

POLITECHNIKA OPOLSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

KATEDRA POJAZDÓW

Rozprawa doktorska - Streszczenie

mgr inż. Dawid Drabik

**STEROWANIE EFEKTYWNYM STOPNIEM SPRĘŻANIA W SILNIKU
O ZAPŁONIE ISKROWYM**

Promotor:

prof. dr hab. inż. Jarosław Mamala

Promotor pomocniczy:

dr inż. Krzysztof Prażnowski

Opole 2023

1. Wprowadzenie

Pomimo zapowiadanych ograniczeń przez Komisję Europejską, dotyczących całkowitego zakazu produkcji silników spalinowych od roku 2035, to jednostki napędowe oparte o silniki spalinowe są nadal najpopularniejszym źródłem mocy w układach napędowych samochodów. Wymaga to jednak ciągłej modyfikacji ich konstrukcji oraz sposobu sterowania. Dlatego ostatnie lata to ciągła próba poprawy wskaźników pracy silnika głównie w dziedzinie związanej z ochroną środowiska, czego efektem jest powszechnie stosowanie systemów (układów) oczyszczania spalin, reaktorów katalitycznych oraz zaawansowanych systemów sterowania wtryskiem paliwa.

Jednym ze sposobów niestandardowych nad którymi pracuje się w wielu ośrodkach badawczych to poprawa osiągnięć silnika spalinowego przez modyfikację parametrów obiegu pracy. W tym zakresie między innymi ogranicza się występowanie strat pompowania ładunku paliwowo-powietrznego do cylindra podczas niskich prędkości obrotowych i związane z tym obniżenia sprawności ogólnej silnika spalinowego czy jego zmiana stopnia sprężania podczas pracy skutkująca zwiększeniem sprawności ogólnej silnika spalinowego. Zdaniem autora niniejszej rozprawy doktorskiej, nadal istnieją możliwości poprawy wybranych wskaźników pracy silnika spalinowego. Analizowany problem ma związek z najbardziej charakterystyczną cechą tłokowego silnika spalinowego jaką jest cykliczna zmiana objętości czynnika roboczego w cylindrze. Ograniczenie strat pompowania, poprawa współczynnika napełnienia cylindra czy zmiany stopnia sprężania to właśnie główne obszary poruszane w pracy. Wpływ tych zjawisk na maksymalne ciśnienie w komorze spalania i przebiegi ciśnienia w cylindrze silnika spalinowego sprawiają, że są to zagadnienia bardzo istotne w trakcie opracowania nowych konstrukcji silników.

W przewarżającej liczbie konstrukcji silników spalinowych zdefiniowany stopień sprężania jest wartością stałą. Wartością oczekiwaną jest dostosowanie stopnia sprężania do chwilowych warunków obciążenia silnika spalinowego, zabudowanego w układzie napędowym samochodu. W pracy przyjęto założenie upraszczające, że suw sprężania jest realizowany według przemiany izotermicznej (prawo Boyl'a Mariotta). Wówczas przemiany zachodzące w cylindrze silnika spalinowego można opisać zależnością poniżej przy założeniu niezmienności temperatury:

$$V_c * p_d = V_k * p_{max} = const.$$

gdzie:

p_{max} - maksymalne ciśnienie podczas sprężania w GMP, [MPa],

p_d - ciśnienie podczas sprężania w DMP, ciśnienie w przy otwartych zaworach to ciśnienie w kolektorze dolotowym [MPa],

V_k - objętość komory spalania w GMP,

V_c - objętość całkowita w DMP.

Po przekształceniach powyższe wyrażenie można zapisać w inny sposób, dzieląc obustronnie równanie przez V_k i p_d , otrzymując wzór:

$$\frac{V_c}{V_k} = \frac{p_{max}}{p_d} = const.$$

Pierwsza część równania po lewej stronie to wprost stopień sprężania, a po prawej wyrażenie opisujące przyrost ciśnienia w cylindrze w wyniku realizacji suwu sprężania. Określono, że ciśnienie w kolektorze dolotowym odpowiada ciśnieniu w cylindrze podczas początku suwu sprężania dla jeszcze otwartych w cylindrze zaworów dolotowych. Natomiast ciśnienie maksymalne wynika bezpośrednio z ciśnienia otrzymanego w komorze spalania podczas suwu sprężania.

Dlatego w pracy przeniesiono powyższy tok analizy i zaproponowano określenie efektywny stopień sprężania, który odnosi się bezpośrednio do ilorazu czynnej objętości skokowej przy zamkniętych zaworach dolotowych do objętości komory spalania, względnie do ilorazu otrzymanych ciśnień, i co ważne nie jest to zależne od parametrów konstrukcyjnych silnika czy innych parametrów mających wpływ na maksymalne ciśnienie sprężania. Taki opis precyzyjnie odnosi się do nowoczesnych silników spalinowych z układem zmiennych faz rozrządu czy układami doładowania.

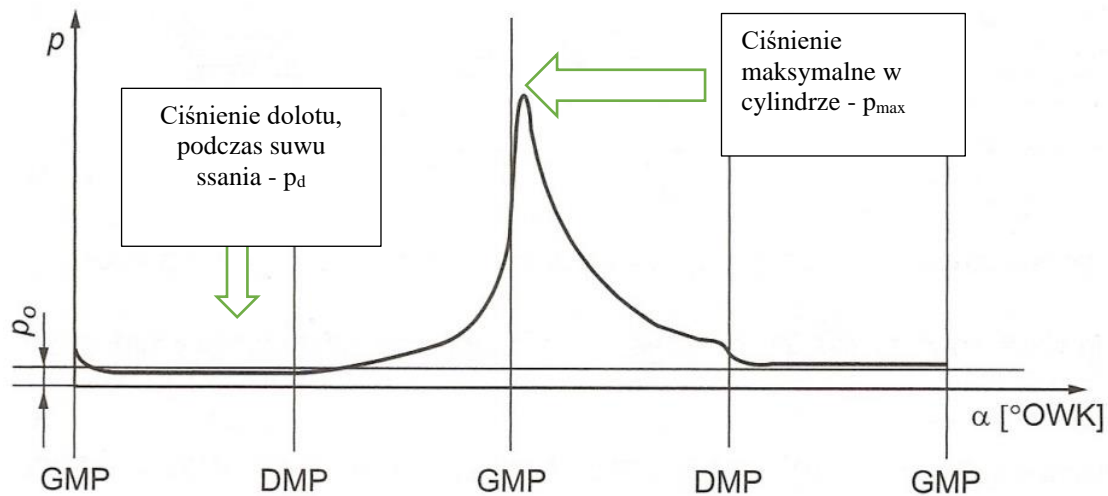
Zatem możemy zdefiniować efektywny stopień sprężania jako stosunek ciśnienia maksymalnego w komorze sprężania do ciśnienia w kolektorze dolotowym podczas procesu napełnienia:

$$\varepsilon_{ev} = \frac{p_{max}}{p_d}.$$

gdzie;

ε_{ev} - efektywny stopień sprężania, [-].

Cykl pracy silnika o zapłonie iskrowym na otwartym wykresie indykatorowym został przedstawiony na rysunku 1, z określonymi punktami wpływającymi na współczynnik efektywnego stopnia sprężania.



Rys. 1. Przebieg ciśnienia silnika spalinowego.

2. Cel i teza pracy

Celem niniejszej pracy jest ocena możliwości zastosowania sterowania efektywnym stopniem sprężania w silniku o zapłonie iskrowym w aspekcie poprawy jego wskaźników pracy. Sterowanie współczynnikiem efektywnego stopnia sprężania, nie jest zagadnieniem powszechnie stosowanym i polega na aktywnym oddziaływaniu na proces napełnienia cylindra w suwie ssania i sprężania, przez zmianę czynnej objętości sprężania mającej wpływ na przyrost ciśnienia sprężania w cylindrze. Zatem efektywność w tym ujęciu odnosi się do procesu zamiany ilości energii chemicznej zawartej w paliwie podczas jednego cyklu pracy silnika spalinowego w taki sposób, aby uzyskać jak najwyższe wskaźniki pracy.

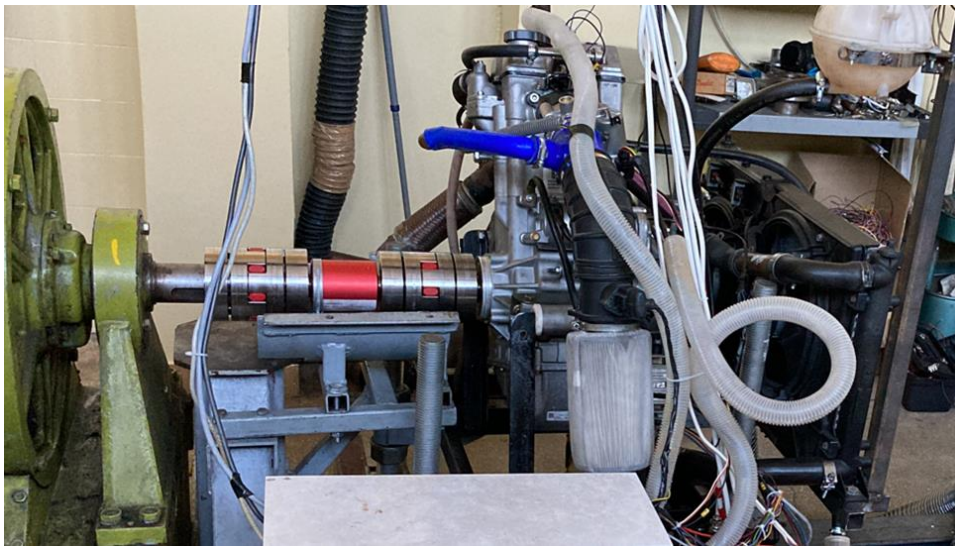
Założony cel główny pracy pozwolił na sformułowanie tezy rozprawy, że:

„Istnieje możliwość wpływu na wskaźniki pracy silnika spalinowego przez zmianę procesu sterowania napełnianiem cylindra wpływającym na efektywny stopień sprężania, zdefiniowanego jako stosunek czynnej objętości sprężania do stałej objętości komory spalania w cylindrze, podczas suwu sprężania.”

3. Przebieg badań własnych

Na początku realizacji pracy przeprowadzono szereg badań identyfikacyjnych, w których możliwe było określenie ciśnień występujących w cylindrze podczas czterech suwów pracy tłoka. Następnie stworzono symulacyjny model matematyczny silnika

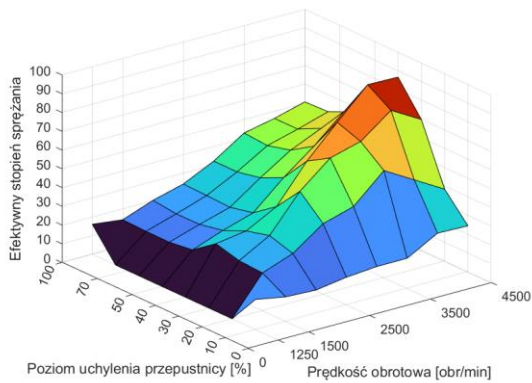
wykorzystując program Matlab i biblioteki Simulink. Założeniem modelu było stworzenie otwartych wykresów indykatorowych badanego jednocylindrowego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym, porównywalnych ze wskaźnikami otrzymanych podczas badań identyfikacyjnych na hamowni silnikowej. Jednostka napędowa wykorzystana do badań identyfikacyjnych to jednocylindrowy silnik spalinowy o zapłonie iskrowym charakteryzujący się wtryskiem pośrednim z układem dwóch wałków rozrządu. Przygotowane stanowisko badawcze (rys. 2) umożliwiło odpowiednio: rejestrację wyników i ich późniejszą analizę, wpływające na procesy zachodzące w cylindrze, badania eksperymentalne oraz dalszą realizację pracy.



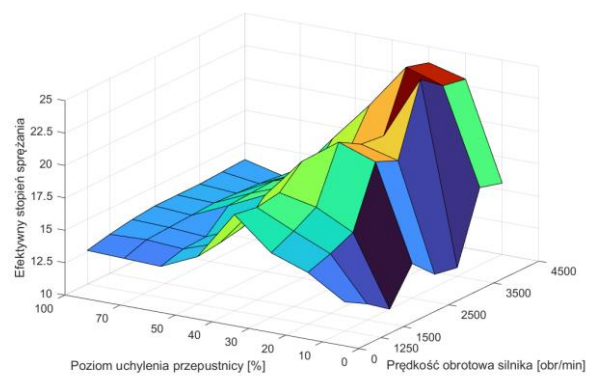
Rys. 2. Stanowisko badawcze wraz z zainstalowanym silnikiem spalinowym marki z pojazdu Polaris typ 570.

Badania eksperymentalne i symulacyjne zostały podzielone na kilka etapów. Badania realizowane na hamowni silnikowej dotyczyły wyznaczenia podstawowych wskaźników pracy jednocylindrowego silnika spalinowego w postaci ciśnienia sprężania, ciśnienia spalania, masy powietrza, prędkości obrotowych wału korbowego silnika czy jego momentu obrotowego. Wskaźniki pracy wyznaczono dla dwóch stanów pracy silnika spalinowego niepracującego i pracującego. Wykonanie badań umożliwiło wykreślenie w kolejnym etapie jego charakterystyk prędkościowych czy charakterystyk ogólnych. Rysunek 3 przedstawia charakterystykę efektywnego stopnia sprężania dla silnika z zapłonem mieszanki paliwowo-powietrznej i silnika niepracującego. Przeprowadzona analiza numeryczna pracy silnika spalinowego oraz opracowany model do badań symulacyjnych, umożliwił modelowanie procesu pracy jednostki napędowej z układem do sterowania przyrostem ciśnienia wewnątrz cylindra podczas suwu sprężania mającego wpływ na otrzymany finalny efektywny stopień sprężania.

a)

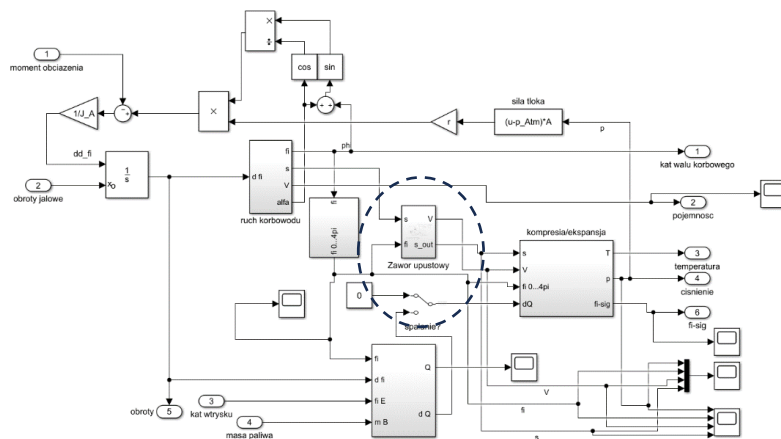


b)



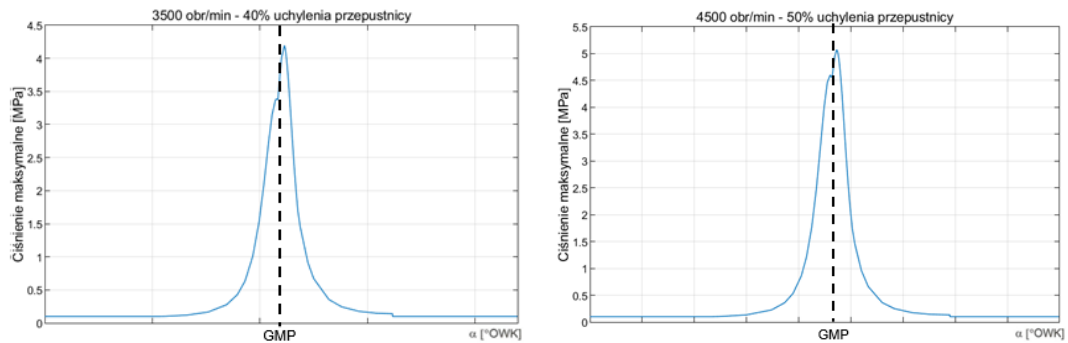
Rys. 3. Charakterystyka ogólna silnika spalinowego przedstawiająca efektywny stopień sprężania w zależności od poziomu uchylenia przepustnicy i prędkości obrotowej silnika: a) silnik pracujący, b) silnik niepracujący

Praca modelu symulacyjnego zamodelowana została w bloku „silnik spalinowy”. Część ta składała się z danych wejściowych. Dane te były przetwarzane przez kolejne bloki programu, takie jak: ruch korbowodu, spalanie oraz kompresja i ekspansja. Blok programu z zamodelowanym zaworem upustowym został przedstawiony na rysunku 4. W ten sposób możliwe było zamodelowanie pracy silnika spalinowego i przedstawienie otwartych wykresów indykatorowych. Otrzymane wskaźniki pracy silnika spalinowego z dużą dokładnością odzwierciedlają rzeczywiste wartości wskaźników zarejestrowanych w badaniach na hamowni silnikowej. Przeprowadzone symulacje potwierdziły, że przyjęte parametry procesu symulacji odzwierciedlają rzeczywiste wskaźniki pracy silnika spalinowego. Uzyskane wyniki były bardzo zbliżone do zmierzonych wartości podczas fizycznych pomiarów badanego silnika. Ciśnienia maksymalne odpowiadały realnym wartościom, występowała również powtarzalność wyników.



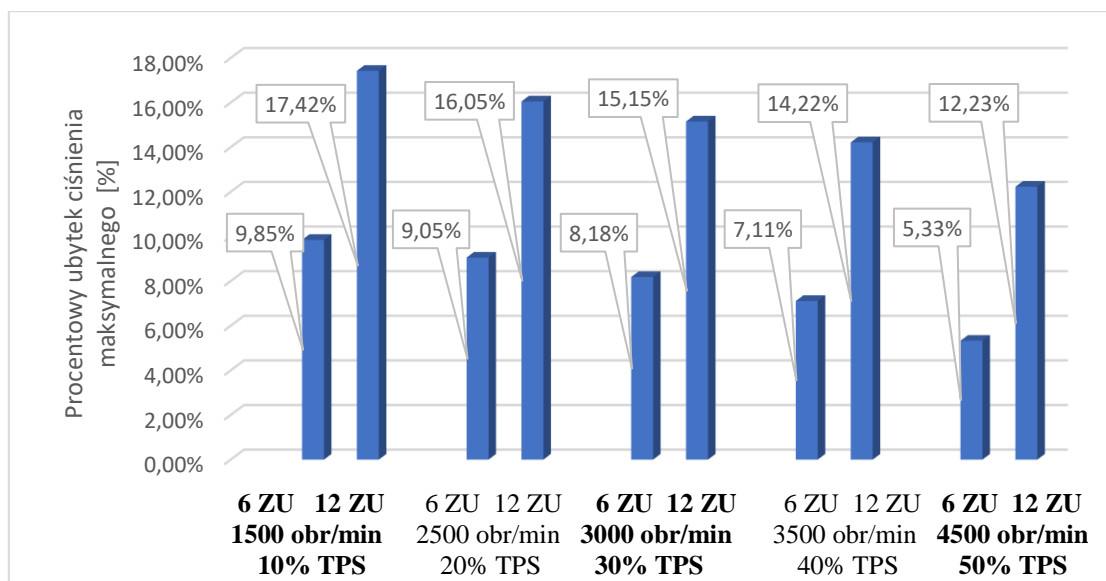
Rys. 4. Model silnika spalinowego z dodanym blokiem zaworu upustowego

Wygenerowane otwarte wykresy indykatorowe w wyniku użytej symulacji komputerowej przedstawione zostały na rysunku 5.



Rys. 5 Otwarte wykresy indykatorowe wygenerowane z symulacji komputerowej

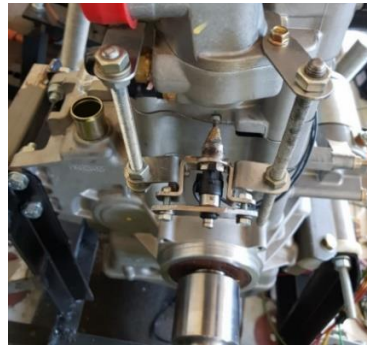
W dalszej części badań symulacyjnych dokonano modelowania procesu sterowania ciśnieniem sprężania. Zamknięcie zaworu upustowego skutkowało symulacją normalnych warunków pracy, tak jak oryginalny silnik spalinowy. Następnie zawór otwierano, równocześnie z zamknięciem zaworów dolotowych odpowiednio o określoną ilość sygnałów, gdzie 1 sygnał odpowiadał 10 stopniom obrotu wału korbowego. Określono dwa zakresy pracy zaworu upustowego, kolejno 6 i 12 sygnałów pracy zaworu upustowego. Zestawienie względnego ubytku ciśnienia maksymalnego dla różnych zakresów pracy zaworu upustowego oraz różnych prędkości obrotowych i uchyień przepustnicy, przedstawione zostało na rysunku 6.



Rys. 6. Procentowe zestawienie ubytku ciśnienia maksymalnego w cylindrze

Po przeprowadzonych badaniach symulacyjnych przystąpiono do badań eksperymentalnych. Zakres badań obejmował pomiary ciśnienia wewnątrz cylindra

z zaprogramowanym układem kontroli ciśnienia. Silnik spalinowy z zmodyfikowaną głowicą, w której wykonano dodatkowy otwór o średnicy 10 mm wyposażono w układ do zmiany stopnia sprężania oparty na wtryskiwaczu paliwa, przedstawiony na rysunku 7.

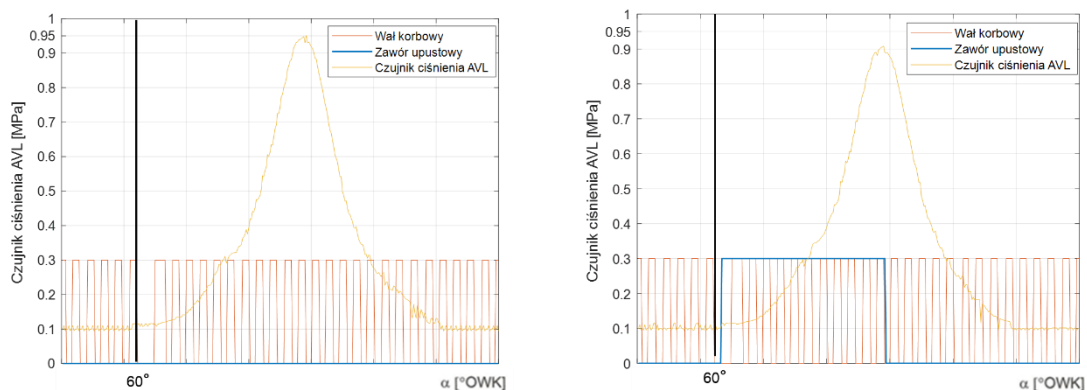


Rys. 7. Zawór upustowy na bazie wtryskiwacza zainstalowany w głowicy

Celem zastosowania takiej konstrukcji było umożliwienie regulacji ciśnienia sprężania w cylindrze, a badania te wykonano na silniku spalinowym niepracującym. Rysunek 8 przedstawia porównanie dwóch otwartych wykresów indykatorowych dla różnych poziomów otwarcia zaworu upustowego.

$P_{Max} = 0,95 [MPa]$, $P_{MAP} = 0,06 [MPa]$, $E_{ev} = 15,83$

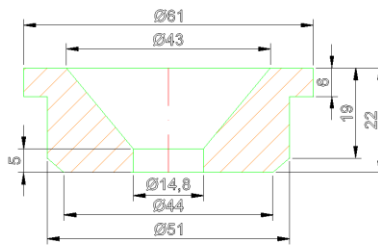
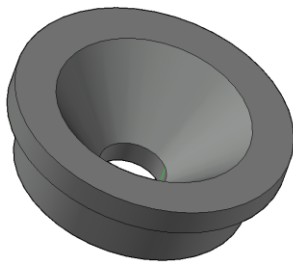
$P_{Max} = 0,90 [MPa]$, $P_{MAP} = 0,06 [MPa]$, $E_{ev} = 15$



Rys. 8. Otwarte wykresy indykatorowe dla: 1500 obr/min , 20 % TPS, 0 Sygnałów zaworu upustowego i 1500 obr/min , 20 % TPS 12 sygnałów zaworu upustowego.

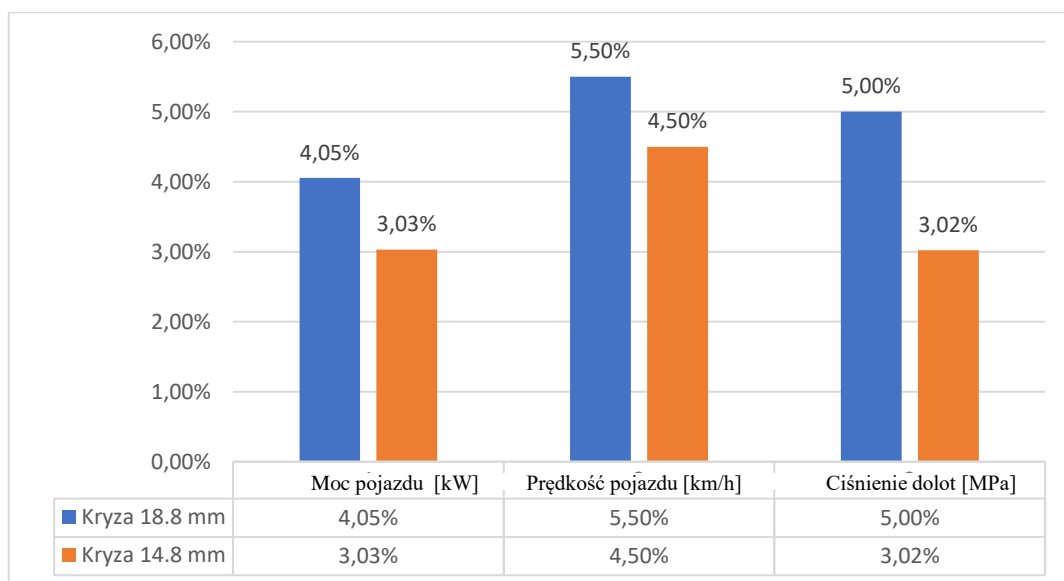
Następnie wykonano badania ograniczenia strat pompowania w silniku spalinowym przez modyfikację przepustnicy. Przepustnica jako klasyczne rozwiązanie służące regulacji przepływu powietrza do cylindra posiada wady, takie jak nieregularny i dławiący przepływ podczas niskich prędkości obrotowych. W celu przepływu wykonano w układzie dolotowym silnika spalinowego dodatkowe kryzy, które zamontowano w miejsce przepustnicy. Kryzy miały kształt stożka, dzięki takiej konstrukcji kryzy zaprezentowanej na rysunku 9, przepływ powietrza byłby płynniejszy i możliwe byłoby zmniejszenie dławienia na przepływie. Rozmiar

średnicy stożka został dobrany, aby odpowiadać przepływowi powietrza przy uchyleniu przepustnicy w trzech pozycjach 10 %, 20 % i 30%.



Rys. 9. Schemat kryzy o średnicy 14.8 mm

Procentowe zestawienie zmiany wskaźników pracy pojazdu takich jak prędkość pojazdu, moc pojazdu i ciśnienie w kolektorze dolotowym, przeprowadzone na hamowni silnikowej i podwoziowej z użyciem realnego pojazdu. Pojazd ten był wyposażony w ten sam typ silnika, który był zamontowany na hamowni silnikowej. Przedstawione w formie wykresu słupkowego na rysunku 10, odnoszą się do badań na hamowni podwoziowej. Na wykresie porównane zostały dwa rodzaje kryz dolotowych dla pojazdu z silnikiem spalinowym oryginalną przepustnicą i zastosowanymi kryzami. Począwszy od prędkości pojazdu, która wzrosła średnio o 5 % dzięki zastosowaniu kryzy dolotowej, a kończąc na mocy w układzie napędowym, która również uległa poprawie odpowiednio o 4,05 % dla kryzy o średnicy 18.8 mm i 3,03 % dla kryzy o średnicy 14,8 mm. Należy zauważyć, że zastosowanie kryz dolotowych poprawia wybrane wskaźniki trakcyjne układu napędowego pojazdu, procentowy przedział poprawy wynosił od 3.02 % do 5,50%.



Rys. 10. Procentowa względna zmiana wskaźników trakcyjnych pojazdu w zależności od zastosowanej kryzy

4. Podsumowanie

Tematyce rozwijania silników spalinowych poświęcona jest niniejsza praca, w której autor podjął próbę poprawy wskaźników pracy silnika spalinowego przez sterowanie efektywnym stopniem sprężania. Zmiana stopnia sprężania przez zmianę czynnej objętości skokowej obecnie realizowana w wielu ośrodkach badawczych przez różne koncerny i na różne sposoby. Ponieważ ostatecznie osiągnięte ciśnienie sprężania w cylindrze ma bezpośredni wpływ na wskaźniki pracy silnika spalinowego, zarówno ekonomiczne – w postaci zużycia paliwa i sprawności ogólnej – i konstrukcyjne, jak: moc, moment obrotowy, redukcja emisji dwutlenku węgla do środowiska. Natomiast sterowanie efektywnym stopniem sprężania jest tylko narzędziem w realizacji celu, dlatego na podstawie przeprowadzonych prac modelowych i badawczych oraz analizy wyników sformułowano następujące wnioski ogólne:

1. Dokonano oceny bieżącego stanu techniki w kontekście rozwoju silników spalinowych i możliwości poprawy wskaźników pracy pod względem zmniejszenia zużycia paliwa.
2. Dokonano modelowania procesu spalania w cylindrze i na tej podstawie analizy przebiegu ciśnienia sprężania w cylindrze, bez i z układem sterowania efektywnym stopniem sprężania.
3. Istnieje możliwość określenia głównych parametrów pracy silnika poprzez analizę numeryczną oraz badania symulacyjne.
4. Stopień sprężania w cylindrze wpływa bezpośrednio na główne wskaźniki pracy silnika, takie jak: sprawność ogólna, moc, zużycie paliwa, emisja dwutlenku węgla.
5. Zastosowanie techniki sterowania efektywnym stopniem sprężania przez sterowanie czynną objętością sprężania przynosi wymierne korzyści poprawy wskaźników pracy, w tym przyrost ciśnienia w cylindrze. Zaproponowane rozwiązanie techniczne modyfikuje ciśnienie sprężania, a podczas krótkotrwałej pracy spełnia swoje założenia i pozwala na jego płynną regulację.
6. Zmniejszenie strat pompowania podczas suwu ssania pozytywnie wpływa na wskaźniki pracy silnika spalinowego.
7. Ocena zastosowanego układu do sterowania efektywnego stopnia sprężania pod kątem zastosowania go w silnikach spalinowych wymaga jeszcze kontynuowania prac badawczych ze względu na swoją konstrukcję, a ze względu na krótką żywotność musi zostać technologicznie dopracowana.

Powyższe wnioski upoważniają do stwierdzenia, że jest możliwe rozwiązanie głównego problemu badawczego pracy, zarazem potwierdzenie postawionej tezy.