

## Control of agricultural engine injection system in aspect of ecological property improvement

### Abstract:

*Development of diesel injection system cause significant possibilities to affect the combustion process, and themselves to their ecological properties. In case of nonroad vehicles injection system should be characterized with insensibility to disadvantageous condition occurred during their operation. High requirements are also set in reliability and durability of this solutions. One of the significant features are ecological properties, which should be fulfilled according to emission regulation TIER/ Euro.*

*The paper concentrate with possibilities of fuel injection control at nonroad engine in aspect to improve ecological properties namely reduction of emission of harmful substances. Paper presents prototype solution of control of mechatronized injection pump that enable multiphase fuel injection. This study include analysis of research results as influence of injection control to ecological properties (emission of  $NO_x$ , PM) of engine used in agricultural tractor. As show the realized analysis advanced control of injection system allow to reduction of harmful substances emission.*

Key words: reduction of emission of  $NO_x$ , PM, multiphase injection, nonroad engine

## Sterowanie układem wtryskowym silnika ciągnika rolniczego w aspekcie poprawy jego własności ekologicznych

### Streszczenie:

*Rozwój układów wtryskowych silników o zapłonie samoczynnym spowodował powstanie znacznych możliwości wpływu na proces spalania, a tym samym na jego własności ekologiczne. W przypadku pojazdów poruszających się poza drogami utwardzonymi układy wtryskowe powinny charakteryzować się niewrażliwością na niekorzystne czynniki występujące podczas ich pracy. Wysokie wymagania stawia się też jeżeli chodzi o niezawodność i trwałość takich rozwiązań. Jednym z istotnych cech są właściwości ekologiczne, które powinny być spełnione według odpowiednich norm emisji spalin TIER /Euro.*

*W pracy skoncentrowano się na możliwości sterowania wtryskiem paliwa w silniku pojazdu nonroad w aspekcie poprawy własności ekologicznych tj. ograniczenia emisji substancji szkodliwych. Publikacja przedstawia prototypowe rozwiązanie sterowania zmechatronizowaną pompą wtryskową umożliwiającą zastosowanie wtrysku wielofazowego. Praca zawiera analizę wyników badań wpływu sterowania wtryskiem paliwa na własności ekologiczne (emisja  $NO_x$ , PM) silnika stosowanego w ciągniku rolniczym. Jak pokazuje przeprowadzona analiza zaawansowane sterowanie wtryskiem paliwa pozwala na obniżenie emisji substancji szkodliwych*

Słowa kluczowe: ograniczenie emisji  $NO_x$ , PM, wtrysk wielofazowy, silnik pojazdu nonroad

### 1. Wprowadzenie

Rosnące wymagania odnośnie ograniczenia globalnej emisji substancji szkodliwych powodują, że poszukuje metod ograniczenia zanieczyszczeń do środowiska. Jedną z grup pojazdów, która została uwzględniona w stosownych regulacjach ograniczających emisję są pojazdy poruszające się głównie poza drogami utwardzonymi (nonroad). Wśród wielu metod ograniczenia emisji substancji szkodliwych istotne znaczenie mają metody silnikowe polegające na takim wpływie na proces spalania paliwa, dzięki któremu możliwe stanie się znaczne

ograniczenie spalin emitowanych w miejscu ich wypływu z komory spalania. Z kolei metody poza-silnikowe obecnie bardzo intensywnie udoskonalane powinny pozwolić na uzyskanie zadowalającego efektu końcowego w postaci emisji poszczególnych składników spalin poniżej dopuszczalnych limitów ustalonych dla tego typu pojazdów. Wśród metod silnikowych istotne znaczenie ma oprócz systemów recyrkulacji spalin również sposób sterowania wtryskiem. Wiele konstrukcji spełniających obecnie obowiązujące normy bazuje na klasycznych rozwiązaniach (rzędowa pompa wtryskowa, pom-

powtryskiwacze) i sterowanych głównie w sposób mechaniczny.

## 2. Regulacje dotyczące emisji spalin pojazdów nonroad

Wśród norm emisji spalin dla pojazdów poruszających się głównie poza drogami utwardzonymi (nonroad, offroad) w Europie obowiązują normy Euro oparte w znacznej mierze na regulacjach zawartych w normach Tier (EPA Nonroad Regulation, 40 CFR 89; 40 CFR1039; 40 CFR 1068) obowiązujących m.in. w USA. Ograniczenie emisji pojazdów nonroad w Europie opiera się na zapisach EU-Nonroad Directive 97/68/EC (2004/26/EC), dodatkowo uzupełnionej w przypadku ciągników rolniczych o dyrektywę 2000/25/EC oraz 2005/13/EC [9]. Szczegółowe poziomy dopuszczalnej emisji poszczególnych składników spalin i daty wprowadzenia kolejnych regulacji przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dopuszczalna emisja pojazdów nonroad wg. EU -97/68/EC [9]

Stage I					
$37 \leq P_{max} < 75$	9,2	1,3	6,5	0,85	1999
$75 \leq P_{max} < 130$	9,2	1,3	5,0	0,70	1999
$130 \leq P_{max} < 560$	9,2	1,3	5,0	0,54	1999
Stage II					
$18 \leq P_{max} < 37$	8,0	1,5	5,5	0,8	2001
$37 \leq P_{max} < 75$	7,0	1,3	5,0	0,4	2004
$75 \leq P_{max} < 130$	6,0	1,0	5,0	0,3	2003
$130 \leq P_{max} < 560$	6,0	1,0	3,5	0,2	2002
Stage IIIa					
$19 \leq P_{max} < 37$	7,5		5,5	0,6	2007
$37 \leq P_{max} < 75$	4,7		5,0	0,4	2008
$75 \leq P_{max} < 130$	4,0		5,0	0,3	2007
$130 \leq P_{max} < 560$	4,0		3,5	0,2	2006
Stage IIIb					
$37 \leq P_{max} < 56$	4,7		5,0	0,025	2013
$56 \leq P_{max} < 75$	3,3	0,19	5,0	0,025	2012
$75 \leq P_{max} < 130$	3,3	0,19	5,0	0,025	2012
$130 \leq P_{max} < 560$	2,0	0,19	3,5	0,025	2011
Stage IV					
$56 \leq P_{max} < 130$	0,4	0,19	5,0	0,025	2014
$130 \leq P_{max} < 560$	0,4	0,19	3,5	0,025	2014

Pomiar emisji w poszczególnych zakresach mocy maksymalnej silnika odbywa się według wytycznych zawartych w dyrektywie i opartych o cykle obciążeniowe stacjonarne ISO 8178 i ECE R49, ESC (European Steady State Cycle) opartym na ECE R49 i niestacjonarne NRTC (Nonroad Transient Cycle) [1, 2, 6, 9].

W przypadku cykli podzielono pojazdy nonroad na grupy w zależności od zastosowania zawierając np. w grupie C1 pojazdy wyposażone w silnik ZS, zaś w grupie D pojazdy i urządzenia pracujące ze stałą prędkością obrotową. Grupy E i F dotyczą odpowiednio silników okrętowych i stosowanych w

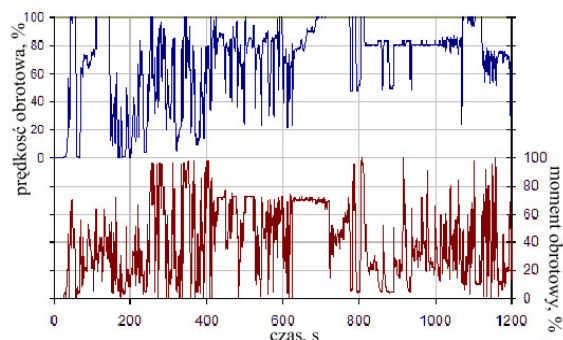
lokomotywach. Tabela 2 przedstawia procedurę stosowaną w teście stacjonarnym ISO 8178 [1, 9].

Tabela 2. Przykładowe punkty pomiarowe w teście stacjonarnym ESSC wg. ISO 8178 [9]

Test mode B-cycle	Prędkość obrotowa	Obciążenie %	Cykl/waga punktu pomiarowego		
			C1	D1	E1
1	$n_{P_{max}}$ dla $P_{max}$	100	0,15	0,3	0,08
2		75	0,15	0,5	0,11
3		50	0,15	0,2	
4		25			
5		10	0,1		
6	pośrednia $0,6 n_{P_{max}}$ ( $0,75 n_{P_{max}}$ )	100	0,1		
7		75	0,1		0,19
8		50	0,1		0,32
9		25			
10		10			
11	b. jałowy	0	0,15		0,3

Podczas testu stacjonarnego dokonuje się pomiaru emisji poszczególnych składników spalin z odpowiednią wagą przy różnych wartościach obciążenia silnika oraz jego pracy na biegu jałowym, przy prędkości znamionowej oraz prędkości pośredniej (wynoszącej 60% lub 75% prędkości znamionowej) zależnej od położenia maksymalnego momentu obrotowego na charakterystyce zewnętrznej silnika [3, 9].

Uzupełnieniem testu stacjonarnego jest w przypadku najnowszych norm emisji spalin cykl niestacjonarny NRTC (rys. 1). Warunki zmiennego obciążenia i prędkości obrotowej silnika zadane w przypadku tego cyklu powstały w wyniku badań kilku charakterystycznych pojazdów i maszyn typu nonroad. Złożenie wybranych fragmentów przebiegu obciążenia pojazdów nonroad podczas pracy było podstawą powstania cyklu NRTC.

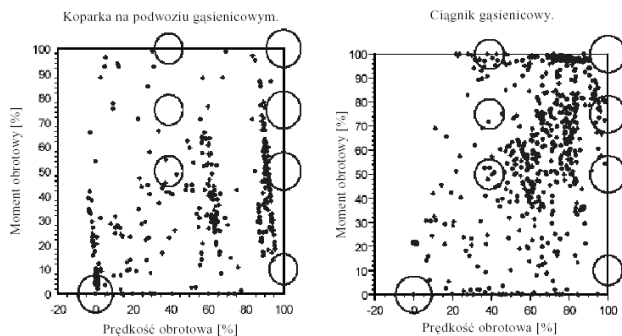


Rys. 1. Cykl niestacjonarny NRTC [1]

Cykl NRTC pozwala na badanie emisji w stacjach przejściowych i stosuje się głównie do pomiaru emisji cząstek stałych w przypadku norm Euro Stage III B oraz Euro Stage IV. Może być również zastosowany do pomiaru emisji substancji gazowych w normach Euro Stage IIIA, IIIB oraz IV.

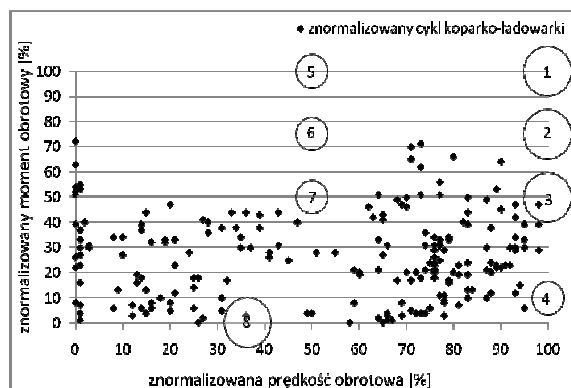
### 3. Stacjonarny cykl testowy a rzeczywiste warunki pracy silników pojazdów nonroad

Stacjonarny cykl ISO 8178 stosowany w obecnie obowiązującej normie EURO Stage IIIa wymaga przeprowadzenia badań w kilku (8) znormalizowanych punktach pracy silnika [1, 2] zgodnie z tabelą 2. Na rys. 2 pokazano porównanie zarejestrowanych punktów pracy przykładowych pojazdów pozadrogowych (m.in. koparki i ciągnika gąsienicowego) z naniesionymi obszarami, w których przeprowadza się opisywany test 8-fazowy.



Rys. 2 Porównanie zebranych danych z ośmiofazowym cyklem statycznym ISO 8178 – 4 C1 [10]

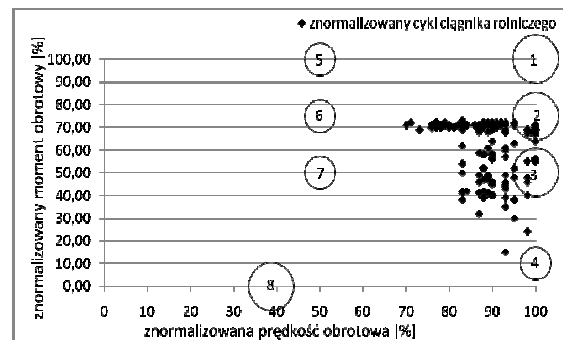
Analizując rys. 2 [10] można stwierdzić, że test ISO 8178- 4C1 jest mało adekwatny do rzeczywistych warunków obciążeń. Daje to podstawę, aby wnioskować, że uzyskane wyniki pomiarów emisji poszczególnych składników spalin znacznie odbiegają od wyników pomiarów wykonanych w warunkach eksploatacyjnych.



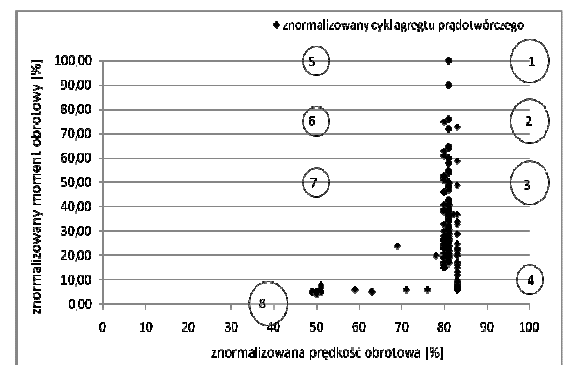
Rys. 3 Porównanie znormalizowanych punktów pracy koparko-ładowarki ze statycznym cyklem obciążeń ISO 8178 – 4 C1.

Również wykonane własne porównania cyklu pracy (zarejestrowane odpowiednie punkty pracy silnika) poszczególnych pojazdów i maszyn wykorzystywanych do tworzenia cyklu NRTC [1] (rys. 3 – 5) pokazują wyraźne rozbieżności pomiędzy

cyklem stacjonarnym a rzeczywistym charakterem obciążenia.



Rys. 4 Porównanie znormalizowanych danych ciągnika rolniczego podczas wykonywania orki ze statycznym cyklem obciążeń ISO 8178 – 4 C1.



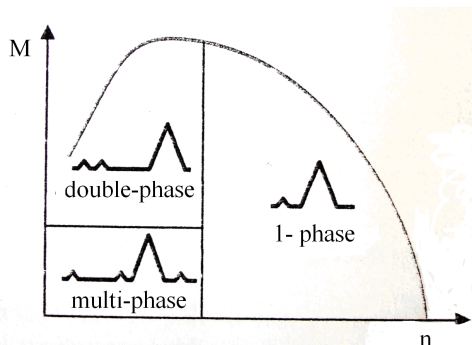
Rys. 5 Porównanie znormalizowanych danych agregatu prądotwórczego ze statycznym cyklem obciążeń ISO 8178 – 4 C1.

Analizując rys. 3 -5 widać wyraźne zróżnicowanie sposobu obciążenia silnika różnych pojazdów nonroad.

### 4. Wtrysk wielofazowy w pojazdach nonroad

Zastosowanie wtrysku wielofazowego w silniku wysokoprężnym ma wiele zalet. Kształtowanie przebiegu wtrysku paliwa poprzez podział określonej dawki paliwa na części pozwala w rezultacie wpłynąć na przebieg procesu spalania w cylindrze, a równocześnie wpływa na emisję substancji szkodliwych. Sposób podziału dawki na fazy ma istotne znaczenie głównie dla emisji  $\text{NO}_x$  oraz cząstek stałych PM.

Moment zainicjowania wtrysku oraz ilość wtryskiwanego paliwa wpływają na ukształtowanie krzywej ciśnienia indykowania w cylindrze. Odpowiedniego doboru wymaga tutaj określenie podziału dawki paliwa oraz przesunięcie kątowe (kąt obrotu wału korbowego OWK) pomiędzy poszczególnymi fazami wtrysku.

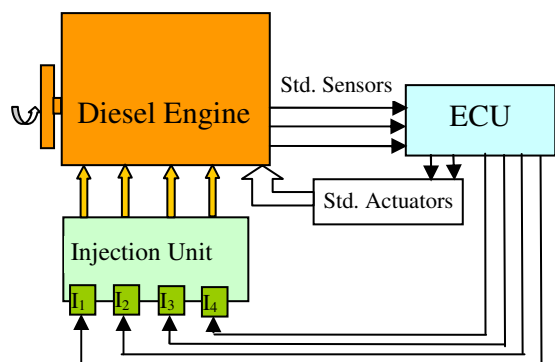


Rys. 6. Możliwość podziału dawki paliwa na fazy silnika wysokoprężnego pojazdu nonroad w polu charakterystyki zewnętrznej [8]

Jak wynika z rys. 6 [8] w przypadku silników wysokoprężnych stosowanych w pojazdach mogących się poruszać poza drogami utwardzonymi, podział dawki paliwa na więcej niż jedną fazę można ograniczyć do dolnego zakresu prędkości obrotowych silnika, a wielokrotny wtrysk stosowany jest głównie przy obciążeniach częściowych. Dzięki temu można uzyskać zadowalające maksymalne wartości momentu obrotowego i mocy przy jednoczesnym obniżeniu emisji i poprawie wskaźników pracy jak i emisji hałasu głównie podczas pracy z obciążeniami częściowymi [4, 5, 7].

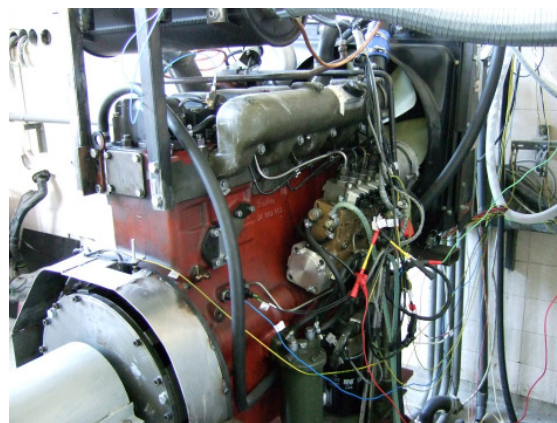
Możliwość podziału dawki na fazy może zostać zrealizowana w nowoczesnym układzie wtryskowym jak np. Common Rail, ale również w innych rozwiązaniach takich jak np. pompowtryskiwacze lub indywidualne zespoły wtryskowe. W tych ostatnich występuje między innymi ograniczenie jeżeli chodzi o liczbę faz. Jednakże w przypadku silnika rozpatrywanych pojazdów możliwości te są wystarczające.

Potrzeba uzyskania niskich kosztów produkcji i wysokiej niezawodności spowodowała poszukiwanie rozwiązań, które mogą wykorzystać istniejące elementy układu wtryskowego, ale równocześnie pozwolić na uzyskanie wtrysku wielofazowego. Wszystkie te cechy posiada rozwiązanie oparte na koncepcji mechatronizacji sekcyjnej pompy wtryskowej (rys.7).



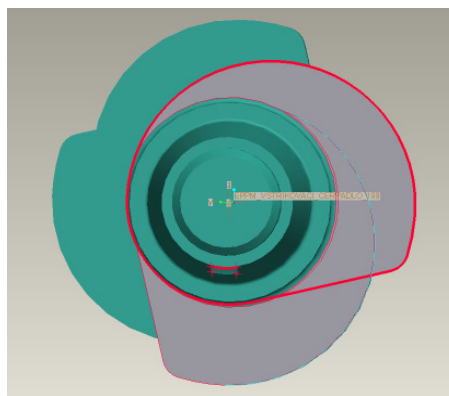
Rys. 7 Koncepcja układu wtrysku wielofazowego ciągnika rolniczego

Jedną z głównych modyfikacji tego klasycznego rozwiązania jest wprowadzenie do każdej sekcji elektrozaworu wpływającego na maksymalną wartość ciśnienia w układzie wtryskowym. Jest to element o charakterze upustowym, pozwalającym na zmniejszenie wartości ciśnienia wytwarzanego w sekcji tłoczącej, a sterowanym sygnałem z ECU silnika w oparciu o czujniki prędkości obrotowej, położenia wału korbowego i wałka krzykowego pompy oraz wychylenia elektronicznego pedału przyspieszenia. W opisywanym rozwiązaniu ze względu na zastosowanie elektrozaworów w sekcjach tłoczących możliwe było zrezygnowanie z listwy sterującej obecnej w rozwiązaniach klasycznych.



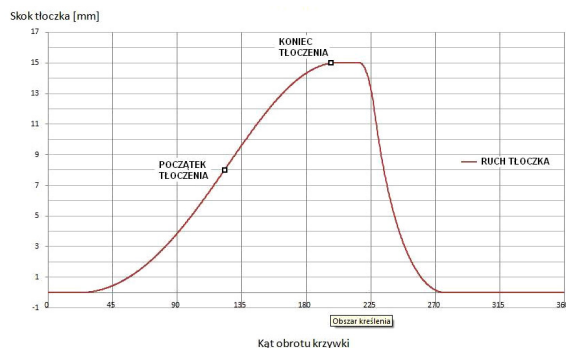
Rys. 8 Silnik badawczy wyposażony w zmechatronizowaną pompę wtryskową

Czynnikami korygującymi działanie elektrozaworu są odpowiednie ciśnienia i temperatury zarówno w układzie dolotowym powietrza jak i układzie wtryskowym. Dodatkowo w porównaniu do rozwiązania standardowego zmodyfikowano zarys krzywki wymuszającej ruch tłoczka sekcji tłoczącej w taki sposób, aby możliwe było uzyskanie wysokiego ciśnienia w układzie przez znaczną część obrotu wałka krzykowego pompy wtryskowej (rys. 9, 10).



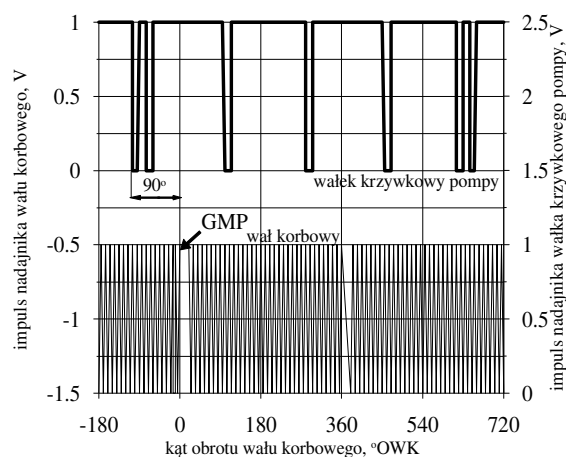
Rys. 9 Zarys krzywek na wałku krzykowym pompy 4-cylindrowego silnika ciągnika rolniczego

Zastosowanie charakterystycznego zarysu krzywek napędzających sekcje tłoczące umożliwiło uzyskanie wysokiego ciśnienia w układzie (powyżej ciśnienia otwarcia wtryskiwacza - przy zamkniętym elektrozaworze sekcji tłoczącej) znacznie wysuniętym przed GMP (rys. 10).



Rys.10 Wznios tłoczka sekcji tłoczącej zmechanizowanej pompy wtryskowej

Podczas analizy wzniosu tłoczka sekcji tłoczącej należy zwrócić uwagę na przesunięcie fazowe w stosunku do wału korbowego wynoszące 90° OWK (rys. 11).



Rys.11 Przesunięcie fazowe wałka krzywkowego pompy wtryskowej w stosunku do wału korbowego

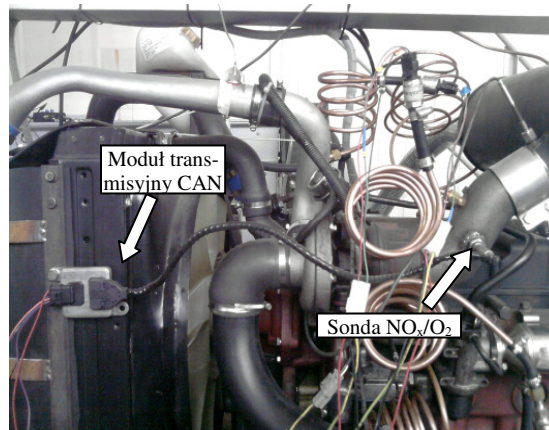
Zastosowany w opisywanej konfiguracji układ wtryskowy o wtrysku bezpośrednim współpracuje z turbodoładowanym 4-cylindrowym silnikiem o ZS wyposażonym w układ recyrkulacji spalin oraz chłodnicę powietrza. Tak wyposażona jednostka napędowa jest źródłem napędu ciągnika rolniczego.

## 5. Aparatura do pomiaru emisji substancji szkodliwych

### 5.1. Pomiar emisji tlenków azotu

W celu pomiaru stężenia emitowanych w trakcie pracy silnika tlenków azotu zastosowano system pomiarowy firmy DRIVEN, którego głównym elementem jest sonda pomiarowa. Czuj-

nik ten zamontowano w układzie wylotowym silnika tuż przed tłumikiem. Dane pomiarowe z modułu sondy przesyłane są do urządzenia akwizycji danych (CompactRIO) za pomocą magistrali CAN (rys. 12). Elementem pośredniczącym w tej transmisji jest karta NI 9853 firmy National Instruments, przeznaczona do transmisji danych zgodnie z protokołem magistrali CAN.



Rys.12 Zestaw do pomiaru emisji tlenków azotu zamontowany na silniku badawczym

System pomiarowy pozwala jednocześnie na pomiar stężenia tlenków azotu oraz tlenu O<sub>2</sub> w spalinach. Najważniejsze parametry systemu pomiarowego zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Najistotniejsze parametry systemu pomiarowego NO<sub>x</sub> / O<sub>2</sub>

substancja	Zakres pomiarowy	Dokładność	Czas reakcji, ms	Przebieg danych
NO <sub>x</sub>	0-3000 ppm	0 ±10 ppm 100 -1500 ppm ± 10%	1300	20 Hz
O <sub>2</sub>	0 - 21%	λ=0,90 ± 1,4% λ=1,00 ± 0,13% λ=2,65 ± 0,32%	1000	

### 5.2. Pomiar emisji cząstek stałych

Kolejnym urządzeniem wykorzystywanym w badaniach emisji substancji szkodliwych jest dymomierz Maha MPM-4 stosowanym do precyzyjnego pomiaru spalin silnika wysokoprężnego również takiego, który wyposażono w filtr cząstek stałych. Zastosowany sposób pomiaru oparty o wiązkę laserową pozwala na wykrycie cząstek stałych o wielkości mniejszej niż 0,001 mm. Urządzenie posiada wyjścia analogowe oraz złącze RS232 do przesyłu danych. Aparatura pozwala na pracę z oprogramowaniem akwizycyjnym, a analiza emisji cząstek stałych przeprowadzona cyfrowo pozwala na podanie poziomu emisji w mg·m<sup>-3</sup>.





Rys. 13 Dymomierz MAHA MPM – 4.

Tabela 4. Najistotniejsze parametry systemu pomiarowego NO<sub>x</sub> / O<sub>2</sub>

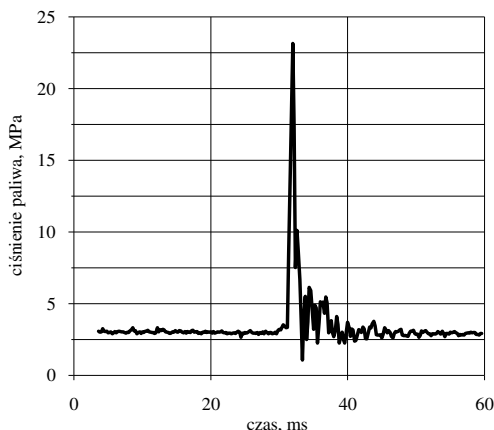
Lp.	Cecha	Wartość
1.	Zakres pomiarowy	0,01-700 mg·m <sup>-3</sup>
2.	Dokładność	0,01 mg·m <sup>-3</sup>
3.	Wielkość cząstek	100- 10000 nm
4.	Zakres wyjść analogowych	1: 0 – 8 mg·m <sup>-3</sup> 2: 0 – 900 mg·m <sup>-3</sup>

Najistotniejsze parametry urządzenia do pomiaru emisji cząstek stałych podano w tabeli 4.

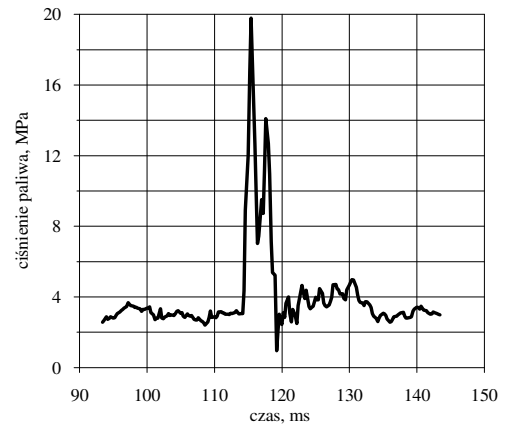
## 6. Analiza wyników badań

### 6.1. Przebieg wtrysku paliwa

Podczas badań rejestrowano przebieg ciśnienia występującego w przewodzie łączącym sekcję tłoczącą z wtryskiwaczem paliwa dzięki umieszczeniu czujnika wysokiego ciśnienia firmy AVL. Wśród wielu przeprowadzonych prób na rysunkach pokazano przykładowe przebiegi podczas pracy silnika nieobciążonego z prędkością obrotową 900 obr/min, dla wtrysku jednofazowego (rys. 14) oraz dwufazowego (rys. 15). Jak pokazuje rys. 15 możliwe jest wyraźne rozdzielenie dawki paliwa na 2 fazy



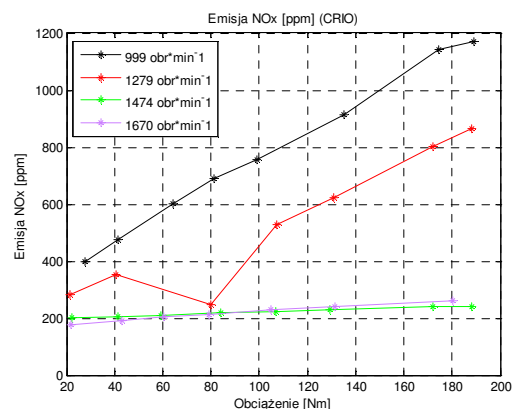
Rys.14 Przebieg ciśnienia wtrysku jednofazowego



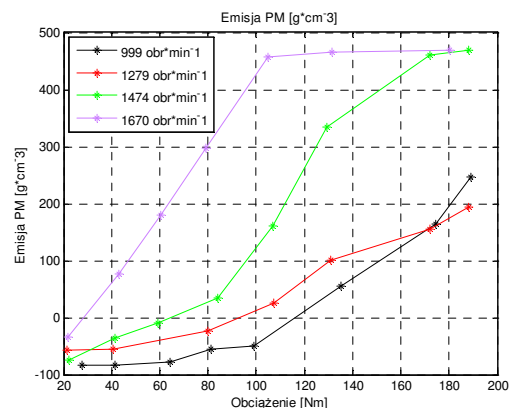
Rys.15 Przebieg ciśnienia wtrysku dwufazowego

### 6.2. Emisja substancji szkodliwych w stanach stacjonarnych

Podczas badań przeprowadzonych w stanach stacjonarnych monitorowano m.in. emisję substancji szkodliwych. Najbardziej istotna ze względu na rygorystyczne ograniczenie w normach TIER/EURO Stage jest emisja tlenków azotu oraz cząstek stałych przedstawiono na rys. 16 i 17



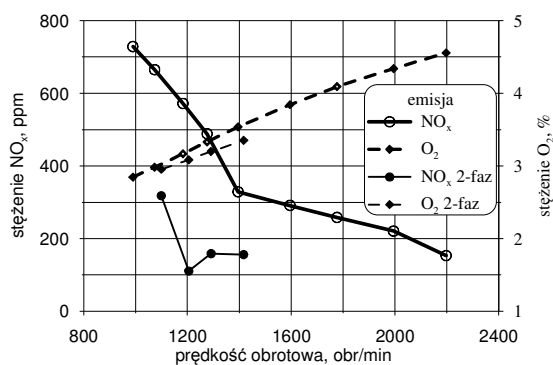
Rys.16 Stężenie NO<sub>x</sub> w spalinach podczas pracy silnika w stanach stacjonarnych



Rys.17 Emisja PM w stanach stacjonarnych zależnie od obciążenia silnika

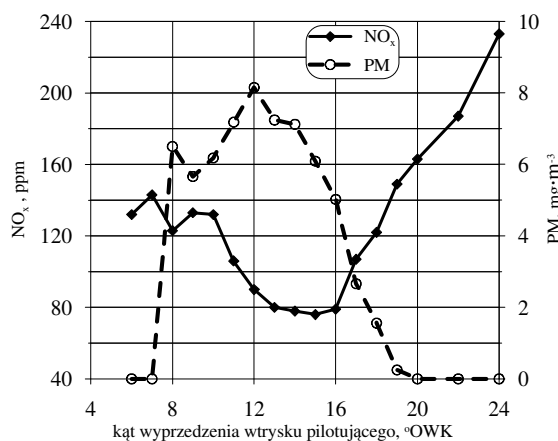
Część badań przeprowadzono podczas pracy silnika zasilanego paliwem wtryskiwanym w ciągu jednej fazy. Widoczne ograniczenie emisji  $\text{NO}_x$  przy prędkościach obrotowych powyżej 1400 obr/min spowodowane są działaniem układu recyrkulacji spalin (rys.16). Równocześnie widoczny jest wzrost emisji cząstek stałych (rys. 17).

Przeprowadzono również badania wpływu podziału dawki paliwa na emisję  $\text{NO}_x$  podczas pracy silnika nieobciążonego (rys. 18).



Rys. 18. Emisja  $\text{NO}_x$  z czujnika Drivven w zależności od prędkości obrotowej dla silnika nieobciążonego, przy jedno- i dwufazowym wtrysku

Zastosowanie wtrysku wielofazowego pozwala na ograniczenie emisji  $\text{NO}_x$  (rys. 18 – linia ciągła). Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że wielofazowy wtrysk paliwa stosuje się głównie przy niepełnym obciążeniu oraz prędkościach obrotowych znacznie mniejszych od znamionowych (rys. 6). Podczas badań wpływu kąta wyprzedzenia dawki pilotującej na emisję substancji szkodliwych zmieniano kąt odstepu dawki pilotującej, w wyniku czego uzyskano zależność pomiędzy rozpatrywanym kątem, a emisją  $\text{NO}_x$  oraz PM (rys. 19).

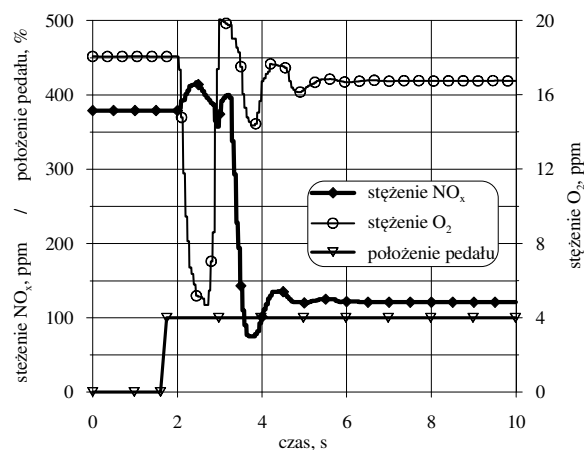


Rys.19 Emisja  $\text{NO}_x$  oraz PM w zależności od kąta wyprzedzenia wtrysku pilotującego (prędkość obrotowa, silnik nieobciążony 900 obr/min).

Analiza przebiegu emisji  $\text{NO}_x$  oraz PM (rys. 19) pokazuje, że sposób podziału dawki paliwa (kąt wyprzedzenia wtrysku pilotującego) posiada istotny wpływ na właściwości emisyjne silnika. Znalazienie pewnego kompromisu pomiędzy emisją  $\text{NO}_x$  a PM powinno mieć więc istotny wpływ na odpowiedni dobór parametrów wtrysku paliwa.

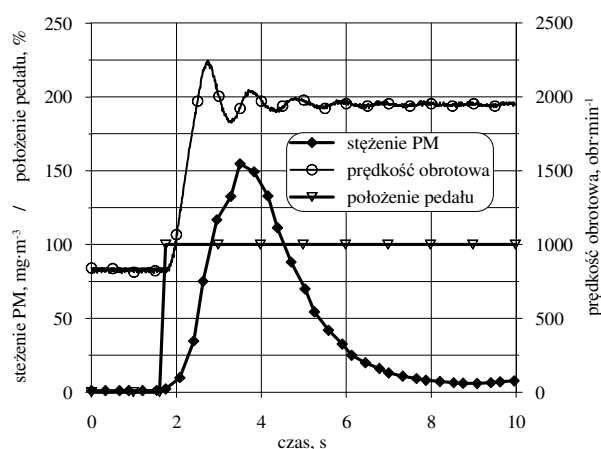
### 6.3. Emisja substancji szkodliwych w stanach niestacjonarnych

Istotnym z punktu widzenia spełnienia przyszłościowych norm emisji spalin jest emisja  $\text{NO}_x$  oraz PM podczas dynamicznej zmiany obciążenia silnika. W związku z tym przeprowadzono próby polegające na skokowej zmianie obciążenia silnika podczas nagłej zmiany położenia elektronicznego pedału przyspieszenia (0 -100%). Przebieg emisji  $\text{NO}_x$  oraz stężenia  $\text{O}_2$  w spalinach zmierzono czujnikiem  $\text{NO}_x/\text{O}_2$  firmy Drivven (rys. 20).



Rys. 20 Emisja  $\text{NO}_x$  i stężenie  $\text{O}_2$  w spalinach podczas próby dynamicznej

Zarejestrowano również emisję cząstek stałych w opisywanej próbie dynamicznej (rys.21).



Rys.21 Emisja cząstek stałych PM oraz przebieg prędkości obrotowej silnika w próbie dynamicznej

---

## 7. Podsumowanie

Spełnienie coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin pojazdów nonroad wymaga zastosowania wielu rozwiązań obejmujących zarówno silnikowe jak i pozasilnikowe metody ograniczenia emisji substancji szkodliwych. Wśród rozważanych rozwiązań znajdują się m.in. układy wtryskowe umożliwiające realizację wtrysku wielofazowego. Jak pokazują wstępne badania możliwe jest ograniczenie substancji szkodliwych emitowanych przez silnik pojazdu nonroad dzięki mechatronizacji sekcyjnej pompy wtryskowej. Optymalizacja tego

korzystnego ekonomicznie rozwiązania współpracującego z układem recyrkulacji spalin posiada wystarczający potencjał pozwalający na spełnienie normy Euro Stage IIIb.

## Acknowledgements/ Podziękowania

Praca została wykonana w ramach projektu sfinansowanego z funduszu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w latach 2009 - 2011 jako projekt badawczy o numerze N N502447436.

---

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

ESSC -European Steady State Cycle/ *europejski cykl stacjonarny*  
ECU - Electronic Control Unit/ *elektroniczna jednostka sterująca*

NRTC – NonRoad Transient Cycle/ *cykl dynamiczny pojazdów nonroad*  
PM – Particulate Mater/ *cząstki stałe*

---

## Bibliography/Literatura

- [1] Dieselnet- Emission Test Cycle: [www.dieselnet/standards/cycles](http://www.dieselnet/standards/cycles)
- [2] Block M. C.: Engine technologies for nonroad Tier 3 and Tier 4, NVMA/NSHA/ NIOSH DPM Workshop Elko NV, 2007 s. 1-45
- [3] EPA: Nonroad diesel emission standards – Staff technical paper, United States Environmental Protection Agency 2001s. 1-40
- [4] Gauding M., Brands T., Felschl C., Hottenbach P., Hasse C., Pauls C., Gruenefeld G., Peters N.: Experimental and Numerical Investigation of Ignition Mechanisms for Multiple Injection Strategies at Diesel Engine-Like Conditions, Institut für Technische Verbrennung, RWTH Aachen University, Germany
- [5] Han Z., Uludogan A., Hampson G.J. and Reitz R.D.: Mechanism of Soot and NO<sub>x</sub> Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine, SAE paper no 960633 2003 s. 1-19
- [6] Merkisz J: Ekologiczne problemy silników spalinowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998
- [7] Reitz R.D., Hanson R., Splittem D. Kokjohn S.: Improving Fuel Efficiency with Fuel-Reactivity-Controlled Combustion, ERC Symposium 2009 s. 1-28
- [8] Suzuki M., Tsuzuki N., Teramachi Y.: The New Toyota L-4 direct injection diesel engine – Toyota D-4D Clean Power Concept, 26. Internationales Wiener Motoren-Symposium Wien 2005
- [9] VDMA, : Exhaust Emission Legislation Diesel and Gas engines, 2008
- [10] Walsh M.: Global trends in diesel emissions regulation - a 2001 update. SAE technical paper 2001-01-0183.

Andrzej Bieniek, PhD, MEng - doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology.

*Dr. inż. Andrzej Bieniek, adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej.*



Mariusz Graba, MEng -PhD student in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology.

*Mgr inż. Mariusz Graba – doktorant na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Opolskiej*



Andrzej Lechowicz, MEng -PhD student in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology.

*Mgr inż. Andrzej Lechowicz – doktorant na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej*

