

Determining the Mechanical Efficiency of a Reciprocating Engine Based on Indicator Diagrams

Kacper Cieślars¹, Bartosz Wisła², Jacek Nowakowski^{3,*}

¹ *University of Bielsko-Biala, Willowa 2, 43-309, Bielsko-Biala, Poland, E-mail: kcieslar@ubb.edu.pl*

² *University of Bielsko-Biala, Willowa 2, 43-309, Bielsko-Biala, Poland, E-mail: bw058152@student.ubb.edu.pl*

³ *University of Bielsko-Biala, Willowa 2, 43-309, Bielsko-Biala, Poland, E-mail: jnowakowski@ubb.edu.pl*

* *Corresponding author, e-mail*

Abstract: The article presents a system for measuring, recording and analyzing the pressure course of the working medium in the cylinder of a piston engine as a function of the engine crankshaft rotation angle. A piezoelectric pressure transducer and an optical crankshaft position transmitter were used. Based on the measurements carried out, the mechanical efficiency of the engine was determined in various operating conditions.

Keywords: engine indication, fast-changing measurements, mechanical efficiency of the piston engine;

Wyznaczanie sprawności mechanicznej silnika tłokowego w oparciu o wykresy indykatorowe

Kacper Cieślars¹, Bartosz Wisła², Jacek Nowakowski^{3,*}

¹ *Uniwersytet Bielsko-Bialski, Willowa 2, 43-309, Bielsko-Biala, Poland, E-mail: kcieslar@ubb.edu.pl*

² *Uniwersytet Bielsko-Bialski, Willowa 2, 43-309, Bielsko-Biala, Poland, E-mail: bw058152@student.ubb.edu.pl*

³ *Uniwersytet Bielsko-Bialski, Willowa 2, 43-309, Bielsko-Biala, Poland, E-mail: jnowakowski@ubb.edu.pl*

* *Corresponding author, e-mail*

Streszczenie: W artykule przedstawiono układ do pomiaru, rejestracji i analizy przebiegu ciśnienia czynnika roboczego w cylindrze silnika tłokowego w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika. Zastosowano piezoelektryczny przetwornik ciśnienia i optyczny nadajnik położenia wału korbowego. W oparciu o przeprowadzone pomiary wyznaczono sprawność mechaniczną silnika w różnych warunkach pracy.

Słowa kluczowe: indykowanie silnika, pomiary szybkozmienne, sprawność mechaniczne silnika tłokowego;

1. Wprowadzenie

Celem pracy było opracowanie kompleksowego systemu do pomiaru szybkozmiennych ciśnień w komorze spalania silnika tłokowego oraz przeprowadzenie badań wstępnych w celu oceny jego dokładności i funkcjonalności oraz wyznaczenie sprawności mechanicznej silnika. Podczas realizacji pracy zostały zidentyfikowane i zastosowane odpowiednie metody oraz urządzenia pomiarowe, które umożliwiają precyzyjną rejestrację dynamicznych zmian ciśnienia w warunkach rzeczywistej pracy silnika [1,2,3,4,7]. Wykonano integrację tych elementów w spójny układ pomiarowy, który może być użyty w dalszych badaniach i analizach. Przeprowadzono analizę literatury z uwzględnieniem historycznego kontekstu metod pomiarowych, co pozwala na zrozumienie ewolucji technologii stosowanych w tej dziedzinie [9,10]. Układ pomiarowy hamowni Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów został szczegółowo opisany, włączając w to opis stanowiska badawczego, komponenty takie jak silnik, hamulec, układ

sterowania i akwizycji oraz układ pomiaru ciśnienia. Przeprowadzone zostały również badania wstępne, które obejmują kalibrację toru pomiarowego, co jest kluczowe dla zapewnienia dokładności i wiarygodności wyników. Następnie, wykonane zostały pomiary ciśnienia, które zostały poddane analizie i podstawowym obliczeniom w celu oceny efektywności i precyzji systemu pomiarowego oraz wyznaczono sprawność mechaniczną silnika. Na zakończenie pracy, przedstawione zostały wnioski oraz podsumowanie.

2. Stanowisko badawcze i obiekt badań

Badania przeprowadzono w laboratorium Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego. Silnik wraz z niezbędnym osprzętem znajduje się w jednym pomieszczeniu, podczas gdy aparatura sterująca i pomiarowa zlokalizowana jest w sąsiednim, dźwiękoszczelnie odizolowanym pomieszczeniu. Silnik jest sprzężony z hamulcem elektrowirowym, umożliwiającym regulację obciążenia.

Badania przeprowadzono na silniku 1.3 SDE Z13DTH. Jest to nowoczesna, czterocyldrowa jednostka napędowa o pojemności skokowej 1,3 dm³ o zapłonie samoczynnym, powszechnie stosowana w samochodach osobowych segmentu B i C. Wyróżnia się niskim zużyciem paliwa oraz spełnieniem norm emisji spalin, co czyni go popularnym wśród producentów samochodów dążących do zwiększenia efektywności energetycznej swoich pojazdów (Tabela 1, Rys. 1).

Tabela 1. Dane techniczne obiektu badań

1.3 SDE Z13DTH 66kW/90KM	
Pojemność skokowa	1248 cm ³
Typ silnika	zapłon samoczynny
Moc silnika	90 KM (66 kW) przy 4000 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	200 N·m przy 1750-2500 obr/min
Liczba cylindrów	4
Stopień sprężania	18.0:1
Średnica cylindra × skok tłoka	69,6 × 82 mm
Układ zasilania	Common Rail

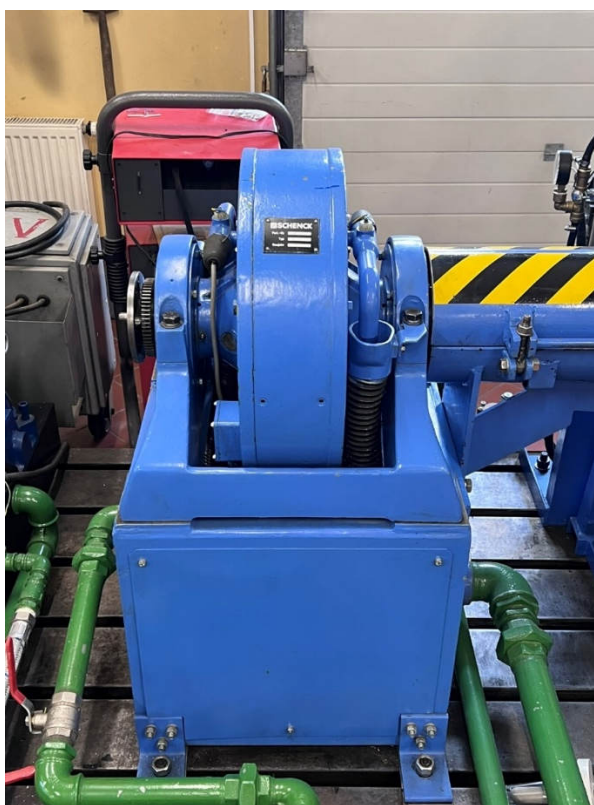


Rysunek 1. Silnik 1.3 SDE Z13DTH 66kW/90KM (zdjęcie stanowiska)

Hamulec elektrowirowy Schenck LWG 0948 jest zaawansowanym urządzeniem służącym do testowania silników spalinowych, wykorzystywanym głównie w laboratoriach badawczych i stanowiskach testowych (Tabela 2, Rys. 2).

Tabela 2. Dane techniczne hamulca elektrowirowego

Schenck LWG 0948	
Zakres obrotów	0-10 000 obr/min
Maks. moment hamujący	500 N·m
System chłodzenia	wodne
Sterowanie	elektroniczne

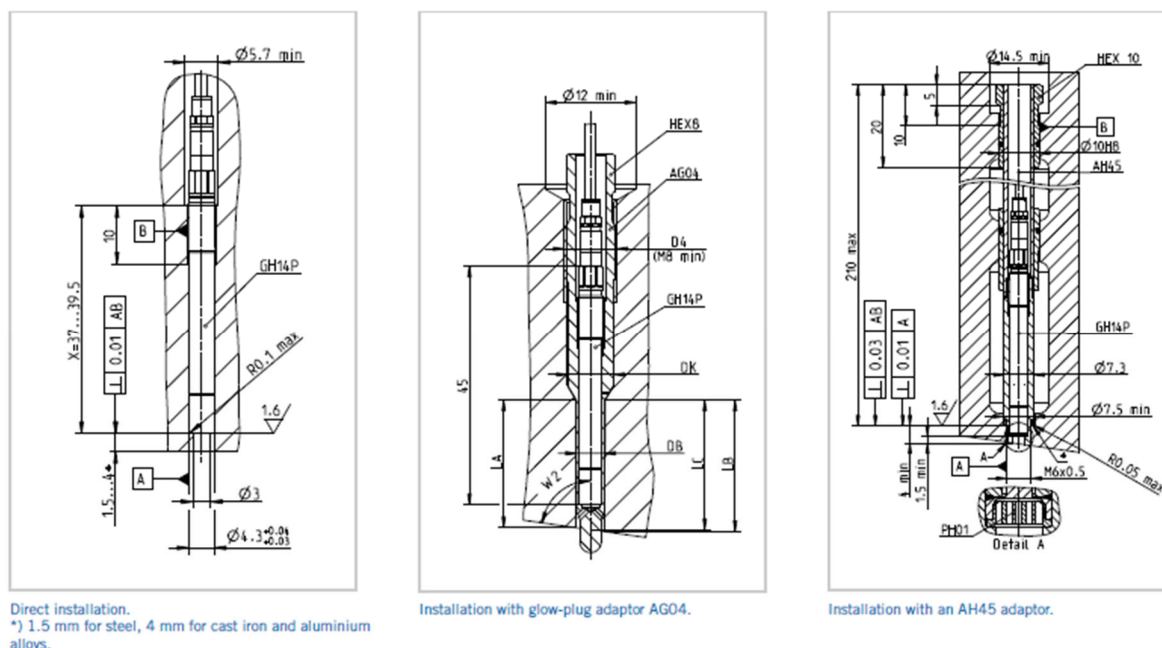


Rysunek 2. Hamulec elektrowirowy Schenck LWG 0948 (zdjęcie stanowiska)

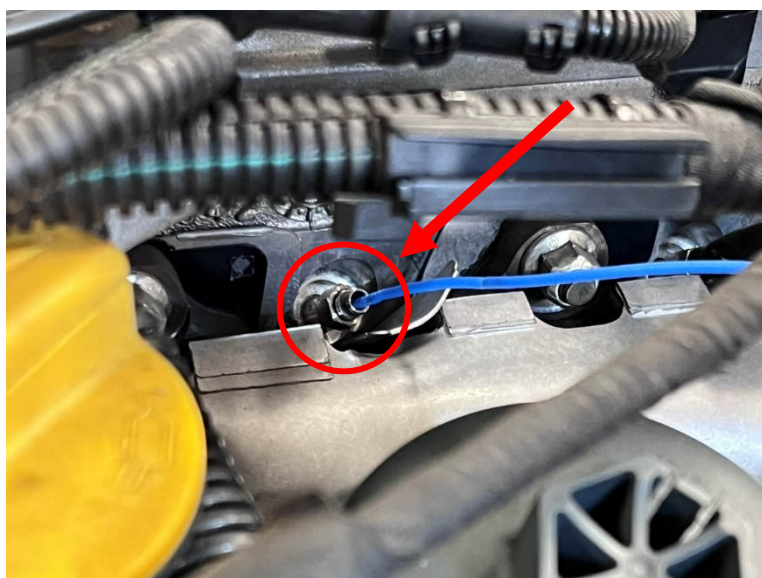
W skład układu pomiarowego ciśnienia w komorze spalania silnika wchodzi następujące elementy:

- piezoelektryczny czujnik ciśnienia,
- nadajnik położenia wału korbowego,
- rejestrator wraz z oprogramowaniem.

Do pomiaru ciśnienia czynnika roboczego w cylindrze zastosowano piezoelektryczny czujnik ciśnienia AVL GH14P TIGG1323A.01. Czujnik został zamontowany w miejscu świecy żarowej. Czujnik GH14P, w połączeniu z adapterem świecy żarowej (montaż bezpośredni), stanowi dogodne rozwiązanie montażowe dla silników wysokoprężnych. Umożliwia on pomiary bez oscylacji ciśnienia w cylindrze do 250 barów. Czujnik GH14P jest wyposażony w złącze M3, które umożliwia najmniejsze średnice narzędzi instalacyjnych. Wymiary adaptera świecy żarowej są dostosowane do wymagań klienta. Konstrukcja Double-Shell™ oddziela elementy piezoelektryczne od negatywnych wpływów naprężeń mechanicznych, które mogą wystąpić podczas montażu czujnika w adapterze lub silniku. Na rysunku 3 przedstawiono różne możliwości montażu czujnika. W badanym silniku został on zamontowany za pomocą tulei adaptacyjnej AG04. Widok zamontowanego czujnika na silniku badawczym przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 3. Rysunki różnych możliwości montażu czujnika AVL GH14P TIGG1323A.01. (źródło: [11])



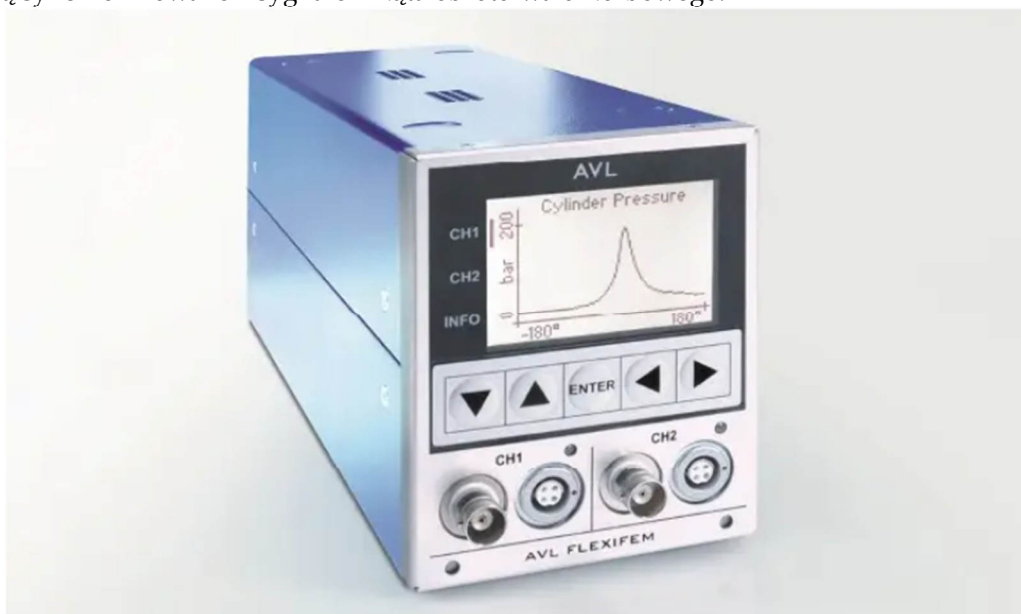
Rysunek 4. Czujnik AVL GH14P TIGG1323A.01.(zdjęcie stanowiska)

Nadajnik położenia wału korbowego AVL 366C umożliwia precyzyjne monitorowanie położenia wału korbowego. Dzięki zaawansowanej technologii optycznej, czujnik ten zapewnia odporność na wysokie temperatury, zakłócenia elektryczne i wibracje silnika. AVL 366C jest wyposażony w tarczę znacznikową z 720 znacznikami, co umożliwia uzyskanie rozdzielczości 0,5 stopnia kąta obrotu. Czujnik ten jest montowany na końcu wału za pomocą specjalnej flanszy, co gwarantuje jego stabilność i precyzyjność pomiarów (Rys. 5).



Rysunek 5. Czujnik położenia wału korbowego AVL 366C (zdjęcie stanowiska)

Rejestrator wraz z oprogramowaniem FlexIFEM Indi (Rys. 6) jest kompletnym systemem do pomiaru i rejestracji przebiegów szybkozmiennych (w tym ciśnienie w cylindrze silnika), łączącym w sobie wzmocnienie sygnału oraz zaawansowaną akwizycją danych, dostarczane razem z oprogramowaniem IndiCom Mobile™. Jedno lub dwa wejścia analogowe przeznaczone do pomiaru ciśnienia w cylindrze, układu wtryskowego lub ciśnienia w kolektorze oraz dwa wejścia cyfrowe do synchronizacji sygnałów zapłonu lub wtrysku umożliwiają rejestrowanie wszystkich niezbędnych danych, które są synchronizowane z sygnałem kąta obrotu wału korbowego.



Rysunek 6. Rejestrator FlexIFEM Indi (źródło:[11])

3. Badania doświadczalne

Plan badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Plan badań doświadczalnych silnika

Moment obrotowy [N·m]	Prędkość obrotowa [obr/min]			
	1500	2000	2500	3000
25	X	X	X	X
50	X	X	X	X
75	X	X	X	X
100	X	X	X	X

Badania przeprowadzono na silniku o ustabilizowanych parametrach cieplnych. Podczas przeprowadzanych badań rejestrowano min. takie parametry jak:

- Prędkość obrotowa silnika (obr/min),
- Maksymalne ciśnienie w cylindrze (P_{max} , bar),
- Kąt obrotu wału korbowego przy którym wystąpiło maksymalne ciśnienie (AP_{max} , °),
- Ciśnienie indykowane (IMEP, bar).

3.1. Wyniki badań doświadczalnych

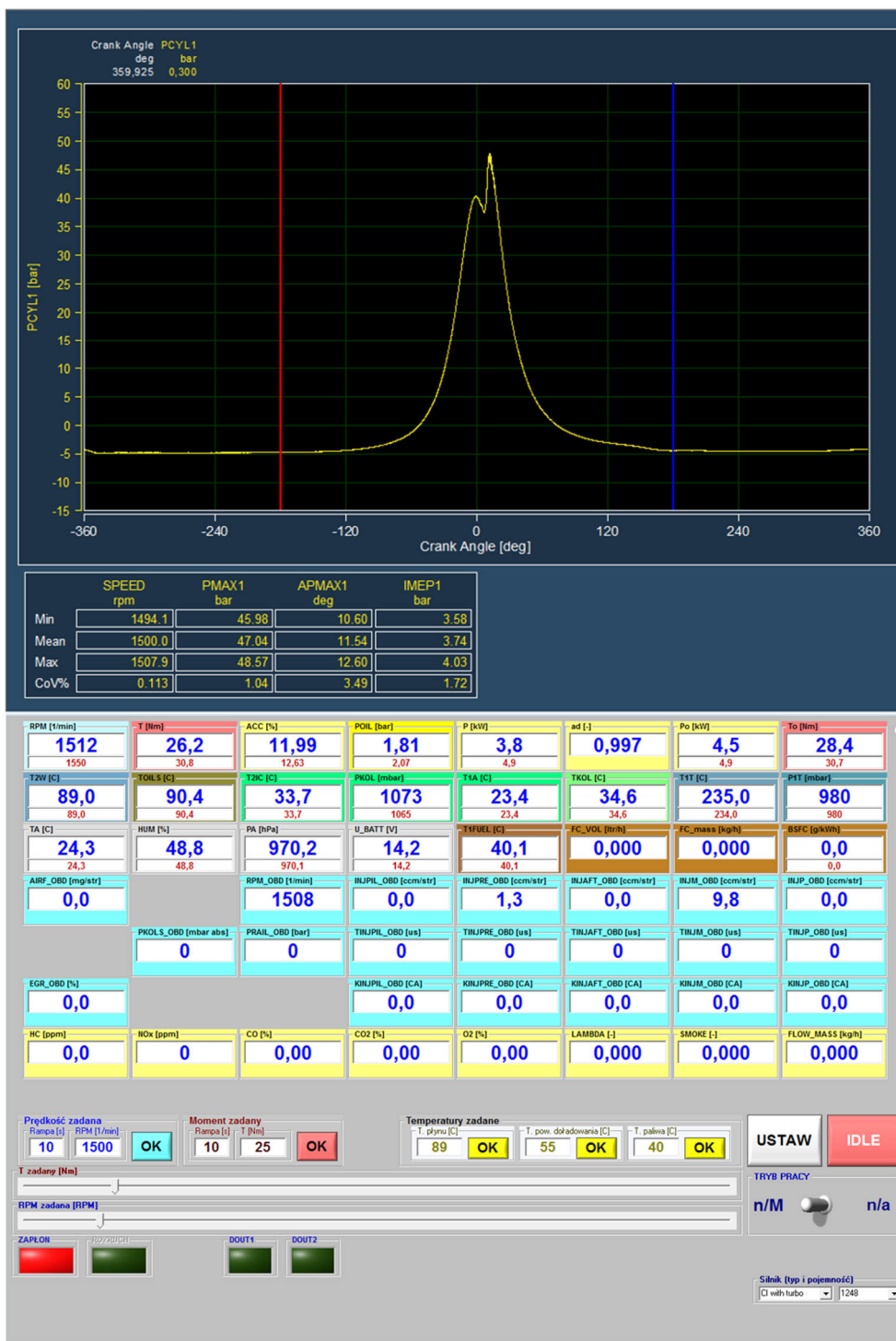
Na rysunkach (Rys. 7, Rys. 8) oraz tabelach (Tabela 4, Tabela 5) przedstawiono wybrane wyniki pomiarów, kolejno wykres indykatorowy wraz z jego parametrami, parametry hamowni oraz centrali sterującej silnikiem.

3.1.1. Punkt pomiarowy 1500 obr/min 25 N·m

Dla punktu pomiarowego 1500 obr/min 25 N·m uzyskano następujące parametry wykresu indykatorowego (Tabela 4).

Tabela 4. Parametry wykresu indykatorowego dla punktu pomiarowego 1500 obr/min, 25 N·m

1500 obr/min, 25 N·m				
	Prędkość obrotowa [obr/min]	P_{max} [bar]	AP_{max} [°OWK]	IMEP [bar]
Min	1494,1	45,98	10,6	3,58
Średnia	1500,0	47,04	11,54	3,74
Max	1507,9	48,57	12,6	4,03
CoV%	0,113	1,04	3,49	1,72



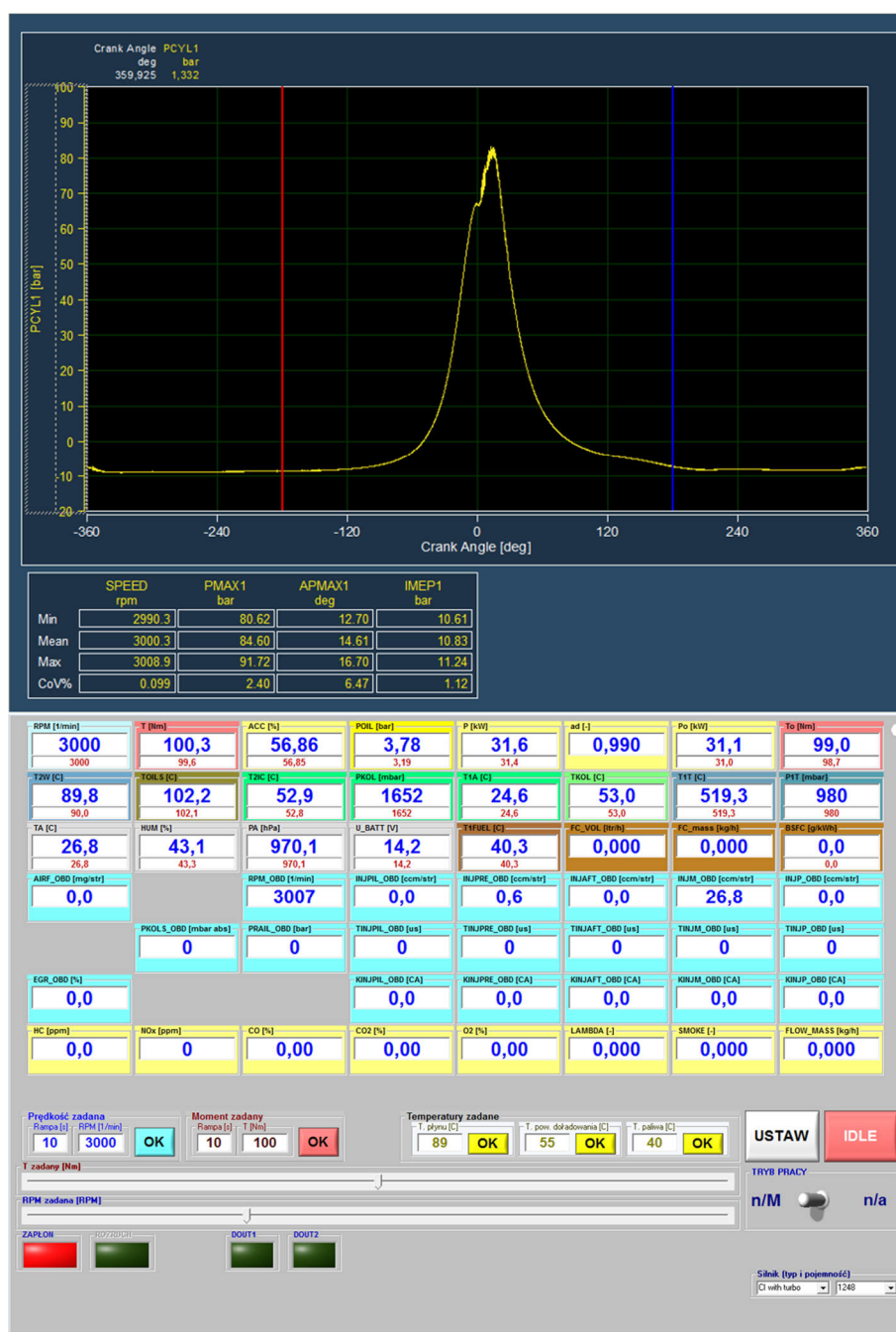
Rysunek 7. Punkt pomiarowy 1500 obr/min, 25 N·m

3.1.2. Punkt pomiarowy 1500 obr/min 25 N·m

Dla punktu pomiarowego 3000 obr/min 100 N·m uzyskano następujące parametry wykresu indykatorowego (Tabela 5).

Tabela 5. Parametry wykresu indykatrowego dla punktu pomiarowego 3000 obr/min, 100 N·m

3000 obr/min, 100 N·m				
	Prędkość obrotowa [obr/min]	Pmax [bar]	APmax [°OWK]	IMEP [bar]
Min	2990,3	80,62	12,7	10,61
Średnia	3000,3	84,6	14,61	10,83
Max	3008,9	91,72	16,7	11,24
CoV%	0,099	2,4	6,47	1,12



Rysunek 8. Punkt pomiarowy 3000 obr/min, 100 N·m

3.2. Obliczenia sprawności mechanicznej silnika

W założeniu podczas realizacji pracy planowano wyznaczenie sprawności ogólnej silnika oraz sprawności mechanicznej silnika. Na podstawie danych silnika oraz wyników pomiarów przeprowadzonych podczas indykowania można obliczyć sprawność ogólną oraz mechaniczną badanego silnika [5,6,8]. Uszkodzenie układu pomiaru zużycia paliwa wykluczyło określenie sprawności ogólnej silnika.

Przykład obliczenia sprawności mechanicznej przeprowadzone na podstawie wyników z punktu pomiarowego 2000 obr/min, 100 N·m (Tabela 6).

Tabela 6. Parametry wykresu indykatorowego dla punktu pomiarowego 2000 obr/min, 100 N·m

2000 obr/min, 100 N·m				
	Prędkość obrotowa [obr/min]	Pmax [bar]	APmax [°OWK]	IMEP [bar]
Min	1997,7	67,65	15,9	10,58
Średnia	2000,1	68,96	16,89	10,8
Max	2002,3	70,91	17,7	10,95
CoV%	0,05	1,03	2,89	0,689

Sprawność mechaniczna:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

P_e – ciśnienie efektywne,
 P_i – ciśnienie indykowane (IMEP).

Ciśnienie indykowane P_i (IMEP) otrzymaliśmy z przeprowadzonych badań, ciśnienie efektywne z kolei (P_e) musimy obliczyć wykorzystując do tego wzór na moc efektywną (N_e).

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_{ss} \cdot n}{\tau} \quad (2)$$

gdzie:

P_e – ciśnienie efektywne,
 V_{ss} – pojemność silnika,
 n – prędkość obrotowa silnika,
 τ – współczynnik obiegu (dla silników dwusuwowych $\tau = 1$ a dla silników czterosuwowych $\tau = 2$).

Po przekształceniu wzoru na moc efektywną, niżej przedstawiono wzór na ciśnienie efektywne.

$$P_e = \frac{N_e \cdot \tau}{V_{ss} \cdot n} \quad (3)$$

$$P_e = \frac{21 \cdot 10^3 \cdot 2}{0,001248 \cdot \frac{2000}{60}} = \frac{42000}{0,001248 \cdot 33,33} = 10,1 \text{ bar} \quad (4)$$

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \cdot 100\% = \frac{10,1}{10,8} \cdot 100\% = 93,5\% \quad (5)$$

Wyniki obliczeń dla wszystkich punktów pomiarowych zostały przedstawione w tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki obliczeń dla wszystkich punktów pomiarowych

Lp.	Prędkość obrotowa n [obr/min]	Moment obrotowy M [N·m]	Ciśnienie indykowane Pi (IMEP) [bar]	Ciśnienie efektywne Pe [bar]	Moc efektywna Ne [kW]	Sprawność mechaniczna η_m [%]
1	1500	25	3,74	2,4	3,8	65,1
2	1500	50	6,19	5,0	7,8	80,8
3	1501	75	9,02	8,0	12,5	88,8
4	1498	100	11,51	11,3	17,6	98,1
5	2001	25	3,78	2,4	5	63,6
6	2000	50	5,84	4,7	9,7	79,8
7	2000	75	8,61	7,5	15,7	87,7
8	2000	100	10,8	10,1	21	93,5
9	2501	25	3,69	2,5	6,4	66,7
10	2499	50	6,40	6,1	16,7	95,3
11	2500	75	8,63	7,5	19,6	87,3
12	2500	100	11,07	10,0	26	90,3
94	2990	25	3,62	2,9	9,1	80,8
14	3000	50	6,17	5,0	15,7	81,5
15	3001	75	8,47	7,5	23,5	88,9
16	3000	100	10,83	10,1	31,6	93,5
17	852	0	1,17	0,1	0,1	9,6

4. Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie zaawansowanych technologii pomiarowych, takich jak przetworniki piezoelektryczne i indykatory optyczne, znacznie poprawia precyzję i efektywność pomiarów podczas badań silników spalinowych. Przetworniki piezoelektryczne, dzięki swojej wysokiej czułości i szybkości reakcji umożliwiają dokładne monitorowanie ciśnienia oraz analizę cyklu roboczego silnika w czasie rzeczywistym. Układy rejestracji, takie jak oscyloskopy i rejestratory cyfrowe, odgrywają kluczową rolę w zbieraniu i analizie danych pomiarowych.

Technologie oferowane przez firmę AVL, w tym oprogramowanie IndiCom Mobile™, wykazują wysoką efektywność w analizie procesu spalania i optymalizacji cyklu roboczego silników. Szczególnie nowoczesne przetworniki ciśnienia oparte na kryształach ortofosforanu galu (GaPO_4) pokazują znaczące zalety, takie jak odporność na zakłócenia i wysoka precyzja pomiarów, co podkreśla ich wartość w zaawansowanej analizie układów napędowych pojazdów.

Na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń dotyczących ciśnienia w komorze spalania silnika tłokowego można sformułować następujące wnioski.

Wraz ze wzrostem momentu obrotowego, zarówno wartość maksymalnego ciśnienia (P_{\max}), jak i średniego ciśnienia indykowanego Pi (IMEP) w komorze spalania rosną. Kąt obrotu wału korbowego przy którym wystąpiło maksymalne ciśnienie (AP_{\max}) również wzrasta z wzrostem momentu obrotowego.

Sprawność mechaniczna i ogólna silnika zmieniają się w zależności od prędkości obrotowej i momentu obrotowego. W miarę wzrostu momentu obrotowego, sprawność mechaniczna wzrasta, co jest efektem malejącego udziału strat mechanicznych przy większym obciążeniu silnika.

Wartości CoV% dla ciśnienia maksymalnego i IMEP są zazwyczaj niskie, co wskazuje na dobrą powtarzalność wyników pomiarowych.

Podsumowując, przeprowadzone badania dostarczają cennych informacji na temat wpływu momentu obrotowego i prędkości obrotowej na parametry wykresu indykatorowego czynnika roboczego w komorze spalania silnika.

Bibliografia

1. Wajand J.A., Wajand J.T. Tłokowe silniki spalinowo średnio i szybkoobrotowe, 1993.
2. Wajand J.A., Silniki o zapłonie samoczynnym, 1983.
3. Wajand J.A., Pomiarzy szybkozmiennych ciśnień w maszynach tłokowych, 1974.
4. Wimmer A., Glaser J., Piernikarski D. Indykowanie silnika (AVL), 2004.
5. Rychter T., Teodorczyk A. Teoria silników tłokowych, 2006.
6. Kneba K., Makowski S. Zasilanie i sterownie silników, 2004.
7. Bernard D. Hsu. Diesel-Engine Combustion Analysis, 2001.
8. Sobieszkański M. Modelowanie procesów zasilania w silnikach spalinowych, 2000.
9. Sass, F. Geschichte des deutschen Verbrennungsmotorenbaus von 1860-1918 (Historia konstrukcji niemieckich silników spalinowych w latach 1860-1918).
10. Curie P., Curie J. Discovery of piezoelectricity, 1880.
11. Strona internetowa AVL. Dostępna online: <https://www.avl.com/en>