

## Badania stanowiskowe instalacji HHO w układzie z silnikiem spalinowym Volvo Penta D5A T

dr inż. Piotr Dobrzaniecki  
dr inż. Krzysztof Kaczmarczyk  
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

### Streszczenie:

W artykule przedstawiono wyniki badań układu, składającego się z generatora HHO współpracującego z silnikiem spalinowym, wyposażonym w górniczy układ dolotowo-wylotowy. Celem badań była identyfikacja parametrów użytkowych silnika, takich jak moc i moment obrotowy oraz określenie zawartości substancji szkodliwych w spalinach. Na podstawie wyników badań dokonano analizy wpływu generatora na pracę silnika spalinowego.

### Abstract:

Results of tests of the system consisting of HHO generator cooperating with diesel engine, equipped with special inlet-outlet system, are presented. Identification of engine operational parameters, such as power and torque, as well as determination of concentration of hazardous substances in exhaust gases were the tests objectives. Impact of generator on operation of diesel engine was analyzed on the basis of test results.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, generator HHO, skład chemiczny spalin, badania

Keywords: diesel engines, HHO generator, chemical composition of exhaust gases, tests

## 1. Wprowadzenie

Prace badawcze, mające na celu wzrost efektywności pracy silników spalinowych prowadzone są w wielu ośrodkach badawczych. Ich głównym celem jest wzrost mocy użytecznej silnika przy jednoczesnym obniżeniu ilości substancji szkodliwych w spalinach. Uzyskuje się to poprzez stosowanie układów obróbki spalin, tj. katalizatorów i filtrów cząstek stałych, jak również przez stosowanie alternatywnych paliw ekologicznych np. w postaci wodoru (spala się do  $H_2O$ ) lub jego związków. Dozowanie wodoru odbywa się na ogół z instalacji stacjonarnych (z butli). Stosuje się również generatory, pozwalające uzyskać związek HHO lub wodór w procesie elektrolizy.

W celu określenia stopnia wpływu dodatku mieszaniny wodorotlenowej na parametry osiągnięte przez silnik ZS, wyposażony w ognioszczelny układ dolotowo-wylotowy, przeprowadzono badania układu silnik – generator HHO. Wyznaczano moc i moment obrotowy rozwijany przez silnik spalinowy, a jednocześnie badano skład spalin. Wyniki badań posłużyły do oceny wpływu generatora na efektywność pracy silnika spalinowego, a w końcowym efekcie zastosowania generatora w napędach spalinowych powierzchniowych maszyn roboczych.

## 2. Badania stanowiskowe

Obiektem badań był silnik spalinowy Volvo Penta typu D5A T, z górniczym układem dolotowo-wylotowym, współpracujący z generatorem HHO.

Badania parametrów pracy silnika spalinowego przeprowadzono w dwóch wariantach:

- bez generatora HHO,
- z generatorem HHO.

W tym celu określano wartości parametrów pracy silnika spalinowego (moc, moment obrotowy oraz skład chemiczny spalin) w następującym porządku:

- ustalano dwie prędkości obrotowe silnika spalinowego – jedną, przy której silnik spalinowy osiągał maksymalną wartość momentu obrotowego oraz drugą, przy której silnik rozwijał maksymalną moc,
- próby rozpoczynano od prędkości maksymalnej,
- ustalano moment obrotowy obciążający silnik wg tabeli 1.

**Zakres prędkości obrotowej i momentu obrotowego silnika spalinowego [1]**

Tabela 1

Numer fazy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Prędkość obrotowa	1500 [min <sup>-1</sup> ]					2300 [min <sup>-1</sup> ]					Bieg jałowy
Moment obrotowy [%]	100	75	50	25	10	100	75	50	25	10	0
Moment obrotowy [Nm]	401	300	200	100	40	336	252	168	84	36	0
	320	240	160	80	32	267	200	133	66	27	0
Czas trwania próby dla każdej z faz – 5 minut											

Cykl badawczy składał się z następujących etapów:

- a) stabilizacja temperatury pracy silnika,
- b) stabilizacja prędkości obrotowej silnika wg tabeli 1,
- c) obciążanie silnika momentem wg tabeli 1. Pomiaru prędkości obrotowej silnika i momentu obrotowego dokonywano w sposób ciągły przez 5 minut.

Przed każdym cyklem badawczym doprowadzano temperaturę cieczy chłodzącej do około 90° C.

Próby prowadzono przy obciążeniach silnika momentem obrotowym 100%, 75%, 50%, 25%, 10% oraz na biegu luzem. Wytwarzanie gazu, stanowiącego dodatek do zasysanego powietrza, odbywało się automatycznie, po uruchomieniu silnika.

Podczas badań rejestrowano wartości następujących parametrów:

- temperatura otoczenia,
- temperatura płynu chłodzącego silnik,
- temperatura elektrolitu w zbiorniku,
- masa paliwa,
- moment obrotowy silnika,
- prędkość obrotową silnika,
- natężenie prądu elektrycznego elektrolizy,
- skład chemiczny spalin.

W celu określenia składu chemicznego spalin zastosowano analizator spalin Arcon Olivier K4500. Spaliny pobierano z kolektora zbiorczego za płuczką wodną.

Oprócz badań wg porządku przedstawionego w tabeli 1, przeprowadzono cykl badawczy „M max” polegający na pomiarze maksymalnego momentu obrotowego przy ustalonych prędkościach obrotowych silnika. Na podstawie serii pomiarów opracowano charakterystykę zewnętrzną silnika spalinowego. Prędkości obrotowe przy których dokonywano pomiaru maksymalnego momentu obrotowego rozwijanego przez silnik spalinowy przedstawiono w tabeli 2.

Zakres prędkości obrotowej silnika spalinowego w cyklu badawczym „M max” [1]

Tabela 2

Prędkość obrotowa silnika $n_s$ [ $\text{min}^{-1}$ ]								
1000	1200	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2300

2.1. Stanowisko badawcze

Stanowisko do badań napędów spalinowych wyposażono w silnik spalinowy Volvo Penta D5A T z ognioszczelnym układem dolotowo-wylotowym. Podstawowe parametry silnika spalinowego przedstawiono w tabeli 3.

Podstawowe parametry silnika spalinowego Volvo Penta D5A T [6]

Tabela 3

Silnik Volvo Penta D5A T	
Maksymalna moc silnika	81 [kW] / 2300 [obr/min]
Maksymalny moment obrotowy	381 [Nm] / 1500 [obr/min]

Na stanowisku wykorzystano silnik elektryczny Leroy Somer LSK 2254 L11 jako hamownię do obciążania silnika spalinowego. Silnik elektryczny wyposażony był z bezstykowy momentomierz typu T10F Hottinger Baldwin Messtechnik.

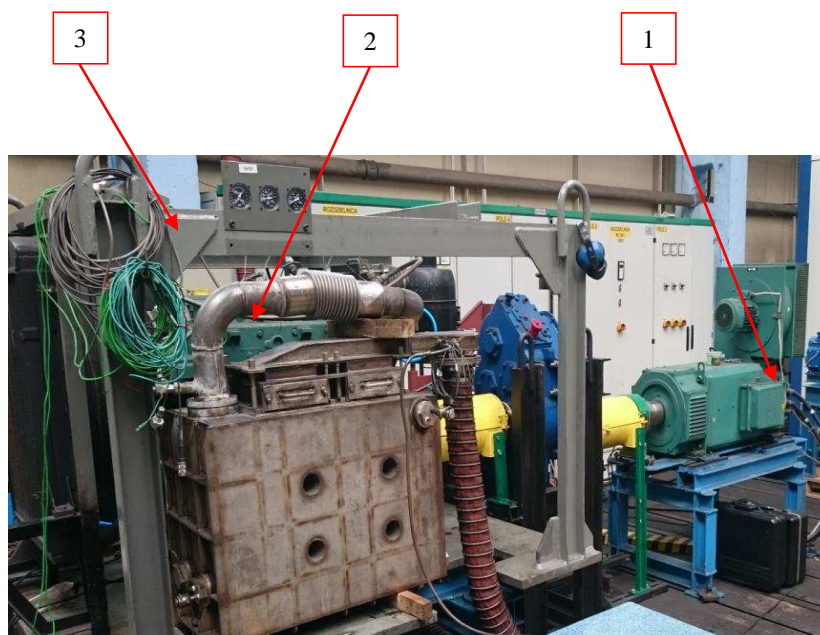
Podstawowe parametry hamowni elektrycznej przedstawiono w tabeli 4.

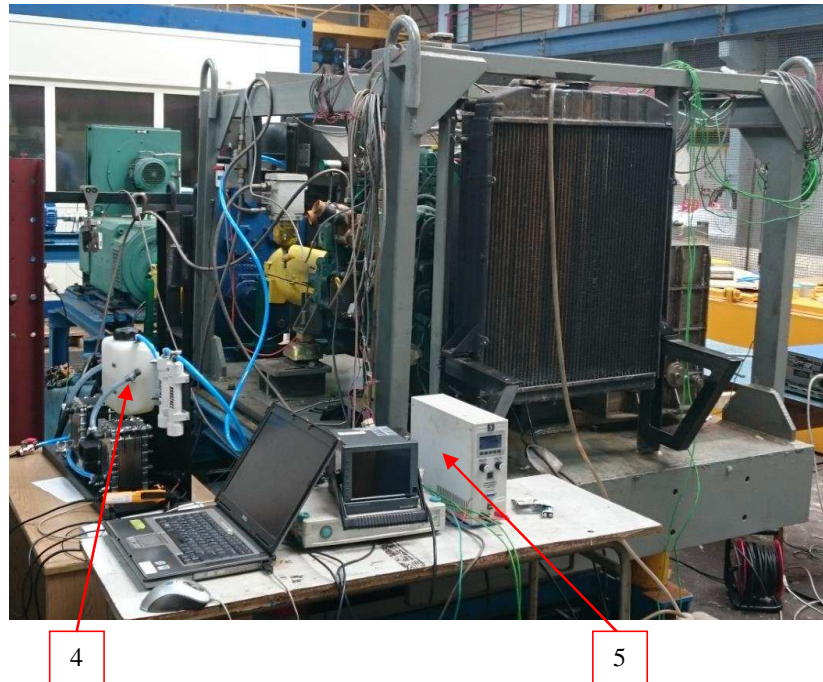
Podstawowe parametry silnika Leroy Somer LSK 2254 L11 [7]

Tabela 4

Silnik Leroy Somer LSK 2254 L11	
Napięcie zasilania	3x380 [V]
Maksymalna moc silnika	223 [kW] / 1520 [obr/min]
Nominalny moment obrotowy	1400 [Nm]

Stanowisko do badań napędów spalinowych przedstawiono na rysunku 1.



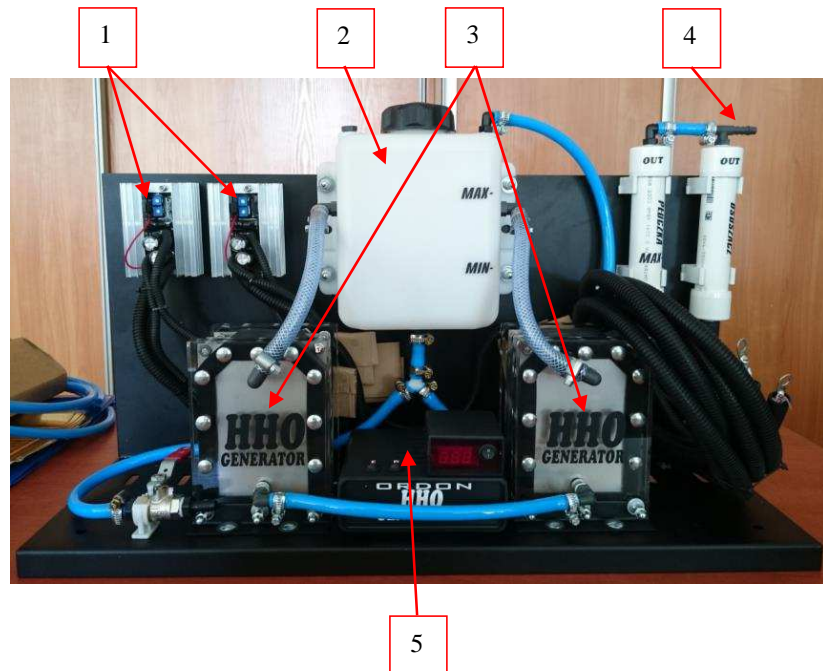


Rys. 1. Widok stanowiska badawczego [2]

Stanowisko składało się z hamowni elektrycznej (poz. 1), silnika spalinowego z niezbędnym oprzyrządowaniem (poz. 2), umocowanego w specjalnej ramie (poz. 3), generatora HHO (rys. 4) oraz wyposażenia pomiarowego (poz. 5).

## 2.2. Generator HHO

Do badań stanowiskowych zastosowano generator HHO typu 2X21 EL 12V produkcji PHU „ORDON” Przemysł Ordon składający się z elementów przedstawionych na rysunku 2.



Rys. 2. Generator wodoru typu 2X21 EL 12V produkcji Ordon [2]  
 1-regulatory CCPWM, 2- zbiornik elektrolitu, 3-generator, 4-wyloty gazu do silnika,  
 5- układ elektryczny generatora



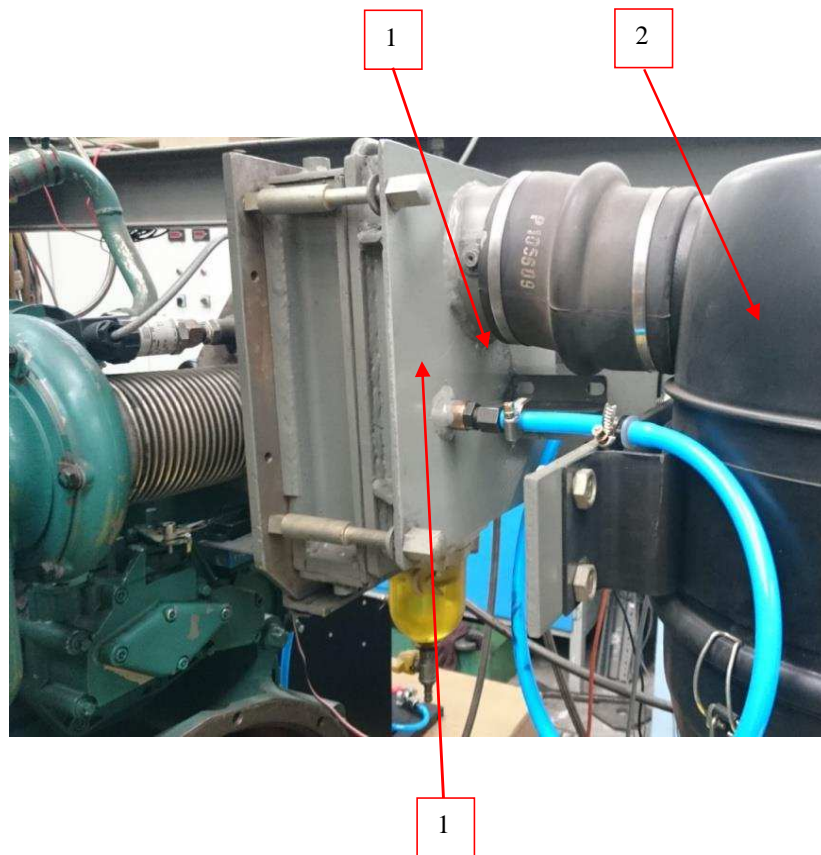
Podstawowe parametry techniczne generatora przedstawiono w tabeli 5.

**Parametry techniczne generatora typu 2X21 EL 12 V [1]**

Tabela 5

Parametr	Wartość
Napięcie zasilania $U_{zas}$	12 [V]
Maksymalne natężenie prądu elektrolizy $I_e$	30 [A]
Pojemność układu	$\sim 2,5$ [dm <sup>3</sup> ]
Liczba generatorów	2
Liczba elektrod w pojedynczym generatorze	21

Generator, podłączony do układu dolotowego silnika, zasilano napięciem 12 V DC z zasilacza laboratoryjnego. Sposób podłączenia generatora do układu dolotowego silnika przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Doprowadzenie mieszaniny HHO do łącznika kolankowego układu dolotowego silnika [2]  
1 - przyłącze , 2 - filtr powietrza , 3- łącznik kolankowy

Zgodnie z zaleceniem producenta stężenie elektrolitu oraz regulację układów CCPWM generatora dobrano tak, by natężenie prądu elektrolizy wynosiło około  $I_{celi}=25$  [A]. Pozwoliło to na bezpieczną pracę generatora (bez szybkiego wzrostu temperatury elektrolitu).

### 3. Wyniki badań

Wyniki badań przedstawiono w tabelach 6 i 7.

**Skład chemiczny spalin podczas pracy silnika spalinowego Volvo Penta D5A T  
bez generatora HHO [1]**

Tabela 6

Parametry pracy silnika spalinowego										
$n_s$ [min <sup>-1</sup> ]	1500					2300				
$M_s$ [Nm]	320	240	160	80	32	267	200	133	66	27
$\lambda$ wsp. nadmiaru powietrza	1,516	1,855	>2	>2	>2	1,879	>2	>2	>2	>2
Skład chemiczny spalin										
CO [% obj.]	0,12	0,08	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
CO <sub>2</sub> [% obj.]	10,00	8,00	5,80	3,80	2,60	8,00	6,90	5,70	4,10	3,20
HC [ppm obj.]	0	0	1	0	3	2	4	1	1	1
O <sub>2</sub> [% obj.]	7,51	9,88	12,87	15,46	17,05	10,06	11,55	13,15	15,07	16,12
NO [ppm obj.]	1024	900	571	27	26	805	627	433	31	25

**Skład chemiczny spalin podczas pracy silnika spalinowego Volvo Penta D5A T  
z generatorem HHO [1]**

Tabela 7

Parametry pracy silnika spalinowego										
$n_s$ [min <sup>-1</sup> ]	1500					2300				
$M_s$ [Nm]	320	240	160	80	32	267	200	133	66	27
$\lambda$ wsp. nadmiaru powietrza	1,624	1,964	>2	>2	>2	1,891	>2	>2	>2	>2
Skład chemiczny spalin										
CO [% obj.]	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
CO <sub>2</sub> [% obj.]	9,00	7,40	5,50	3,70	2,50	7,70	6,60	5,30	4,00	3,20
HC [ppm obj.]	9	6	7	7	7	9	4	1	3	3
O <sub>2</sub> [% obj.]	8,06	10,20	12,66	15,24	16,84	9,79	11,28	12,93	14,78	15,96
NO [ppm obj.]	1287	982	629	29	14	818	696	463	26	16

Wyniki badań przy obciążeniu  $M_s$  równym 66 i 27 [Nm] przy prędkości obrotowej  $n_s = 2300$  [min<sup>-1</sup>] przedstawione w tabeli 7 zarejestrowano podczas pracy generatora z ograniczoną wydajnością. Automatyczne ograniczenie parametrów pracy generatora (natężenia prądu elektrycznego elektrolizy) nastąpiło ze uwagi na wzrost temperatury elektrolitu.

W drugiej części badań przeprowadzono cykl pomiarowy na podstawie którego sporządzono charakterystyki zewnętrzne silnika  $M_s(n_s)$  oraz  $N_e(n_s)$ . Cykl pomiarowy realizowano wg tabeli 2, zaś wyniki przedstawiono w tabeli 8.

**Charakterystyka zewnętrzna silnika spalinowego Volvo Penta D5A T z generatorem HHO [1]**

Tabela 8

Prędkość obrotowa silnika $n_s$ [ $\text{min}^{-1}$ ]								
1000	1200	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2300
Moment obrotowy silnika $M_s$ [Nm]								
335	364	362	356	352	334	327	300	285
Temperatura cieczy chłodzącej $T_{\text{chl}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]								
89,4	86,3	88,2	87,0	89,0	89,6	88,8	89,3	89,1
Natężenie prądu elektrycznego elektrolizy $I_e$ [A]								
24,84	24,92	24,84	24,96	24,88	24,84	24,8	24,76	24,68

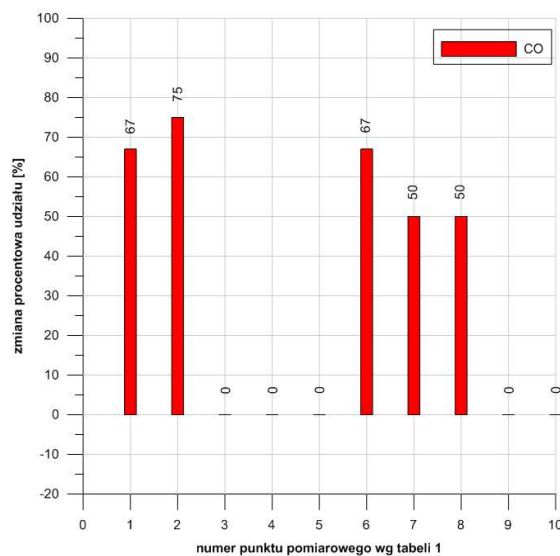
Dokonano również wrywkowej weryfikacji dwóch punktów pracy silnika, bez generatora HHO – tabela 9.

**Weryfikacja wybranych punktów pracy silnika Volvo Penta D5A T bez generatora HHO [1]**

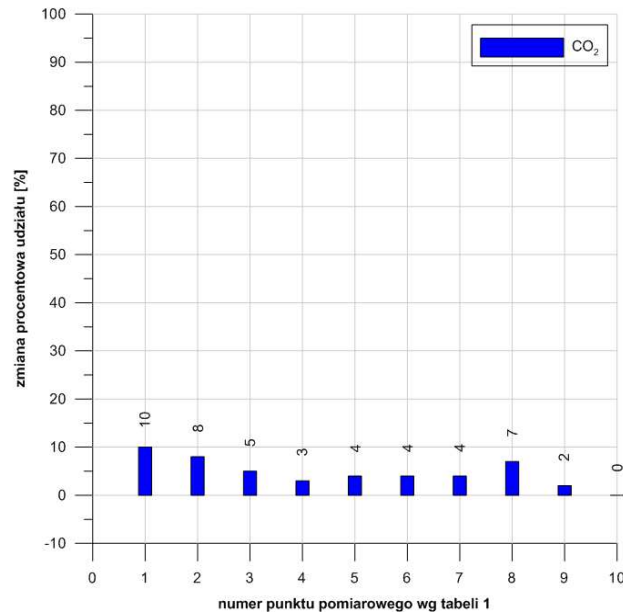
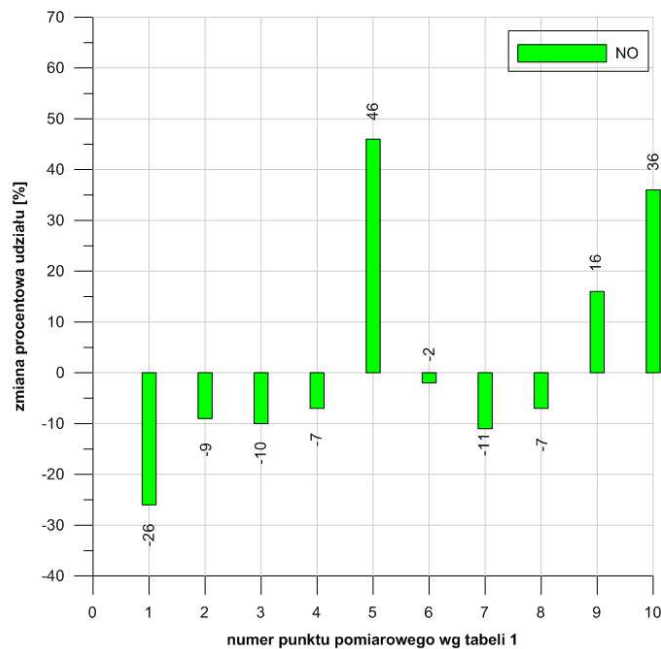
Tabela 9

Prędkość obrotowa silnika $n_s$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	
1400 (prędkość obrotowa przy której silnik rozwija maksymalny moment obrotowy)	2300 (prędkość obrotowa przy której silnik rozwija maksymalną moc)
Moment obrotowy silnika $M_s$ [Nm]	
358	287
Temperatura cieczy chłodzącej $T_{\text{chl}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	
89,9	90,2

W efekcie badań stwierdzono następujące zmiany procentowe wybranych związków chemicznych w spalinach (rys. 4÷6):



Rys. 4. Zmiana procentowa udziału CO w spalinach w punktach pomiarowych 1÷10 [1]

Rys. 5. Zmiana procentowa udziału CO<sub>2</sub> w spalinach w punktach pomiarowych 1÷10 [1]

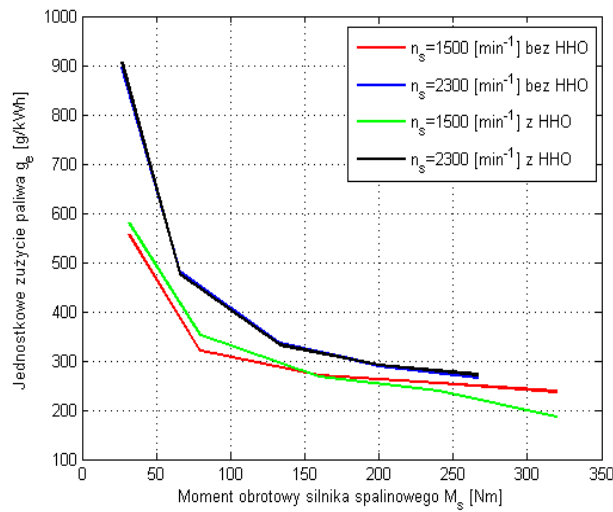
Rys. 6. Zmiana procentowa udziału NO w spalinach w punktach pomiarowych 1÷10 [1]

Dodatnie wartości na wykresach świadczą o korzystnym wpływie zastosowania instalacji HHO na ilość związku, natomiast ujemne o niekorzystnym.

Zawartość CO w spalinach podczas pracy silnika spalinowego z generatorem była niższa lub utrzymywała się na porównywalnym poziomie w stosunku do wyników badań bez zastosowania generatora HHO. Zawartość CO<sub>2</sub> podczas pracy silnika spalinowego z generatorem HHO utrzymywała się na niższym poziomie w stosunku do układu bez generatora. Zawartość NO w spalinach w większości punktów cyklu pomiarowego była

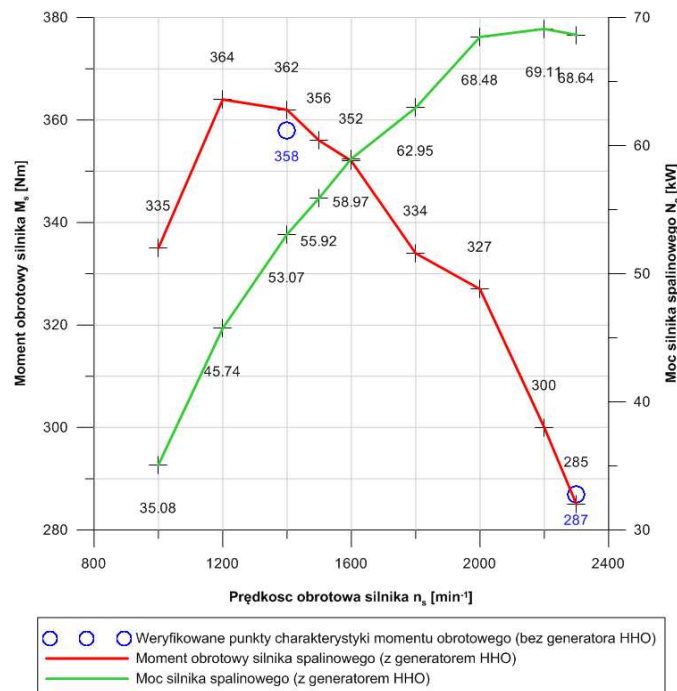


większa podczas pracy z generatorem HHO. Jednostkowe zużycie paliwa podczas realizacji cyklu badawczego przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Jednostkowe zużycie paliwa w cyklu badawczym [1]

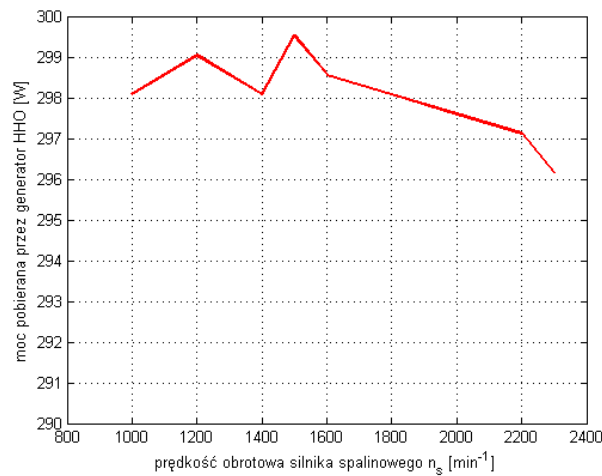
Charakterystykę zewnętrzną silnika spalinowego w układzie z generatorem HHO przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Charakterystyka zewnętrzna silnika spalinowego w układzie z generatorem HHO [1]

Zaznaczono na nim wybrane punkty pomiarowe charakterystyki momentu obrotowego, przy wyłączonym generatorze HHO.

Wykres mocy pobieranej przez generator HHO podczas pracy przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Moc pobierana przez generator HHO [1]

Generator pracował praktycznie ze stałą mocą, gdyż był zasilany niezależnie od prędkości obrotowej silnika.

#### 4. Omówienie wyników badań

Wyniki badań odniesiono do rezultatów badań opisanych w [2, 3, 4]. Różnicą w obecnych badaniach była praca generatora HHO ze stałą wydajnością, niezależnie od prędkości obrotowej silnika. Zmieniał się zatem procentowy udział mieszaniny HHO w stosunku do powietrza zasysanego przez silnik. W pracach [2, 3, 4] procentowa objętość HHO lub  $\text{H}_2$  w stosunku do objętości powietrza zasysanego przez silnik była stała. Ponadto silnik spalinowy posiadał zawór EGR, a więc część spalin była wykorzystywana w kolejnym cyklu pracy. W badaniach przedstawionych w niniejszym artykule silnik nie posiadał zaworu EGR, a układ wylotowy był wyposażony w wodną płuczkę spalin oraz chłodzony przewód wylotu spalin. Z tego względu przedstawione wyniki badań stanowiskowych nie mogą być porównywane do opisywanych w [2, 3, 4] z uwagi na wymienione różnice.

W trakcie badań podczas pracy silnika spalinowego z generatorem, jak i bez generatora nie stwierdzono wzrostu mocy oraz momentu obrotowego silnika, a zużycie jednostkowe paliwa utrzymywało się na zbliżonym poziomie. Stwierdzono ograniczenie ilości CO w spalinach silnika pracującego pod dużym obciążeniem (punkty 1, 2 oraz 6, 7 i 8 – tabela 1). Redukcja CO wynosiła ponad 50%, co przedstawiono na rysunku 4. Zawartość  $\text{CO}_2$  podczas pracy silnika spalinowego z generatorem była nieznacznie mniejsza niż podczas pracy bez generatora. Związki NO występowały w większych ilościach podczas pracy silnika spalinowego z generatorem niż bez generatora. Ograniczenie ilości NO występowało podczas pracy silnika spalinowego z minimalnym obciążeniem, co pokazano na rysunku 6.

#### 5. Podsumowanie

Na podstawie wyników badań stanowiskowych silnika spalinowego Volvo Penta D5A T w układzie z generatorem HHO firmy PHU „ORDON” można stwierdzić:

- praca generatora z zalecanym przez producenta stężeniem elektrolitu i natężeniem prądu elektrolizy spowodowała zadziałanie ochrony termicznej układu elektrycznego generatora. Układ sterujący ograniczał natężenie prądu elektrolizy, co skutkowało ograniczeniem wydajności generatora. Po obniżeniu temperatury generator pracował normalnie,
- ponieważ generator HHO był zasilany z zewnętrznego źródła prądu elektrycznego, podczas sporządzania bilansu energetycznego należy uwzględnić moc potrzebną do pracy generatora – około 300W,
- nie stwierdzono znaczącego wpływu dodatku HHO na parametry osiągnięte przez silnik spalinowy (moc, moment obrotowy). Prawdopodobną przyczyną była zbyt niska wydajność testowanego generatora w odniesieniu do pojemności skokowej silnika spalinowego,
- uzyskane wyniki mogą być wykorzystane do doboru generatorów do silników spalinowych o określonej pojemności skokowej.

## Literatura

- [1] Dobrzaniecki P.: Zwiększanie sprawności górniczych napędów spalinowych. ITG KOMAG, Gliwice 2015 (materiały nie publikowane).
- [2] Yilmaz A.C., Uludamar E., Aydin K.: *Effect of hydroxyl (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines*, International journal of hydrogen energy 35(2010), p. 11366-11372.
- [3] Liew C., Li H., Liu S., Besch M.C., Ralston B., Clark N., Huang Y.: *Exhaust emissions of a H<sub>2</sub>-enriched heavy-duty diesel engine equipped with cooled EGR and variable geometry turbocharger*, Fuel 91(2012), p. 155-163.
- [4] Miyamoto T., Hasegawa H., Mikami M., Kojima N., Kabashima H., Urata Y.: *Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine*, International Journal of Hydrogen Energy 36(2011), p. 13138-13149.
- [5] Dokumentacja techniczna silnika Volvo Penta D5A T.
- [6] Dokumentacja techniczna silnika Leroy Somer LSK 2254 L11.

## *Czy wiesz, że ....*

*... polskie górnictwo węgla kamiennego miało w ubiegłym roku blisko 1,9 mld straty netto, o ponad 150 mln mniej niż rok wcześniej. Kopalnie wydobyły 72,2 mln ton węgla. Zgodnie z danymi katowickiego oddziału Agencji Rozwoju Przemysłu, zobowiązania sektora wynoszą około 14,7 mld zł. Przychody były mniejsze, choć sprzedaż węgla w 2015 roku była o 3,2 mln ton (4,6%) wyższa niż przed rokiem, a kopalnie sprzedały o 1,4 mln ton węgla więcej niż wydobyły w 2015 roku.*

*Rzeczpospolita 2016 29 lutego s.B7*