

OPIS STANOWISKA DO BADAŃ PROTOTYPU SILNIKA Z PNEUMATYCZNYM AKUMULATOREM ENERGII

MICHAŁ GŁOGOWSKI¹, ZBIGNIEW PAWELSKI²

Politechnika Łódzka

Streszczenie

W artykule przedstawiono zasadę działania silnika z pneumatycznym akumulatorem energii oraz stanowisko zbudowane w Katedrze Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej. Na stanowisku przebadano dwusuwowy silnik spalinowy o zapłonie iskrowym z prototypowym pneumatycznym akumulatorem energii, umieszczonym w jednym z cylindrów silnika. Pomiar położenia dodatkowego tłoka z akumulatora był realizowany czujnikiem laserowym zamocowanym na głowicy i został opisany w artykule. Zamieszczono również typowy przebieg ciśnienia w cylindrze i ruchu dodatkowego tłoka w pneumatycznym akumulatorze. Silnik spalinowy o zapłonie iskrowym w swojej historii był już wielokrotnie wyposażony w różnego rodzaju urządzenia mające poprawiać jego parametry, ale próby nie znalazły szerszego zastosowania. W przypadku pneumatycznego akumulatora energii przedstawionego w artykule widać szerokie spektrum możliwości otwierające się przed nową konstrukcją, dlatego artykuł ten będzie pierwszym z cyklu artykułów poświęconych badaniu i modelowaniu silnika o zapłonie iskrowym z pneumatycznym akumulatorem.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, pneumatyczny akumulator energii, czujnik laserowy, stopień sprężania dodatkowy tłok.

1. Wstęp

Tradycyjny układ korbowo-tłokowy w silnikach o zapłonie iskrowym ma stały stopień sprężania. Jednym z ograniczeń wartości stopnia sprężania jest możliwość wystąpienia zjawiska spalania stukowego, które nie może się pojawić przy maksymalnym obciążeniu silnika i głównie z tego powodu wartość stopnia sprężania dla przeciętnego silnika, mieści się w przedziale od 8 do 11. W silnikach o zapłonie iskrowym efektem stałego stopnia sprężania jest spadek sprawności ogólnej silnika wraz ze spadkiem obciążenia. Zmienny stopień sprężania był jednak pomijany przy konstruowaniu silników produkowanych seryjnie, choć w przyszłości może on stanowić kolejny etap rozwoju silników o zapłonie iskrowym.

¹ Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, e-mail instpoj@p.lodz.pl, tel. 42 636 22 65, fax 42 631 23 98

² Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, zbigniew.pawelski@p.lodz.pl, tel. 42 631 23 91

Istnieje bardzo wiele rozwiązań realizujących zmianę stopnia sprężania, wśród których należy wymienić silniki: MCE-5, SAAB SVC 1.6L czy Lotus Omnivore.

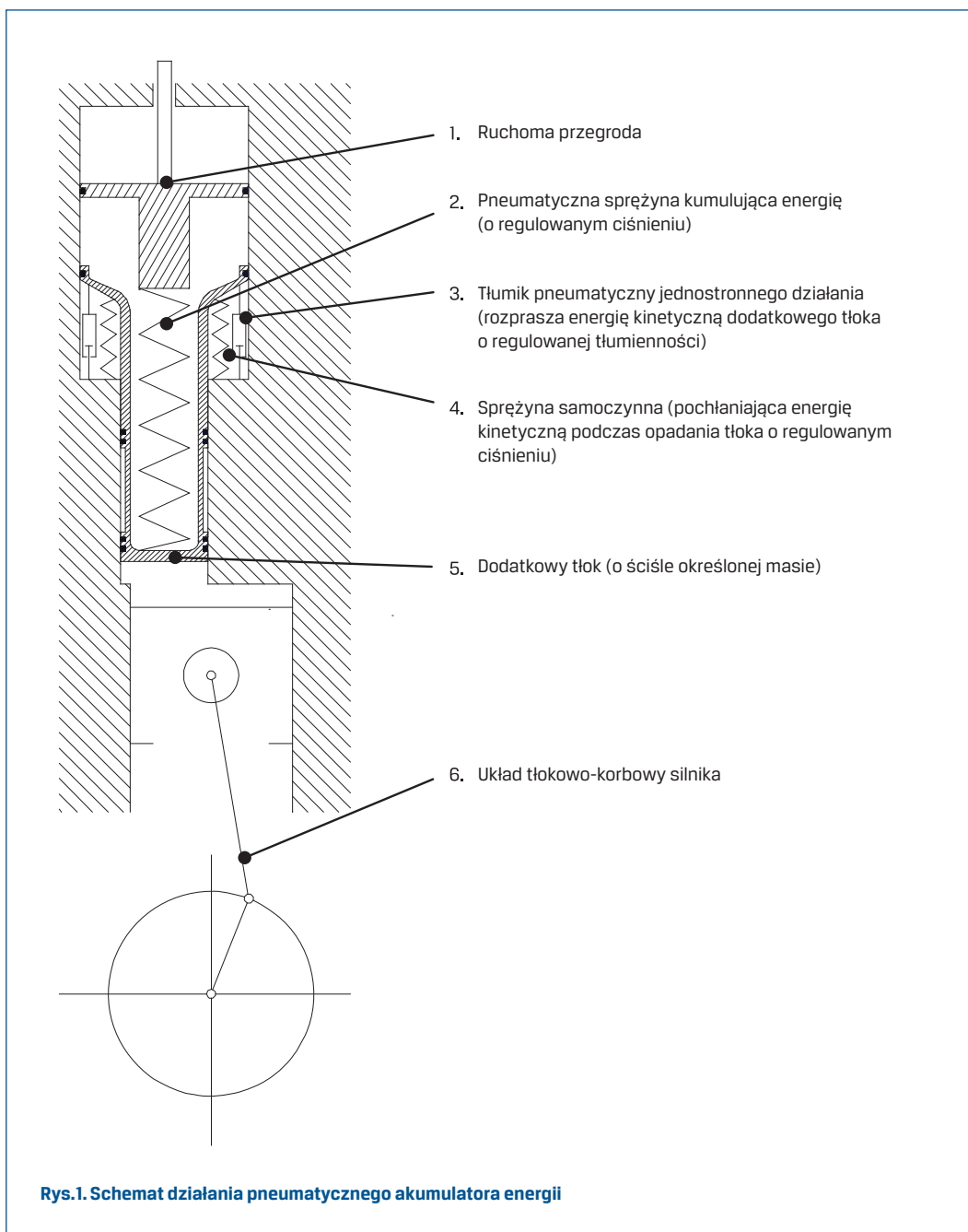
W artykule opisano rozwiązanie zgłoszone w Urzędzie Patentowym RP pod numerem P388876 [1], w którym elementem regulującym stopień sprężania w sposób samoczynny jest dodatkowy tłok, umieszczony w głowicy silnika, podparty sprężycie i wraz pozostałymi elementami stanowiący pneumatyczny akumulator energii. Proponowane rozwiązanie sprawdzono w silniku dwusuwowym przeprowadzając pomiary przebiegu ciśnienia w cylindrze dla kilku wybranych obciążeń przy wybranej prędkości obrotowej.

2. Zasada działania silnika z pneumatycznym akumulatorem energii

Na rys. 1. przedstawiono schemat budowy pneumatycznego akumulatora energii, pochodzący ze zgłoszenia patentu. Zgodnie ze znajdującym się tam opisem w cylindrze silnika (komorze spalania) po zamknięciu zaworów znajdują się dwie ruchome przegrody; pierwszą stanowi denko tłoka (6) związanego kinematycznie z silnikiem a drugą – powierzchnia czołowa dodatkowego tłoka (5). Zachowanie pierwszej przegrody opisuje kinematyka mechanizmu korbowo-tłokowego. O ruchu drugiej przegrody decyduje wypadkowa wszystkich sił działających na dodatkowy tłok: parcie czynnika wywołane przez ciśnienie w cylindrze silnika, parcie pneumatycznych sprężyn, siła bezwładności i siły tarcia.

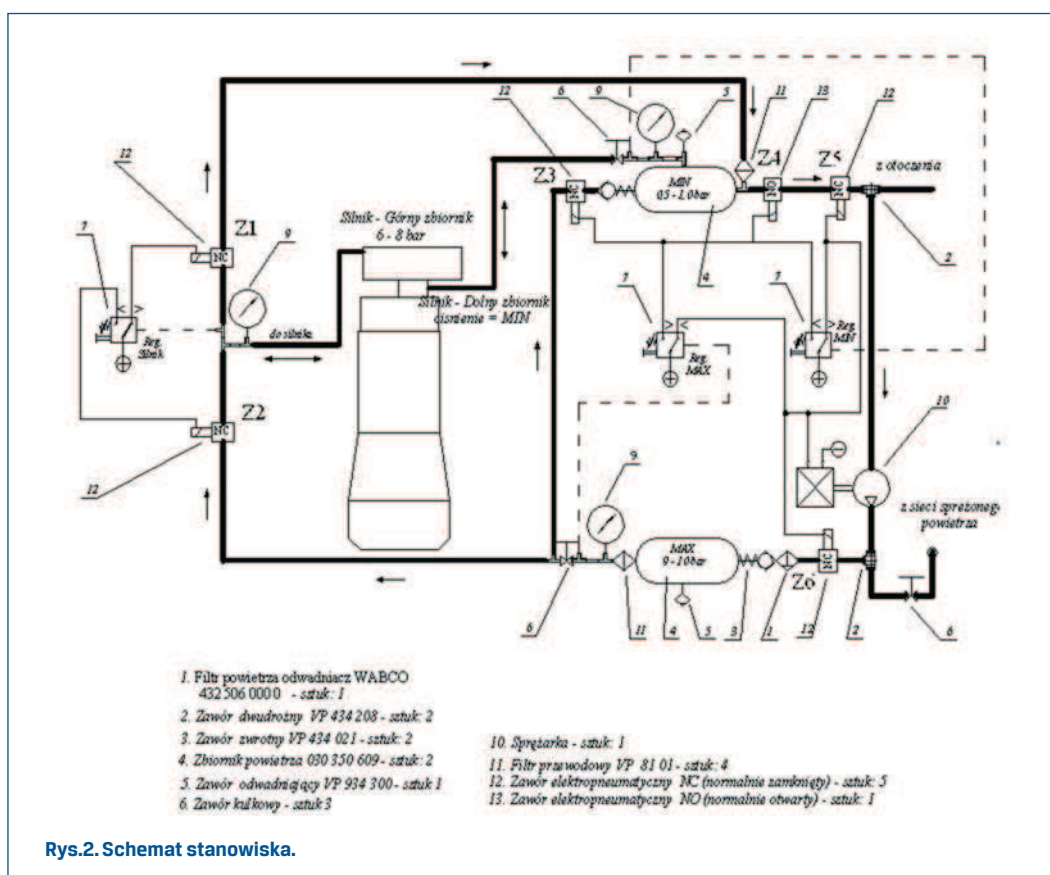
Zasada działania silnika z pneumatycznym akumulatorem jest następująca: w chwili, gdy ciśnienie w cylindrze silnika pokona napięcie wstępne w zbiorniku-sprężynie pneumatycznej (2), dodatkowy tłok (5) unosi się magazynując jednocześnie energię w zbiorniku sprężynie (2). Gdy tłok zajmie najwyższe położenie, wtedy zgromadzona energia sprężysta w „zbiorniku-sprężynie” osiąga największą wartość, a wszystkie siły działające na tłok, w tym siły bezwładności zrównoważą się. Rekuperacja energii zgromadzonej w „zbiorniku-sprężynie” następuje przy ruchu powrotnym tłoka (5). Wówczas opadający tłok dzięki energii ze „zbiornika-sprężyny” podtrzymuje objętość w komorze spalania na stałym poziomie. Kontrolę osiadania tłoka w dolnym położeniu zapewnia pneumatyczna sprężyna jednostronnego działania (4), oraz tłumik jednostronnego działania (3). Przedstawiona modyfikacja cyklu silnika, która dotyczy końca suwu sprężania i początku suwu rozprężania wymaga od akumulatora pneumatycznego w postaci „zbiornika-sprężyny” zdolności adaptacyjnych, takich by cykl mógł być realizowany w dużym zakresie prędkości obrotowych i obciążeń. Uzyskiwane jest to przez zmianę sztywności sprężyny pneumatycznej (2) na dwa sposoby: zmianę objętości „zbiornika-sprężyny” ruchomą przegrodą (1) oraz przez zmianę ciśnienia panującego w zbiorniku.

Zastosowane rozwiązanie daje: małą masę dodatkowego układu, łatwy sposób sterowania oraz stosunkowo zwartą i prostą konstrukcję.



3. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko kontrolno pomiarowe, które powstało podczas realizacji pracy [2] przedstawiono schematycznie wraz z opisem poszczególnych elementów, tylko części zasilającej pneumatyczny akumulator energii na rys. 2. Zbudowany układ umożliwił pełną regulację ciśnienia w sposób elektroniczny z pulpitu sterującego w zakresie od 0,1 MPa do 1 MPa barów. Regulacji podlegały dwa ciśnienia: zasilające sprężynę pneumatyczną (2) oraz sprężynę pneumatyczną (4).

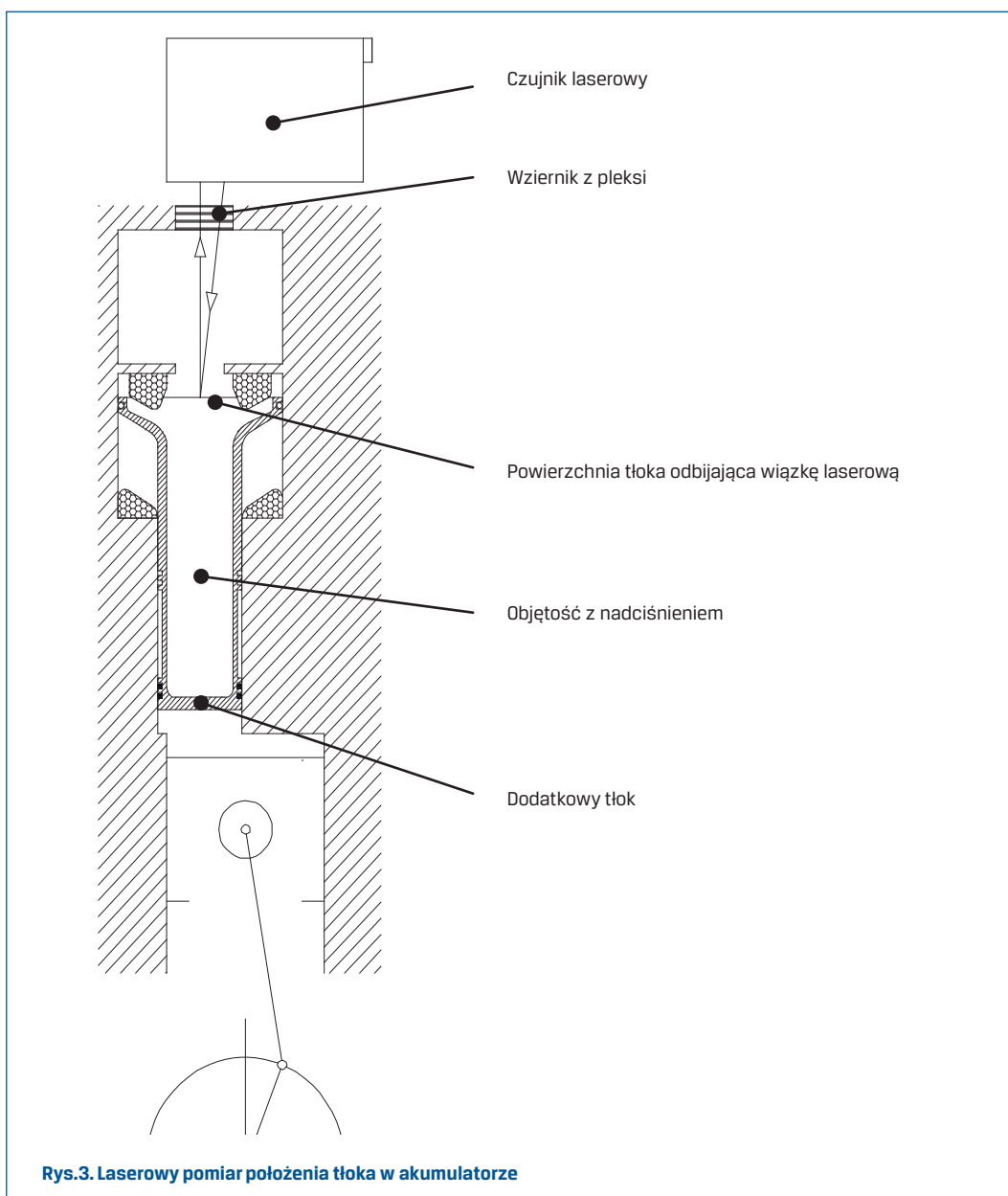


4. Laserowy pomiar położenia dodatkowego tłoka

Położenie tłoka w głowicy (5) dwusuwowego silnika mierzono laserowym przetwornikiem położenia Baumer OADM 2016460/S14F o zakresie pomiarowym 30 -130 mm, częstotliwości własnej 1,1 kHz i błędzie liniowości wskazań 0,2 mm.

Schemat pomiaru jest przedstawiony na rys. 3. Pomiar odbywa się w odizolowanej od otoczenia z powodu panującego w niej nadciśnienia przestrzeni pomiarowej, w której

przemieszcza się dodatkowy tłok. Przechodząc przez wziernik wiązka laserowa, odbija się od powierzchni pomiarowej a następnie powraca do czujnika odchylona o pewien kat, który jest miarą odległości od czujnika. Pomiar dokonywany w taki sposób jest obarczony błędami wynikającymi z załamania światła na powierzchniach wziernika, ale przeprowadzone próby pozwoliły oszacować błąd i przy pomiarze różnicowym można go pominąć bez



Rys.3. Laserowy pomiar położenia tłoka w akumulatorze

szkody dla samych pomiarów. W całej przestrzeni pomiarowej znajdowały się drobiny oleju smarującego i chłodzącego układ tłok – cylinder. Osadzał się on również na powierzchni odbijającej wiązkę pomiarową i wzierniku z pleksi, co było przyczyną stałej kontroli, a przy zaniku sygnału, przerw w pomiarze. Podczas tych przerw usuwano olej ze wszystkich powierzchni jednocześnie weryfikując stan techniczny pneumatycznego akumulatora.

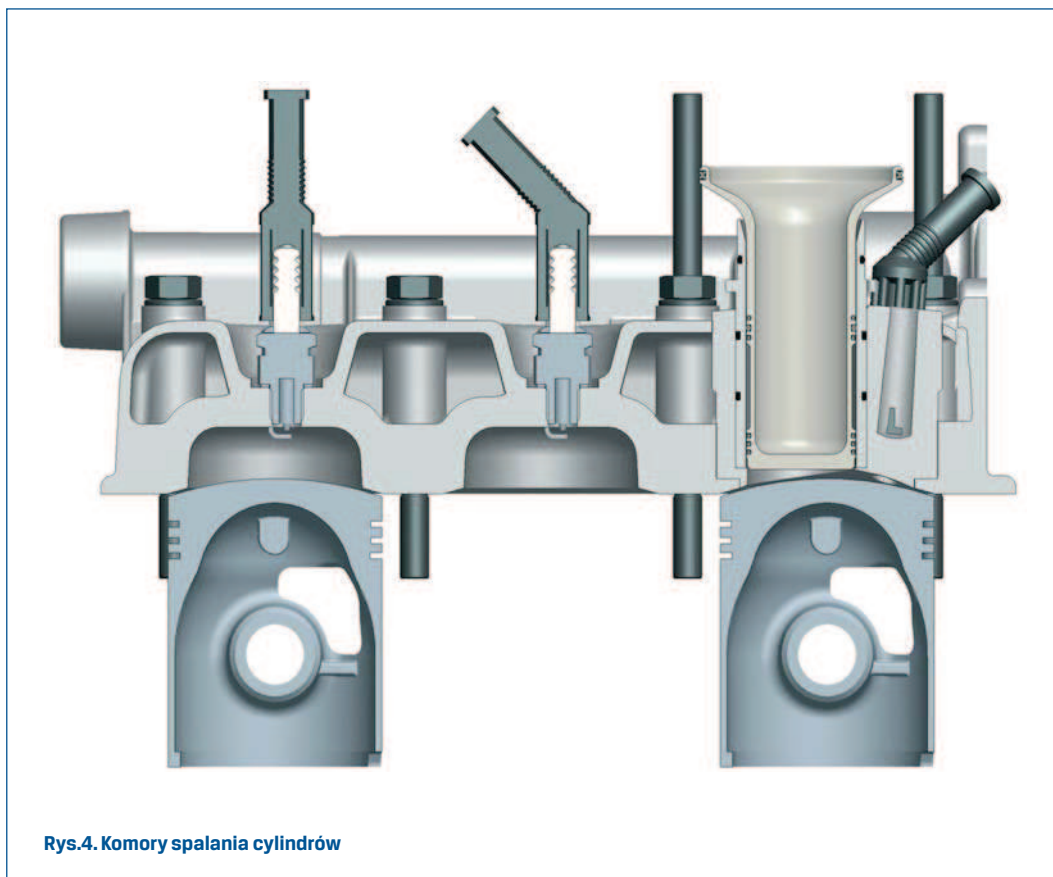
Dodatkowym problemem okazały się drgania generowane przez silnik. Powodowały zjawisko interferencji, które usunięto przez zastosowanie specjalnej konstrukcji mocującej czujnik do głowicy. Problem ten można rozwiązać na dwa sposoby: w pierwszym należy zamocować go bardzo sztywno, ale istniało niebezpieczeństwo uszkodzenia czujnika, a w drugim zamocować czujnik elastycznie z tłumikiem. W badaniach prototypu zastosowano ten drugi sposób ze względu na użyty czujnik, który miał znaczące ograniczenia dopuszczalnych wartości przyspieszeń, jakim może być poddany.

W drodze doświadczeń wybrano górną powierzchnię tłoka na element odbijający wiązkę laserową, gdyż w tej części nie gromadził się olej. Wadą tego wyboru jest mała szerokość powierzchni pomiarowej, co wymaga precyzyjnego ustawienia czujnika i nie uwzględnione są odkształcenia własne tłoka. Po analizie wszystkich problemów związanych z tym pomiarem, stwierdzono że, nowy czujnik powinien mieć częstość próbkowania, co najmniej 15 kHz i dokładność rzędu 0,1 mm. Dopiero zastosowanie takiego czujnika odpornego na duże wartości przyspieszeń i sztywno zamocowanego do głowicy zapewni właściwą dokładność pomiaru.

5. Metodyka badań

Założeniem badań był warunek, że wartość maksymalnego ciśnienia nie przekracza wartości ciśnienia występującego w silniku podczas pełnego otwarcia przepustnicy.

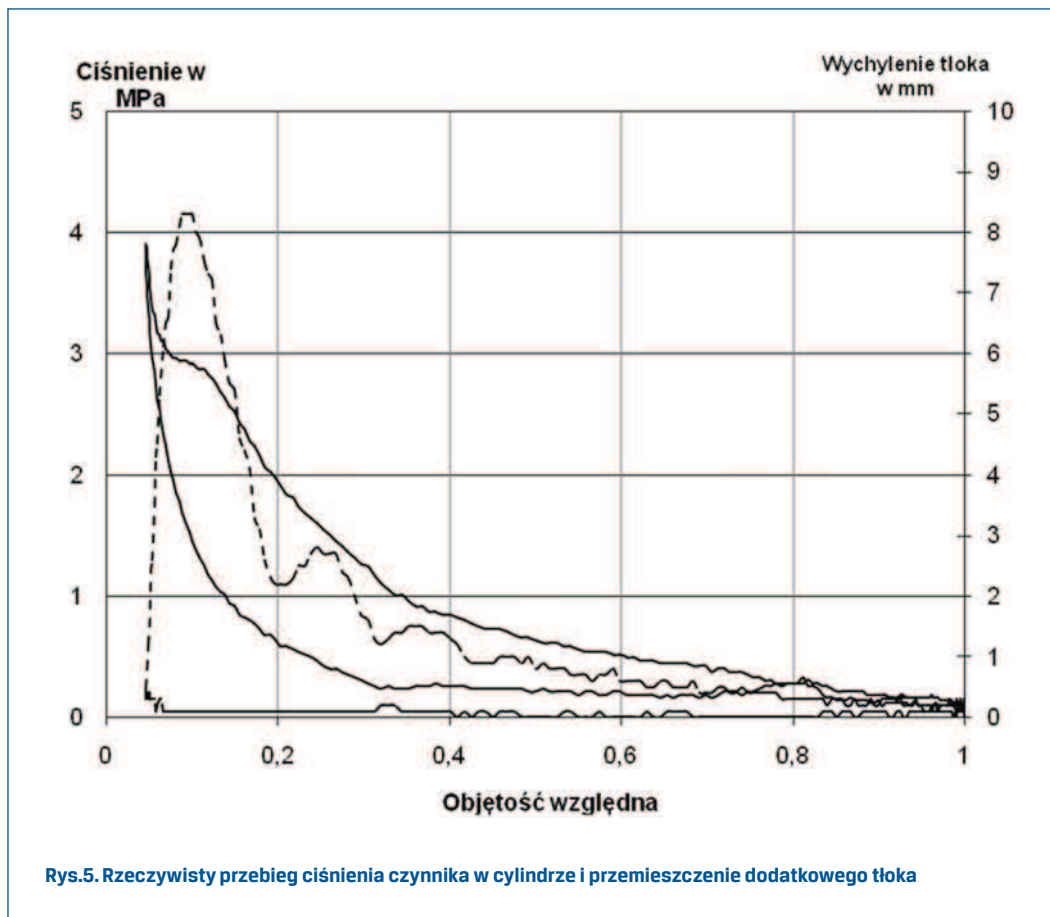
W pierwszej fazie badań określono tę wartość i wyniosła ona ok. 4.2 MPa. Następnie wyznaczono parametry geometryczne oraz podparcia dodatkowego tłoka. Dokonano także kilkudziesięciu pomiarów przebiegu ciśnienia w zmodyfikowanym cylindrze pod kątem udoskonalenia konstrukcji akumulatora. Po tych zabiegach przeprowadzono pomiar porównawczy w silniku dwusuwowym. Badano równocześnie przebieg ciśnienia w dwóch skrajnych cylindrach, których komory spalania przedstawiono na rys. 4. Pozwoliło to na bezpośrednie porównanie otrzymanych wyników obu cylindrów w wybranych zakresach prędkości obrotowych i obciążeń. Do analizy wybrano tylko te punkty pracy, dla których nie było zakłócone przepłukanie dwusuwowego silnika, tworzące asymetrię w zasilaniu obu cylindrów. Ponadto, badano wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu i masy dodatkowego tłoka w akumulatorze na przebieg ciśnienia w cylindrze.



6. Przykładowy wynik pomiaru dla silnika dwusuwowego

Na rys. 4 przedstawiono przykładowy pomiar przemieszczenia dodatkowego tłoka (linia przerywana), nałożony na przebieg ciśnienia (linia ciągła) w cyklu zamkniętym w zależności od objętości względnej, wykonany na dwusuwowym silniku o zapłonie iskrowym o następujących parametrach: objętość skokowa pojedynczego cylindra 332 cm^3 , kąt otwarcia przepustnicy ok. 15%, prędkość obrotowa 1400 obr/min, maksymalny stopień sprężania ok. 20.

Przedstawiony na rys. 5 rzeczywisty przebieg ciśnienia w cylindrze wyraźnie odbiega od standardowego przebiegu ciśnienia dla silnika dwusuwowego o zapłonie iskrowym. Bez wątpliwości jest to spowodowane działalnością dodatkowego tłoka umieszczonego w komorze spalania. Ruch dodatkowego tłoka w końcowej fazie był w przybliżeniu ruchem o gwałtowniejszej amplitudzie z widocznym logarytmicznym dekrementem tłumienia, co świadczyło o poprawnym działaniu układu rozpraszającego energię kinetyczną opadającego tłoka (5),



Rys.5. Rzeczywisty przebieg ciśnienia czynnika w cylindrze i przemieszczenie dodatkowego tłoka

sprężyny (4) i tłumika (3). Na rys. 5 wykres ruchu dodatkowego tłoka (linia przerywana) jest wyraźnie pofałdowany. Jest to rezultat niedostatecznej częstości pomiarowej laserowego czujnika położenia, który przy większych prędkościach „gubił sygnał”.

Sam pomiar ciśnienia był również obarczony zakłóceniami natury elektrycznej szczególnie uwidaczniającymi się w niskim zakresie wartości ciśnień. Pomimo to widać charakterystyczną dla rozwiązania „półkę”. Jest to miejsce, w którym następuje rekuperacja energii – chwilowo nie zmienia się znacząco objętość a skutkiem jest utrzymywanie się ciśnienia na stałym poziomie (stąd nazwa).

7. Podsumowanie

Konstrukcja pneumatycznego akumulatora okazała się na tyle trwała, że umożliwiła badania wstępne. Stanowisko badawcze rozbudowano do stanu umożliwiającego pełną kontrolę wszystkich parametrów silnika i akumulatora energii. Wstępnie dobrano parametry akumulatora: masę i wartości ciśnień w sprężynach podpierających dodatkowy tłok oraz przeanalizowano ich wpływ na przebieg ciśnienia cylindrze w końcu suwu sprężania i na początku suwu rozprężania. W trakcie tych badań stwierdzono ponad 30% wzrost sprawności silnika przy częściowych obciążeniach i brak objawów spalania stukowego pomimo bardzo dużego stopnia sprężania (21). Zakłócenia w przepłukaniu silnika, uniemożliwiły badania w zakresach przekraczających 50% kąta otwarcia przepustnicy. Ustalono ponadto, że w końcowej fazie opadania tłoka (5) występujące w sprężynie (4) ciśnienie, wielokrotnie przekraczało wartość ciśnienia zasilającego sprężynę (2), co świadczyło o bardzo dużych wartościach sił masowych. Najbardziej kłopotliwym okazał się pomiar położenia dodatkowego tłoka realizowany czujnikiem laserowym. Zbyt niska częstość próbkowania tego czujnika uniemożliwiła analizę termodynamiczną przy większych prędkościach obrotowych. Dalsze badania będą kontynuowane na silniku czterosuwowym z czujnikiem laserowym o wymaganych parametrach w pełnym zakresie obciążeń.

Literatura

- [1] GŁOGOWSKI M.: *Zgłoszenie patentowe nr P388876 z dnia 27-08-2009 r.*
- [2] Sprawozdanie(merytoryczne) z wykonania projektu badawczego „własnego” N512 012 31/1068 „Tłokowy silnik spalinowy o regulowanej objętości spalania oraz wewnętrznej akumulacji i rekuperacji energii”
- [3] OSIŃSKI Z.: *Teoria drgań* Warszawa PWN 1980 r.
- [4] WIŚNIEWSKI S.: *Termodynamika techniczna* Warszawa PWN 1987 r.
- [5] KORDZIŃSKI CZ. POGORZELSKI, J.: *Małe silniki spalinowe* WKŁ1982 r.
- [6] JĘDRZEJOWSKI J.: *Mechanika układów korbowych* WKŁ 1987 r.