00	0,18
>130–560	4,00	0,12
>560	3,80	0,12

Japońskie przepisy dotyczące pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych wyróżniają dwie grupy pojazdów: pojazdy specjalne SMVS (*Special Motor Vehicles Standards*) (tab. 3.8) i pojazdy budowlane CMS (*Construction Machinery Standards*) (tab. 3.9). Podział uwzględnia rodzaj maszyny, w której zabudowany jest silnik. Dopuszczalny poziom emisji uzależniony jest od mocy silnika, podobnie jak w Europie i Stanach Zjednoczonych. Między standardami japońskimi (SMVS i CMS) oraz europejskimi i amerykańskimi zachodzi jeszcze jedno podobieństwo, mianowicie wprowadzenie limitów emisji podzielono na etapy i rozłożono w czasie [98].

Tabela 3.8. Limity emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych SMVS w Japonii oraz daty ich wprowadzenia [96]

Moc silnika kW	Data wprowadzenia	CO g/kWh	HC g/kWh	NO <sub>x</sub> g/kWh	PM g/kWh	Zaczerzenie spalin %
<i>Stage I</i>						
≥19–37	1.10.2003	5,00	1,50	8,00	0,80	40
>37–75			1,30	7,00	0,40	
>75–130			1,00	6,00	0,30	
>130–560					0,20	
<i>Stage II</i>						
≥19–37	1.10.2007	5,00	1,00	6,00	0,40	40
>37–56	1.10.2008		0,70	4,00	0,30	35
>56–75			0,25	30		
>75–130	1.10.2007		0,40	3,60	0,20	25
>130–560	1.10.2006	0,17				

Tabela 3.9. Limity emisji związków toksycznych spalin silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych CMS w Japonii oraz daty ich wprowadzenia [96]

Moc silnika kW	Data wprowadzenia	CO g/kWh	HC g/kWh	NO <sub>x</sub> g/kWh	PM g/kWh
<i>Stage I</i>					
≥7,5–15	1.04.1996	5,70	2,40	12,40	–
>15–30	1.04.1997		1,90	10,50	–
>30–260	1.04.1998	5,00	1,30	9,20	–
<i>Stage II</i>					
≥8–19	1.10.2003	5,00	1,50	9,00	0,80
>19–37				8,00	
>37–75			1,30	7,00	0,40
>75–130			1,00	6,00	0,30

Jednym z głównych celów dyrektyw europejskich było ustalenie dopuszczalnych limitów emisji związków toksycznych spalin. Na przestrzeni lat stawały się one coraz bardziej rygorystyczne. Mimo że bardzo często silniki o zastosowanych pozadrogowych i pojazdów drogowych HDV charakteryzują się mocą i właściwościami na podobnym poziomie, to i tak dopuszczalne wartości związków toksycznych dla silników o zastosowanych pozadrogowych są większe.

Dla silników ZI, o małej objętości skokowej pierwsze normę *Stage I* wprowadzono w roku 2004, zawierała ona wartości dopuszczalne dla poszczególnych związków toksycznych spalin,

dla silników o mocy mniejszej niż 19 kW (tab. 3.10), natomiast *Stage II* w roku 2007 i 2008 (tab. 3.11).

Tabela 3.10. Limity emisji związków toksycznych spalin *Stage I* silników ZI o mocy do 19 kW [96]

Kategoria	Objętość skokowa dm <sup>3</sup>	Data wprowadzenia	CO g/kWh	HC g/kWh	NO <sub>x</sub> g/kWh	HC+NO <sub>x</sub> g/kWh
Narzędzia ręczne						
SH:1	<0,020	11.08.2004	805	295	5,36	
SH:2	0,020≤V<0,050	11.08.2004	805	241	5,36	
SH:3	≥0,050	11.08.2004	603	161	5,36	
Pozostałe maszyny i urządzenia przenośne						
SN:1	<0,066	11.08.2004	519			50
SN:2	0,066≤V<0,010	11.08.2004	519			40
SN:3	0,100≤V<0,225	11.08.2004	519			16,1
SN:4	≥0,225	11.08.2004	519			13,4

Tabela 3.11. Limity emisji związków toksycznych spalin *Stage II* silników ZI o mocy do 19 kW [96]

Kategoria	Objętość skokowa dm <sup>3</sup>	Data wprowadzenia	CO g/kWh	HC+NO <sub>x</sub> g/kWh
Narzędzia ręczne				
SH:1	<0,020	08.2007	805	50
SH:2	0,020≤V<0,050	08.2007	805	50
SH:3	≥0,050	08.2008	603	72
Pozostałe maszyny i urządzenia przenośne				
SN:1	<0,066	08.2004	610	50
SN:2	0,066≤V<0,010	08.2004	610	40
SN:3	0,100≤V<0,225	08.2007	610	16,1
SN:4	≥0,225	08.2006	610	12,1
Warunek dodatkowy – NO <sub>x</sub> nie mogą przekroczyć 10 g/kWh				

Kolejne regulacje dla silników ZI o małej objętości skokowej wprowadzono w roku 2019 i rozgraniczono na dwie kategorie, dla silników o mocy poniżej 19 kW i mocy większej niż 19 kW, ale mniejszej niż 56 kW (tab. 3.12 i 3.13) [96].

Tabela 3.12. Limity emisji związków toksycznych spalin *Stage V* silników ZI o mocy do 19 kW [96]

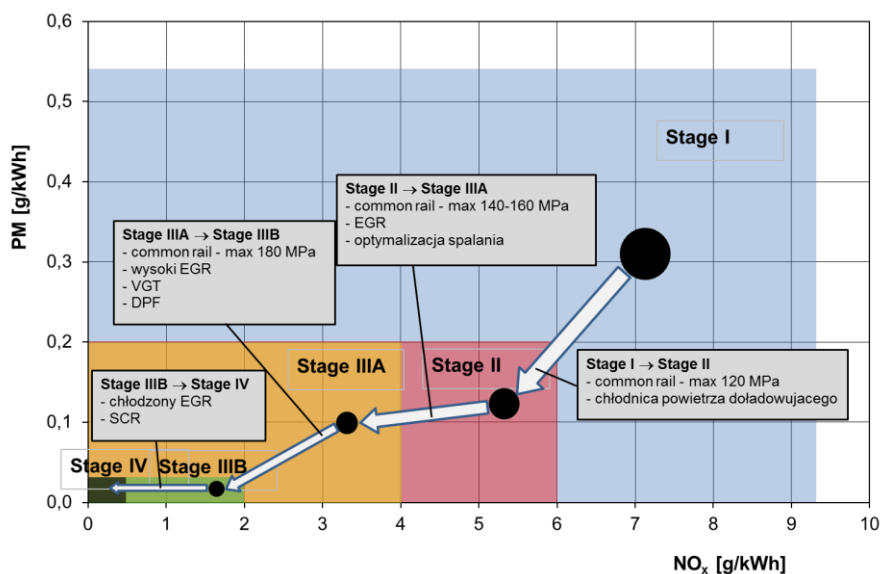
Kategoria	Objętość skokowa dm <sup>3</sup>	Data wprowadzenia	CO g/kWh	HC+NO <sub>x</sub> g/kWh
NRSh-v-1a	<0,050	08.2007	805	50
NRSh-v-1b	≥0,050	08.2007	805	50



Tabela 3.13. Limity emisji związków toksycznych spalin *Stage II* silników ZI o mocy 19-56 kW [96]

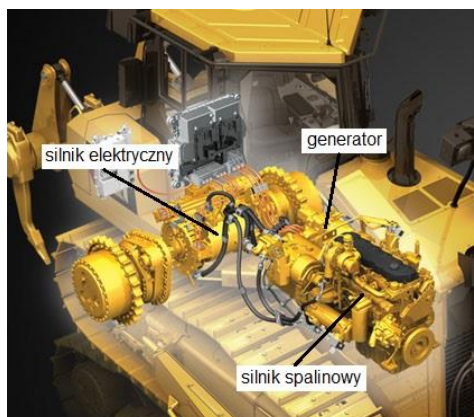
Kategoria	Moc kW	Objętość skokowa dm <sup>3</sup>	Data wprowadzenia	CO g/kWh	HC+NO <sub>x</sub> g/kWh
NRS-vr/vi-a	<19	0,080≤V<0,225	08.2007	805	50
NRS-vr/vi-b		≥0,225	08.2007	805	50
NRS-v-2a	19≤Ne<30	≤1	08.2008	603	72
NRS-v-2b		>1	08.2004	610	50
NRS-v-3	30≤Ne<56	dowolna	08.2004	610	40
Lub dowolna kombinacja spełniająca warunek: (HC+NO <sub>x</sub> ) × CO 0,784 ≤ 8,57 i warunki CO ≤ 20,6 g/kWh i (HC+NO <sub>x</sub> ) ≤ 2,7 g/kWh					

Wprowadzanie rygorystycznych przepisów odnoszących się do emisji związków toksycznych spalin wymusiło na producentach modernizację i stosowanie nowych rozwiązań w silnikach o zastosowaniach pozadrogowych. Rozwiązania w tych silnikach bardzo często były przyjmowane z silników pojazdów drogowych. Ten kierunek transferu wynikał z bardziej rygorystycznych przepisów dla silników pojazdów drogowych [64 – 66]. Charakterystyczne jest to, że dla silników pojazdów NRMM obserwuje się globalną tendencję polegającą na stosowaniu takich samych, albo bardzo podobnych rozwiązań w budowie silników spalinowych [66]. Efektem tego są obecnie stosowane silniki wyposażone w układy oczyszczania spalin (filtry DPF – *Diesel Particulate Filter* i układy SCR). W opisywanej grupie silników od kilku lat stosowany jest tzw. *downsizing*, czyli zmniejszanie wymiarów głównych elementów silnika spalinowego oraz jego podzespołów. To nic innego jak ogólna redukcja wymiarów i ilości materiałów. Często zachodzi zmniejszenie ilości cylindrów w silniku spalinowym. Ponadto stosowane są wysokociśnieniowe układy wtryskowe common rail lub pompowtryskiwacze (maksymalne ciśnienie wtrysku paliwa dochodzi do wartości 180 MPa) oraz turbodoładowanie, coraz częściej typu VGT (*Variable Geometry Turbocharger*). Do standardowych rozwiązań należy także recyrkulacja spalin EGR (*Exhaust Gas Recirculation*), również z chłodnicą spalin. Najważniejsze rozwiązania konieczne do spełnienia limitów silników pojazdów NRMM schematycznie przedstawiono na rysunku 3.1 [30, 41, 43, 58, 86]. Niestety, jak już napisano wyżej, w rozdziale drugim, rozwój ten nie dotyczy silników o małych objętościach skokowych i małej mocy, stosowanych do napędu maszyn i urządzeń przenośnych, liberalne przepisy nie wymuszają tego rozwoju.

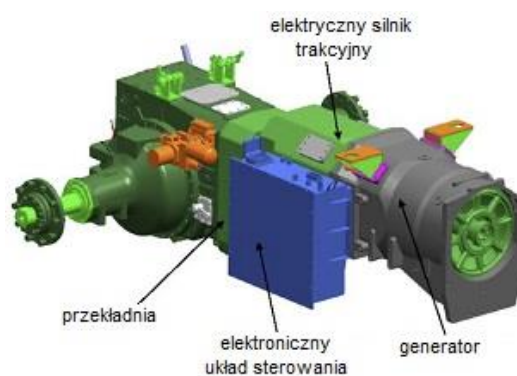


Rys. 3.1. Rozwiązania stosowane w silnikach NRMM w celu spełnienia norm emisji [opracowano na podstawie: 30, 55, 58, 69, 103]

W przyszłości należy spodziewać się dalszego zmniejszania dopuszczalnych wartości emisji związków toksycznych spalin oraz zużycia paliwa (emisji CO<sub>2</sub>) przez silniki o zastosowaniach pozadrogowych [62, 67]. Będzie to wiązało się z koniecznością unowocześniania tych silników, czy całych układów napędowych. Już obecnie ośrodki badawczo-rozwojowe pracują nad takimi rozwiązaniami. W ostatnich kilku latach intensywne prace trwają nad hybrydyzacją i elektryfikacją układów napędowych [64, 81, 84, 85]. Producenci dostrzegają duży potencjał w tych rozwiązaniach, a pierwsze z nich pojawiły się już na rynku, np. hybrydowe układy napędowe maszyn budowlanych firmy Caterpillar (rys. 3.2), czy ciągnik rolniczy z elektrycznym układem napędowym (rys. 3.3) [15, 31, 32]. W dalszej przyszłości należy spodziewać się zastosowania ogniwi paliwowych jako źródła napędu pojazdów NRMM. Pierwszy prototypowy ciągnik rolniczy z takim napędem powstał już kilka lat temu [63]. Natomiast dla maszyn i urządzeń przenośnych kierunek rozwoju napędów jest jednoznaczny, napędy konwencjonalne, z silnikiem spalinowym są zastępowane napędami elektrycznymi akumulatorowymi. Rozwiązania zaawansowane technologicznie, jak np. zasilanie wodorem są bardzo rzadko spotykane i w fazie koncepcyjnej (rys. 3.4) [99].



Rys. 3.2. Hybrydowy układ napędowy spycharki firmy Caterpillar [16]



Rys. 3.3. Elektryczny układ napędowy ciągnika rolniczego MTZ Belarus-3023 [44, 45]



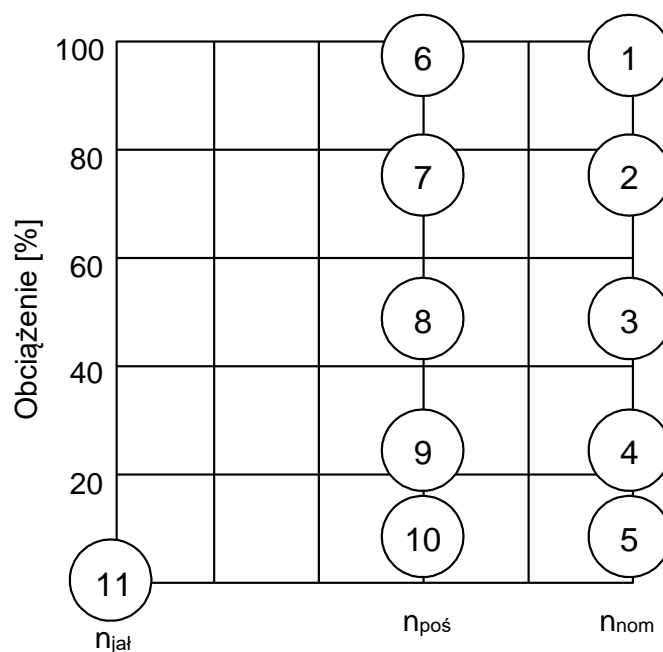
Rys. 3.4. Kosiarka z silnikiem ZI zasilanym wodorem [99]

### 3.3. Metody badań homologacyjnych

Każdy nowo skonstruowany pojazd, a tym samym każde nowo skonstruowane narzędzie czy maszyna dopuszczone do użytkowania jest zobligowane na terenie Unii Europejskiej do uzyskania certyfikatu homologacyjnego. W celu otrzymania certyfikatu homologacyjnego konieczne jest przebadanie silnika spalinowego, przeznaczonego do napędów maszyn i urządzeń pozadrogowych. Do tego celu wykorzystuje się dwa sposoby testowania. Pierwszym z nich jest stacjonarny, drugi zaś niestacjonarny. Testem stacjonarnym, który jest wykorzystywany do badań i pomiarów przeznaczonych do homologowania i dopuszczania silników do użytkowania jest test w cyklu NRSC (*Non-Road Stationary Cycle*), który jest cyklem dla maszyn pozadrogowych, stosowany w celu pomiaru emisji CO, HC, NO<sub>x</sub> oraz PM. Jest on przeprowadzany według standardów testów *Stage* dla silników, które pracują przy stałej lub zmiennej prędkości obrotowej. Test NRSC jest cyklem składającym się z pewnej liczby faz prędkości obrotowej i obciążenia, pokrywających typowy zakres pracy silników w maszynach. W każdej z badanych faz określa się stężenie badanych związków szkodliwych spalin, natężenie przepływu spalin oraz moc i średnie ważone zmierzonych wartości. Podczas przyjętej i zaplanowanej fazy w określonych wcześniej warunkach pracy na wykondycjonowanym silniku pobiera się próbki gazów wylotowych z układu wydechowego w sposób ciągły, poprzez pobranie próbki nierozcieńczonych lub też rozcieńczonych spalin, zależnie od ich zanieczyszczenia czy też zależnie od normy pracy danego silnika spalinowego.

Dla pomiaru PM próbkę pobraną na odpowiednim filtrze (jedną dla całego testu) rozcieńcza się kondycjonowanym powietrzem otoczenia. Próbkę można również zbierać na oddzielnych filtrach, po jednej dla każdej z badanych faz oraz obliczyć wartości średnie ważone dla całego testu. Liczbę gramów każdego z zanieczyszczeń w przeliczeniu na kilowatogodzinę oblicza się w ściśle określony sposób. Test obejmuje charakterystyki przedstawiające sposób przeprowadzania cyklu badawczego dla różnych urządzeń zdefiniowanych w dyrektywie 2004/26/WE [20, 21, 27].

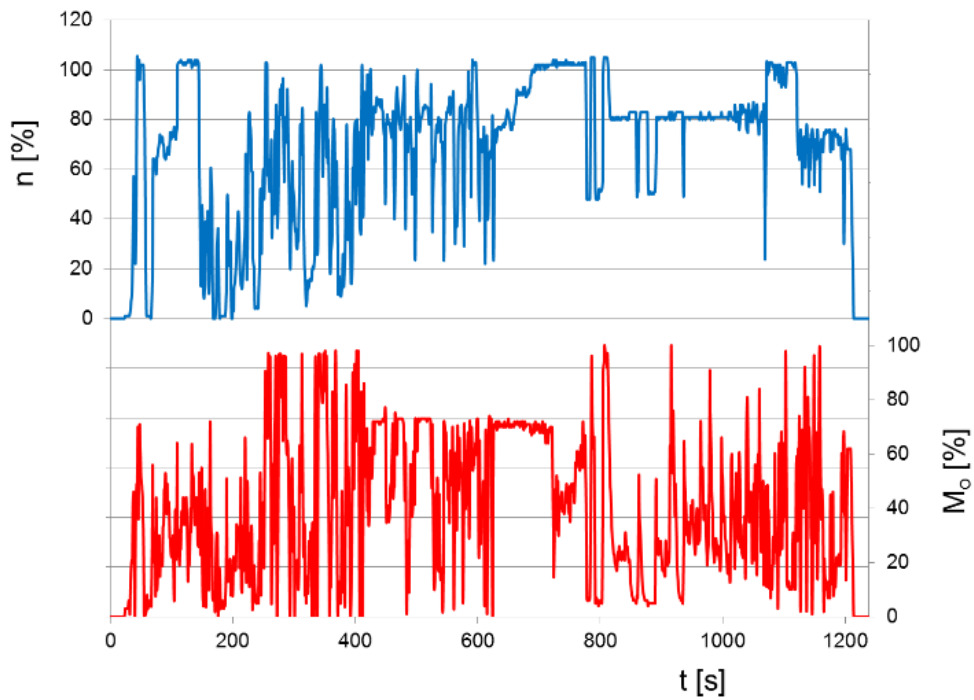
Aktualnie obowiązującym na całym świecie homologacyjnym testem statycznym dla niesamochodowych zastosowań silników spalinowych jest opracowany przez ISO (*International Standard Organization*) test badawczy ISO 8178 (rys. 3.5) [98]. Jest to test 11-fazowy wykonywany na hamulcowym stanowisku silnikowym. Na jego podstawie wyznacza się średnią emisję poszczególnych składników toksycznych spalin. Charakterystyczne współczynniki udziału w każdej fazie testu są dobierane w zależności od zastosowania badanego silnika. Dla pojazdów NRMM podstawowym testem statycznym jest ISO 8178-C1 [101].



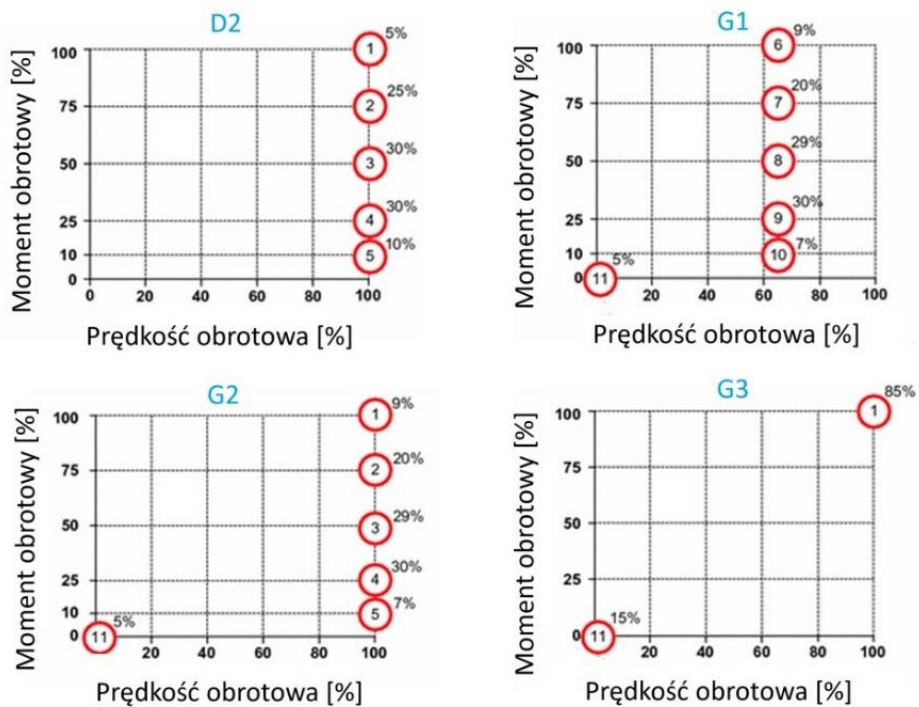
Rys. 3.5. Schemat testu 11-fazowego ISO 8178 [96]

Drugim ze sposobów jest przeprowadzenie testu niestacjonarnego w cyklu NRTC (*Non-Road Transient Cycle*), który jest cyklem dla maszyn pozadrogowych, stosowany w celu pomiaru emisji CO, HC, NO<sub>x</sub> oraz PM (rys. 3.6). Należy zwrócić uwagę, że test dynamiczny nie jest wykonywany dla silników ZI o małych objętościach skokowych i małej mocy, dla tych silników wykonywany jest tylko test statyczny w, a w zasadzie jego warianty (rys. 3.6):

- D2 - silniki pracujące ze stałą prędkością obrotową wału korbowego i zmiennym obciążeniem
- G1 - silniki maszyn i urządzeń nie wymagające trzymania w ręku i pracujące z pośrednimi prędkościami wału korbowego
- G2 - silniki maszyn i urządzeń nie wymagające trzymania w ręku i pracujące z maksymalną prędkością obrotową wału korbowego
- G3 - silniki maszyn i urządzeń trzymany w ręku.



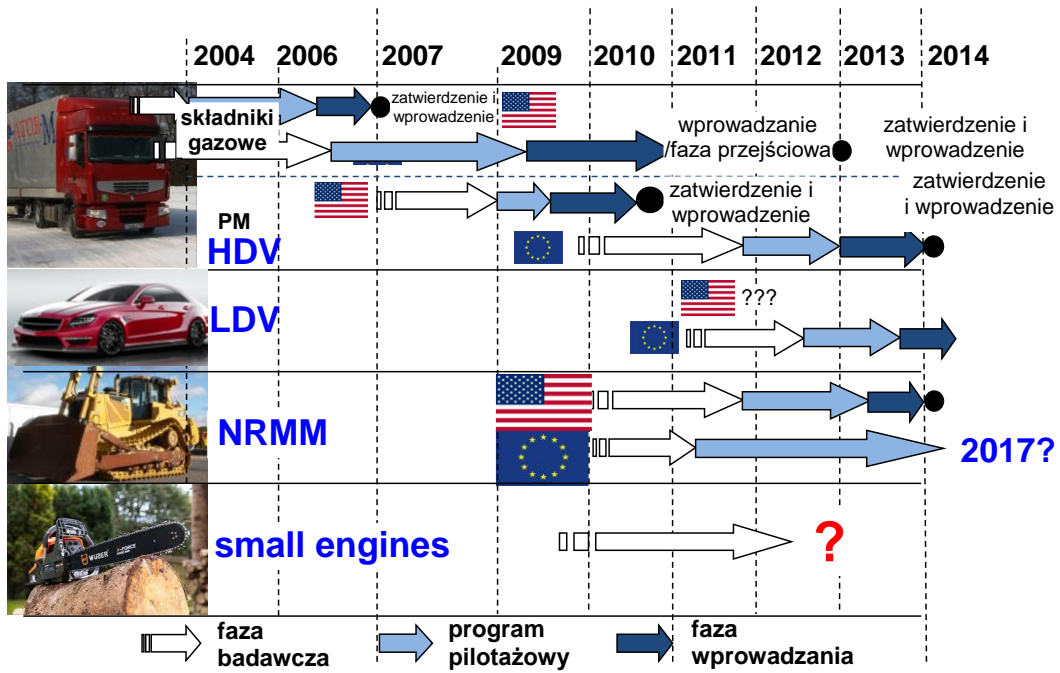
Rys. 3.6. Przebieg testu NRTC [96]



Rys. 3.7. Warianty testu ISO-8178 dla silników ZI [96, 101]

### **3.4. Badania w warunkach rzeczywistych**

Biorąc pod uwagę niepożądane skutki wynikające z procesu spalania oraz z charakteru pracy silników zastosowanych w urządzeniach pracujących w warunkach rzeczywistych pozadrogowych, założono, że emisja związków toksycznych spalin okaże się większa, niż uzyskana podczas testów homologacyjnych takich urządzeń. Wskazują na to badania w warunkach rzeczywistych wykonane dla grup pojazdów podlegających normom emisji spalin do środowiska uwzględnionych w dyrektywach. Pomiarów w rzeczywistych warunkach eksploatacji są wprowadzane dla różnych zastosowań silników, schematycznie proces ten przedstawiono na rysunku 3.8. Niestety obecne, ale także propozycje przyszłych regulacji nie uwzględniają badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji silników ZI o małej objętości i mocy, w tym zakresie legislacja wydaje się całkowicie zaniedbywać ten problem. Natomiast badania opisane w niniejszej pracy udowadniają, że pomiary takie są możliwe i mimo napotkanych wielu kwestii problematycznych powinny być kontynuowane i rozwijane. Już podczas wstępnych pomiarów napotkano na problemy związane z uzyskaniem danych potrzebnych do określenia emisji związków toksycznych spalin z tego typu urządzeń. Aparatura stosowana do pomiaru emisji związków toksycznych spalin z pojazdów nie zarejestrowała wyników pomiarów ze względu na ich zakres. Wskazuje to na słuszność podjętej tematyki. Podjęcie próby zbadania oraz określenie wielkości, czy też w początkowej fazie rzędu wielkości emisji związków toksycznych powstałych na skutek pracy tego typu urządzeń w warunkach rzeczywistych, wymagało podjęcia szeregu czynności mających na celu opracowanie metodyki badań oraz określenie warunków i sposobu pomiaru. Niezbędne jest, nie tylko pobranie próbki spalin, konieczny jest również pomiar szeregu parametrów pracy silnika, koniecznych do określenia wielkości emisji. Dostosowanie czy też znalezienie odpowiedniego narzędzia w postaci analizatora spalin jest również kluczowe ze względu na osiągnięcie sprecyzowanego celu w postaci oczekiwanego wyniku pomiarów. Konstrukcja urządzeń oraz silników jednocylindrowych jest od wielu lat niezmienna ze względu na ich budowę. To znacznie upraszcza zadanie, biorąc pod uwagę konieczność ingerencji bezpośrednio w silnik w celu domontowania do niego czujników potrzebnych do odczytania parametrów pracy silnika.



Rys. 3.8. Geneza wprowadzania pomiarów emisji związków toksycznych spalin dla silników różnych kategorii



#### **4. Przegląd literaturowy**

W piśmiennictwie dotyczącym silników spalinowych o małej objętości i mocy, zwykle poniżej 19 kW, można dostrzec, że urządzenia te nie są kontrolowane pod względem emisji związków toksycznych spalin podczas ich eksploatacji, a jedynie podczas homologacji do użytku przez producenta. Wyniki badań z tego typu urządzeń są wyłącznie uzyskiwane na stanowiskach hamowniczych w warunkach laboratoryjnych, co daje możliwość przeprowadzania certyfikowanych badań homologacyjnych i sprzedaży urządzenia na rynku Unii Europejskiej oraz Stanów Zjednoczonych. W grupie silników o małej objętości skokowej i małej mocy wykorzystywanych do zasilania urządzeń leśnych, ogrodowych i budowlanych nie jest prowadzony pomiar emisji związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji tak, jak jest to wykonywane podczas homologacji silników wykorzystywanych na przykład w pojazdach osobowych, ciężarowych oraz w ciężkich maszynach leśnych, rolniczych, budowlanych, czy też w silnikach statków i agregatach używanych do napędu lokomotyw.

Podczas przeglądu literatury zauważono pojawienie się tematyki oraz artykułów, poruszających zagadnienie małych silników, wykorzystywanych do napędu maszyn i urządzeń przenośnych, w których poziom emisji związków toksycznych spalin do środowiska wydaje się być odmienny w rzeczywistych warunkach eksploatacji – a zatem podczas wykonywania prac, do których dane urządzenia zostały faktycznie skonstruowane – niż poziom wykazany podczas pomiarów homologacyjnych w warunkach laboratoryjnych. W tematyce dotyczącej badań silników wykorzystywanych do małych urządzeń zostały zaobserwowane różne podejścia do pomiarów. Wszystkie jednoznacznie stanowią, że emisja związków toksycznych spalin w testach homologacyjnych znacząco różni się od emisji w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Przeważającą grupą publikacji są prace, które skupiają się na ukazaniu poziomu i składu emitowanych spalin, ze szczególnym uwzględnieniem przekroczenia poziomu dopuszczalnego związków toksycznych spalin, takich jak CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC oraz PM. [3, 16, 49, 56, 57, 59 - 61, 74, 75, 87 - 94]. Interesujące wnioski płyną z badań nad poziomem węglowodorów w małych silnikach użytkowych o mocy znamionowej od 3,7 do 9,3 kW, wykonanych za pomocą analizatora podczerwieni z transmisją Fouriera. Silniki o różnych wariantach wymiany ładunku zostały zbadane w trakcie pracy przy zastosowaniu czterech różnych typów paliwa. Wyniki wskazują, że emisja HC ma zwykle postać metanu lub nienasyconych węglowodorów aromatycznych. Inne mniejsze alkan, takie jak etan i propan, są obecne tylko w stosunkowo niewielkich stężeniach [77]. W innym artykule naukowym, w którym obiektem zainteresowania są małe silniki ZS stwierdzono z kolei,

że zmniejszenie  $\text{NO}_x$  przy pełnym obciążeniu dla mobilnego silnika wysokoprężnego nieporuszającego się po drogach jest kluczem do osiągnięcia normy emisji [44]. Gdzie indziej dokonano obserwacji, która potwierdza, że gdy małe silniki benzynowe z gaźnikiem są eksploatowane w regionie o większej wysokości bezwzględnej, ilość pobieranego powietrza i pobór paliwa zmniejszają się wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza, a mieszanka gęstnieje i emisja zwiększa się. Badania wykonano w regionie płaskowyżu, porównując silniki pracujące na płaskowyżu z tymi operującymi na położonej niżej równinie [48]. W innym badaniu dokonano pomiaru emisji związków toksycznych spalin emitowanych przez silnik dwusuwowy zasilający profesjonalne pilarki łańcuchowe. Analizie poddano podstawowe związki charakterystyczne dla silników dwusuwowych, czyli CO i HC, dodatkowo  $\text{O}_2$ . Wyniki wskazały, że pojemność silnika dwusuwowego pilarki nie determinuje wielkości emisji CO i HC. Praca pilarki na biegu jałowym powodowała znacznie większą emisję HC w porównaniu do innych operacji, dlatego czas pracy pilarki na biegu jałowym powinien być ograniczony do minimum. Można przypuszczać, że wynika to ze stanu cieplnego silnika. Zwiększenie udziału  $\text{O}_2$  w mieszance paliwowo-powietrznej zmniejszyło emisję CO [97]. W przykładowych badaniach opisanych w innej pracy przedstawiono wyniki pomiarów emisji związków toksycznych spalin przeprowadzonych w rzeczywistych warunkach pracy silników ZI napędzających generator prądotwórczy i piłę łańcuchową. Podczas pracy tych urządzeń autorzy mierzyli stężenia CO, HC,  $\text{NO}_x$  i  $\text{CO}_2$ . Do pomiarów wykorzystano przenośny analizator emisji spalin SEMTECH DS firmy SENSORS. Analizator ten mierzy stężenia składników spalin w trybie on-line podczas pracy silnika w rzeczywistych warunkach pracy (droga, pole itp.). Testy emisji silników o zastosowanych pozadrogowych były przeprowadzane na stanowiskach badawczych cyklach NRSC (ISO 8178) i NRTC. Przedstawiona metoda jest stosunkowo nowym rozwiązaniem w określaniu emisji spalin z takich silników. Uzyskane wyniki porównano z obowiązującymi wymaganiami emisyjnymi. Ponadto na podstawie przeprowadzonych badań autorzy podjęli próbę oceny możliwości wykorzystania metody pomiarowej do prac rozwojowych związanych z ograniczeniem emisji związków toksycznych spalin z małych silników benzynowych [50]. Wśród nielicznych badań silników z wykorzystaniem aparatury PEMS należy wspomnieć o pracy [25], której przedmiotem były pomiary emisji związków toksycznych z silnika piły łańcuchowej podczas pozyskiwania drewna. W pracy tej zwrócono uwagę na dużą emisję CO i  $\text{NO}_2$ .

Kolejną grupę stanowią publikacje charakteryzujące się badaniem ekspozycji oraz wpływu emisji spalin na zdrowie operatora. Dotyczy to głównie o grupę urządzeń, które operator

---

podczas wykonywanej pracy trzyma w rękach. Ta tematyka głównie skupia się wokół badań silników pił łańcuchowych i stężeń związków szkodliwych spalin w okolicach dróg oddechowych operatora. Pojawiają się też pomiary związane z poziomem hałasu oraz szkodliwych drgań mogących wywierać wpływ na zdrowie oraz kondycję operatora. W jednym z interesujących badań zmierzono poziom związków toksycznych spalin, hałasu i drgań dłoni i przedramienia HAV (*Hand Arm Vibration*) w piłach łańcuchowych, nożycach do żywopłotu i dmuchawach zasilanych dwoma różnymi rodzajami paliwa: komercyjną benzyną 95 z dodatkiem 2 % oleju syntetycznego odpowiedniego do silników dwusuwowych oraz, jako alternatywę, specjalną zaawansowaną mieszanką dostępną na rynku, opartą na benzynie alkalicznej. Dla dwóch różnych warunków pracy, tj. z silnikiem na biegu jałowym i podczas wykonywania typowej rutyny roboczej (maksymalna prędkość z obciążeniem) przeprowadzono pomiary stężenia lotnych związków organicznych (LZO, ang. *VOC - Volatile Organic Compounds*), poziom hałasu przy pomocy miernika w obu uszach operatora oraz HAV. Wyniki wykazały, że przy stosowaniu paliwa alkilowego emisja LZO została zmniejszona w badanych maszynach od 23 do ponad 77 %, podczas gdy w przypadku hałasu i HAV różnice w poziomie nie były statystycznie istotne. Niniejsze badanie potwierdza, że redukcję emisji związków toksycznych można znacznie poprawić, stosując zaawansowane paliwa, które prowadzą do bardziej wydajnego procesu spalania [17]. Często w badaniach z tego zakresu zagadnień skupiano się na badaniu poziomu tlenku węgla w drogach oddechowych operatorów maszyn, ze szczególnym uwzględnieniem łańcuchowej pilarki spalinowej, we współpracy z innymi maszynami z zakresu technologii pozyskiwania drewna [47, 36]. Przyjmuje się często, że narażenie inhalacyjne operatorów małych urządzeń zasilanych silnikiem spalinowym – także na takie związki jak: wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i benzen, toluen, etylobenzen i ksyleny – różni się w zależności od zastosowanego typu paliwa. Jedne z badań wykazały, że w szczególności narażenie inhalacyjne na wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne i benzen, toluen, etylobenzen i ksyleny było generalnie o jeden rząd wielkości mniejsze w przypadku stosowania nowoczesnych paliw alkilowych w porównaniu z tradycyjną mieszanką oleju i benzyny bezołowiowej [68].

Podobnie jak w innych grupach silników, na które ustawodawca nałożył już limity emisji związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji, także i stanowiąca przedmiot zainteresowania niniejszej pracy grupa małych silników maszyn i urządzeń przenośnych przechodzi różne modyfikacje elementów konstrukcyjnych silnika oraz modyfikacje układów wylotowych mające na celu zmniejszenie emitowanych związków toksycznych. Wśród tych

modyfikacji pojawiają się, między innymi, poniżej wyszczególnione koncepcje. Jedną z częściej spotykanych propozycji o dużym potencjale konkurencyjności silnika dwusuwowego jest zastosowanie układów wtrysku bezpośredniego aby przezwyciężyć długotrwały problem zwarcia paliwa (zwarcia przewodu paliwowego). W badaniach opisanych w jednym z artykułów autorzy opracowali niskociśnieniowy układ wtrysku bezpośredniego (LPDI – *Liquefied Petroleum Gas Direct Injection*) dla silnika dwusuwowego o pojemności 300 cm<sup>3</sup>, który zapewniał taką samą moc wyjściową silnika i emisję związków toksycznych, co silnik czterosuwowy o podobnej mocy. [78] Głównymi wadami systemu był długi czas wymagany do dostarczenia paliwa i niepełne odparowanie paliwa w niektórych warunkach pracy; w rezultacie praca silnika była ograniczona przy dużej prędkości obrotowej, a także występowały wahania prędkości obrotowej przy niskich obciążeniach. W kolejnym, sukcesywnym, badaniu system LPDI został zastąpiony systemem wtrysku bezpośredniego GDI (*Gasoline Direct Injection*), z pojedynczym wtryskiwaczem wysokociśnieniowym zainstalowanym w głowicy silnika, zdolnym do pracy do ciśnienia roboczego 150 bar. Po przeprowadzeniu wstępnych badań numerycznych w celu zidentyfikowania najkorzystniejszej konfiguracji wtryskiwaczy, wydajność systemu została oceniona na stanowisku testowym. Eksperymenty wykazały, że system GDI pozwala na osiągnięcie wyższych prędkości obrotowych dzięki krótszemu czasowi wtrysku, przy takich samych korzyściach w zakresie redukcji zużycia paliwa uzyskanych dzięki technologii LPDI. Przeprowadzono dogłębne badania nad czasem wtrysku i ciśnieniem wtrysku w celu zminimalizowania zarówno emisji węglowodorów, jak i jednostkowego zużycia paliwa podczas zwiększania obciążenia [78]. W innych analizowanych pracach zostały zbadane możliwości redukcji emisji związków toksycznych spalin za pomocą wysokociśnieniowych układów wtrysku bezpośredniego w silnikach dwusuwowych o objętości skokowej 50 cm<sup>3</sup>, ale nie są one jeszcze obecne na rynku jako produkty masowe. Ze względu na przewagę układu wtrysku bezpośredniego, prosty reaktor katalityczny utleniający, taki sam jak w silnikach Euro 2, może spełnić normę emisji Euro 4 bez żadnych strat wydajności. Jednak skupiając się wyłącznie na technologii wtrysku, nie jest możliwe osiągnięcie kolejnego kroku legislacyjnego w przypadku silników dwusuwowych. Istnieją dwa główne charakterystyczne ograniczenia. Po pierwsze, konieczne jest drastyczne zmniejszenie emisji HC podczas zimnego rozruchu, po drugie w celu spełnienia wyższych norm emisji konieczne jest zastosowanie mieszanki o kontrolowanym składzie stechiometrycznym [71]. Pozo-

stałe koncepcje konstruktorskie, pojawiające się w literaturze, przewidują między innymi zastosowanie systemów spalania z komorą w tłoku i wymuszonym zawirowaniem ładunku oraz zastosowanie pozasilnikowych układów oczyszczania spalin [7, 24, 70, 76, 79].

W ostatnich latach zaobserwowano znaczne naciski oraz ogólnoswiatową tendencję do wprowadzania ekologicznych źródeł napędów, które mają swoje odzwierciedlenie w coraz bardziej restrykcyjnych normach i przepisach dotyczących emisji związków toksycznych spalin, pochodzących również z małych urządzeń typu *non-road*. Jest to bardzo wyraźnie widoczne w literaturze naukowej. Znaczna część naukowców skupia się właśnie na zagadnieniu stosowania alternatywnych paliw w małych silnikach. Część publikacji stanowi o stosowaniu domieszek do paliw oraz innego typu środków smarnych. Kolejna grupa porusza tematykę zastosowania nowych mieszanek paliwopodobnych w różnych stężeniach, szukając tym samym optymalnych pod względem redukcji emisji i jej wpływu na środowisko naturalne i operatora [1, 3, 23, 38, 45, 51, 53–55, 100].

## 5. Cel i problem badawczy

Analiza literatury oraz regulacji prawnych, wsparte obserwacjami własnymi pozwoliły określić stan wiedzy dotyczący emisji związków szkodliwych spalin z silników urządzeń i maszyn przenośnych. Najważniejsze pozyskane informacje sformułowano w formie następujących wniosków:

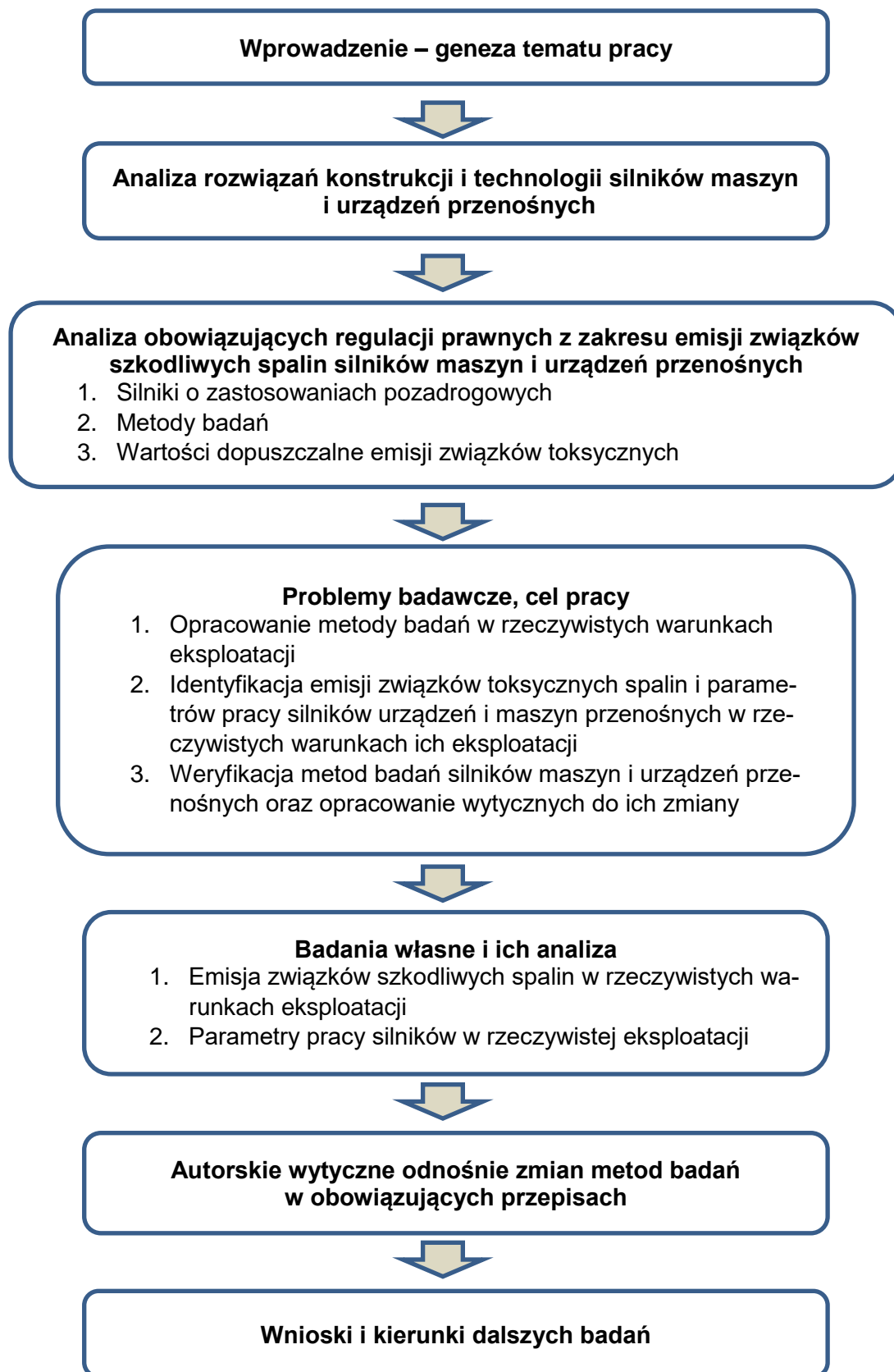
1. Brak jest badań pozwalających na ocenę emisji związków szkodliwych spalin z silników urządzeń i maszyn przenośnych w rzeczywistych warunkach eksploatacji, nie ma publikacji dotyczących tego zagadnienia.
2. Silniki urządzeń i maszyn przenośnych nie są zaawansowane technologicznie w porównaniu np. do silników pojazdów drogowych, często są to silniki dwusuwowe, zasilane gaźnikiem, w konsekwencji nie mają elektronicznego sterowania, nie mają również pozasilnikowych układów oczyszczania spalin, taki stan zaawansowania generuje stosunkowo dużą emisję, co znajduje odzwierciedlenie w wartościach norm *Stage*.
3. Silniki o małej objętości i mocy urządzeń i maszyn przenośnych są obecnie jedynie grupą dla której w homologacji wykonywane są tylko testy statyczne ISO 8178. Obowiązujące przepisy nie uwzględniają pomiarów w rzeczywistych warunkach eksploatacji, nie są one także przewidziane w przyszłych regulacjach. Ponadto, nie są prowadzone badania pilotażowe poprzedzające legislację, tak jak to było dla innych grup silników i pojazdów.

Wobec wykazanych w literaturze oraz w procedurach braków badań, nasuwa się pytanie badawcze: jaka jest emisja związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji z silników urządzeń i maszyn przenośnych oraz jak mierzyć tę emisję? Pierwsza część tego pytania odnosi się do ilości – masy emitowanych związków toksycznych, natomiast druga ma charakter metodyczny, a odpowiedź na nie powinna zawierać informacje, jakie powinny być wytyczne dotyczące testów badawczych dla tej grupy silników. Rozwiązanie sformułowanych problemów badawczych wymagało zrealizowania głównych celów pracy zdefiniowanych jako:

1. **Identyfikacja emisji związków toksycznych spalin i parametrów pracy silników urządzeń i maszyn przenośnych w rzeczywistych warunkach ich eksploatacji.**
2. **Opracowanie autorskich wytycznych dla procedur badań silników urządzeń i maszyn przenośnych w rzeczywistych warunkach eksploatacji.**

Do osiągnięcia powyższych celów część badawczą pracy podzielono na dwa główne etapy. Etap pierwszy dotyczył opracowania odpowiedniej metodyki badawczej – dobór reprezentatywnej grupy urządzeń oraz określenie warunków pracy i użytkowania charakterystycznych dla każdego urządzenia i maszyny. W tym etapie istotny był także właściwy dobór aparatury badawczej typu PEMS, do badań wykorzystano aparaturę Axion R/S+, która przeszła rygorystyczną ocenę Państwowej (USA) Agencji Ochrony Środowiskowej USEPA (*United States Environmental Protection Agency*). Opis aparatury, jej montażu oraz niezbędnych procedur przygotowawczych zostały przedstawione w rozdziale szóstym dysertacji. Etap drugi obejmował badania empiryczne emisji związków szkodliwych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Badania te umożliwiły wyznaczenie i analizę parametrów pracy silników, również w aspekcie obowiązujących przepisów. Analiza obejmowała także emisję związków szkodliwych z silników w rzeczywistych warunkach eksploatacji, niestety analiza ograniczała się tylko do masowego natężenia emisji poszczególnych związków, ale dała pogląd na charakter zmian emisji w zależności od parametrów pracy silników.

Schematyczną strukturę pracy z wyszczególnionymi najważniejszymi jej etapami przedstawiono na rysunku 5.1. W rozdziale pierwszym opisano genezę podjętej tematyki pracy. Rozdział drugi traktuje o rozwiązaniach konstrukcyjnych silników i maszyn, które są przedmiotem badań. Opisano najważniejsze aspekty, rozwiązania determinujące emisję związków szkodliwych spalin, klasyfikację maszyn i silników oraz zastosowania eksploatacyjne. Kolejny rozdział pracy to analiza obowiązujących przepisów odnośnie badań emisji związków szkodliwych spalin. Rozdział ten zawiera szeroki opis dla maszyn i pojazdów non-road, kategorii do której należą silniki maszyn i urządzeń przenośnych. Opis ten obrazuje specyfikę badań analizowanej grupy silników na tle innych grup i zastosowań silników. Rozdział czwarty stanowi syntetyczną analizę dostępnej literatury w aspekcie badań emisji związków toksycznych spalin z silników maszyn i urządzeń przenośnych i rozwiązań mających na celu jej redukcję. W rozdziale 6, który stanowi główną część dysertacji, opisano badania własne, przedstawiono opracowaną i wykorzystaną metodykę badawczą, obiekty badań. Ponadto w rozdziale tym znajdują się opisy i analizy emisji związków szkodliwych spalin oraz parametrów pracy silników. Analizy z rozdziału 6 pozwoliły na opracowanie ogólnych wytycznych odnośnie zmian w procedurze homologacyjnej dla silników maszyn i urządzeń przenośnych. Praca zakończona została podsumowaniem i wnioskami oraz wskazane zostały kierunki dalszych prac.



Rys. 5.1. Schemat struktury pracy





## 6. Badania własne

### 6.1. Obiekty badań

Do badań wybrano urządzenia należące do najliczniej reprezentowanych grup spośród maszyn zasilanych silnikami spalinowymi o małej objętości skokowej. Zastosowane maszyny to głównie urządzenia wykorzystywane do prac ogrodniczych, leśnych i budowlanych. Wybrane obiekty badawcze dobrano tak, aby były reprezentatywne dla zastosowań polskiego i europejskiego parku maszyn. Większość maszyn był zasilanych silnikami ZI. Jeden z pośród trzech generatorów wybranych do pomiarów był zasilany silnikiem ZS. Do badań wybrano urządzenia spełniające co najmniej normę *Stage II*, przy czym większość spełniała normę *Stage IIIA*. W tabeli 6.1 przedstawiono najważniejsze parametry operacyjne badanych maszyn i urządzeń przenośnych oraz ich widok podczas wykonywania pomiarów.

Tabela 6.1. Widok maszyn i urządzeń podczas badań oraz główne parametry ich silników

<b>Maszyny i urządzenia przenośne</b>	
<b>Kosiarka do trawy</b>	
	<p>objętość skokowa: 0,149 dm<sup>3</sup>                      budowa: 1 cyl., czterosuw                      maksymalna moc:                      1,75 kW/2900 obr/min                      maksymalny moment obrotowy:                      11,5 Nm/2100 obr/min                      norma emisji: <i>Stage II</i>                      zasilanie: gaźnik                      masa urządzenia: 25 kg</p>
<b>Kosa</b>	
	<p>objętość skokowa: 0,042 dm<sup>3</sup>                      budowa: 1 cyl., dwusuw                      maksymalna moc:                      1,25 kW/5800 obr/min                      maksymalny moment obrotowy:                      11,3 Nm/2500 obr/min                      zasilanie: gaźnik                      norma emisji: <i>Stage II</i>                      masa urządzenia: 8 kg</p>

**Glebogryzarka**



objętość skokowa: 0,148 dm<sup>3</sup>  
budowa: 1 cyl., czterosuw  
maksymalna moc: 1,9 kW/3200 obr/min  
maksymalny moment obrotowy:  
6,1 Nm/2400 obr/min  
zasilanie: gaźnik  
norma emisji: *Stage II*  
masa urządzenia: 26 kg

**Pila łańcuchowa**



objętość skokowa: 0,045 dm<sup>3</sup>  
budowa: 1 cyl., dwusuw  
maksymalna moc:  
2,2 kW/9500 obr/min  
maksymalny moment obrotowy:  
2,5 Nm/6500 obr/min  
zasilanie: gaźnik  
norma emisji: *Stage II*  
masa urządzenia: 5,1 kg

**Dmuchawa**



objętość skokowa: 0,027 dm<sup>3</sup>  
budowa: 1 cyl., dwusuw  
maksymalna moc: 0,8 kW/7000 obr/min  
maksymalny moment obrotowy:  
1,6 Nm/5800 obr/min  
zasilanie: gaźnik  
norma emisji: *Stage II*  
masa urządzenia: 5,6 kg

### Traktor ogrodowy



objętość skokowa: 0,452 dm<sup>3</sup>  
budowa: 1 cyl., czterosuw  
maksymalna moc: 6,4 kW/2700 obr/min  
maksymalny moment obrotowy:  
7,3 Nm/2500 obr/min  
zasilanie: gaźnik  
norma emisji: *Stage II*  
masa urządzenia: 181 kg

### Zagęszczarka



objętość skokowa: 0,118 dm<sup>3</sup>  
budowa: 1 cyl., czterosuw  
maksymalna moc:  
7,4 kW/2400 obr/min  
maksymalny moment obrotowy:  
26,5 Nm/2200 obr/min  
zasilanie: gaźnik  
norma: emisji: *Stage II*  
masa urządzenia: 31 kg

### Rębak



objętość skokowa: 0,390 dm<sup>3</sup>  
budowa: 1 cyl., czterosuw  
maksymalna moc: 9,6 kW/3800 obr/min  
maksymalny moment obrotowy:  
18,7 Nm/2100 obr/min  
zasilanie: gaźnik  
norma emisji: *Stage II*  
masa urządzenia: 60 kg

### Generator I



objętość skokowa: 0,212 dm<sup>3</sup>  
budowa: 1 cyl., czterosuw  
maksymalna moc: 3,4 kW/3000 obr/min  
maksymalny moment obrotowy:  
2,1 Nm/1750 obr/min  
zasilanie: gaźnik  
norma emisji: *Stage II*  
masa urządzenia: 65 kg

### Generator II



objętość skokowa: 0,099 dm<sup>3</sup>  
budowa: 1 cyl., czterosuw  
maksymalna moc:  
2,2 kW/3600 obr/min  
maksymalny moment obrotowy:  
5,7 Nm/3600 obr/min  
zasilanie: gaźnik  
norma emisji: *Stage II*  
masa urządzenia: 31 kg

### Generator ZS



objętość skokowa: 0,418 dm<sup>3</sup>  
budowa: 1 cyl., czterosuw  
maksymalna moc: 5,9 kW/3000 obr/min  
maksymalny moment obrotowy:  
18,7 Nm/2880 obr/min  
zasilanie: gaźnik  
norma emisji: *Stage II*  
masa urządzenia: 220 kg

Podczas badań maszyny wykonywały prace, zgodnie z ich docelowym przeznaczeniem. Były to typowe i bardzo często wykonywane prace ogrodnicze, leśne i budowlane. Maszyny były obsługiwane przez doświadczonych operatorów, a pomiary wykonywano z uwzględnieniem zimnego rozruchu, tzn. pomiar rozpoczynał się natychmiast po uruchomieniu silnika, po czym rozpoczynała się praca maszyny. Każdy cykl pomiarowy trwał co najmniej 500 s. Charakter pracy silników w dłuższym czasie nie zmieniał się, dynamiczne zmiany obserwowane były w krótkim czasie, dlatego rejestracja dłuższych cykli pomiarowych nie były konieczna. Wszystkie maszyny przed badaniami miały podstawowy przegląd techniczny, wykonano podstawowe czynności kontrolne, wszystkie maszyny były sprawne i nie wykazywały usterek.

## **6.2. Zastosowana aparatura badawcza**

Badania mające na celu weryfikację oddziaływania silników spalinowych z małych urządzeń na środowisko naturalne mają szczególne znaczenie podczas pomiarów w dynamicznych warunkach pracy. Warunki te, uwzględnione w testach laboratoryjnych, zarówno statycznych, jak i dynamicznych, nie odzwierciedlają parametrów w rzeczywistej eksploatacji silników. W szczególności dotyczy to parametru prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia. Dlatego w pracy zdecydowano się na wykorzystanie aparatury PEMS do pomiaru emisji z silników w warunkach rzeczywistej eksploatacji, podczas wykonywania prac przez maszyny. Badania te były jednym z głównych narzędzi do osiągnięcia postawionego celu pracy. Wykorzystana aparatura pomiarowa umożliwiła pomiary stężeń związków szkodliwych spalin: CO<sub>2</sub>, CO, HC i NO<sub>x</sub>, pomiary masowego strumienia spalin oraz bieżących parametrów pracy silników.

Wstępne badania, jakie zostały wykonane na kosiarce kołowej do trawy (rys. 6.1) w celu sprawdzenia wpływu silników montowanych do współpracy z urządzeniami przenośnymi, były przeprowadzane za pomocą aparatury do pomiaru gazowych składników spalin TESTO 360, stosowanej do pomiarów emisyjnych na pojazdach samochodowych. Przewidując zakres stężeń składników gazowych spalin silnik został rozgrzany do temperatury pracy, tak aby pomiar odbywał się w warunkach ustabilizowanych parametrów cieplnych silnika na biegu jałowym. Pomiary wstępne z kosiarki koszonej nie przyniosły żadnego rezultatu ze względu na zbyt wysokie stężenia składników gazowych spalin. Analizator wskazywał na stężenia przekraczające zakres pomiarowy. Wyniki wstępnych pomiarów ukazały konieczność zastosowania specjalistycznej aparatury do pomiarów stężeń gazowych składników spalin.



Rys. 6.1. Kosiarka kołowa spalinowa ZI z zamontowaną aparaturą pomiarową

Pomiary przedstawiane w rozprawie przeprowadzono przy użyciu analizatora Axion R/S+ Global MRV (rys. 6.2). Bardzo ważną cechą predysponującą analizator Axion R/S+ do badań silników maszyn i urządzeń przenośnych jest jego kompaktowa budowa, nieduże gabaryty i masa. Inne analizatory PEMS cechują się znacznie większymi gabarytami i masą, co niewątpliwie utrudniłoby pomiary, a w przypadku niektórych maszyn wręcz uniemożliwiło wykonanie pomiarów. Za pomocą tego analizatora możliwy jest jednoczesny pomiar stężenia związków w spalinach oraz pomiar ciśnienia w kolektorze dolotowym. Informacje zgromadzone pozwalają na wyznaczenie masowego natężenia przepływu spalin. Analizator umożliwia także pomiar aktualnych parametrów pracy silnika, w aspekcie pracy ważna była rejestracja prędkości obrotowej wału korbowego. W Axionie R/S+ do wyznaczenia emisji CO<sub>2</sub>, CO i HC wykorzystywany jest analizator niedispersyjny na podczerwień – NDIR (*Nondispersive Infrared Sensor*), natomiast do określenia emisji NO<sub>x</sub> – analizator elektrochemiczny. W zakresie pomiaru cząstek stałych wykorzystywana jest metoda bazująca na Laser Scatter.



*Rys. 6.2. Analizator Axion R/S+ firmy Global MRV*

W tabeli 6.2 przedstawiono podstawowe dane techniczne systemu pomiarowego AxionR/S+. Analizator wyposażony jest w stację meteorologiczną do pomiaru warunków otoczenia – temperatury i ciśnienia. Ponadto, zaopatrzony jest w system pozycjonowania GPS oraz moduł umożliwiający rejestrację danych z pokładowego systemu diagnostycznego – OBD (*Controler Area Network*). W przypadku pojazdów, silników niewyposażonych w system OBD (*CAN*), tak jak to jest dla silników maszyn i urządzeń przenośnych, do wyznaczenia prędkości obrotowej silnika i jego obciążenia system pomiarowy mierzy ciśnienie w kolektorze dolotowym silnika oraz zlicza ilość impulsów elektrycznych przewodu świecy zapłonowej. Aparatura dokonuje pomiarów i akwizycji danych z częstotliwością 1 Hz.

Tabela 6.2. Dane techniczne analizatora PEMS Axion R/S+, metody pomiarów

Związek	Zakres pomiarowy	Dokładność	Rozkład	Analizator
HC	0 – 4000 ppm	$\pm 8$ ppm abs. or $\pm 3$ % rel.	1 ppm	NDIR
CO	0 – 10 %	$\pm 0.02$ % abs. or $\pm 3$ % rel.	0,001 vol. %	NDIR
CO <sub>2</sub>	0 – 16 %	$\pm 0.3$ % abs. or $\pm 4$ % rel.	0,01 vol. %	NDIR
NO <sub>x</sub>	0 – 4000 ppm	$\pm 25$ ppm abs. or $\pm 3$ % rel.	1 ppm	E-chem
O <sub>2</sub>	0 – 25 %	$\pm 0.1$ % ppm abs. or $\pm 3$ % rel.	0,01 vol. %	E-chem
PM	0 – 300 mg/m <sup>3</sup>	$\pm 2$ %	0,01 mg/m <sup>3</sup>	Laser Scatter

### 6.3. Metodyka badań własnych

Wykonane badania dostarczyły danych na temat parametrów pracy silników w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Szczególnie przydatną w opisywanej analizie jest prędkość obrotowa wału korbowego. Ponieważ silniki nie posiadały systemów diagnostycznych, nie było możliwe dokładne wyznaczenie obciążeń silników. Zastosowane w nowoczesnych silnikach spalinowych pojazdów elektroniczne układy sterowania i diagnostyki umożliwiają zapisanie danych dotyczących warunków pracy maszyny i silnika, niestety nie ma takiej możliwości dla silników zasilających maszyny i urządzenia przenośne. Dlatego analizie poddano głównie prędkość obrotową wału korbowego badanych silników. Wstępne analizy wykazały, że większość silników pracuje przy stałej, zadanej prędkości obrotowej, a więc jest to praca według charakterystyki regulatorowej. Uwzględniając, że silnik pracuje dla stałej prędkości obrotowej jako wskaźnik obciążenia można przyjąć emisję CO<sub>2</sub>/zużycie paliwa. W rzeczywistości dla wszystkich analizowanych silników prędkość obrotowa, w zależności od zmian chwilowego obciążenia zmieniała się nieznacznie, tzn. zmniejsza się przy zwiększeniu obciążenia i zwiększa przy zmniejszeniu obciążenia, po czym wraca do zadanej wartości. Wynika to z właściwości układu regulacji prędkości obrotowej, im dokładniejszy układ tym mniejsze zmiany i szybszy powrót do zadanej wartości prędkości obrotowej. Dlatego w zastępstwie momentu obrotowego wykonano analizę natężenia emisji CO<sub>2</sub>, jako wskaźnik obciążenia silnika. Niestety, taki wskaźnik jest tylko informacją na temat charakteru zmian obciążenia, nie można na jego podstawie wnioskować o wartości obciążenia. Analiza parametrów pracy silników może być wykorzystana do weryfikacji istniejących testów badawczych lub opracowania przyszłych.



#### 6.4. Analiza emisji związków szkodliwych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Analizę emisji CO<sub>2</sub>, CO, HC i NO<sub>x</sub> ze wszystkich przebadanych silników przeprowadzono dla całego cyklu pomiarowego, czyli pomiarów od chwili, gdy rozpoczynała się praca badanego urządzenia, po uruchomieniu silnika, do chwili zakończenia pracy. Budowa badanych maszyn uniemożliwia pomiar obciążenia silnika podczas pracy w rzeczywistych warunkach. Wyznaczenie obciążenia silnika jest możliwe tylko na stanowisku hamulcowym. Dlatego analizę emisji związków szkodliwych wykonano dla natężenia emisji poszczególnych związków, wyrażonej w g/s i mg/s. Wyznaczono także masę całkowitą każdego związku wyemitowaną w cyklu pomiarowym. Dla wszystkich badanych urządzeń i związków wyznaczono wskaźnik emisji  $k_j$  jako iloraz masy danego związku do masy CO<sub>2</sub>.

$$k_j = \frac{m_j}{m_{CO_2}} \quad (6.1)$$

gdzie:  $j$  – związek toksyczny, dla którego określono wskaźnik emisji,  
 $m_j$  – masa danego związku w cyklu pomiarowym w warunkach rzeczywistej eksploatacji, g, mg,  
 $m_{CO_2}$  – masa CO<sub>2</sub> w cyklu pomiarowym w rzeczywistych warunkach eksploatacji, g, mg.

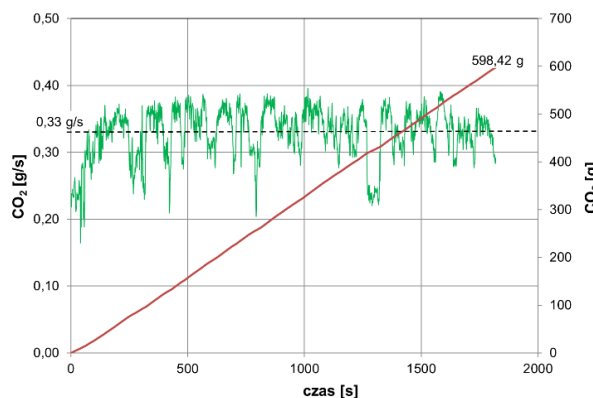
Dla silników generatorów prądotwórczych wyznaczono obciążenie, na podstawie pomiaru obciążenia elektrycznego urządzeń, które były zasilane przy użyciu generatorów. Dlatego dla tych urządzeń, oprócz wskaźników emisji  $k_j$  wyznaczono także wskaźniki  $n_j$ , jako iloraz emisji jednostkowej danego związku w czasie rzeczywistej eksploatacji do wartości dopuszczalnej *Stage II*, badane generatory spełniały tą normę.

$$n_j = \frac{e_j}{e_{dop}} \quad (6.2)$$

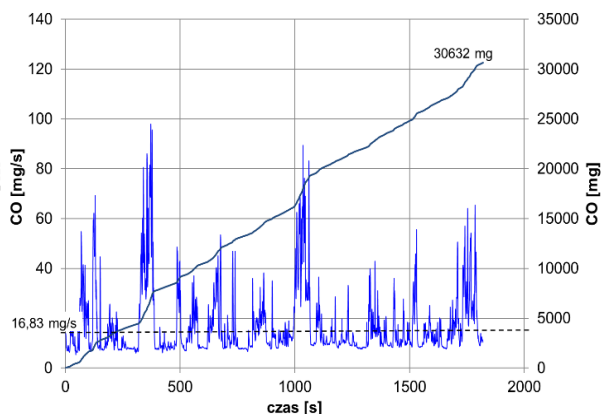
gdzie:  $j$  – związek toksyczny, dla którego określono wskaźnik emisji,  
 $e_j$  – emisja jednostkowa danego związku  $j$  w cyklu pomiarowym w warunkach rzeczywistej eksploatacji, g/kWh,  
 $e_{dop}$  – wartość dopuszczalna danego związku  $j$  w cyklu pomiarowym w rzeczywistych warunkach eksploatacji, g/kWh.

Zdefiniowane wskaźniki emisji są miarą zmian badanych związków toksycznych, dodatkowo wskaźniki  $n_j$  są miarą zmian w stosunku do obowiązujących limitów europejskich *Stage II*. Wartość wskaźników  $k_j$  i  $n_j$  może leżeć w przedziale  $(0; \infty)$ . Gdy wartość wskaźnika  $n_j$  jest większa od jedności oznacza to większą emisję w rzeczywistej eksploatacji w stosunku do limitu, natomiast mniejsza od jedności oznacza mniejszą emisję w rzeczywistej eksploatacji w odniesieniu do limitu. Natomiast gdy wskaźnik ma wartość równą jedności, emisja w rzeczywistych warunkach eksploatacji jest równa dopuszczalnej.

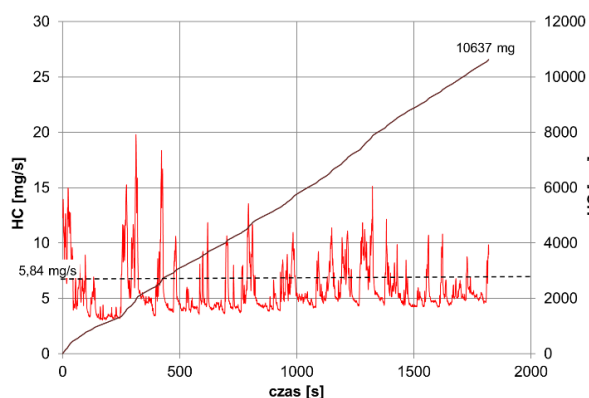
Zmiany natężenia emisji związków szkodliwych dla silnika kosiarki przedstawiono na rys. 6.3 – 6.6. Na rysunkach tych zaznaczono także wartości średnie natężenia emisji, dla całego testu badawczego oraz zmiany masy emitowanych związków szkodliwych. Podczas pracy nastawy silnika kosiarki są tak dobrane, aby utrzymywać stałą prędkość obrotową wału korbowego, podobnie jest dla większości silników analizowanych maszyn. Z analizy warunków pracy silnika (rys. 6.52 – 6.55) wynika, że występują chwilowe zmiany prędkości obrotowej, co jest następstwem zmian obciążenia. Zmiany te znajdują odzwierciedlenie w wartościach natężenia emisji związków szkodliwych. Widoczne na rys. 6.3 – 6.6 zmiany, zwiększanie i zmniejszanie, natężenia emisji wynikają ze zmian obciążenia silnika, jak również zmian prędkości obrotowej. Najlepiej widocznymi przykładami opisanego stanu są zmiany między 1270 – 1330 s, oraz około 1000 – 1060 s, następuje zmniejszenie prędkości obrotowej silnika oraz zmniejszenie natężenia emisji CO<sub>2</sub>, wynika to ze zwiększenia obciążenia silnika. Po pewnym czasie, w opisywanym przykładzie jest to około 40 s, następuje zwiększenie prędkości obrotowej, do wartości zadanej, zwiększa się również natężenie emisji godzinowej CO<sub>2</sub>. Należy podkreślić, że wspomniana zależność zmian natężenia emisji od zmian prędkości obrotowej, jako następstwa chwilowego zwiększenia lub zmniejszenia obciążenia silnika, jest charakterystyczna dla natężenia emisji wszystkich związków szkodliwych oraz większości badanych obiektów. Początkowe ok. 60 s pracy silnika kosiarki to praca zimnego silnika, bez obciążenia, stąd widoczne mniejsze natężenie emisji CO<sub>2</sub> i większe HC. Wartości średnie natężenia emisji zmierzone dla silnika kosiarki: CO<sub>2</sub> – 0,33 g/s, CO – 16,83 mg/s, HC – 5,84 mg/s, NO<sub>x</sub> – 0,91 mg/s, natomiast masa poszczególnych związków wyemitowana w teście: CO<sub>2</sub> – 598,42 g/s, CO – 30632 mg/s, HC – 10637 mg/s, NO<sub>x</sub> – 1652 mg/s.



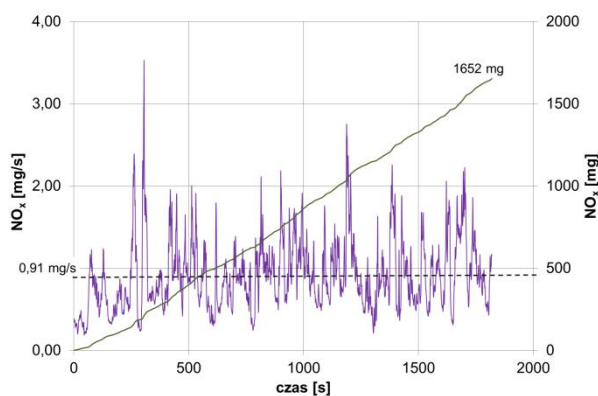
Rys. 6.3. Natężenie emisji  $CO_2$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji silnika kosiarki



Rys. 6.4. Natężenie emisji  $CO$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji kosiarki



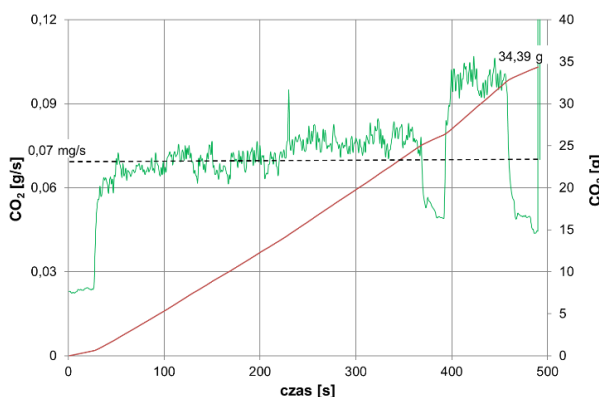
Rys. 6.5. Natężenie emisji  $HC$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji kosiarki



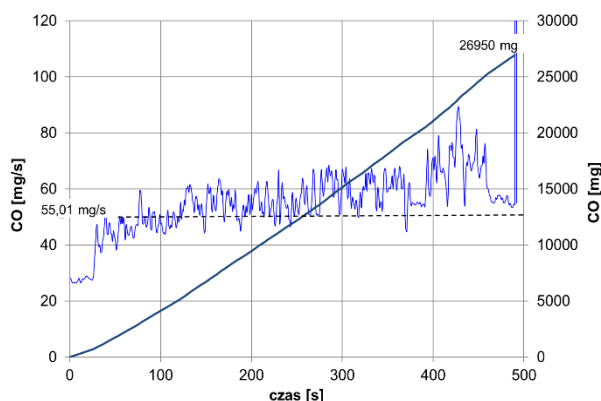
Rys. 6.6. Natężenie emisji  $NO_x$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji kosiarki

Dla kosi spalinowej na wykresach obrazujących natężenie emisji związków szkodliwych widoczne jest początkowe około 20 s, podczas których wartości natężenia emisji wszystkich związków są wyraźnie mniejsze. Wyjątkiem jest natężenie emisji  $HC$  (rys. 6.9), większe od wartości średniej, co zapewne wynika z początkowego wzbogacenia mieszanki paliwo-powietrznej. Był to czas przed pracą maszyny. Potwierdzeniem tego jest przede wszystkim mniejsze natężenie emisji  $CO_2$  (rys. 6.7), a więc zużycie paliwa. Później, od około 20 s, natężenia emisji wszystkich związków zwiększają się i oscylują wokół wartości średnich, które są zaznaczone na wykresach. Około 360 s zaobserwowano chwilowe zmniejszenie natężenia emisji  $CO_2$ /zużycia paliwa, co wynika z chwilowego zmniejszenia prędkości obrotowej. Jest to efekt zwiększenia obciążenia silnika. Jednocześnie następuje zwiększenie natężenia emisji  $HC$  i  $NO_x$  (rys. 6.9 i 6.10). Około 400 s następuje zwiększenie natężenia emisji  $CO_2$ , aż do około 450 s, w tym czasie następuje zmniejszenie natężenia emisji  $HC$  i  $NO_x$ , natomiast zwiększenie  $CO$  (rys. 6.8). Około 450 s ponownie zarejestrowano

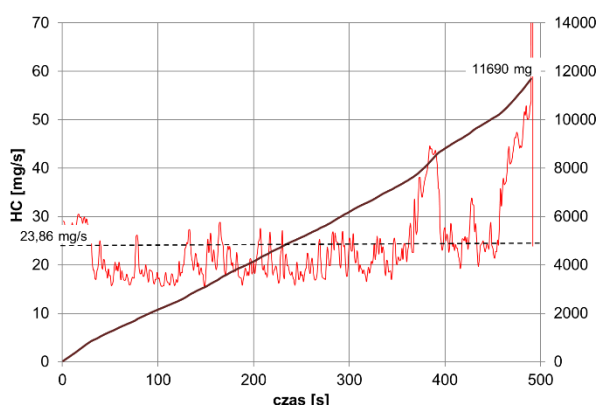
chwilowe zmniejszenie natężenia emisji  $\text{CO}_2$  i jednocześnie zwiększenie natężenia emisji HC i  $\text{NO}_x$ .



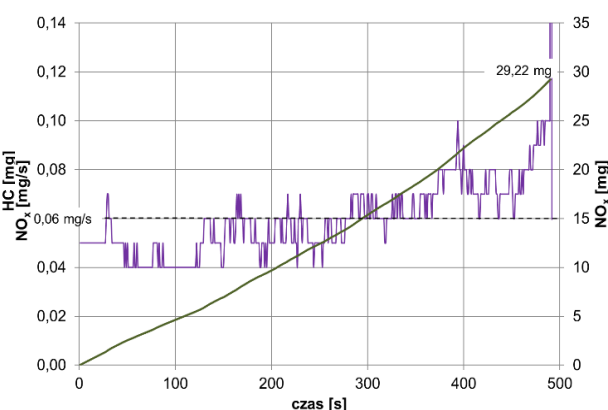
Rys. 6.7. Natężenie emisji  $\text{CO}_2$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji silnika kosy



Rys. 6.8. Natężenie emisji CO w rzeczywistych warunkach eksploatacji silnika kosy

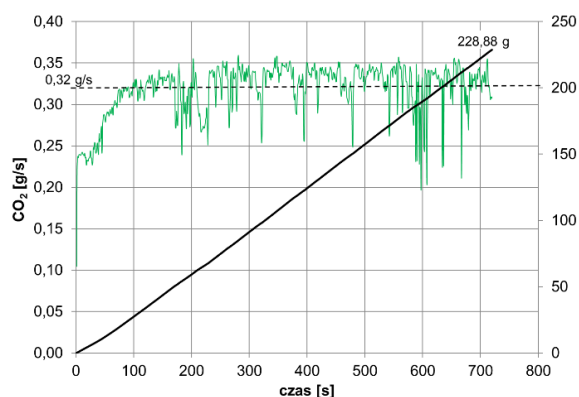


Rys. 6.9. Natężenie emisji HC w rzeczywistych warunkach eksploatacji silnika kosy

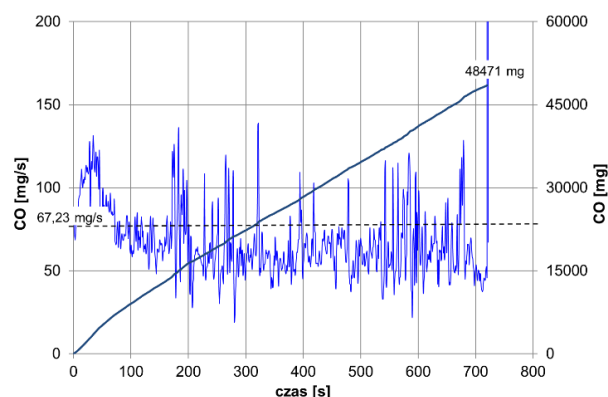


Rys. 6.10. Natężenie emisji  $\text{NO}_x$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji silnika kosy

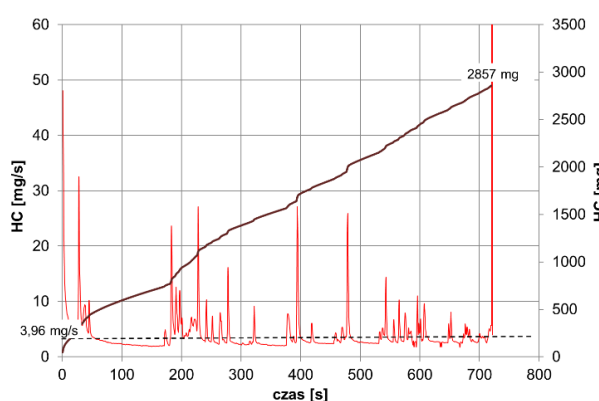
Podobnie jak dla silnika kosy spalinowej natężenia emisji związków szkodliwych silnika głębogryzarki oscylują wokół wartości średnich (rys. 6.11 – 6.14). Początkowo około 50 s to zimny rozruch, czas uruchomienia i przygotowania maszyny do pracy. W tym czasie zaobserwowano mniejsze natężenie emisji  $\text{CO}_2$  i  $\text{NO}_x$ , co wynika zapewne z braku obciążenia silnika. Po upływie 50 s rozpoczyna się praca maszyny, a natężenia emisji związków szkodliwych zmieniają się, następuje ich chwilowe zwiększenie i zmniejszenie, co jest efektem zmian prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia, jako następstwo zmian oporów narzędzia podczas pracy.



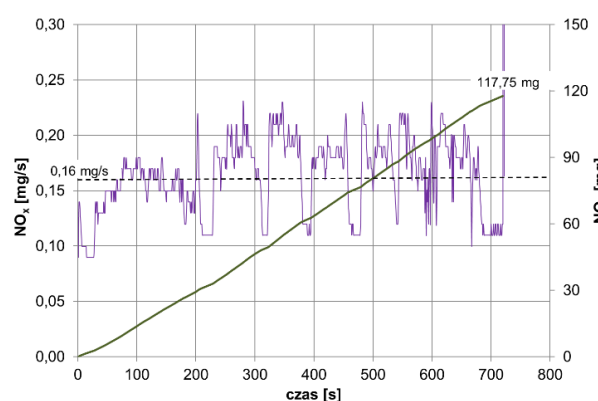
Rys. 6.11. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji glebogryzarki



Rys. 6.12. Natężenie emisji CO w rzeczywistych warunkach eksploatacji glebogryzarki

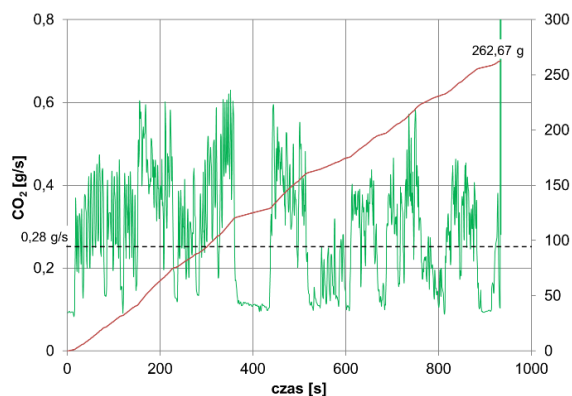


Rys. 6.13. Natężenie emisji HC w rzeczywistych warunkach eksploatacji glebogryzarki

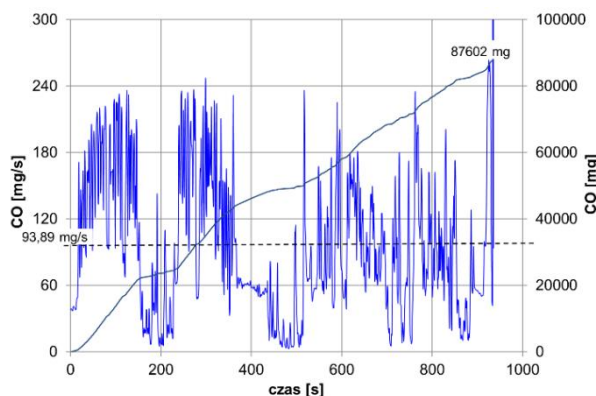


Rys. 6.14. Natężenie emisji NO<sub>x</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji glebogryzarki

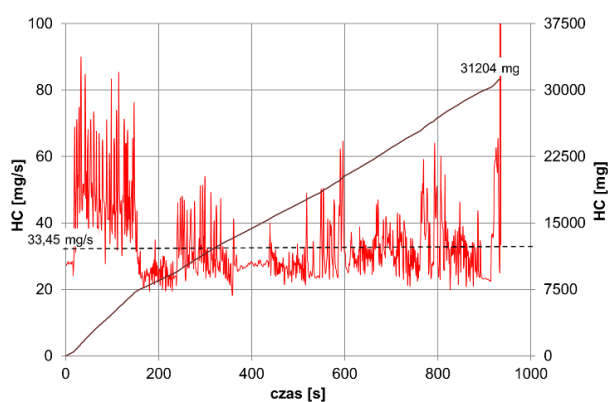
Praca silnika piły łańcuchowej charakteryzuje się cyklicznym zwiększaniem obciążenia, co wynika z cięcia drewna, po czym następuje chwilowe zmniejszenie obciążenia wynikające z przerwy w pracy maszyny, cięciu. Taki charakter pracy silnika jest widoczny na wykresach przedstawiających natężenia emisji związków szkodliwych (rys. 6.15 – 6.18). Przykładem jest pierwsze około 18 s, podczas których zaobserwowano zwiększone natężenie emisji CO i HC, natomiast mniejsze NO<sub>x</sub>. Należy zauważyć, że natężenie emisji NO<sub>x</sub> zmienia się cyklicznie, ale odwrotnie niż HC i CO.



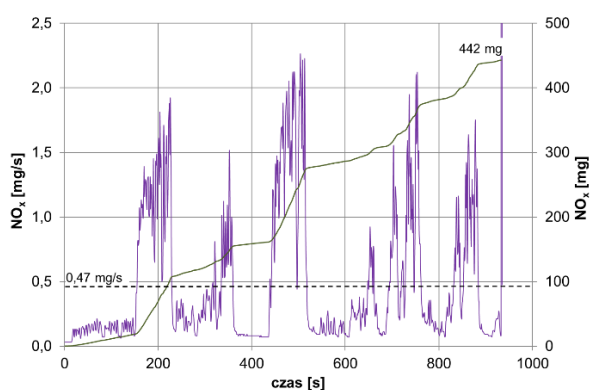
Rys. 6.15. Natężenie emisji  $\text{CO}_2$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji piły łańcuchowej.



Rys. 6.16. Natężenie emisji  $\text{CO}$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji piły łańcuchowej

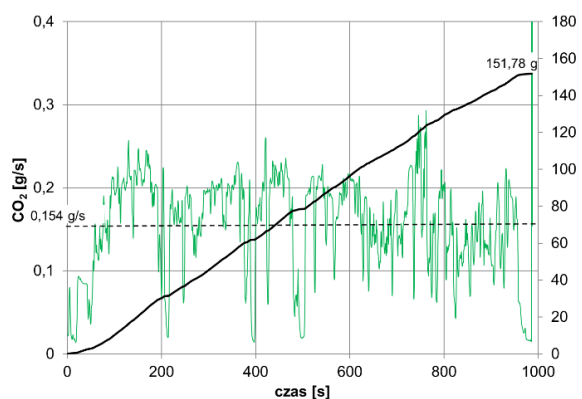


Rys. 6.17. Natężenie emisji  $\text{HC}$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji piły łańcuchowej

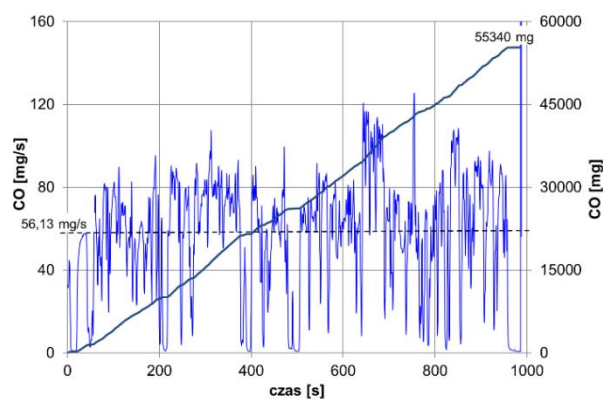


Rys. 6.18. Natężenie emisji  $\text{NO}_x$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji piły łańcuchowej

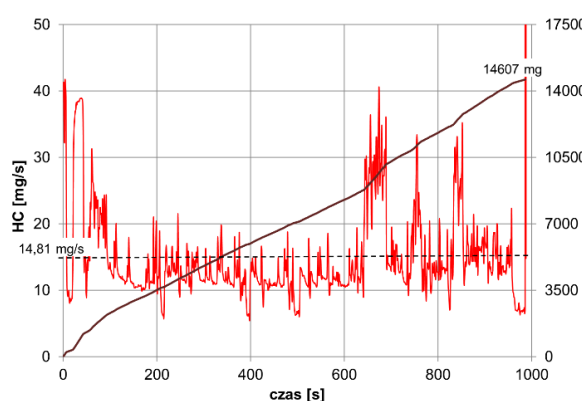
Natężenia emisji związków szkodliwych silnika dmuchawy, podobnie jak wyżej opisywane przypadki, oscylują wokół wartości średnich (rys. 6.19 – 6.22). Widoczny jest okres zimnego rozruchu, przed rozpoczęciem pracy, do około 50 s, podczas którego wystąpiło zwiększone natężenie emisji  $\text{HC}$ , co jest wynikiem wzbogacenia mieszanki paliwowo-powietrznej. Podczas pracy natężenia emisji wszystkich związków szkodliwych wykazują wyraźną korelację do prędkości obrotowej wału korbowego, analogicznie następują chwilowe zwiększenia i zmniejszenia natężenia emisji.



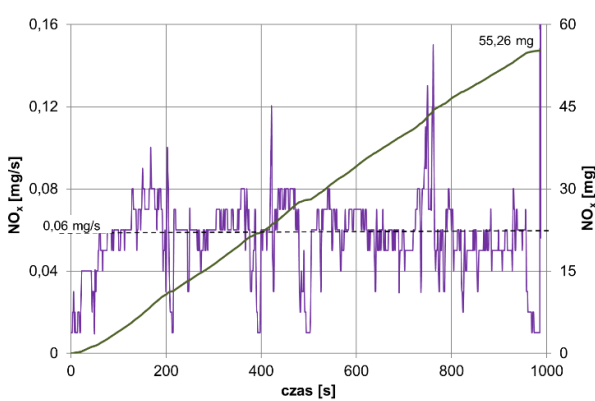
Rys. 6.19. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji dmuchawy



Rys. 6.20. Natężenie emisji CO w rzeczywistych warunkach eksploatacji dmuchawy

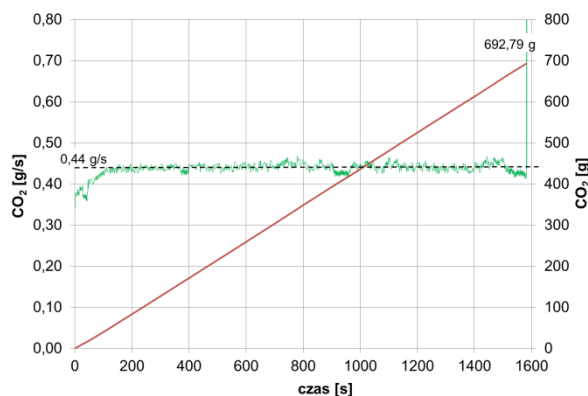


Rys. 6.21. Natężenie emisji HC w rzeczywistych warunkach eksploatacji dmuchawy

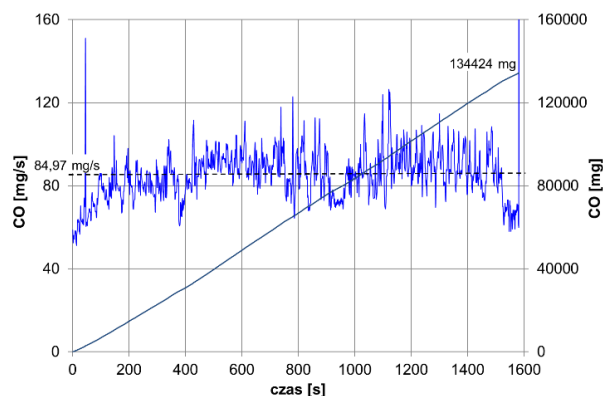


Rys. 6.22. Natężenie emisji NO<sub>x</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji dmuchawy

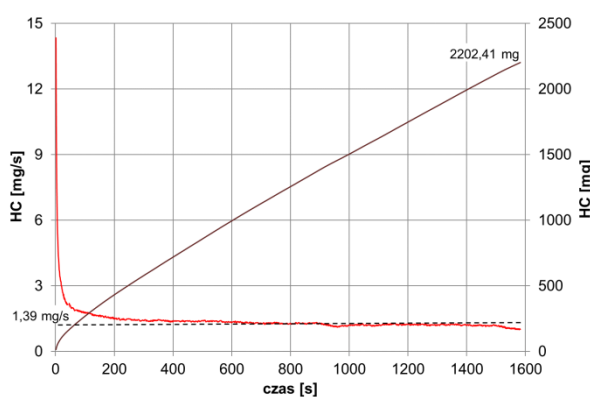
Silnik traktora ogrodowego pracował w bardzo wąskim zakresie prędkości obrotowej wału korbowego, co znajduje odzwierciedlenie w zmianach natężenia emisji związków szkodliwych, szczególnie CO<sub>2</sub> (rys. 6.23). Natężenie emisji CO<sub>2</sub>/zużycie paliwa podczas pracy ma niemal stałą wartość, zarejestrowano tylko nieznaczne wahania wokół wartości średniej, która wynosi 0,44 mg/s. Natężenie emisji HC (rys. 6.25), poza pierwszymi kilkudziesięcioma sekundami pracy silnika, również zmienia się nieznacznie, natomiast początkowe zwiększenie wynika z zimnego rozruchu. Większe uzależnienie od stosunkowo niedużych zmian prędkości obrotowej wykazuje natężenie emisji CO i NO<sub>x</sub> (rys. 6.24 i 6.26), jednak zmiany te mieszczą się w granicach nie przekraczających 10% wartości średniej.



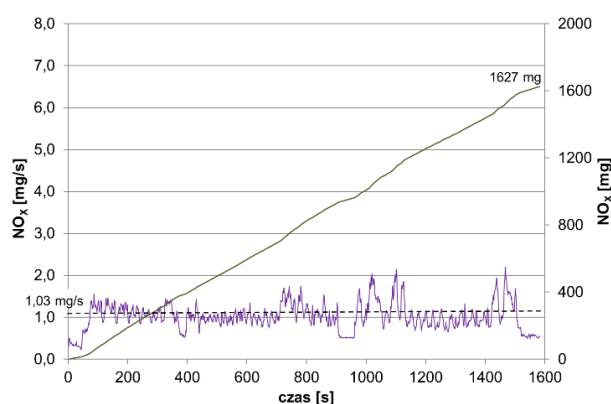
Rys. 6.23. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji traktora ogrodowego



Rys. 6.24. Natężenie emisji CO w rzeczywistych warunkach eksploatacji traktora ogrodowego



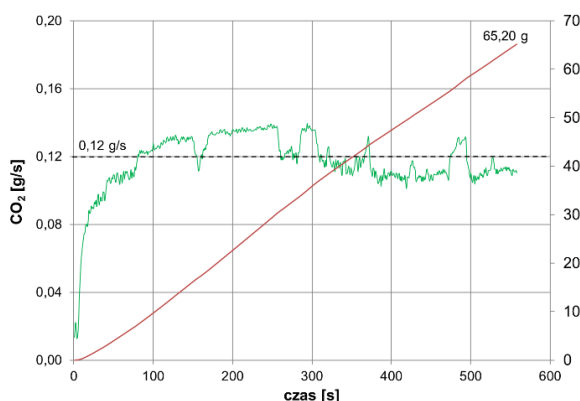
Rys. 6.25. Natężenie emisji HC w rzeczywistych warunkach eksploatacji traktora ogrodowego



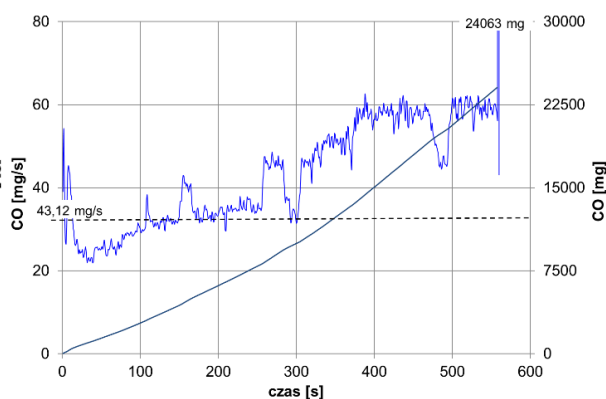
Rys. 6.26. Natężenie emisji NO<sub>x</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji traktora ogrodowego

Natężenia emisji związków szkodliwych z silnika zagęszczarki charakteryzują się widocznym okresem zimnego rozruchu, podczas którego wystąpiło zwiększenie natężenia emisja CO i HC (rys. 6.28 i 6.29). Zimny rozruch trwał około 30 s, co jest widoczne głównie na wykresie przedstawiającym natężenie emisji CO<sub>2</sub> (rys. 6.27). Dla pracy silnika zagęszczarki od około 300 s następuje wyraźne zwiększenie natężenia emisji CO oraz HC, przy jednoczesnym zmniejszeniu CO<sub>2</sub>.

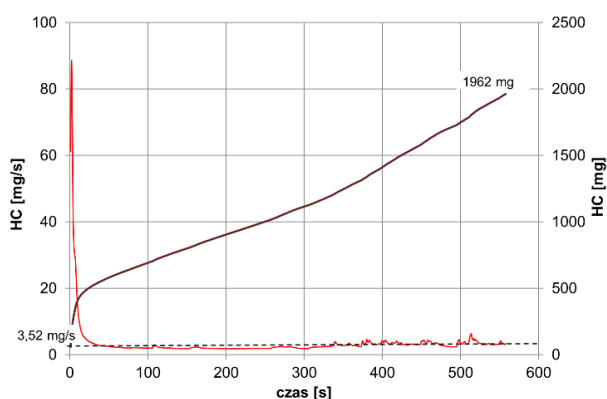




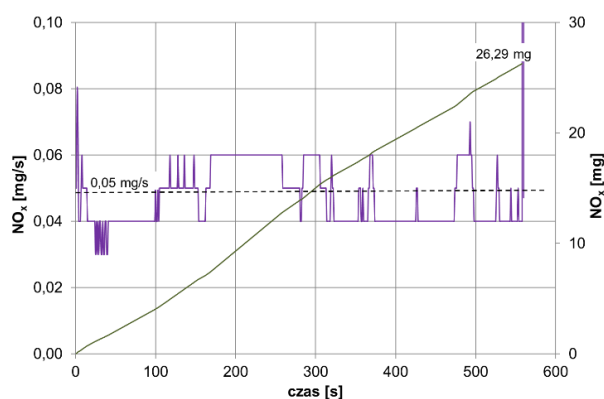
Rys. 6.27. Natężenie emisji  $\text{CO}_2$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji zagęszczarki



Rys. 6.28. Natężenie emisji  $\text{CO}$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji zagęszczarki

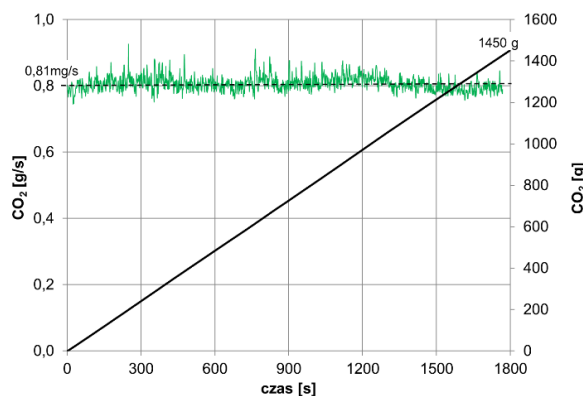


Rys. 6.29. Natężenie emisji  $\text{HC}$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji zagęszczarki

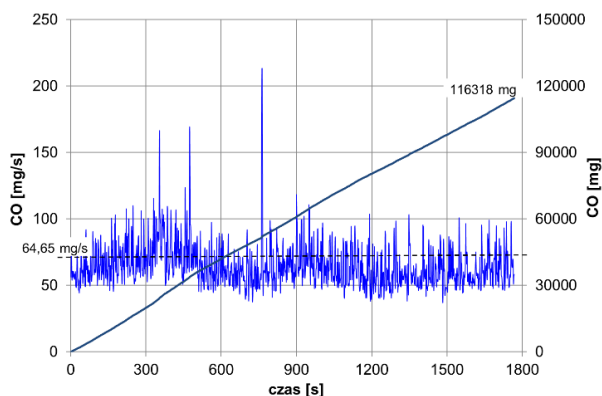


Rys. 6.30. Natężenie emisji  $\text{NO}_x$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji zagęszczarki

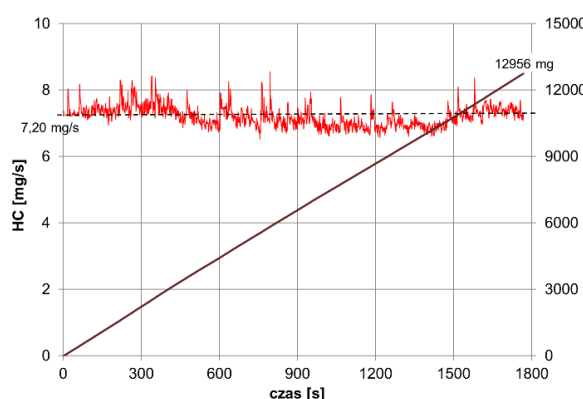
Natężenia emisji wszystkich związków szkodliwych spalin silnika rębaka oscylują wokół wartości średnich (rys. 6.31 – 6.34). Należy zauważyć, że dla tego silnika zakres zmian prędkości obrotowej wału korbowego nie był duży, a więc chwilowe zwiększanie i zmniejszanie natężenia emisji wszystkich związków szkodliwych jest w tym przypadku głównie efektem chwilowych zmian obciążenia silnika.



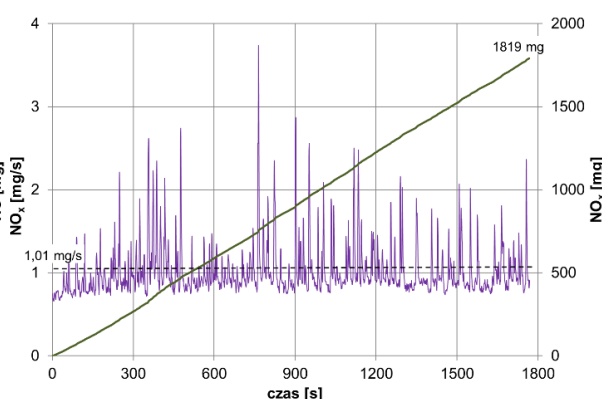
Rys. 6.31. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji rębaka



Rys. 6.32. Natężenie emisji CO w rzeczywistych warunkach eksploatacji rębaka

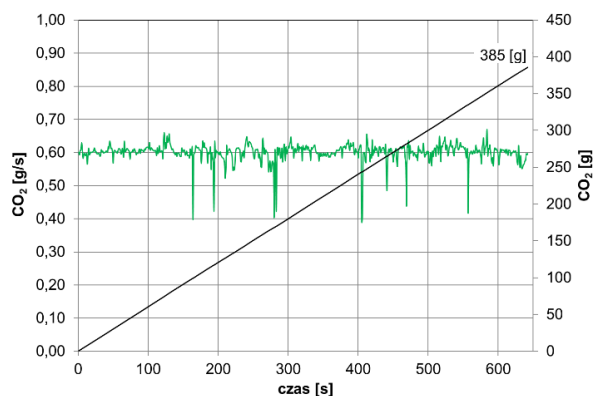


Rys. 6.33. Natężenie emisji HC w rzeczywistych warunkach eksploatacji rębaka

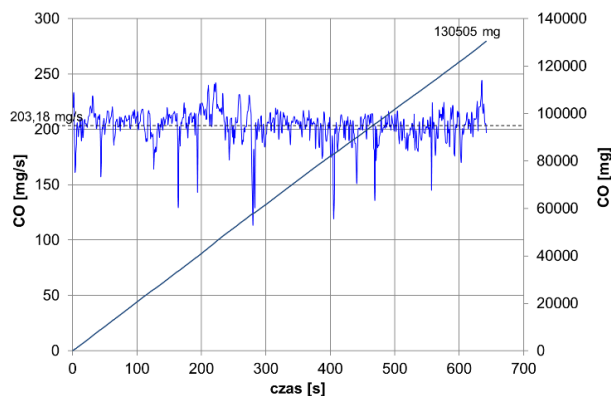


Rys. 6.34. Natężenie emisji NO<sub>x</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji rębaka

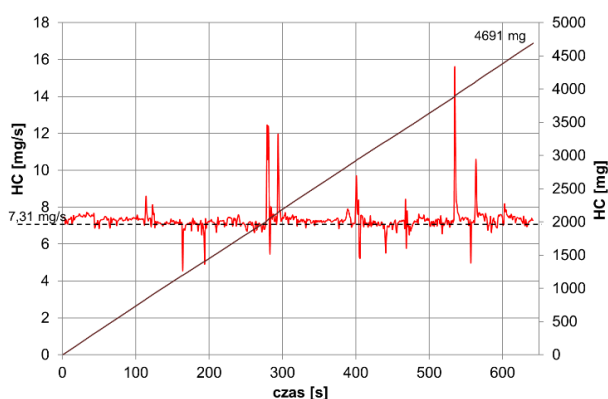
Natężenie emisji związków szkodliwych emitowane z generatorów prądotwórczych z silnikami ZI oscylują wokół wartości średnich (rys. 6.35 – 6.42). Podobnie jak dla wyżej opisanych urządzeń, chwilowe, dynamiczne zmiany natężenia emisji wynikają z przejściowych zmian obciążenia. Mniejszą dynamikę zmian emisji zaobserwowano dla generatora II, widoczne to jest szczególnie na wykresie zmian natężenia emisji CO<sub>2</sub>, zapewne wynika to z mniejszych zmian obciążenia silnika (rys. 6.39).



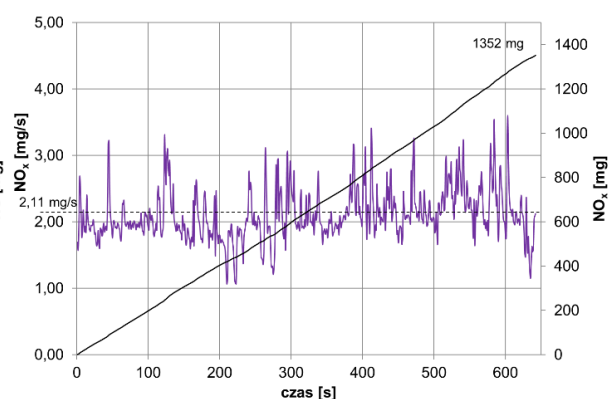
Rys. 6.35. Natężenie emisji  $CO_2$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora I



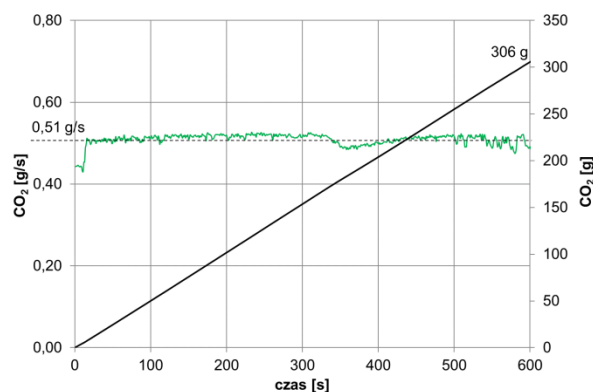
Rys. 6.36. Natężenie emisji CO w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora I



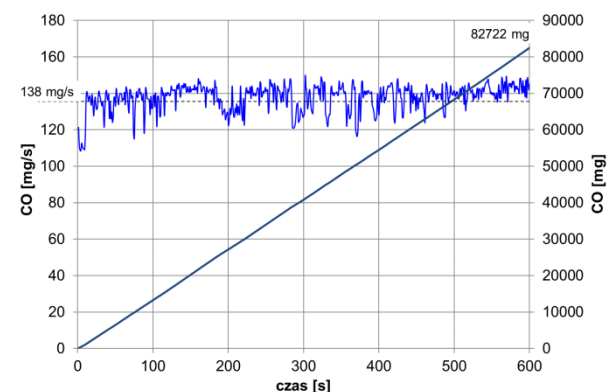
Rys. 6.37. Natężenie emisji HC w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora I



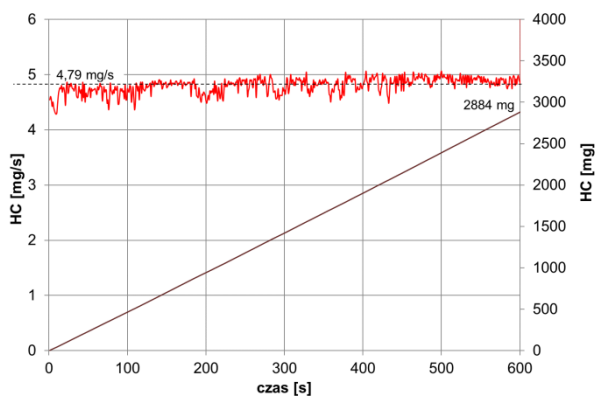
Rys. 6.38. Natężenie emisji  $NO_x$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora I



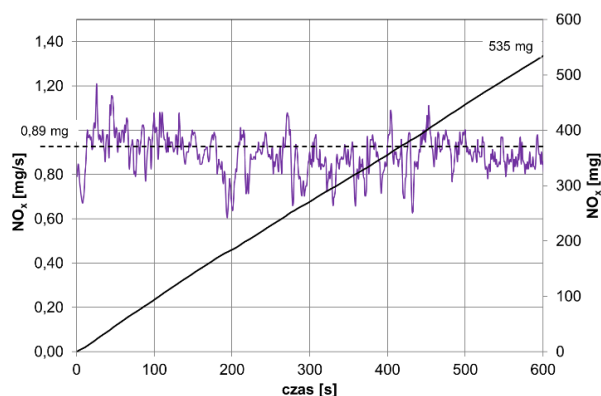
Rys. 6.39. Natężenie emisji  $CO_2$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora II



Rys. 6.40. Natężenie emisji CO w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora II

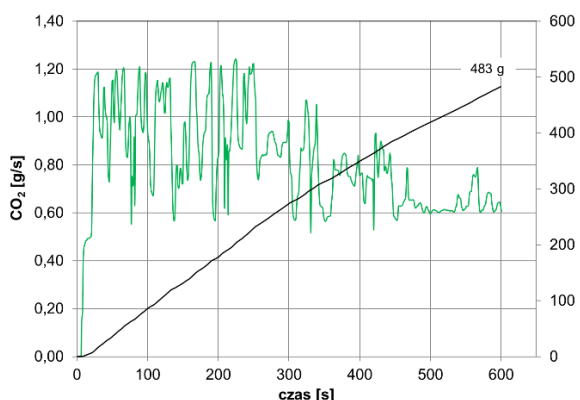


Rys. 6.41. Natężenie emisji HC w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora II

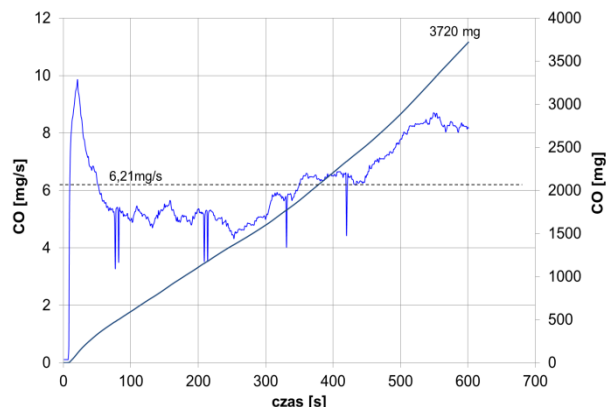


Rys. 6.42. Natężenie emisji NO<sub>x</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora II

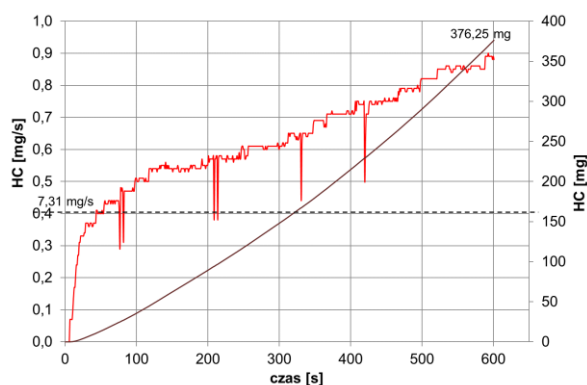
Natomiast dla silnika generatora ZS natężenia emisji związków szkodliwych charakteryzują się dużymi zmianami, szczególnie jest to widoczne dla CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>, do około 400 s pracy (rys. 6.43 i 6.46). Z kolei dla natężenia emisji CO zaobserwowano zwiększoną emisję w początkowej fazie pracy silnika, co zapewne wynika z zimnego rozruchu. Co charakterystyczne, dla CO i HC zaobserwowano zwiększenie natężenia emisji w czasie (rys. 6.44 i 6.45).



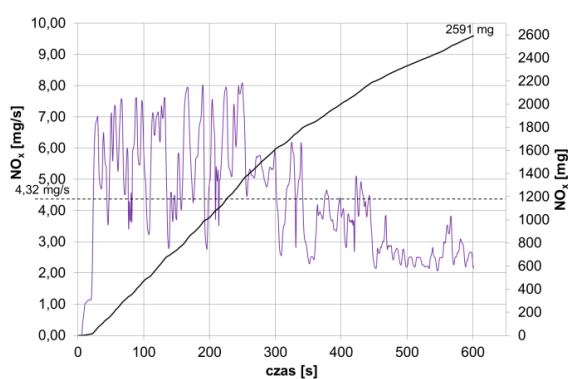
Rys. 6.43. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji generatora ZS



Rys. 6.44. Natężenie emisji CO w rzeczywistych warunkach eksploatacji generatora ZS

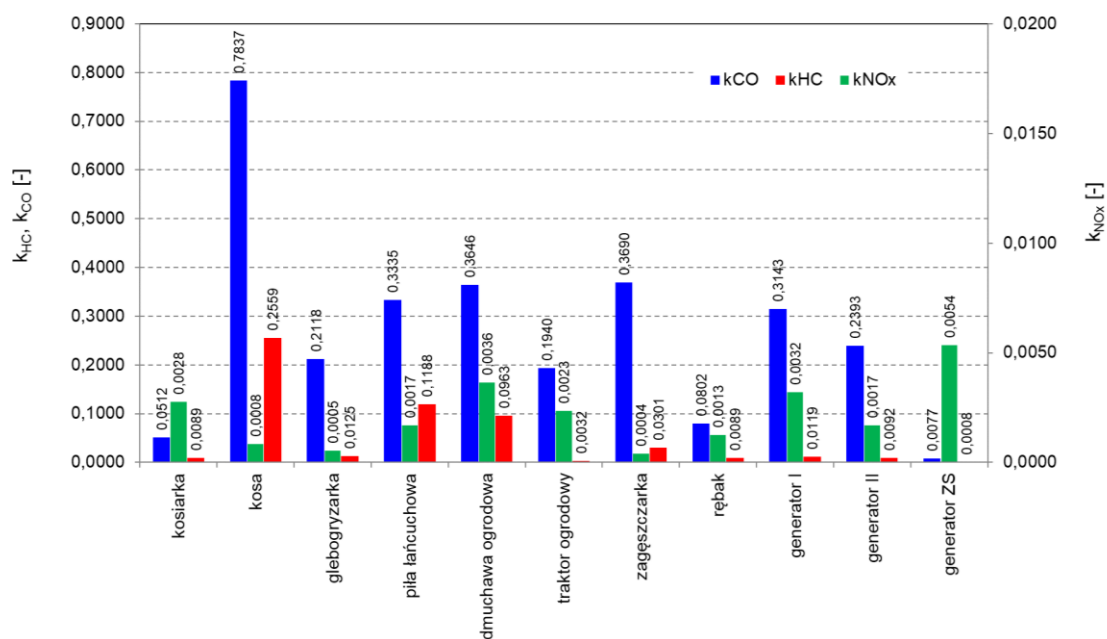


Rys. 6.45. Natężenie emisji HC w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora ZS



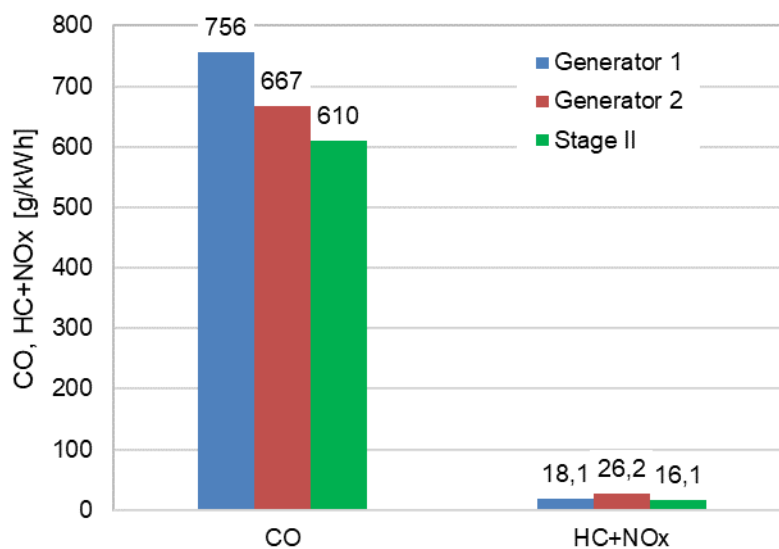
Rys. 6.46. Natężenie emisji NO<sub>x</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji Generatora ZS

Wyznaczone współczynniki  $k_j$  są miarą emisji danego związku do masy CO<sub>2</sub>, czyli zużytego paliwa (rys. 6.47). Najkorzystniej, gdy wskaźniki te przyjmują jak najmniejszą wartość, co oznacza, że dla określonej masy zużytego paliwa – energii silnik wyemitował najmniejszą emisję. Wszystkie wskaźniki przyjmują wartości w przedziale (0; 1), co wydaje się oczywiste, wskaźnik o wartości powyżej 1 oznaczałby masę wyemitowanego związku większą niż masa wyemitowanego CO<sub>2</sub>, co jest rzadko spotykanym zjawiskiem. Jak można zauważyć na wykresie na rys. 6.47, współczynnik  $k_j$  przyjmuje największe wartości dla CO, natomiast najmniejsze dla NO<sub>x</sub>. Ponieważ dla badanej grupy silników pomiar obciążenia silnika jest problematyczny, należy rozważyć wykorzystanie współczynnika  $n_j$ , jako wskaźnika emisji dla badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Takie podejście do problemu pomiaru emisji jest spotykane w literaturze i rozpatrywane jako wielkość charakteryzująca wielkość emisji związków toksycznych spalin, przy czym spotykane jest określenie tego parametru jako iloraz masy danego związku do masy CO<sub>2</sub> lub jako stosunek emisji, bądź odniesienie masy emitowanego związku do masy paliwa [61, 74].

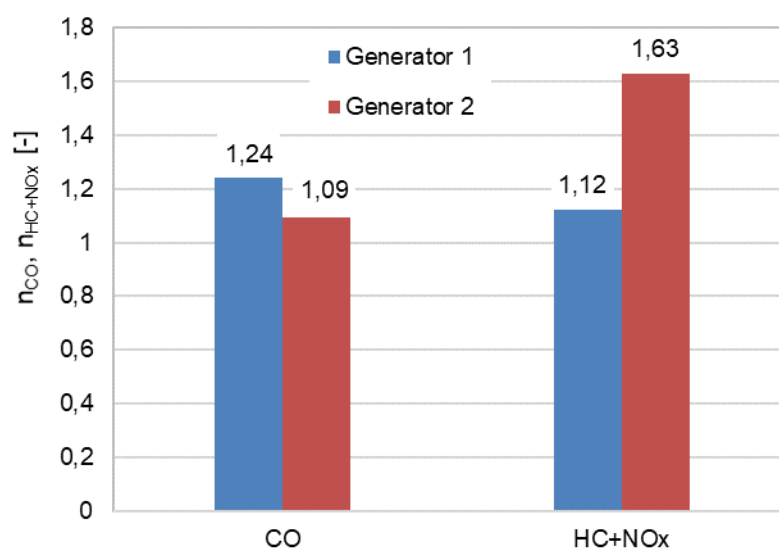


Rys. 6.47. Współczynniki  $k_j$  wyznaczone dla silników badanych urządzeń

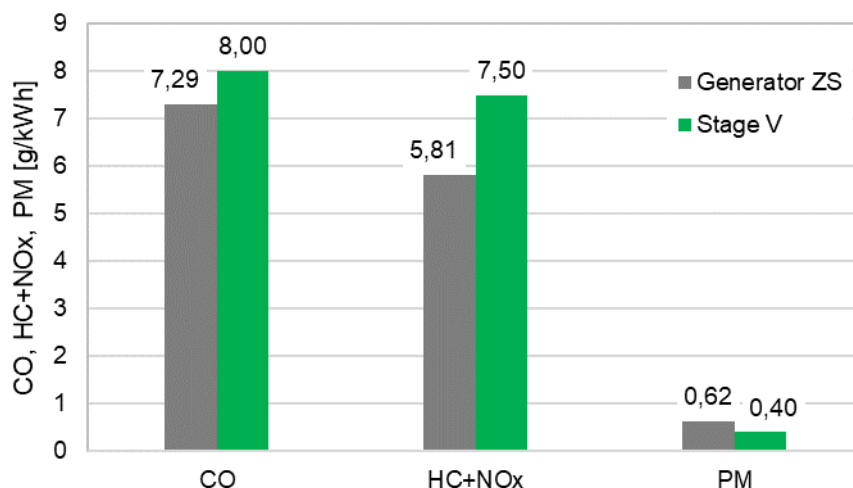
Dla silników generatorów prądotwórczych, jak napisano wyżej, ustalono obciążenie silników, zatem możliwe było wyznaczenie emisji związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach ich eksploatacji, emisję jednostkową porównano z obowiązującymi limitami (rys. 6.48 i 6.50). Dla generatora ZS porównanie wykonano dla normy *Stage V*, wcześniejsze regulacje prawne nie uwzględniały silników ZS o tak małej mocy i objętości, dotyczyły one tylko silników ZI. Dla silników ZI porównanie dotyczy normy *Stage II*, zgodnie z którą były one homologowane. Emisja CO silników ZI w rzeczywistych warunkach eksploatacji jest większa od wartości dopuszczalnych, podobnie jest dla sumarycznej emisji HC + NO<sub>x</sub>. Różnice między rzeczywistą emisją, a wartościami dopuszczalnymi najlepiej obrazuje współczynnik  $n_j$  (rys. 6.49). Dla silnika ZS badanego generatora emisja zarówno CO, jak i HC + NO<sub>x</sub>, jest mniejsza od wartości dopuszczalnych (rys. 6.50), natomiast większa jest emisja PM. Współczynnik  $n_j$  wyznaczony dla silnika generatora ZS obrazuje różnice między rzeczywistą emisją i wartościami dopuszczalnymi. Należy zwrócić uwagę, że różnica dla PM wynosi aż 1,55 (rys. 6.51).



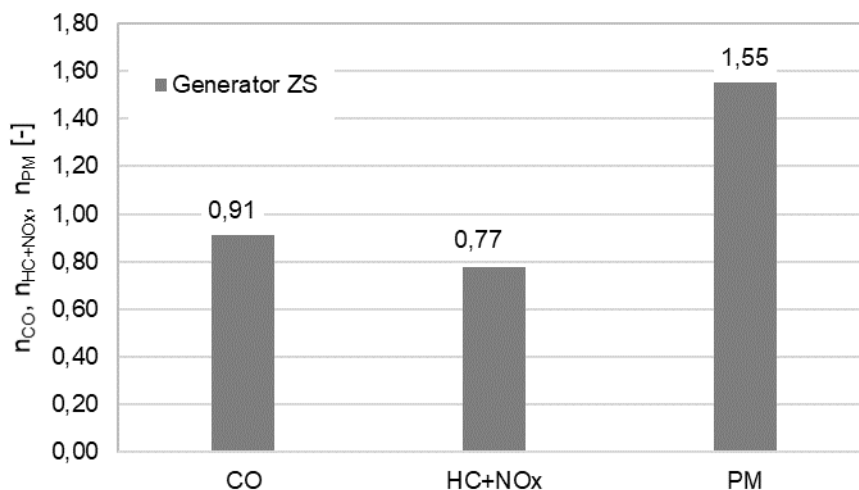
Rys. 6.48. Emisja jednostkowa związków toksycznych spalin generatorów prądotwórczych zasilanych silnikami ZI, porównanie z limitami Stage II



Rys. 6.49. Współczynnik  $n_j$  związków toksycznych spalin silnika generatorów 1 i 2



Rys. 6.50. Emisja związków toksycznych spalin generatora ZS, porównanie z limitami Stage V



Rys. 6.51. Współczynnik  $\eta_j$  związków toksycznych silnika generatora ZS

## 6.5. Analiza parametrów pracy silników w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Wykonano analizę w czasie danych dotyczących pracy silników w rzeczywistej eksploatacji, tj. prędkość obrotową wału korbowego i natężenie emisji CO<sub>2</sub>, jako wskaźnik obciążenia silników, parametry te są przedstawione na rysunkach 6.52 – 6.101. W teście statycznym dopuszczalne jest odchylenie 2 % od zadanej prędkości obrotowej, dlatego taki przedział brano pod uwagę. Na rysunkach, na których przedstawiono porównanie punktów testu statycznego i rzeczywistych parametrów pracy, zaznaczono przedziały prędkości uwzględniające dopuszczalne odchylenie i



udział czasu pracy silników w tych przedziałach. W celu dokładniejszej analizy i porównania parametrów pracy poszczególnych silników zdefiniowano bezwymiarowy współczynnik  $x$  prędkości obrotowej ( $x_n$ ) i współczynnik natężenia emisji CO<sub>2</sub> ( $x_{CO_2}$ ):

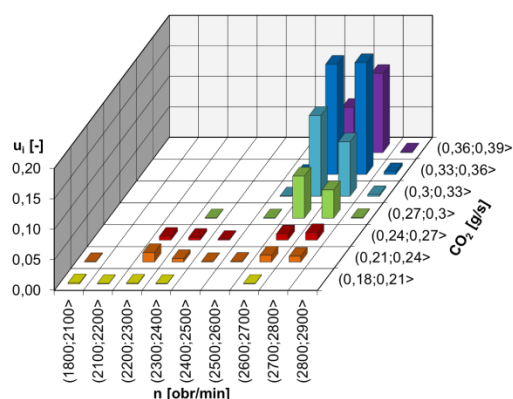
$$x = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|x_i - \bar{x}|}{\bar{x}} \quad (6.3)$$

gdzie:  $m$  – liczba badanych parametrów  
 $x_i$  – kolejna wartość badanego parametru  
 $\bar{x}$  – wartość średnia badanego parametru

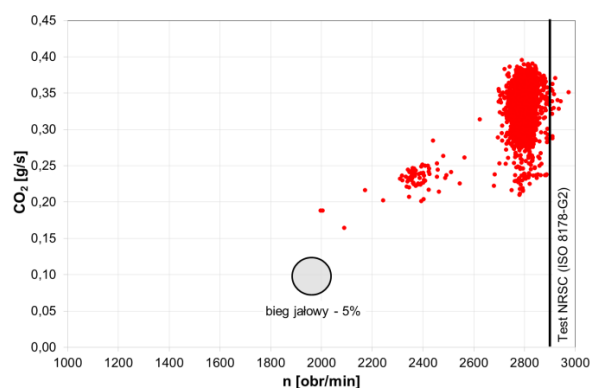
Zdefiniowane współczynniki są miarą zmian prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>. Informują one, w jakim stopniu wielkości te koncentrują się wokół wartości centralnej badanego parametru; mniejsza wartość oznacza mniejszą dyspersję zmiennych. Dla prędkości obrotowej wartość centralna powinna być równa wartości zadanej, czyli prędkości dla której badane maszyny wykonują pracę. Dokonano także analizy parametrów pracy silników w odniesieniu do parametrów testu homologacyjnego. Analiza ta opiera się tylko na ogólnej ocenie odniesienia rzeczywistych parametrów pracy silników, brak pełnej informacji o obciążeniu silników nie pozwala na szczegółową analizę. Pozyskane dane w czasie rzeczywistej eksploatacji silników umożliwiają analizę odnośnie reprezentatywności stosowanych testów homologacyjnych. Jak opisano w rozdziale trzecim, badania homologacyjne silników wykonywane są w teście statycznym NRSC, bazującym na ISO-8178. W zależności od zastosowania urządzenia – silnika podczas badań homologacyjnych wykonywany jest jeden z wariantów testu: G1, G2 lub G3. Przeprowadzona analiza obejmuje przede wszystkim reprezentatywność prędkości obrotowej wału korbowego, zarejestrowane dane pozwalają na pełną informację w tym zakresie. Natomiast odnośnie obciążenia, które jest reprezentowane emisją CO<sub>2</sub>, możliwa jest ograniczona analiza, ponieważ nie jest dokładnie znana wartość obciążeń silników. Nieco inna sytuacja jest dla generatorów prądotwórczych, w tych przypadkach określono wartość obciążenia na podstawie obciążenia odbiorników elektrycznych. Dzięki temu przeprowadzono szczegółową analizę parametrów pracy silników w aspekcie obowiązujących testów homologacyjnych.

Z analizy parametrów pracy silnika kosiarki ogrodowej wynika, że wykorzystywany był wąski zakres prędkości obrotowej wału korbowego 2700 – 2900 obr/min (rys. 6.52 i 6.54), udział czasu pracy w tym zakresie wynosi około 94 %. Charakterystyczne, że prędkość obrotowa skupia się wokół zadanej wartości roboczej 2800 obr/min. Widoczne jest chwilowe zmniejszenie prędkości i

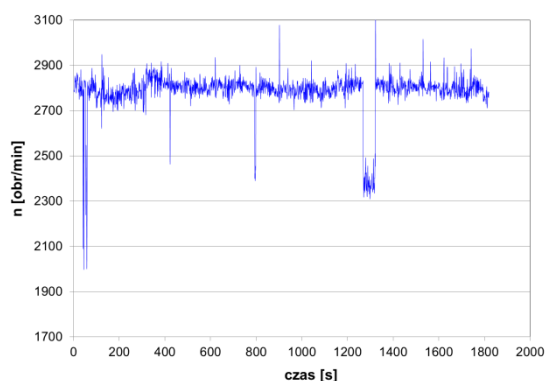
obciążenia silnika (około 1300 s), co wynika z przerwy w pracy maszyny. Zmiany, odchylenia prędkości od wartości zadanej wynikają ze zmian obciążenia silnika, co widoczne jest na rysunku 6.54. Wzrost obciążenia powoduje chwilowe zmniejszenie prędkości obrotowej, po czym następuje powrót do wartości zadanej. Widoczne są zmiany natężenia emisji CO<sub>2</sub> wynikające ze zmian obciążenia silnika, natomiast zmiany obciążenia powodują chwilowe zmiany prędkości obrotowej (rys. 6.53 i 6.55). Dla zarejestrowanych przebiegów wyznaczono współczynniki zmian prędkości obrotowej  $x_n$ , który wynosi 0,016 i 0,091 dla natężenia emisji CO<sub>2</sub>. Na podstawie wyznaczonych współczynników, oraz przebiegów widocznych na rysunkach 6.53 i 6.55 stwierdzono, że obciążenie silnika zmienia się częściej i w większym zakresie, w porównaniu z prędkością obrotową. Na rysunku 6.53 zaznaczono prędkość obrotową wału korbowego, dla której wykonywane są fazy testu homologacyjnego NRSC. Dla silnika kosiarki pomiary wykonywane są w wariacie testu ISO 8178-G2, który obejmuje 5 faz dla prędkości maksymalnej mocy, dla obciążeń odpowiedni: 100, 75, 50, 25 i 10 % maksymalnego, a więc fazy testu obejmują niemal cały zakres obciążenia. Ostatnia faza – 6, to bieg jałowy. W odniesieniu do zarejestrowanych parametrów pracy nasuwa się pierwsze spostrzeżenie, w rzeczywistej eksploatacji wykorzystywane obciążenie, reprezentowane emisją CO<sub>2</sub>, ma ograniczony zakres i można przypuszczać, że zakres ten nie pokrywa się w pełni z zakresem testu. Punkty pracy w teście obejmują cały zakres obciążenia silnika. Ponadto zauważalne jest, że w rzeczywistej eksploatacji prędkość obrotowa jest mniejsza od prędkości faz testu. Najczęściej wykorzystywany zakres prędkości to przedział 2700 – 2900 obr/min, natomiast prędkość obrotowa faz testu wynosi 2900 obr/min, przy czym wyraźnie widoczne jest wykorzystanie zakresu poniżej 2900 obr/min. Duży udział prędkości poniżej 2900 obr/min zapewne wynika z dynamicznych zmian obciążenia silnika, które wywołuje chwilowe zwiększenie i zmniejszenie prędkości obrotowej wału korbowego.



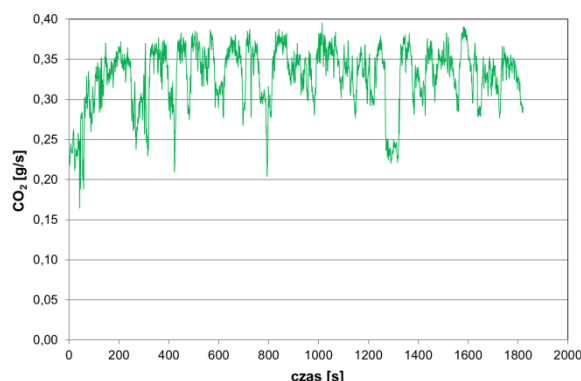
Rys. 6.52. Udział czasu pracy silnika kosiarki dla prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>



Rys. 6.53. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-G2



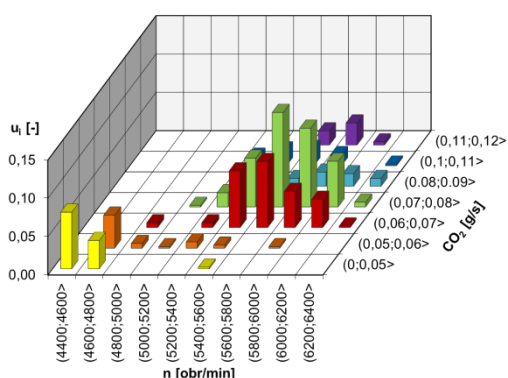
Rys. 6.54. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika kosiarki w rzeczywistych warunkach eksploatacji



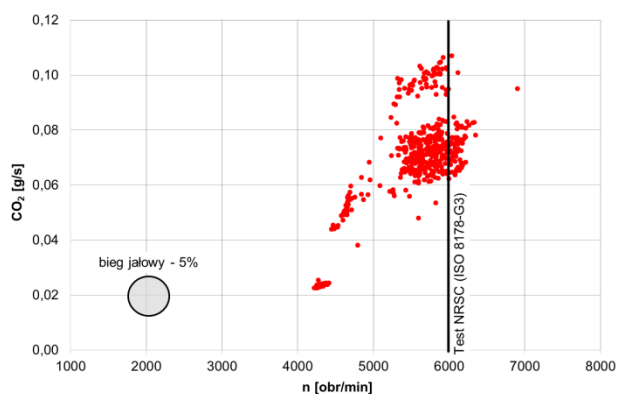
Rys. 6.55. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> silnika kosiarki w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Podczas pracy silnik kosi spalinowej wykorzystywany był głównie zakres prędkości obrotowej wału korbowego 5000 – 6000 obr/min (rys. 6.56 i rys. 6.58), zakres wykorzystywanego obciążenia reprezentowanego natężeniem emisji CO<sub>2</sub> wynosił 0,06 – 0,08 g/h. Prędkość obrotowa skupia się wokół zadanej wartości roboczej 5600 obr/min, przed rozpoczęciem pracy, przez około 30 s, oraz około 380 s zarejestrowano również bieg jałowy silnika – 4200 obr/min (rys. 6.58). Emisja godzinowa CO<sub>2</sub> do około 380 s, zmienia się w zakresie 0,06 – 0,08 g/s i po krótkiej przerwie pracy maszyny następuje praca, ale już charakteryzuje się ona większym natężeniem emisji CO<sub>2</sub> – około 0,1 g/s, co zinterpretowano jako pracę silnika z większym obciążeniem (rys. 6.59). Dla pracy silnika kosi wyznaczono współczynniki zmian prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>. Ich wartości to odpowiednio  $x_n = 0,069$  oraz  $x_{CO_2} = 0,168$ . Podobnie jak dla wyżej opisanej pracy silnika kosiarki, na podstawie wyznaczonych współczynników można stwierdzić większe zmiany obciążenia silnika w porównaniu z prędkością obrotową wału korbowego. Analiza parametrów pracy silnika w aspekcie testu homologacyjnego (rys. 6.57) wykazała, że w rzeczywistej eksploatacji

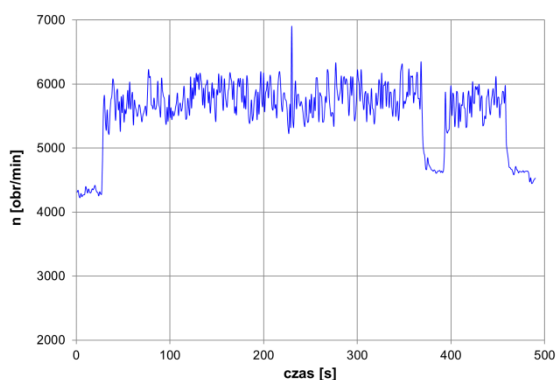
zakres wykorzystywanej prędkości obrotowej nie odpowiada zakresowi testu ISO 8178-G3. W rzeczywistej eksploatacji, zakres wykorzystywanej prędkości jest znacznie większy, ponadto udział prędkości faz testu 6000 obr/min. W odniesieniu do testu badawczego NRSC, widoczny jest wykorzystywany szeroki zakres prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia. Fazy testu ISO 8178-G3 dla urządzeń ręcznych są wykonywane w dwóch punktach pracy silnika, biegu jałowego i dla maksymalnej mocy, czyli dla badanego silnika dla prędkości 6000 obr/min. Natomiast w rzeczywistej eksploatacji zaobserwowano duży udział czasu pracy w zakresie znacznie oddalonym od prędkości faz testu.



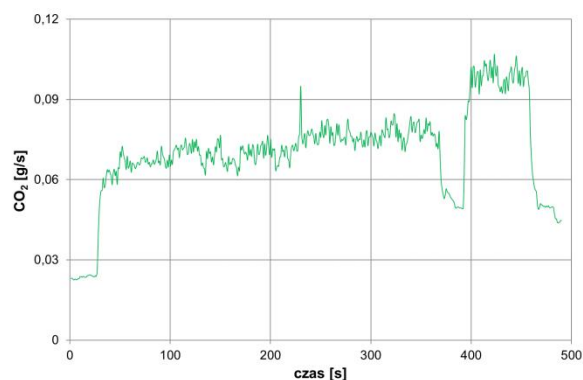
Rys. 6.56. Udział czasu pracy silnika kosi dla prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>



Rys. 6.57. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-G3



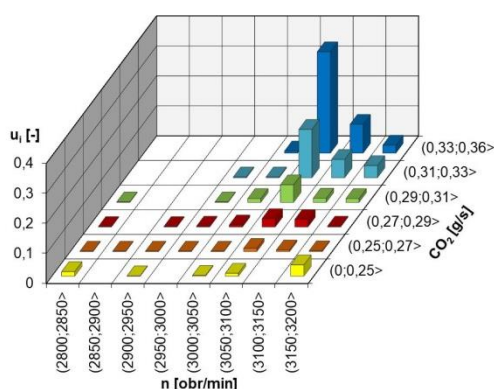
Rys. 6.58. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika kosi w rzeczywistych warunkach eksploatacji



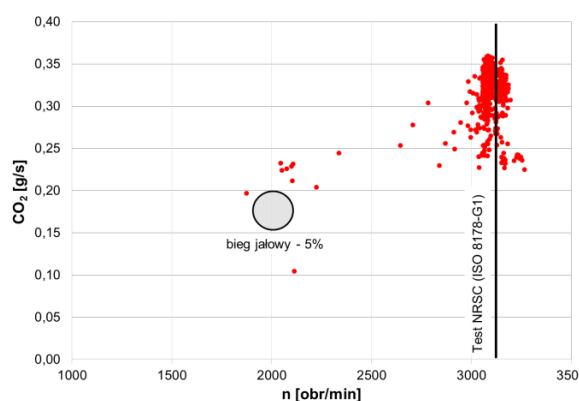
Rys. 6.59. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> silnika kosi w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Na podstawie analizy parametrów pracy silnika glebogryzarki stwierdzono, że głównie wykorzystywany był zakres prędkości obrotowej wału korbowego 3050 – 3150 obr/min (rys. 6.60 i 6.62). Udział pracy w zakresie wskazanej prędkości obrotowej wynosi ponad 95 %. Prędkość robocza silnika to 3100 obr/min. Podczas pracy maszyny zarejestrowano chwilowe odchylenia od tej

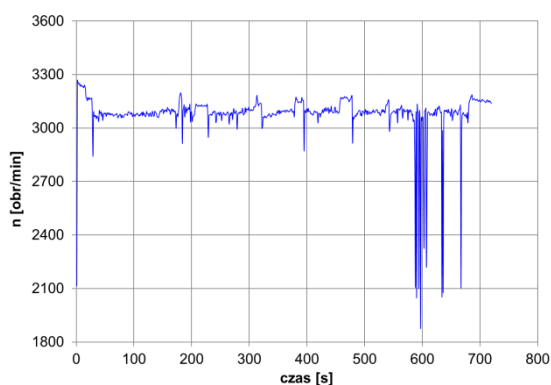
prędkości, które spowodowane są zmianami obciążenia (rys. 6.62). Reprezentujące obciążenie silnika natężenie emisji CO<sub>2</sub> zmienia się w 0,25 – 0,35 g/s. Około 600 s, widoczne są dynamiczne zmiany obciążenia oraz prędkości obrotowej do bardzo małych wartości, 1800 – 2000 obr/min, co należy interpretować jako przeciążenie silnika. Można zatem przypuszczać, że natężenie emisji CO<sub>2</sub> na poziomie 0,35 g/s świadczy o obciążeniu silnika bliskim maksymalnemu. Dla zarejestrowanych przebiegów prędkości i emisji CO<sub>2</sub> wyznaczono współczynniki zmian, które wynoszą  $x_n = 0,014$  i  $x_{CO_2} = 0,074$ . Jak dla opisanych wyżej maszyn, również dla glebogryzarki współczynnik zmian natężenia emisji CO<sub>2</sub> przyjmuje większą wartość niż współczynnik zmian prędkości obrotowej. Dla badanego silnika fazy testu homologacyjnego ISO 8178-G1 są wykonywane dla prędkości 3100 obr/min (rys. 6.61). W rzeczywistej eksploatacji zakres wykorzystywanych prędkości obrotowych jest nieco szerszy, ale zauważalne jest zagęszczenie punktów pracy wokół prędkości 3100 obr/min. Obciążenie reprezentowane zużyciem paliwa/emisją CO<sub>2</sub> również występuje w stosunkowo wąskim zakresie 0,28 – 0,35 g/s.



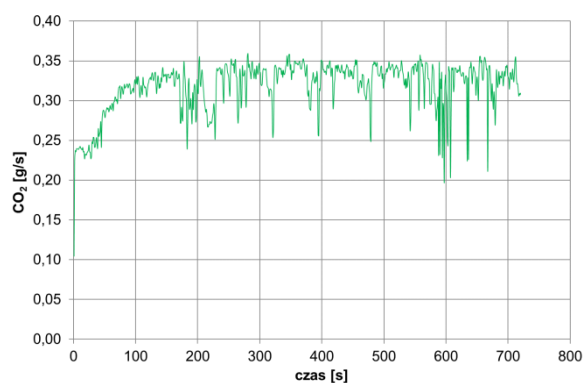
Rys. 6.60. Udział czasu pracy silnika glebogryzarki dla prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>



Rys. 6.61. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-G1

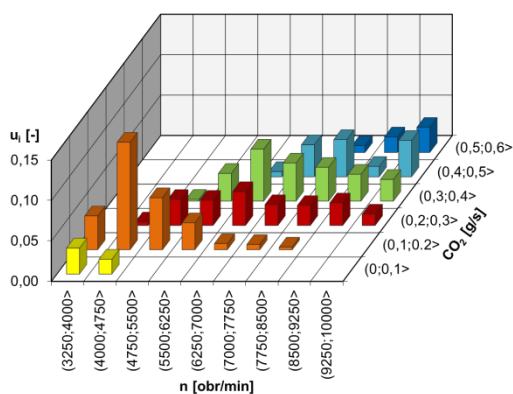


Rys. 6.62. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika glebogryzarki w rzeczywistych warunkach eksploatacji

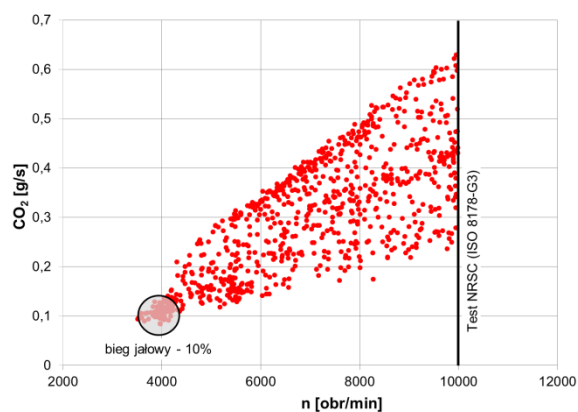


Rys. 6.63. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> silnika glebogryzarki w rzeczywistych warunkach eksploatacji

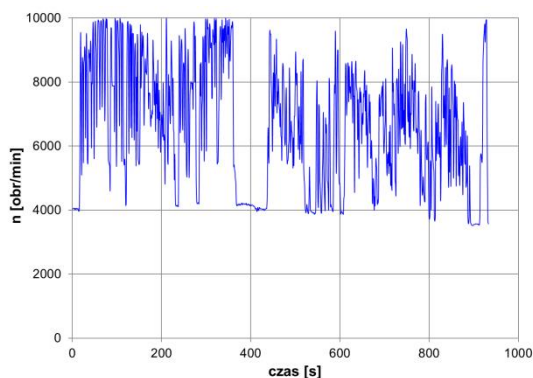
W porównaniu z opisanymi wyżej maszynami, parametry pracy silnika piły łańcuchowej zmieniają się w większym zakresie. Zakres zmian prędkości obrotowej wału korbowego to 4000 – 10000 obr/min (rys. 6.64 i 6.66). Z zestawienia punktów pracy na rysunku 6.65 wynika charakterystyczny rozkład natężenia emisji CO<sub>2</sub> (obciążenia) od prędkości obrotowej, przypominający kształtem trójkąt. Charakter pracy piły łańcuchowej jest cykliczny, po cięciu następuje zmniejszenie prędkości obrotowej, najczęściej do biegu jałowego, co jest wyraźnie widoczne na rysunku 6.66. Analogiczny jest charakter zmian obciążenia silnika (rys. 6.67). Natężenie emisji CO<sub>2</sub> zmienia się w zakresie 0,1 – 0,6 g/s. W porównaniu z wyżej opisanymi maszynami, dla silnika piły łańcuchowej współczynniki zmian prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub> przyjmują największe wartości:  $x_n = 0,251$ ,  $x_{CO_2} = 0,407$ . W odróżnieniu od wyżej przedstawionych silników, w aspekcie testu NRSC zakres parametrów pracy silnika piły łańcuchowej w rzeczywistej eksploatacji znacząco się różni. W czasie rzeczywistej eksploatacji wykorzystywany jest cały dostępny zakres prędkości obrotowej, od 4000 do 10000 obr/min, podczas gdy faza testu ISO 8178-G3 jest wykonywana tylko dla prędkości 10000 obr/min i maksymalnego obciążenia. Test ten nie uwzględnia prędkości i obciążeń częściowych, których udział podczas wykonywania pracy przez urządzenie jest znaczący (rys. 6.65).



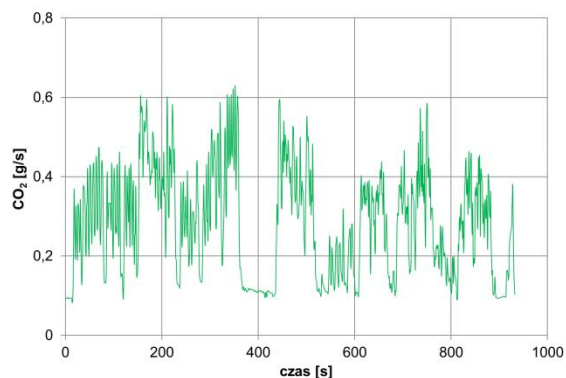
Rys. 6.64. Udział czasu pracy silnika piły łańcuchowej dla prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>



Rys. 6.65. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-G3

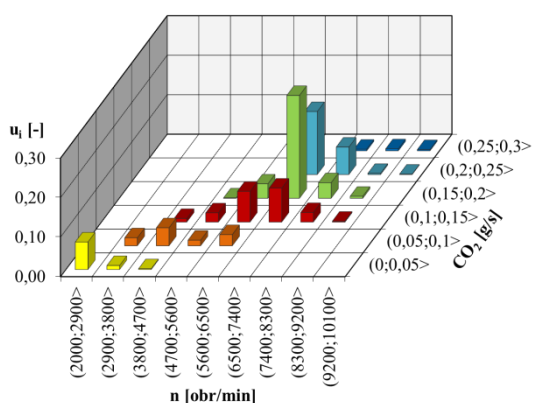


Rys. 6.66. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika piły łańcuchowej w rzeczywistych warunkach eksploatacji

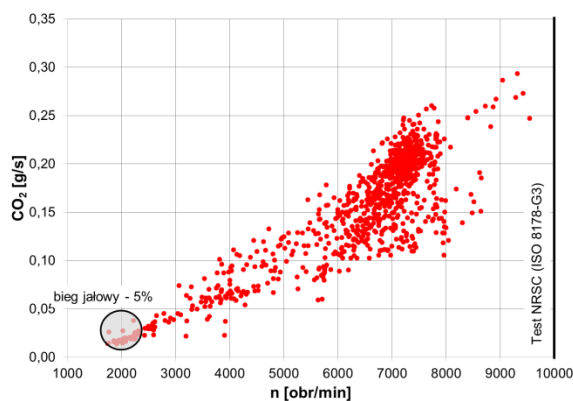


Rys. 6.67. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> silnika piły łańcuchowej w rzeczywistych warunkach eksploatacji

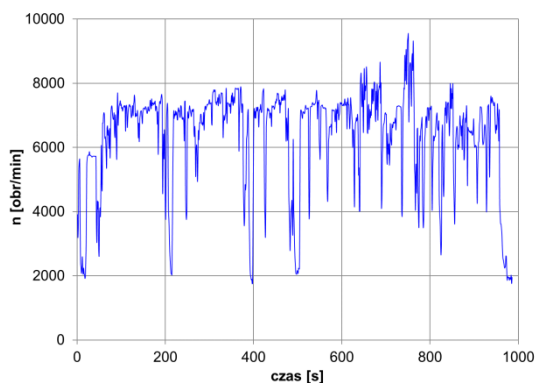
Bardzo podobny do silnika piły łańcuchowej charakter pracy zaobserwowano dla silnika dmuchawy ogrodowej. Najczęściej wykorzystywany zakres prędkości obrotowej wału korbowego to 6500 – 8000 obr/min (rys. 6.68 i 6.70). Zakres zmian prędkości obrotowej i natężenie emisji CO<sub>2</sub> jest stosunkowo duży. Prędkość obrotowa zmienia się od 2000 do 9000 obr/min (rys. 6.70), natomiast natężenie emisji CO<sub>2</sub> od 0,02 do 0,28 g/s (rys. 6.71). Duże zmiany parametrów pracy znajdują odzwierciedlenie w wyznaczonych współczynnikach, które wynoszą:  $x_n = 0,180$  i  $x_{CO_2} = 0,313$ . Analizując pracę silnika dmuchawy w aspekcie testu homologacyjnego, spostrzeżenia są analogiczne do wyżej opisanego silnika piły łańcuchowej. W rzeczywistej eksploatacji silnik dmuchawy pracował w szerokim zakresie prędkości i obciążenia, wyraźne jest niedopasowanie testu ISO 8178-G3 do parametrów występujących podczas rzeczywistej pracy (rys 6.69). Należy zauważyć, że maksymalna prędkość wału korbowego, charakterystyczna dla testu NRSC prawie w ogóle nie była wykorzystywana w czasie rzeczywistej eksploatacji.



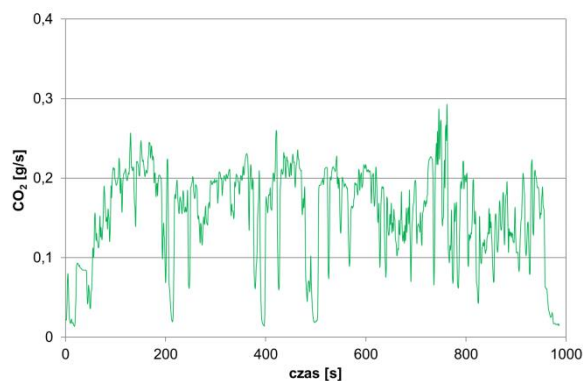
Rys. 6.68. Udział czasu pracy silnika dmuchawy ogrodowej dla prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>



Rys. 6.69. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-G3

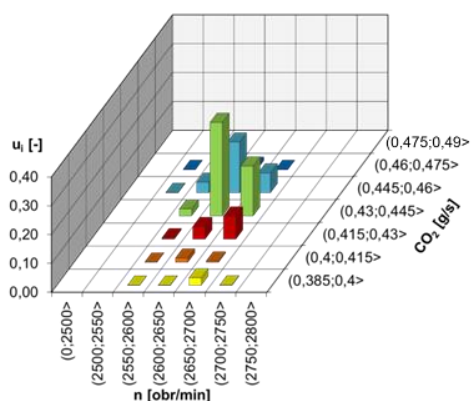


Rys. 6.70. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika dmuchawy ogrodowej w rzeczywistych warunkach eksploatacji

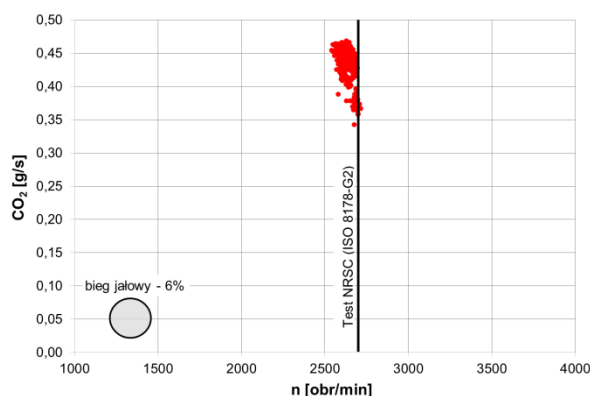


Rys. 6.71. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> silnika dmuchawy ogrodowej w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Z analizy parametrów pracy silnika traktora ogrodowego wynika, że wykorzystywany był bardzo wąski zakres prędkości obrotowej wału korbowego 2600 – 2700 obr/min (rys. 6.72 i 6.74). Prędkość obrotowa oscyluje wokół zadanej wartości roboczej 2600 obr/min, widoczne są chwilowe zmiany, ale w niewielkim zakresie (rys. 6.74). Podobnie zmiany natężenia emisji CO<sub>2</sub>, oscylują wokół wartości 0,44 g/s, a chwilowe zmiany są nieduże (rys. 6.75). Dla zarejestrowanych przebiegów wyznaczono współczynniki zmian prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub> wynoszące kolejno  $x_n = 0,008$  oraz  $x_{CO_2} = 0,022$ . Na rysunku 6.73 przedstawiono również prędkość dla której wykonywane są fazy testu ISO 8178-G2, dla omawianego silnika jest to 2700 obr/min. W czasie rzeczywistej eksploatacji silnik pracował w okolicach tego zakresu, natomiast bliżej prędkości obrotowej roboczej 2600 obr/min.

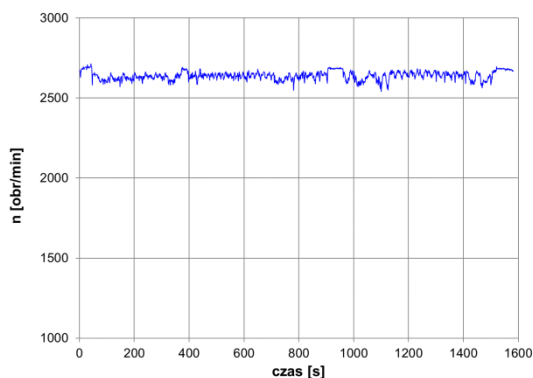


Rys. 6.72. Udział czasu pracy silnika traktora ogrodowego dla prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>

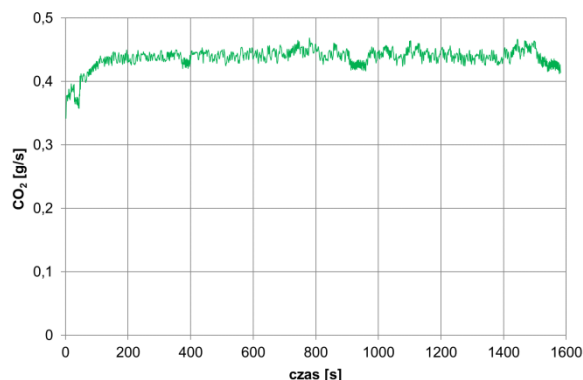


Rys. 6.73. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-G2



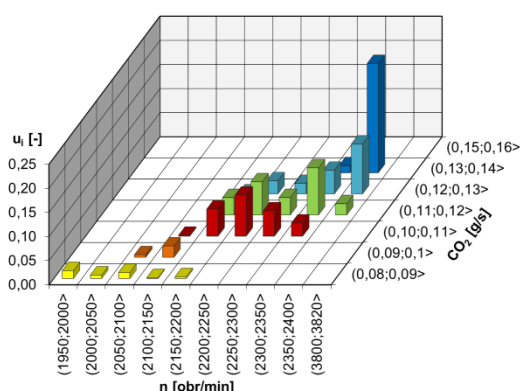


Rys. 6.74. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika traktora ogrodowego w rzeczywistych warunkach eksploatacji

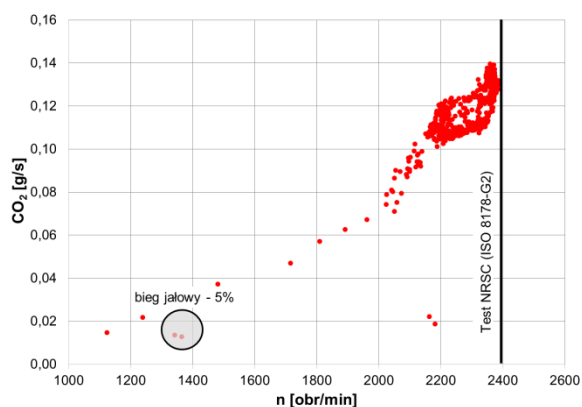


Rys. 6.75. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> silnika traktora ogrodowego w rzeczywistych warunkach eksploatacji

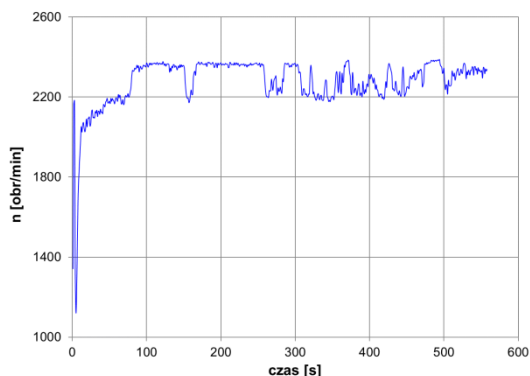
Silnik zagęszczarki pracował w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego 2100 – 2400 obr/min, jednak wyraźnie największy udział ma zakres 3000 – 2400 obr/min (rys. 6.76 i 6.78). Do około 60 s zarejestrowano bieg jałowy i zmniejszoną prędkość obrotową, co wynikało z przygotowania maszyny do pracy, później prędkość oscyluje wokół wartości zadanej 2350 obr/min. Od około 300 s zmienia się charakter pracy maszyny, co widoczne jest na przebiegach prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>, wskazującej na obciążenie silnika (rys. 6.78 i 6.79). Natężenie emisji CO<sub>2</sub> zmienia się w zakresie 0,10 – 0,13 g/s (rys. 6.79). Dla zarejestrowanych przebiegów prędkości i natężenia emisji CO<sub>2</sub> wyznaczono współczynniki zmian, które wynoszą  $x_n = 0,036$  i  $x_{CO_2} = 0,102$ . Jest to kolejny przypadek maszyny dla której współczynnik zmian reprezentujący obciążenie silnika jest większy od współczynnika zmian prędkości obrotowej.



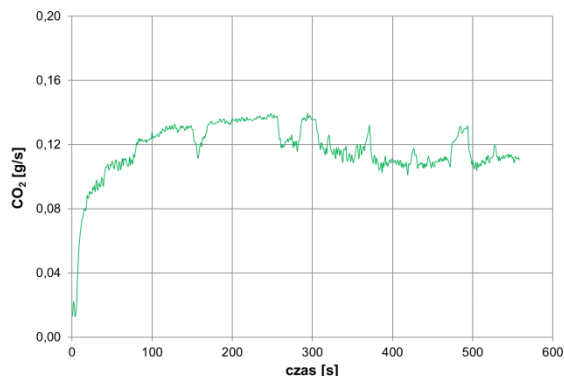
Rys. 6.76. Udział czasu pracy silnika zagęszczarki dla prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>



Rys. 6.77. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-G2

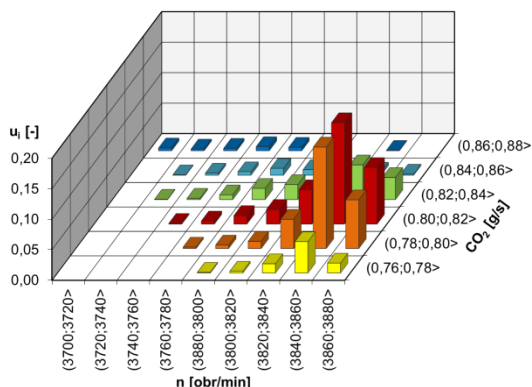


Rys. 6.78. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika zagęszczarki w rzeczywistych warunkach eksploatacji

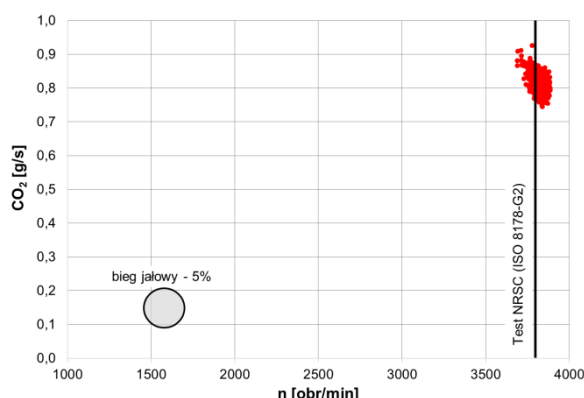


Rys. 6.79. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> silnika zagęszczarki w rzeczywistych warunkach eksploatacji

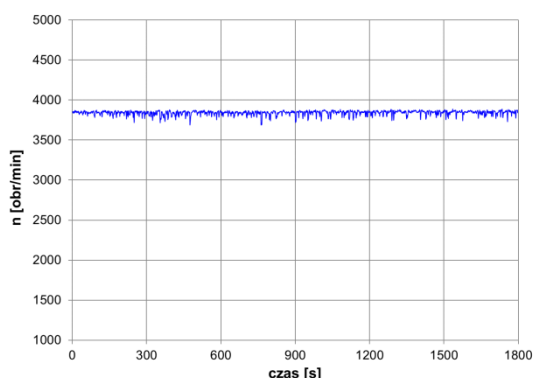
Wąski zakres zmian prędkości obrotowej wału korbowego zarejestrowano dla silnika rębaka (rys. 6.80 i 6.82). Zakres zmian zawiera się w przedziale 3800 – 3900 obr/min. Chwilowe zmiany zarówno prędkości obrotowej, od wartości zadanej 3800 obr/min, jak i natężenia emisji CO<sub>2</sub> są nieznaczne (rys. 6.81 i 6.83), co znajduje odzwierciedlenie w wartościach współczynników zmian:  $x_n = 0,005$ ,  $x_{CO_2} = 0,021$ . Natężenie emisji CO<sub>2</sub> skupia się wokół wartości 0,8 g/s i prędkości 3800 obr/min.



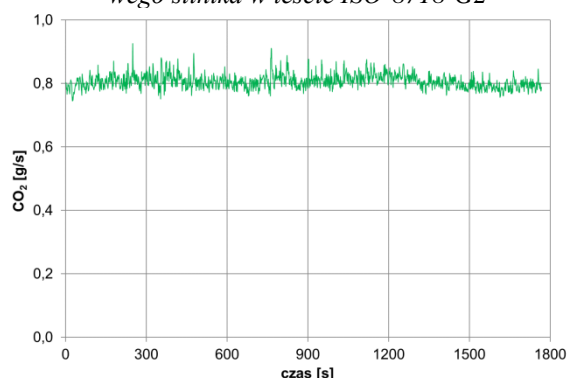
Rys. 6.80. Udział czasu pracy silnika rębaka dla prędkości obrotowej i emisji CO<sub>2</sub>



Rys. 6.81. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8718-G2

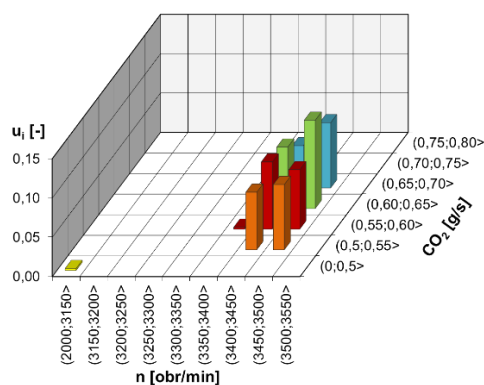


Rys. 6.82. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika rębaka w rzeczywistych warunkach eksploatacji

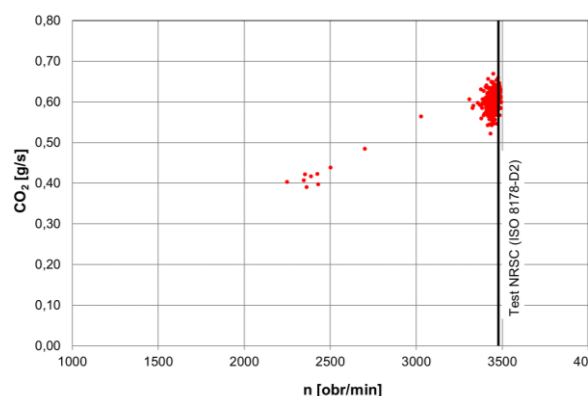


Rys. 6.83. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> silnika rębaka w rzeczywistych warunkach eksploatacji

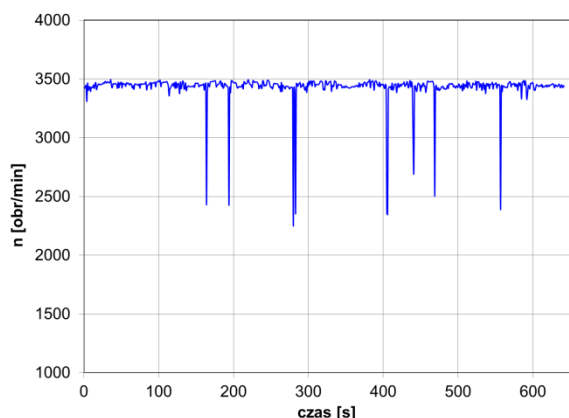
Silnik generatora prądotwórczego I pracował dla ustalonej prędkości obrotowej 3450 obr/min, widoczne niewielkie zmiany wynikają z chwilowej zmiany obciążenia (rys. 6.86). Największy udział czasu pracy zarejestrowano w przedziale prędkości obrotowej 3400–3500 obr/min (rys. 6.84). Charakterystyczne jest skupienie natężenia emisji wokół wartości 0,6 g/s i prędkości obrotowej 3450 obr/min, co potwierdza pracę generatora dla ustalonej prędkości i niewielkich zmian obciążenia. Prędkość obrotowa i natężenie emisji zmienia się stosunkowo nieznacznie, tylko dla kilku punktów widoczne jest wyraźne zmniejszenie prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub>, np. około 160 i 200 s (rys. 6.86 i 6.87). Współczynniki zmian dla badanego silnika, testu wynoszą  $x_n = 0,011$  i  $x_{CO_2} = 0,026$  i są to jedne z najniższych wartości spośród badanych maszyn. Z charakterystyki sporządzanej dla obciążenia silnika, reprezentowanego mocą wynika, wynika, że silnik pracował głównie w zakresie obciążeń częściowych 1 – 1,6 kW, charakterystyczne, że silnik nie pracuje w zakresie obciążeń zbliżonych do maksymalnego, czyli powyżej 1,6 kW. Wyznaczenie obciążenia dla generatorów umożliwiło szczegółową analizę parametrów pracy silników w aspekcie obowiązującego testu, co dla generatora I przedstawiono na rysunku 6.89.



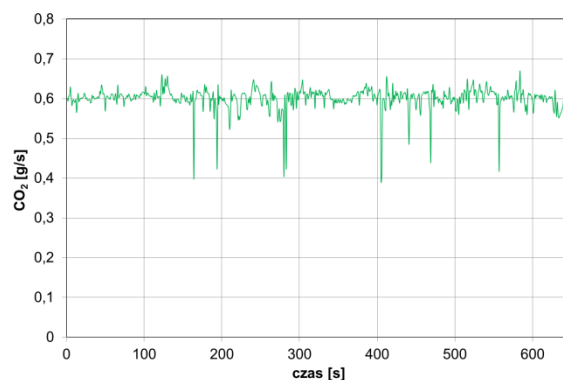
Rys. 6.84. Udział czasu pracy silnika generatora prądotwórczego I dla prędkości obrotowej i emisji CO<sub>2</sub>



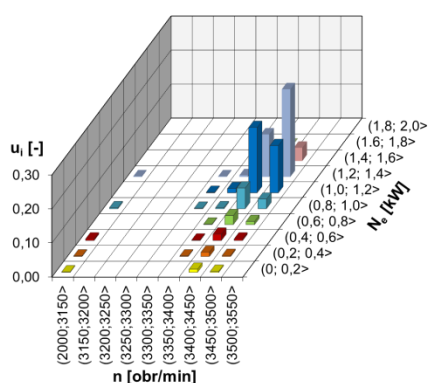
Rys. 6.85. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-D2



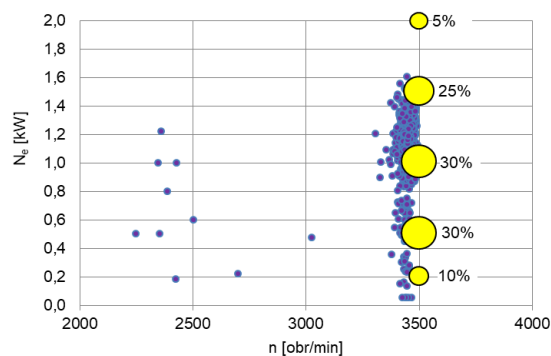
Rys. 6.86. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika generatora prądotwórczego I w rzeczywistych warunkach eksploatacji



Rys. 6.87. Emisja godzinowa CO<sub>2</sub> silnika generatora prądotwórczego I w rzeczywistych warunkach eksploatacji

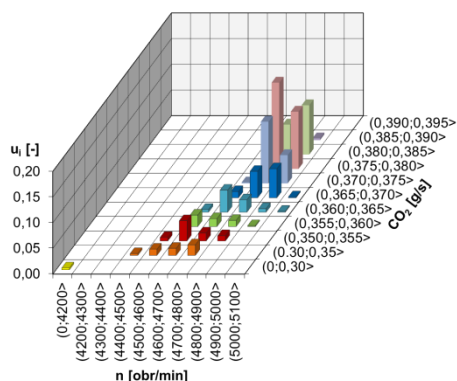


Rys. 6.88. Udział czasu pracy silnika generatora prądotwórczego I dla prędkości obrotowej i mocy

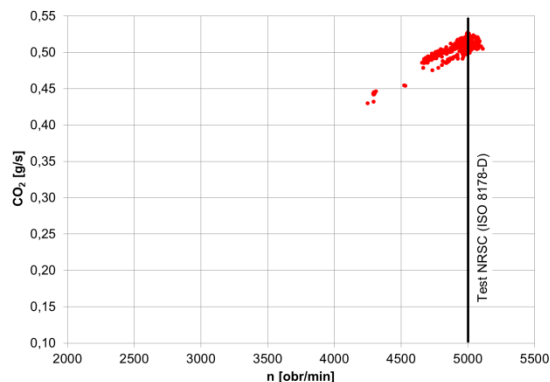


Rys. 6.89. Porównanie zakres pracy silnika generatora prądotwórczego I w rzeczywistych warunkach eksploatacji i w teście ISO-8178-C1

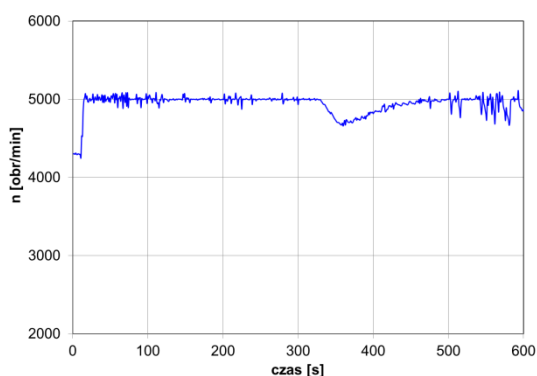
Silnik generatora prądotwórczego II pracował dla ustalonej prędkości obrotowej 5000 obr/min, widoczne są zmiany prędkości i wynikają one z chwilowej zmiany obciążenia (rys. 6.92), podobnie jak to było dla urządzeń opisanych wyżej. Dla silnika generatora II największy udział czasu pracy zarejestrowano w przedziale prędkości obrotowej 4700–5100 obr/min. Dla omawianego silnika zaobserwowano stosunkowo nieduży zakres zmian CO<sub>2</sub>, w porównaniu z silnikiem generatora I (rys. 6.91 i 6.93). Współczynniki zmian dla silnika generatora II przyjmują nieduże wartości i wynoszą  $x_n = 0,005$  i  $x_{CO_2} = 0,015$  i są to jedne z najniższych wartości spośród badanych maszyn. Z charakterystyki sporządzanej dla obciążenia silnika, reprezentowanego mocą wynika, że silnik generatora II pracował głównie w zakresie dużych obciążeń 1,5 – 2,1 kW (rys. 6.90). Wyznaczenie mocy silnika generatora II umożliwiło szczegółową analizę parametrów pracy w aspekcie obowiązującego testu (rys. 6.94 i 6.95), z analiz tych wynika, że test statyczny ISO-8178-D2, nie odzwierciedla obciążenia występującego w rzeczywistej eksploatacji.



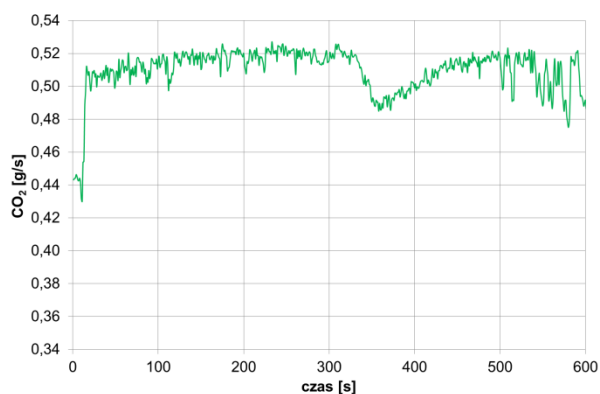
Rys. 6.90. Udział czasu pracy silnika generatora prądowórczego II dla prędkości obrotowej i emisji CO<sub>2</sub>



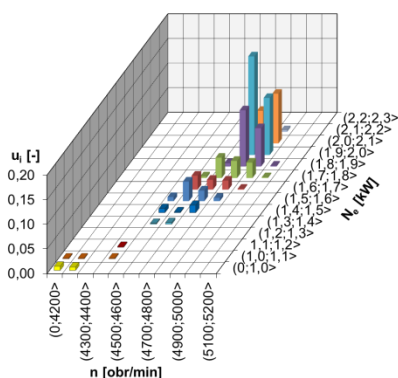
Rys. 6.91. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-D2



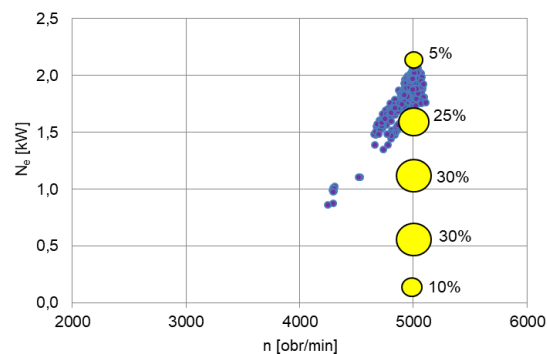
Rys. 6.92. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika generatora prądowórczego II w rzeczywistych warunkach eksploatacji



Rys. 6.93. Natężenie emisji CO<sub>2</sub> silnika generatora prądowórczego II w rzeczywistych warunkach eksploatacji



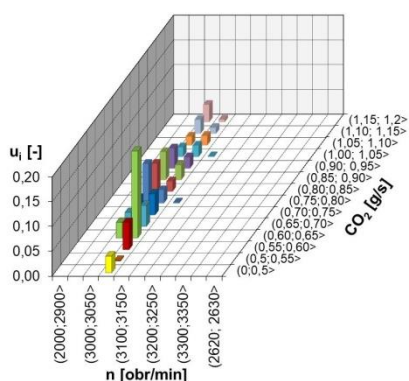
Rys. 6.94. Udział czasu pracy silnika generatora prądowórczego II dla prędkości obrotowej i mocy



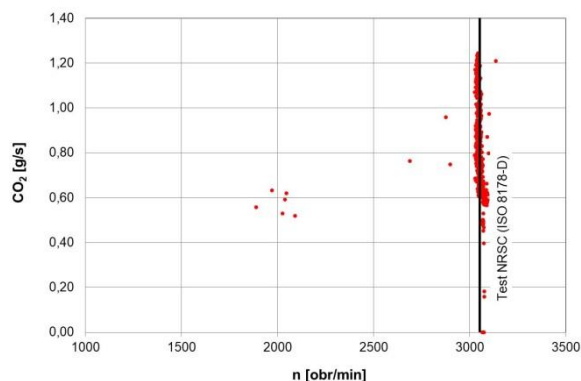
Rys. 6.95. Porównanie zakresu pracy silnika generatora prądowórczego II w rzeczywistych warunkach eksploatacji i w teście ISO-8178-C1

Silnik generatora prądowórczego ZS pracował dla ustalonej prędkości obrotowej 3050 obr/min, należy zauważyć, że na w porównaniu z innym opisanymi wyżej urządzeniami zmiany prędkości obrotowej były nieduże, co znajduje odzwierciedlenie w wartości współczynnika

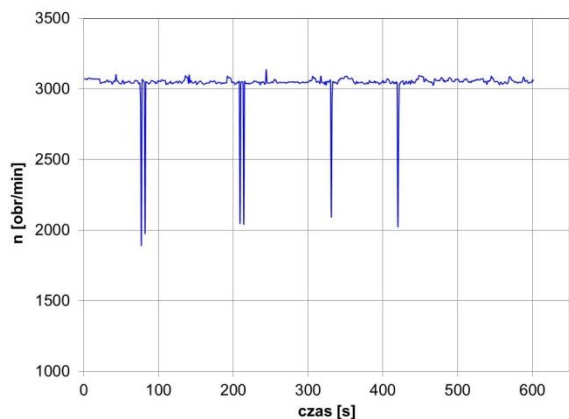
$x_n = 0,008$  (rys. 6.96 i 6.98), natomiast większe zmiany zarejestrowano dla natężenia emisji  $\text{CO}_2$ , współczynnik przyjmuje wartość  $x_{\text{CO}_2} = 0,212$  (rys. 6.99). Dla silnika generatora ZS największy udział czasu pracy zarejestrowano w przedziale prędkości obrotowej 3000 – 3100 obr/min i przedziale mocy 2–4,5 kW (rys. 6.100 i 6.101). Należy także zauważyć, podobnie jak dla generatorów z silnikami ZI, że reprezentatywność testu ISO8178-D2 jest wątpliwa również w tym przypadku.



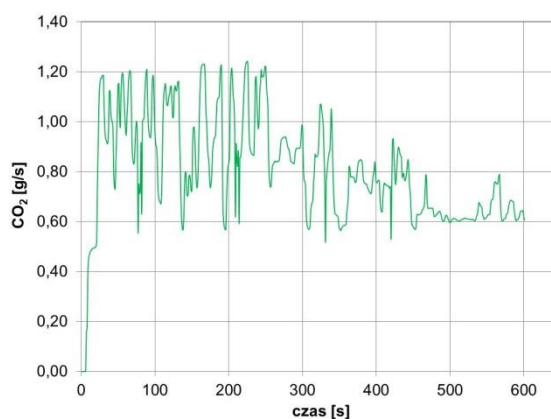
Rys. 6.96. Udział czasu pracy silnika generatora prądowiczego ZS dla prędkości obrotowej i emisji  $\text{CO}_2$



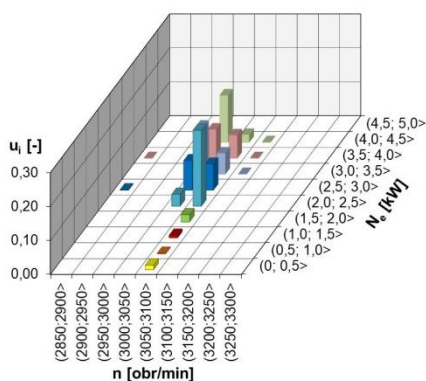
Rys. 6.97. Natężenie emisji  $\text{CO}_2$  w rzeczywistych warunkach eksploatacji i prędkość obrotowa wału korbowego silnika w teście ISO-8178-D2



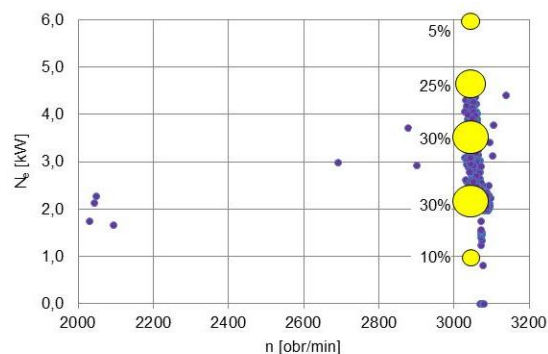
Rys. 6.98. Prędkość obrotowa wału korbowego silnika generatora prądowiczego ZS w rzeczywistych warunkach eksploatacji



Rys. 6.99. Natężenie emisji  $\text{CO}_2$  silnika generatora prądowiczego ZS w rzeczywistych warunkach eksploatacji



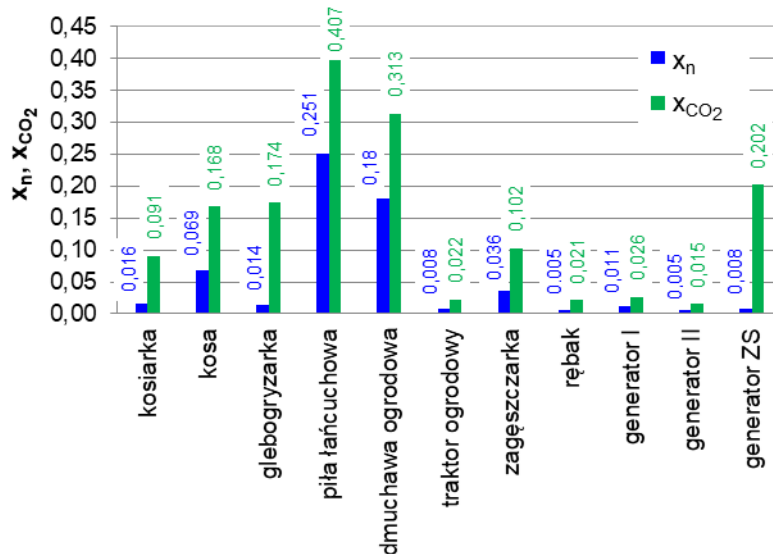
Rys. 6.100. Udział czasu pracy silnika generatora prądowłórczego ZS dla prędkości obrotowej i mocy



Rys. 6.101. Porównanie zakresu pracy silnika generatora prądowłórczego ZS w rzeczywistych warunkach eksploatacji i w teście ISO-8178-C1

Dla analizowanych prędkości obrotowej i emisji CO<sub>2</sub> badanych maszyn zestawiono współczynniki zmienności (rys. 6.102). Dla każdej badanej maszyny współczynnik emisji CO<sub>2</sub>, który reprezentuje obciążenie silnika, jest wyraźnie większy od współczynnika zmienności prędkości obrotowej. Dla większości badanych maszyn praca odbywa się z nastawioną stałą prędkością roboczą. Zmiany obciążenia badanych maszyn powodują chwilowe zmiany prędkości obrotowej wału korbowego od wartości zadanej. Dla niektórych maszyn np. piły łańcuchowej, zmiany prędkości obrotowej wynikają z charakteru pracy, następuje cykliczne zwiększenie obciążenia i prędkości obrotowej.

Wyznaczone współczynniki zmienności prędkości obrotowej wału korbowego i natężenia emisji CO<sub>2</sub> świadczą o dużych zmianach tych parametrów w czasie rzeczywistej eksploatacji, co nie ma odniesienia w teście badawczym.



Rys. 6.102. Współczynniki zmienności prędkości obrotowej wału korbowego i emisji godzinowej  $CO_2$  silników badanych maszyn

Wykonane analizy dowodzą, że homologacyjne testy badawcze nie w pełni odwzorowują rzeczywiste parametry pracy silników. Fazy testu statycznego NRSC dla większości badanych silników leżą poza najczęściej wykorzystywanymi w rzeczywistej eksploatacji zakresami prędkości obrotowych i obciążeń. Ponadto charakterystyczne jest, że bardzo rzadko wykorzystywane są zakresy maksymalnych obciążeń silnika. O ile faza 1 testu NRSC, dla niektórych maszyn, znajduje się w obszarze wykorzystywanych w eksploatacji prędkości obrotowych i obciążeń, to położenie fazy 5 w tym aspekcie jest nieuzasadnione. Szczególną uwagę należy zwrócić na dobór prędkości obrotowych w testach badawczych. W świetle przeprowadzonych badań i analiz nasuwa się pytanie o dobór prędkości w teście NRSC, czym kierowano się wybierając te prędkości? Nasuwa się wniosek, że silniki pojazdów NRMM ze względu na zakres wykorzystywanych w rzeczywistej eksploatacji prędkości obrotowych można podzielić na dwie podstawowe grupy. Pierwsza z nich to silniki, które ze względu na zakres zmian prędkości, a także obciążenia, pracują podobnie jak silniki trakcyjne pojazdów drogowych, czyli wykorzystują cały zakres prędkości obrotowej i obciążenia [35]. Grupę tę stanowią silniki, których współczynniki prędkości obrotowej w rzeczywistej eksploatacji nie różniły się od współczynników w teście o więcej niż 30 %. Do tej grupy należą: ładowarki, koparkoładowniki, miniladowarki. Dla tych silników trudno jest wskazać przedział prędkości, który ma wyraźnie większy udział niż pozostałe.



## **6.6. Propozycje zmian w badaniach silników maszyn i urządzeń przenośnych**

Problem odwzorowania rzeczywistych warunków pracy silników w testach badawczych jest zagadnieniem złożonym i przedmiotem wielu analiz i badań. Dotyczy to w zasadzie silników wszystkich kategorii, czego dowodem są zmiany testów badawczych wprowadzone co pewien czas. Niewątpliwie głównym kryterium budowy testów badawczych powinno być odzwierciedlenie rzeczywistych i typowych parametrów pracy silników, jakie występują w eksploatacji. Z opisanych w rozdziale szóstym badań wynika jednoznacznie, że warunki pracy silników maszyn i urządzeń przenośnych w teście badawczym ISO-81718 odbiegają od warunków występujących w rzeczywistej eksploatacji. Na tej podstawie można wysunąć wniosek - przypuszczenie, że emisja związków toksycznych spalin oraz zużycie paliwa w tych testach nie odpowiadają rzeczywistym. Emisja wyznaczona w testach nie jest reprezentatywna i nie informuje o rzeczywistym zagrożeniu wynikającym z emisji podczas typowej eksploatacji. Wniosek ten wynika wprost z zależności parametrów pracy silników i emisji związków toksycznych. Ponadto należy dodać, że analizowana grupa silników nadal pozostaje jedyną, której badania odbywają się wyłącznie w testach statycznych, dla ustalonej prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia, a oczywistym jest, że za emisję odpowiadają głównie stany dynamiczne pracy silnika. Wynika stąd, że istnieje potrzeba wprowadzenia pewnych zmian w procedurach badawczych, tak aby w większym stopniu odpowiadały one warunkom rzeczywistej eksploatacji.

Spostrzeżeniem, które nasuwa się po analizie wyników badań oraz analizie przepisów dotyczących badań emisji jest konieczność zmniejszenia udziału i znaczenia testu statycznego, na rzecz testu dynamicznego i badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Testy statyczne były pierwszymi rozwiązaniami w zakresie badań silników, obecnie są postrzegane jako archaiczne rozwiązanie.

Należy podkreślić wagę badań prowadzonych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Komisja Europejska dla najpopularniejszej grupy pojazdów tj. lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych, badania tego typu wprowadziła do procedury homologacyjnej we wrześniu 2017 roku wraz z normą Euro 5. Prace te określane są mianem procedury RDE i mają charakter obligatoryjny oraz prowadzone są równoległe z testem homologacyjnym WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test*). Jej wytyczne opisane zostały w Rozporządzeniu Komisji (UE) 2017/1154 z dnia 7 czerwca 2017 r. [33] i zawierają wymagania dotyczące aparatury pomiarowej, warunków eksploatacyjnych, dynamiki przejazdu oraz wartości dopuszczalne emisji związków spalin. Badania w rzeczywistych warunkach eksploatacji zyskują coraz większe znaczenie,

obejmują kolejne grupy pojazdów, a w aspekcie analizowanej grupy silników ich znaczenie jest oczywiste.

W związku z powyższymi spostrzeżeniami i uwzględnieniem wyników badań i ich analiz opracowano autorskie wytyczne do obowiązujących obecnie przepisów homologacyjnych silników maszyn i urządzeń przenośnych:

1. Konieczna jest modyfikacja testu statycznego ISO-8178 i jego wariantów (D2, G1, G2, G3). Modyfikacja powinna dotyczyć zmniejszenia punktów pomiarowych i przeniesienia ich w inne obszary pracy silnika, zależnie od wykorzystania w rzeczywistej eksploatacji. Na podstawie wykonanych badań i analiz należy stwierdzić, że postulat ten dotyczy przede wszystkim prędkości obrotowej wału korbowego silnika, wykazano jednoznacznie, że parametr ten w testach statycznych nie odzwierciedla rzeczywistej eksploatacji. Należy podkreślić jednak, że najkorzystniejszym rozwiązaniem byłoby opracowanie kilku testów dedykowanych dla różnych zastosowań silników, opracowanie jednego uniwersalnego testu nie rozwiąże zasygnalizowanego problemu.
2. Również konieczne wydaje się wprowadzenie do procedur homologacyjnych testu dynamicznego. Przeprowadzone badania i analizy wykazały jednoznacznie, że parametry pracy silników maszyn i urządzeń przenośnych charakteryzują się dużą dynamiką, zarówno co do częstości zmian, jak również zakresu zmian prędkości obrotowej wału korbowego i momentu obrotowego (obciążenia). W tym zakresie uzasadnione wydaje się wykorzystanie testu NRSC, jako wyjściowy, natomiast podobnie jak napisano wyżej, korzystniejszym rozwiązaniem byłoby opracowanie kilku zmodyfikowanych wersji tego testu, zależnie od zastosowania silnika. Modyfikacje powinny dotyczyć przede wszystkim zakresu zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika, zakres ten jest zależny właśnie od zastosowania silnika.
3. Postuluje się także wprowadzenie do procedury homologacyjnej badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji. W pracy wykazano, że obecnie dostępna aparatura pomiarowa umożliwia już prowadzenie takich badań, natomiast należy rozważyć kilka aspektów:
  - Pomiary powinny dotyczyć emisji związków gazowych: CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub> i masy cząstek stałych (PM). Pomiar liczby cząstek stałych PN obecnie, ze względu na specyfikę aparatury pomiarowej wydaje się niemożliwy. Należy przyjąć, że pomiar ten będzie możliwy w przyszłości, co nastąpi wraz z rozwojem metod pomiarowych.

Pomiar stężeń poszczególnych związków powinien odbywać się z wykorzystaniem analizatorów, opartych na następujących metodach działania:

- metoda niedyspersyjna na podczerwień NDIR – pomiar CO<sub>2</sub>, CO i HC
- metoda elektrochemiczna – pomiar NO<sub>x</sub>
- metoda laserowa – pomiar masy PM,

przy czym powinny się one odbywać z częstotliwością mniejszą niż 1 Hz. Wykorzystana w badaniach badania potwierdzają możliwość zastosowania wyżej wymienionych metod.

- Analizowana grupa silników nie ma elektronicznych systemów sterowania, systemów diagnostycznych wzorowanych na systemach OBD (*On-Board Diagnostic*) pojazdów drogowych, zatem nie ma możliwości odczytu obciążenia silnika. Bezpośredni pomiar momentu obrotowego w warunkach rzeczywistej eksploatacji jest zagadnieniem złożonym i trudnym do zrealizowania, dlatego wyznaczenie emisji jednostkowej jest utrudnione. Ze względu na koszty i specyfikę użytkowania silników w najbliższych latach nie należy spodziewać się zmian w tym zakresie. W związku z tym należy rozważyć wprowadzenie wskaźnika emisji rozumianego jako iloraz masy emitowanego związku do masy CO<sub>2</sub> lub masy zużytego paliwa. Wskaźnik taki można określić jako parametr opisujący „sprawność emisyjną”, opisuje wielkość emisji przypadającą na jednostkowe zużycie paliwa (emisję CO<sub>2</sub>).
- Test – pomiary w rzeczywistych warunkach eksploatacji powinny być wykonywane podczas typowej pracy danej maszyny, urządzenia. Wykorzystując doświadczenia badań własnych czas trwania testu nie powinien przekraczać kilkunastu minut, natomiast minimalny czas to około 600 s. Test powinien uwzględniać zimny rozruch silnika, czyli pomiar powinien rozpoczynać się bezpośrednio po uruchomieniu silnika.
- Warunki otoczenia (temperatura, wilgotność powietrza, itd.) mogą być zaadoptowane z procedury RDE pojazdów drogowych.

Przedstawione wyżej propozycje wyznaczają główne kierunki odnośnie zmian w procedurach homologacyjnych. Ich jednoznaczne wprowadzenie oraz doprecyzowanie szczegółowych wymagań niewątpliwie musi być poparte dalszymi badaniami i analizami, uwzględniającymi szersze zastosowania silników, inne warunki pracy. Opisane w dysertacji badania są pierwszymi

tego typu, a ich wyniki są na tyle perspektywiczne, że motywują do dalszych prac i upoważniają do zgłaszania propozycji zmian w procedurach badań.

## **7. Wnioski i kierunki dalszych badań**

Przeprowadzone w pracy badania i analizy pozwoliły na sformułowanie wniosków odnośnie emisji związków toksycznych spalin z silników o małej objętości skokowej i mocy oraz metody ich badań. Wnioski te, ze względu na ich różnorodny charakter podzielono na ogólne, szczegółowe i metodyczne, uzupełnieniem są kierunki dalszych badań, które będą rozszerzeniem i uzupełnieniem opisanych w niniejszej pracy.

### **Wnioski ogólne**

1. Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że emisja związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji z silników o małej objętości skokowej i mocy maszyn i urządzeń przenośnych jest większa od wartości dopuszczalnych. Wniosek ten sformułowano na podstawie badań generatorów prądotwórczych, ale stosunkowo duże natężenia emisji zmierzone dla innych urządzeń pozwalają przypuszczać, że zależność ta zachodzi także dla pozostałych urządzeń. Wniosek potwierdza osiągnięcie celu pracy.
2. Charakter pracy większości silników o małej objętości skokowej i mocy maszyn i urządzeń przenośnych charakteryzuje się dużą zmiennością prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia, co przekłada się na zwiększenie emisji. Stany dynamiczne pracy silników są odpowiedzialne za zwiększoną emisję związków toksycznych.
3. Badania emisji związków toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji silników o małej objętości i mocy nie dają możliwości wyznaczenia emisji jednostkowej, ze względu na konstrukcję, zaawansowanie technologiczne i budowę silników pomiar obciążenia jest utrudniony. W związku z tym analizy dotyczą natężenia emisji poszczególnych związków i wyznaczonych wskaźników emisji, definiowanych jako iloraz masy danego związku do masy CO<sub>2</sub>.
4. Badania i analizy parametrów pracy silników wykazały, że obowiązujący test homologacyjny ISO-8178 i jego warianty nie odzwierciedlają parametrów rzeczywistej eksploatacji silników maszyn i urządzeń przenośnych.

### Wnioski szczegółowe

1. Dla większości badanych silników największe wartości wskaźnika emisji, definiowanego jako iloraz masy danego związku toksycznego do masy CO<sub>2</sub>, przyjmuje dla CO, a w całej grupie przebadanych urządzeń wskaźnik ten był największy dla silnika kosi, wynosi  $k_{CO}=0,7837$ , najmniejszy dla silnika generatora ZS  $k_{CO}=0,0077$ . Najmniejsze wartości wskaźnik emisji przyjmuje dla NO<sub>x</sub>, spośród przebadanych urządzeń największy odnotowano dla silnika generatora ZS, wynosi on  $k_{NO_x}=0,0054$ , najmniejszy dla silnika zagęszczarki  $k_{NO_x}=0,0004$ .
2. Największą zmiennością prędkości obrotowej wału korbowego w rzeczywistej eksploatacji charakteryzował się silnik piły łańcuchowej (wskaźnik zmienności  $x_n = 0,251$ ) i dmuchawy ogrodowej (wskaźnik zmienności  $x_n = 0,180$ ), natomiast najmniejszą silniki generatorów prądotwórczych (wskaźnik zmienności  $x_n = 0,005$  i  $0,008$ ) oraz rębaka (wskaźnik zmienności  $x_n = 0,005$ ). Zauważono, że ze względu na zakres wykorzystywanych prędkości obrotowych silniki maszyn i urządzeń można sklasyfikować jako dwie grupy. Pierwsza grupa o dużej zmienności prędkości obrotowej podczas wykonywanej pracy. Natomiast druga grupa to silniki maszyn i urządzeń pracujących dla stałej prędkości obrotowej wału korbowego. Wniosek ten jest istotny w aspekcie testów dla których wykonuje się pomiary emisji związków toksycznych spalin.
3. Największą zmiennością natężenia emisji CO<sub>2</sub>, reprezentującego obciążenie silnika, w rzeczywistych warunkach eksploatacji charakteryzował się silnik piły łańcuchowej (wskaźnik zmienności  $x_{CO_2} = 0,407$ ) i dmuchawy (wskaźnik zmienności  $x_{CO_2} = 0,313$ ), natomiast najmniejszą silniki generatorów prądotwórczych (wskaźniki zmienności  $x_{CO_2} = 0,015$ ,  $0,021$  i  $0,026$ ) oraz rębaka (wskaźnik zmienności  $x_{CO_2} = 0,021$ ). Zatem, należy zauważyć, iż charakter zmian prędkości obrotowej i natężenia emisji CO<sub>2</sub> (obciążenia silnika) są podobne, dotyczy to także natężenia emisji pozostałych związków, tzn. duże zmiany prędkości obrotowej generują duże zmiany emisji.

### Wnioski metodyczne

Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że obowiązujące metody i testy badawcze emisji związków toksycznych spalin silników o małej objętości skokowej i mocy nie odzwierciedlają rzeczywistych parametrów eksploatacji, dlatego postuluje się wprowadzenie zmian:

1. Konieczna jest modyfikacja testu statycznego ISO-8178.

2. Wykonane badania i analizy potwierdzają konieczność wprowadzenia testu dynamicznego, bazowym może być NRTC silników o zastosowaniach pozadrogowych, ale dla niektórych zastosowań silników maszyn i urządzeń przenośnych powinien on być zmodyfikowany w zakresie wykorzystywanego zakresu prędkości obrotowej wału korbowego.
3. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz uzasadnione jest wprowadzenie do procedury homologacyjnej silników o małej objętości skokowej i mocy pomiarów w rzeczywistych warunkach eksploatacji. W pracy opracowano metodykę tych badań.
4. Wobec trudności z wyznaczeniem obciążenia silników w czasie pomiarów w rzeczywistych warunkach eksploatacji uzasadnione jest wykorzystanie zaproponowanego wskaźnika emisji  $k_j$ , jako parametru zastępczego dla emisji jednostkowej. Wyznaczenie wartości dopuszczalnych wymaga rozszerzenia badań o inne obiekty i zastosowania maszyn i urządzeń.

Powyższe wytyczne odnośnie zmian w procedurze badawczej dla analizowanej grupy silników potwierdzają osiągnięcie drugiego celu pracy.

### **Kierunki dalszych prac**

Jako przyszłe kierunki badań nawiązujące do opisanych w niniejszej pracy proponuje się trzy poniższe:

1. Badania emisji cząstek stałych z silników o małej objętości skokowej i mocy, ze szczególnym uwzględnieniem liczby PN (*Particle Number*).
2. Opracowanie metodyki badań energochłonności dla maszyn i urządzeń przenośnych zasilanych silnikami elektrycznymi.
3. Rozszerzenie badań silników o małej objętości skokowej i mocy dla innych zastosowań w celu opracowania testów badań emisji związków toksycznych, dynamicznego i w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

## Literatura

- [1] A. Chung, A.A. Lall, S.E. Paulson, Particulate emissions by a small non-road diesel engine: Biodiesel and diesel characterization and mass measurements using the extended idealized aggregates theory, *Atmospheric Environment*, Volume 42, Issue 9, 2008, ISSN 1352-2310.
- [2] Abolhasani S., Frey H.C., Kim K., Pang S., Rasdorf W., Lewis P., Real-World In-Use Activity, Fuel Use, and Emissions for Nonroad Construction Vehicles: A Case Study for Excavators. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(8), 1033-1046, 2008.
- [3] Alander, T; Antkaninen, E; (...); Torkkell, K, Particle Emissions from a Small Two-stroke Engine: Effects of Fuel, Lubricating Oil, and Exhaust Aftertreatment on Particle Characteristics, *Aerosol sciences and technology* 39(2), February 2005.
- [4] Almén J., Swedish In-Service Testing Programme 2010 on Emissions From Heavy-Duty Vehicles. Test report, AVL Sweden Certification & Regulation Compliance, Södertälje 2010.
- [5] Andrae M., Salemme G., Kumar M., Sun Z., Emissions Certification Vehicle Cycles Based on Heavy Duty Engine Test Cycles. SAE Paper 2012-01-0878.
- [6] Attfield M., Schleiff P., Lubin J. et al. The Diesel Exhaust in Miners Study: A Cohort Mortality Study With Emphasis on Lung Cancer. *Journal of the National Cancer Institute*, (2012) 104(11).
- [7] B.V.V.S.U. Prasad, C.S. Sharma, T.N.C. Anand, R.V. Ravikrishna, High swirl-inducing piston bowls in small diesel engines for emission reduction, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 7, 2011, ISSN 0306-2619.
- [8] Bass E., Johnson J., Wildemann P., A Comparison of HEV Engine Operation and HD Engine Emissions Test Cycles. SAE Paper 2000-01-3469.
- [9] Benjamin M., Toward Clean Air in 2050: Perspectives on Portable Emissions Measurement Systems (PEMS). 2013 PEMS Conference & Workshop University of California, Riverside April 11, 2013.
- [10] Block M. C., Application of Diesel Emissions Reduction Controls for Nonroad Construction Equipment. Strategies to Reduce Miners Exposure to DPM and Gases (Elko) Workshop, The National Institute for Occupational Safety and Health, Elko, Nevada, June 5-6, 2007.
- [11] Bonnel P., In-Use Emissions Testing in the New and Future European Motor Vehicle Emissions Regulations. 2011 PEMS Conference & Workshop University of California, Riverside, March 24, 2011.
- [12] Bonnel P., Kubelt J., Provenza A., Heavy-Duty Engines Conformity Testing Based on PEMS. Lessons Learned from the European Pilot Program. JRC Scientific and Technical Reports, Publications Office of the European Union, European Union, 2011.



- [13] Bowman J., Lessons and Applications in PEMS for on-highway Measurements. 2012 PEMS Conference & Workshop University of California, Riverside, March 28-30, 2012.
- [14] Bowman J., On-Going Challenges for Off-Road/Nonroad Pilot In-Use Emissions Testing. 2013 PEMS Conference & Workshop University of California, Riverside, April 11, 2013.
- [15] Bruch K., Earle J., Peterson R., Pierpont A., Caterpillar Machine Efficiency Advancements. 6th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 25-26, 2011 Graz, Austria.
- [16] Burgard A. Daniel, Bria R.M. Carmen, Berenbeim Jacob A., Remote Sensing of Emissions from In-Use Small Engine Marine Vessels, Environmental Science&Technology, Vol 45, Issue 7, March 2011, American Chemical Society.
- [17] Calcante Aldo, Facchinetti Davide, Pessina Domenico, Analysis of Hazardous Emissions of Hand-Operated Forestry Machines Fuelled with Standard Mix or Alkylate Gasoline, Croatian Journal of Forest Engineering 39(1), January 2018, University of Milan.
- [18] Cartellieri W.P., Ospelt W.M., Landfahrer K., Erfüllung der Abgasgranzwerte von Nutzfahrzeug-Dieselmotoren der 90er Jahre. MTZ Nr. 50.9/1999.
- [19] Cartus T., Bachler H., Schüßler M., Model based calibration methodology. 5th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 28-29, 2009, Graz, Austria.
- [20] Commission Directive 2010/26/EU of 31 March 2010 amending Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery.
- [21] Commission Directive 2012/46/EU of 6 December 2012 amending Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery.
- [22] Council Directive 2006/105/EC of 20 November 2006 adapting Directives 73/239/EEC, 74/557/EEC and 2002/83/EC in the field of environment, by reason of the accession of Bulgaria and Romania.
- [23] Czerwiński Jan, Guedel Martin, Engelmann Danilo, Influences of Butanol Blends on Combustion and Emissions of a Small SI Engine, SAE International, SAE Technical Paper 2018-32-0058, University of Applied Sciences Biel-Bienne, October 2018, ISSN 0148-7191.

- [24] Dimou, V., K. Demertzis, L. Iliadis, V.-D. Anezakis, Comparative Analysis of Exhaust Emissions Caused by Chainsaws with Soft Computing and Statistical Approaches. *International journal of environmental science and technology*. 2018 15(7), ISSN: 1735-1472.
- [25] Dimou, Vasiliki, Kantartzis, Apostolos, Malesios, Chrisovalantis, Kasampalis, Emmanouil, Research of Exhaust Emissions by Chainsaws with the Use of a Portable Emission Measurement System, *International Journal of Forest Engineering*, May 2019.
- [26] Directive 2002/88/EC of the European Parliament and of the Council of 9 December 2002 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery.
- [27] Directive 2004/26/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery.
- [28] Directive 2011/88/EU of the European Parliament and of the Council of 16 November 2011 amending Directive 97/68/EC as regards the provisions for engines placed on the market under the flexibility scheme.
- [29] Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1997 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery.
- [30] Endo S., Suzuki S., Sugihara H., Commercial Vehicle Diesel Engine and Hybrid System for Today and Future in Hino. 6th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 25–26, 2011 Graz, Austria.
- [31] Florentsev S. et al., Estimation of results and potential of electromechanical drivetrain in agricultural tractors. 7th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 22-23, 2013 Graz, Austria.
- [32] Florentsev S., Izosimov D., Makarov L., Pukhovoi A., Uss I., The First Agricultural Tractor With Pure Electromechanical Drivetrain. 6th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 25-26, 2011 Graz, Austria.
- [33] Giannelli R.A. et al., In-Use Emissions from Non-road Equipment for EPA Emissions Inventory Modeling (MOVES). SAE Paper 2010-01-1952.
- [34] Hadingham E.J., Forecast of Global Markets for Heavy Duty Vehicles & Machines. 5th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 28-29, 2009, Graz, Austria.

- [35] Helms H., Lambrecht U., The relevance of emissions from non-road mobile machinery in comparison with road transport emissions. Proceedings of the 17th International Scientific Symposium on Transport and Air Pollution, Actes INRETS No 122, Toulouse, France, June 2009.
- [36] Hooper, Brionny, Parker, Richard, Todoroki, Christine, Exploring Chainsaw Operator Occupational Exposure to Carbon Monoxide in Forestry, Journal of Occupational & Environmental Hygiene; Jan2017, Vol. 14 Issue 1, ISSN 1545 – 9624.
- [37] IARC: Diesel Engine Exhaust Carcinogenic. Press Release N° 213, 12 June 2012.
- [38] Jandl Stephan, Schmidt Stephan, Piecha Pascal, Schacht Hans-Juergen, Seidel Tilman, Influence of Ethanol and 2-Butanol Blended Fuels on Combustion and Emissions in a Small Displacement Two Stroke Engine, SAE International, SAE Technical Paper 2018-32-0044, Graz University of Technology, October 2018, ISSN 0148-7191.
- [39] Karim J., Improving flow rate exhaust measurement when utilizing „small” PEMS. 2013 PEMS Conference & Workshop University of California, Riverside, April 11, 2013.
- [40] Kheifets L., Epidemiologic Studies of ELF and their Contribution to Risk Assessment. 24th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society, Quebec 23-27 June 2002.
- [41] Kneitz U., Integrated, efficient and innovative powertrain concepts – A prerequisite to meet future customer and legal requirements in agriculture. 6th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 25-26, 2011 Graz, Austria.
- [42] Knuth H. W., Heinle H., Mobile „in-use“ Emission Measurement in Real Agricultural Applications. 2012 PEMS Conference & Workshop, University of California, Riverside, March 28-30, 2012.
- [43] Kozlov A., Harris T., Salyards C., Engine Test for DOC Quenching in DOC-DPF System for Non-Road Applications SAE Paper 2010-01-0815.
- [44] Kuang, Xin & Liu, Sheng & Sun, Jian & Wang, Jian. (2013). A Study on Emissions of Small Diesel Engines. Advanced Materials Research 805-806 (2013), Jiangsu Universit.
- [45] Kumar, Shiva, Dinesha, Pijakala, Rosen, Marc A., Performance and Emission Characteristics of a Bio-lubricated Two-stroke Gasoline Engine. Environmental science and pollution research international. 2018 25(18): ISSN: 0944-1344.
- [46] Lee D. W., Innovative PEMS Testing Approaches Used by TTI. 2013 PEMS Conference & Workshop, University of California, Riverside, April 11, 2013.
- [47] Leszczyński Krzysztof, The Concentration of Carbon Monoxide in the Breathing Areas of Workers During Logging Operations at the Motor-Manual Level, International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health 5/2014, volume 27, University of Agriculture in Krakow, ISSN 1232-1087.

- [48] Li, Chong & Liu, Sheng & Wang, Jian. (2013). Variation and Control of Small Gasoline Engine Emissions Performance in the Plateau Region. *Advanced Materials Research*. 726-731.
- [49] Lijewski Piotr, Fuć Paweł, Markiewicz Filip, Dobrzyński Michał, Problems of exhaust emissions testing from machines and mobile devices in real operating conditions / *Combustion Engines* - 2019, no. 4(179).
- [50] Lijewski, P; Fuć, P; (...); Markiewicz, F, Exhaust Emissions from Small Engines in Handheld Devices, VII INTERNATIONAL CONGRESS ON COMBUSTION ENGINES 118 (2017), Poznań University of Technology.
- [51] Lin, W. Y., Chang, Y. Y., & Hsieh, Y. R. (2010). Effect of Ethanol-Gasoline Blends on Small Engine Generator Energy Efficiency and Exhaust Emission. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(2).
- [52] Lorencowicz E., Ocena jakości ciągników eksploatowanych w Polsce. Krajowa konferencja „Problematyka bezpieczeństwa, ergonomii oraz ekologii w użytkowaniu maszyn i ciągników rolniczych”, Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań, listopad 2012.
- [53] Lue, Y. F., Yeh, Y. Y., & Wu, C. H. (2001). THE EMISSION CHARACTERISTICS OF A SMALL D.I. DIESEL ENGINE USING BIODIESEL BLENDED FUELS. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 36(5).
- [54] M.A. Kalam, H.H. Masjuki, Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil, *Biomass and Bioenergy*, Volume 27, Issue 3, 2004, ISSN 0961-9534.
- [55] Magnani Sandro, Bellissima Alessandro, SAE International, Experimental Data of a Small-Size Gas ICE Driven Heat Pump (GHP) and Comparison of the Environmental Performance with and Electric Heat Pump, SAE Technical Paper 2018-32-0070, Yanmar R&D Europe, October 2018, ISSN 0148-7191.
- [56] Magnusson, R and Nilsson, C, The Influence of Oxygenated Fuels on Emissions of Aldehydes and Ketones from a Two-stroke Spark Ignition Engine., *FUEL Journal*, Volume 90, Issue 3, Swedish Defence Research Agency, CBRN Defence and Security, March 2011.
- [57] Magnusson, R; Nilsson, C; (...); Rannug, U, Determination of Chemical Composition and Mutagenicity in Particles from Chainsaw Exhaust. Experimental Set-up, Stability and Results from Two Different Fuels, *Environmental Technology* 21 (7), Jul 2000.
- [58] Mallamo F., Badami M., Millo F., Analysis of Multiple Injection Strategies for the Reduction of Emissions, Noise and BSFC of a DI CR Small Displacement Non-Road Diesel Engine. SAE Paper 2002-01-2672.
- [59] Markiewicz Filip, Waluś Konrad, Polasik Jakub, Badanie doświadczalne cech kinematycznych ruchu pojazdu z wykorzystaniem opon zimowych i letnich, *Logistyka* - 2014, nr 5.

- [60] Merkisz J., Lijewski P., Fuć P., Exhaust Emission Tests of Small Gasoline Engines used in Power Generators and Handheld Machinery, JSAE 20119511/SAE 2011-32-0511., 2011.
- [61] Merkisz J., Rymaniak Ł., The Assessment of Vehicle Exhaust Emissions Referred to CO<sub>2</sub> Based on the Investigations of City Buses under Actual Conditions of Operation., Institute of Combustion Engine and Transport, National Centre for Research and Development – the Innotech Programme., *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* Vol.19, No. 4, 2017
- [62] Merkisz J., Lijewski P., The Analysis of Non-road Vehicle Engine Operating Conditions in Terms of Emission Regulations. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2010; 2(46).
- [63] Mingrino F., Spadoni R., The Agricultural Tractor Market – Trends and Challenges. 5th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 28–29, 2009, Graz, Austria.
- [64] Moser F.X., Future powertrains – increasing complexity or more opportunities for synergies? 6th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 25-26, 2011 Graz, Austria.
- [65] Moser F.X., On-road and Non-road Powertrains: Different markets, Common Challenges, Similar Solutions. 5th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 28-29, 2009, Graz, Austria.
- [66] Moser F.X., Stein G., Designing Single-Purpose or Multi-Purpose Engines for On-Road and Non-Road Use – A Platform Approach. SAE Paper 2004-01-2689.
- [67] Neilssen D., EU Transport GHG: Routes to 2050? Economic Instruments and Emission Trading Non-Road Transport Modes., Technical Focus Group Meeting 7, 2nd October 2009, Brussels.
- [68] Neri, F; Foderi, C; (...); Marchi, E, Determining Exhaust Fumes Exposure in Chainsaw Operations. ENVIRONMENTAL POLLUTION, Volume 218, November 2016, GESAAF University of Florence.
- [69] Niemi S. et al., HC-SCR Catalyst for NO<sub>x</sub> Reduction in a Non-Road Diesel Engine. SAE Paper 2009-01-2880.
- [70] Nik Rosli Abdullah, Nafis Syabil Shahrudin, Aman Mohd. Ihsan Mamat, Salmiah Kasolang, Aminuddin Zulkifli, Rizalman Mamat, Effects of Air Intake Pressure to the Fuel Economy and Exhaust Emissions on a Small SI Engine, *Procedia Engineering*, Volume 68, 2013, ISSN 1877-7058.
- [71] Oswald Roland, Kirchberger Roland, Krimplstatter Stefan, Technologies to Achieve Future Emission Legislation with Two Stroke Motorcycles, SAE International, SAE Technical Paper 2018-32-0042, Graz University of Technology, October 2018, ISSN 0148-7191.

- [72] Pfeifer A., Holz O., Graf G., New Generation of the Liebherr Diesel Engines D934 / D936, Fulfilling Stage IIIB/Tier4i Emission Norms with SCR Technology. 6th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 25-26, 2011 Graz, Austria.
- [73] Phillips D.C.A., Global Trends in the Construction Equipment Industry. 6th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 25-26, 2011 Graz, Austria.
- [74] Pil-Su Kim, Sang-Jin Choi, Park Geon-Jin, Yong-Hee Han, A Study on the Characteristic of Emission for Air Pollutant by Small Two-stroke Engines, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 32(6), Volume 32, No.6, December 2016.
- [75] Polasik Jakub, Waluś Konrad, Markiewicz Filip, Wpływ konstrukcji układów zawieszenia na kąt przechyłu bryły nadwozia w warunkach rzeczywistych, Logistyka - 2014, nr 5.
- [76] R. L. da Silva, M. M. Vieirab, S. X. de Brito Jra, Two-stroke Engine Behavior (small chainsaw) Operating with Non-commercial Fuel Blends and Diverse Lubrication , Engenharia Térmica (Thermal Engineering), Vol. 14 • No. 2 • December 2015, Universidade Federal da Grande Dourados Engenharia Mecânica & Engenharia de Energia.
- [77] Reisel, J. R., Kellner, T. A., & Neusen, K. F. (2000). Speciated Hydrocarbon Emissions from Small Utility Engines. Journal of the Air & Waste Management Association, 50(4).
- [78] Romani L., Balduzzi F., Ferrara G., Bosi L., Experimental Investigation on the Potentiality of a GDI System Applied to a Two-Stroke Engine: Analysis on Pollutant Emission and Fuel Consumption Reduction SAE International, SAE Technical Paper 2018-32-0047, October 2018, Università degli Studi di Firenze, ISSN 0148-7191.
- [79] Sapate, K. D., & Tikekar, A. N. (2013). Mechanical Modifications to Convert Small Two Strokes Carbureted Engine to Electronic Fuel Injection System Engine to Reduce Emission and Fuel Consumption. Advanced Materials Research, Volume 768 (2013).
- [80] Scherm P., Legislative requirements for nonroad engines beyond Stage IV. 6th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 25-26, 2011 Graz, Austria.
- [81] Schneider K., Länge W., Ellensohn R., Liebherr Pactronic – Hybrid Power Booster: Energy recovery and increased performance with hybrid drive system. 7th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 22-23, 2013 Graz, Austria.
- [82] Shimazaki N., Abe Y., ISUZU's scenario for commercial vehicle engines. 7th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 22-23, 2013 Graz, Austria.
- [83] Silverman D.T., Samanic C.M. Lubin J.H. et al., The Diesel Exhaust in Miners Study: A Nested Case-Control Study of Lung Cancer and Diesel Exhaust. Journal of the National Cancer Institute, (2012) 104(11): 855-868.

- [84] Sobotzik J., Electric drives in mobile agricultural machinery – products and potentials. 7th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 22-23, 2013 Graz, Austria.
- [85] Truckenbrodt A., Schuckert M., Fuel Cells for Commercial Applications – Bus, Truck, Agricultural and Construction Equipment. 5th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 28-29, 2009, Graz, Austria.
- [86] Ueno M., Tier 4 Solutions as Developed at Komatsu. 6th AVL International Commercial Powertrain Conference, Proceedings, May 25-26, 2011 Graz, Austria.
- [87] Waluś Konrad J., Krawiec Piotr, Polasik Jakub, Markiewicz Filip , Cieślik Maciej, Adamiec Jarosław, Effect of Impact Velocity in the Roadblock on the Spatial Arrangement of Acceleration of the Vehicle Body, *Visnik Nacional'nogo Universitetu "L'vivs'ka Politehnika"* - 2014, no. 808.
- [88] Waluś Konrad, Krawiec Piotr, Polasik Jakub, Markiewicz Filip, Cieślik Maciej, Adamiec Jarosław, Effect of Impact Velocity in the Roadblock on the Spatial Arrangement of Acceleration of the Vehicle Body, *Proceedings of the XXII Ukrainian-Polish Conference: CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues*, Lviv, Ukraine, 10-11 October, 2014 - Lviv, Ukraine : Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2014.
- [89] Waluś Konrad, Polasik Jakub, Markiewicz Filip, Cieślik Maciej, Adamiec Jarosław, Badania doświadczalne cech kinematycznych ruchu pojazdu typu "bus" podczas przejazdu przez przeszkodę, *Logistyka* - 2014, nr 5.
- [90] Warguła Łukasz, Dobrzyński Michał, Kaczmarzyk Piotr, Markiewicz Filip, Wieczorek Bartosz, Dimitrov Diyan, Lijewski Piotr, The concentration of CO<sub>2</sub>, CO, CH, NO<sub>x</sub>, and PM<sub>10</sub> in the exhaust gases of combustion engines driving positive pressure fans, *13th International Conference Mechanical Technologies and Structural Materials 2024 / Croatian Society for Mechanical Technologies*, 2024.
- [91] Warguła Łukasz, Kaczmarzyk Piotr, Lijewski Piotr, Fuć Paweł, Markiewicz Filip, Małozieć Daniel, Wieczorek Bartosz, Effect of the Volumetric Flow Rate Measurement Methodology of Positive Pressure Ventilators on the Parameters of the Drive Unit, *Energies* - 2023, vol. 16, issue 11.
- [92] Warguła Łukasz, Kukla Mateusz, Lijewski Piotr , Dobrzyński Michał, Markiewicz Filip , Impact of Compressed Natural Gas (CNG) Fuel Systems in Small Engine Wood Chippers on Exhaust Emissions and Fuel Consumption, *Energies* - 2020, vol. 13, no. 24.
- [93] Warguła Łukasz, Kukla Mateusz, Lijewski Piotr, Dobrzyński Michał, Markiewicz Filip , Influence of Innovative Woodchipper Speed Control Systems on Exhaust Gas Emissions and Fuel Consumption in Urban Areas , *Energies* - 2020, vol. 13, no. 13.

- [94] Warguła Łukasz, Kukła Mateusz, Lijewski Piotr, Dobrzyński Michał, Markiewicz Filip, Influence of the Use of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Systems in Woodchippers Powered by Small Engines on Exhaust Emissions and Operating Costs / *Energies* - 2020, vol. 13, no. 21.
- [95] Weiss M. et al., Analyzing on-road emissions of light-duty vehicles with Portable Emission Measurement Systems (PEMS). JCR Scientific and Technical Reports, Publications Office of the European Union, European Union, 2011.
- [96] Weiss M. et al., Will Euro 6 reduce the NO<sub>x</sub> emissions of new diesel cars? – Insights from on-road tests with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS). *Atmospheric Environment* 62 (2012).
- [97] Wójcik, K., Exhaust Gases Emitted by Professional Chain Saws., *Annals of Warsaw Agricultural University, Agriculture (Agricultural Engineering)* 2005 (No.47), ISSN 0208-5712.
- [98] Worldwide Emissions Standards, Heavy Duty and Off-Highway Vehicles. Delphi Innovation for the Real World 2016/2017.
- [99] Yvon K., Lorenzoni J.L., Hydrogen-powered Lawn Mower: 14 years of operation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 31, Issue 12, September 2006.
- [100] Zardini, Alessandro A., Suarez-Bertoa, Ricardo, Forni, Fausto, Montigny, François, Otura-Garcia, Marcos, Carriero, Massimo, Astorga, Covadonga, Reducing the Exhaust Emissions of Unregulated Pollutants from Small Gasoline Engines with Alkylate Fuel and Low-ash Lube Oil. *Environmental Research*, March 2019, Vol. 170, ISSN: 0013-9351.
- [101] [www.dieselnets.com](http://www.dieselnets.com)
- [102] [www.thebusinessresearchcompany.com/report/small-gas-engine-global-market-report](http://www.thebusinessresearchcompany.com/report/small-gas-engine-global-market-report)