TRANSCOMP – XIV INTERNATIONAL CONFERENCE
COMPUTER SYSTEMS AIDED SCIENCE, INDUSTRY AND TRANSPORT

tłokowy silnik spalinowy o zapłonie iskrowym,
zmienny stopień sprężania,
sprawność, spalanie stukowe

Sławomir LUFT[1]
Tomasz SKRZEK [2]

ANALIZA ROZWIĄZAŃ ZMIENNOŚCI STOPNIA SPRĘŻANIA W SILNIKU O ZAPŁONIE ISKROWYM

W artykule omówione są przykłady prototypowych rozwiązań konstrukcyjnych umożliwiające zmienność stopnia sprężania, prezentowane przez wiodące firmy produkcyjne i ośrodki naukowo badawcze. Rozwiązania oparte są o konstrukcję tradycyjnego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym. Przedstawione rozwiązania umożliwiają wprowadzenie zmienności stopnia sprężania jako dodatkowego parametru regulacyjnego, którego wartość może być zmieniana w czasie pracy silnika w szerokim zakresie obciążeń.

ANALYSIS OF SOLUTIONS OF COMPRESSION RATIO CHANGES IN THE SPARK IGNITION ENGINE

The paper describes examples of prototypical design solutions, introduced by leading industry sector and research centers, that enable compression ratio changes. The solutions are based on the traditional spark ignition engine. The presented solutions enable introduction of compression ratio change as an additional regulating parameter which value may be changed, during the engine operation, over a broad range of load.

1. WSTĘP

Rozwój konstrukcji tłokowego silnika spalinowego wynika w chwili obecnej głównie z wymagań ochrony środowiska. Wielkie znaczenie mają także względy ekonomiczne. Chęć sprostania tym wymogom przez konstruktorów współczesnych silników prowadzi do pojawiania się rozwiązań układów silnika które do niedawna były w swej standardowej formie, wydawałoby się nienaruszalne. Zmienność stopnia sprężania staje się parametrem regulacyjnym, który do dnia dzisiejszego w wielkiej masie produkowanych silników jest stałą wielkością wynikającą z geometrii układu tłokowego.

[1]Politechnika Radomska, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn; 26-600 Radom; ul. Chrobrego 45.
tel: + 48 48 361-76-42, 361-77-07, tel: kom. 600-201-991e-mail: s.luft@pr.radom.pl
[2] Politechnika Radomska, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn; 26-600 Radom; ul. Chrobrego 45.
tel: kom. 694-601-858

Do chwili obecnej rozwój tłokowego silnika spalinowego koncentruje się głównie w obszarze jego układu zasilania i procesów spalania, dotyczy to zarówno silników o zapłonie iskrowym jak i zapłonie samoczynnym. Wymogi stawiane współczesnym silnikom dotyczące norm emisji spali, zużycia paliwa, coraz wyższej sprawności, trwałości wymuszają na konstruktorach wprowadzanie zmian w rozwiązaniach zespołów do niedawna w zasadzie nie występujących. W konstrukcji silnika spalinowego istnieje wiele ograniczeń charakterystycznych dla jego budowy i zasady działania. Dziesięciolecia zmian konstrukcyjnych spowodowały że kolejne zabiegi usprawniające stają się ogromnie wyrafinowane a jednocześnie podnoszą jego sprawność zaledwie o ułamki procenta. Nie zniechęca to konstruktorów do ciągłyego poszukiwania nowych rozwiązań. Z pewnością najbardziej widoczne i odczuwalne zmiany dotyczą układów zasilania i sterowania które mają istotny wpływ na przebieg procesu spalania, a w konsekwencji na sprawność, trwałość, emisję związków toksycznych. Wyraźnie zauważalne są próby wpływania na poprawę parametrów które dokonują się w części mechanicznej silników takie jak: zmienność faz rozrządu, czy zmienność stopnia sprężania. Zmienność faz rozrządu znajduje coraz szersze zastosowanie w obecnie budowanych silnikach. Zmienność stopnia sprężania prezentowana już w rozwiązaniach prototypowych nie jest jeszcze tak powszechna.

2. ZMIENNOŚĆ STOPNIA SPRĘŻANIA JAKO PARAMETR REGULACYJNY

Stopień sprężania jest wielkością geometryczną równą stosunkowi objętości całkowitej cylindra wraz z objętością komory spalania (objętość nad tłokiem w DMP) do objętości samej komory spalania (objętość nad tłokiem w GMP). Stopień sprężania dla silników o ZI wynosi ε=9-11, natomiast dla silników o ZS ε=16-21.

$$\varepsilon = \frac{Vs + Vk}{Vk} \tag{1}$$

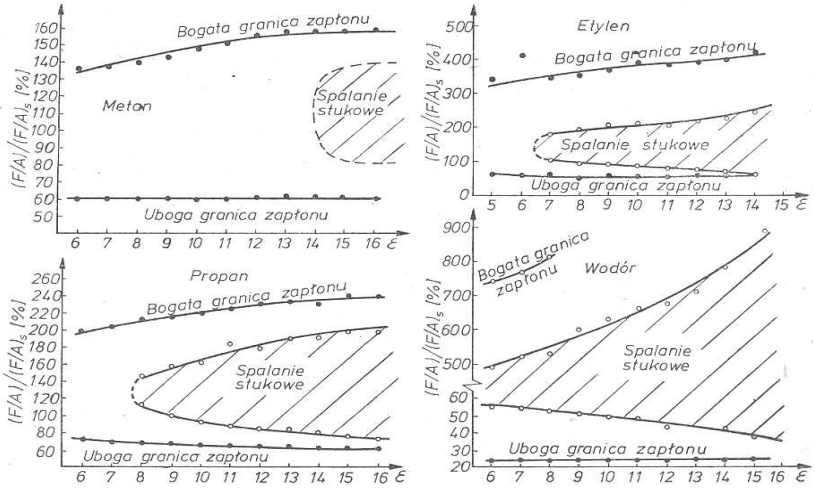
gdzie: ε- stopień sprężania
Vs- objętość skokowa
Vk- objętość komory spalania

Jest to podstawowy parametr decydujący o sprawności ogólnej silnika.
To właśnie stopień sprężania jest głównym i jednym z parametrów który sprawia że silnik o ZS wykazuje większą sprawność sięgającą około 45% w porównaniu do około 35% dla silnika o ZI. Dzieje się tak między innymi dlatego że wyższy stopień sprężania przekłada się na większe ciśnienia sprężania, oraz większe ciśnienie w procesie spalania i w efekcie większy moment obrotowy. Diesel wydaje się że jako pierwszy z konstruktorów zauważył i

wprowadził w życie rozwiązanie silnika wysokoprężnego charakteryzującego się właśnie dużą wartością stopnia sprężania. Tendencja zwiększania tego parametru trwa do dzisiaj. Koncepcja podnoszenia sprawności poprzez ciągłe zwiększanie ε jest ograniczona głównie w silniku o zapłonie iskrowym ze względu na zaburzenie procesu spalania i pojawiające się

spalanie stukowe, które ma destrukcyjny wpływ na trwałość elementów silnika. Wartość maksymalnego możliwego do zastosowania stopnia sprężania w silniku o zapłonie iskrowym determinowany jest własnościami paliw, oraz obciążeniem silnika a głównie temperaturą w cylindrze. Poprawa odporności na samozapłon współczesnych paliw sprawia że obecnie stopień sprężania silnika o zapłonie iskrowym jest ponad trzykrotnie większy w porównaniu z pierwszymi silnikami tego typu. Aby możliwe było dalsze zwiększania stopnia sprężania dla silników o ZI należy stosować uboższe mieszanki. Wzrost sprawności uzyskany dzięki zwiększeniu stopnia sprężania jest większy niż spadek wywołany zubożeniem mieszanki[1].

Stopień sprężania wpływa na temperaturę i ciśnienie ładunku, stąd też jego zwiększanie stopnia sprężania powoduje skrócenie czasu spalania ładunku w silniku o ZS a także czasu opóźnienia samozapłonu. Efektem tego jest zwiększenie współczynnika wydzielania ciepła i sprawności indykowanej, gdyż obieg jest bardziej zbliżony do teoretycznego obiegu Otta (spalanie przy V=const). Sprawność mechaniczna silnika maleje ze zwiększeniem stopnia sprężania, a więc sprawność ogólna osiąga pewne maksimum przy skończonej wartości stopnia sprężania [1]. Ponieważ spalanie stukowe jest głównym ograniczeniem podnoszenia stopnia sprężania i w znacznym stopniu zależy od obciążenia, konstruktorzy silników podjęli próbę wprowadzenia jego zmienności w możliwie jak największym zakresie obciążeń, tak by utrzymać najwyższą sprawność przy jednoczesnym eliminowaniu zjawisk niekorzystnych. Poniższe wykresy obrazują zależność występowania spalania stukowego od stopnia sprężania, oraz składu mieszanki dla kilku różnych paliw gazowych [2].

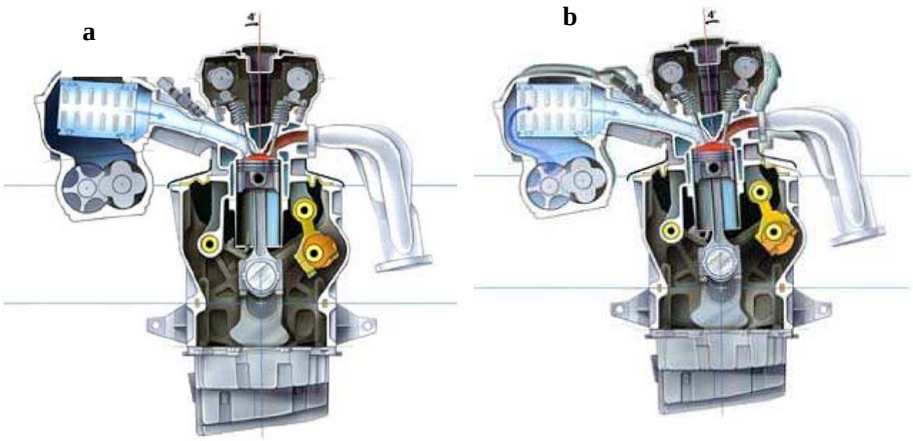


Rys.1.Granica spalania stukowego i granica zapłonu dla różnych paliw gazowych [2]

Z oczywistych względów wysiłki konstruktorów koncentrują się na rozwiązaniach najmniej jak to możliwe skomplikowanych z zachowaniem jak największej ilości elementów tradycyjnego silnika, co ma uzasadnienie głównie ekonomiczne. Prostota konstrukcji przyczynia się także do jej niezawodności i trwałości.

3. ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE WSPÓŁCZESNYCH SILNIKÓW TŁOKOWYCH ZE ZMIENNYM STOPNIEM SPRĘŻANIA

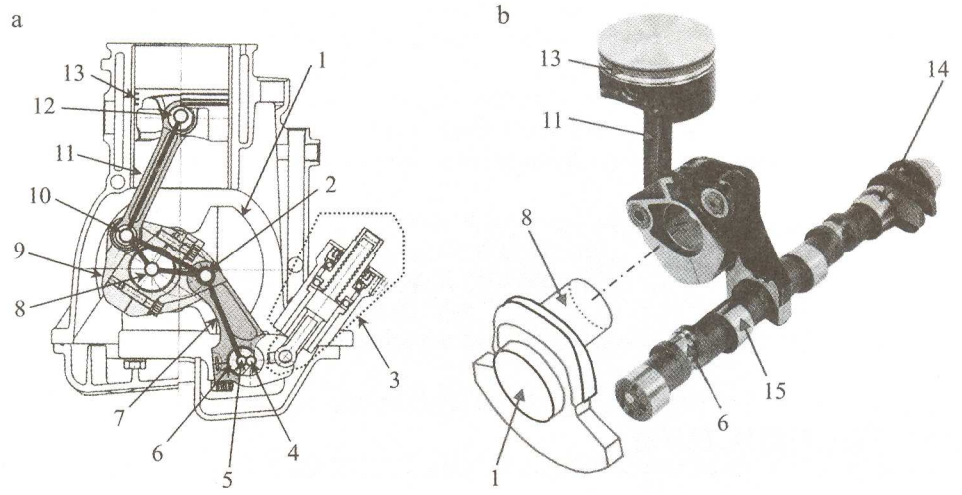
Metody i zmiany konstrukcyjne umożliwiające zmienność stopnia sprężania dotyczą głównie silników o ZI. Na chwilę obecną znanych jest kilka konstrukcji w których wprowadzono zmienność stopnia sprężania jako parametr regulacyjny. Wydaje się że pierwszym prototypowym i funkcjonalnym rozwiązaniem jest konstrukcja firmy SAAB, (rys.2.) oparta na 5-cylindrowym silniku o ZI o pojemności 1,6 dm3. W silniku tym większość elementów tradycyjnego silnika została zachowana. Głowicę natomiast połączono na stałe z tulejami cylindrowymi tworząc tzw. głowicę monocylindryczną. Połączenie głowicy względem bloku silnika pozwala na jej przemieszczanie. Hydrauliczny element wykonawczy powoduje pochylanie monocylindrycznej głowicy w stosunku do skrzyni korbowej wpływając tym samym na zmianę stopnia sprężania. Odchylenie głowicy o 4° powoduje spadek stopnia sprężania do 8, dla kąta 0° stopień sprężania wzrasta do 14. Sterowanie stopniem sprężania jest możliwe w całym zakresie prędkości obrotowej silnika i zależy od obciążenia. Zmiana realizowana jest jednocześnie we wszystkich cylindrach w jednakowym stopniu. Silnik ten charakteryzuje się 30% redukcją zużycia paliwa w stosunku do silników podobnej mocy. Kombinacja zredukowanej pojemności silnika, wysokiego ciśnienia doładowania które osiąga 2,8 bara, zmiennego stopnia sprężania umożliwia osiąganie wartości momentu obrotowego na poziomie 200Nm i mocy 150KM z pojemności jednego litra.



Rys.2. Silnik o zmiennym stopniu sprężania firmy SAAB[5]
a-odchylenie głowicy dla ε=14 b-odchylenie głowicy dla ε=8

Choć ingerencja w konstrukcję tradycyjnego silnika jest wyraźna to niewątpliwie stosunkowo najmniejsza w porównaniu z kolejnymi rozwiązaniami.
Rozwiązanie zaproponowane przez firmę Nissan (rys.3.) również umożliwia zmianę stopnia sprężania. Zmiana konstrukcyjna samego silnika polega na dodaniu wałka

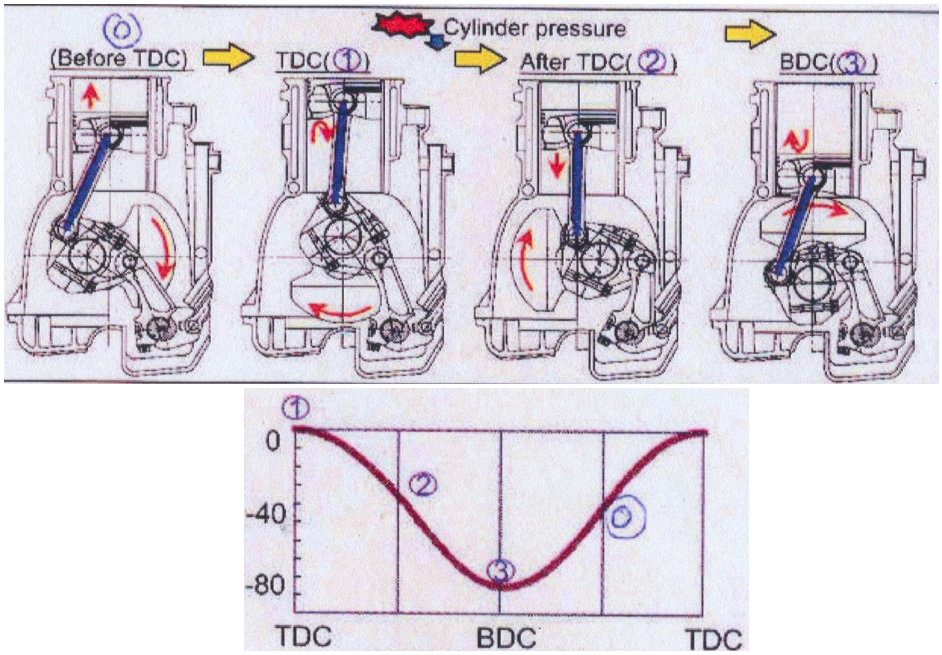
krzywkowego przypominającego wałek rozrządu, którego krzywki połączone są za pomocą dodatkowych korbowodów z wałem korbowym w taki sposób, że oś czopa korbowego znajduje się pomiędzy osiami obrotu właściwego korbowodu oraz korbowodu dodatkowego. Dzięki takiej konstrukcji obrót wałka krzywkowego poprzez przekładnię śrubową uruchamianą silnikiem krokowym wymusza ruch elementu dźwigniowego, z którym połączone są obydwa korbowody. Element dźwigniowy wykonuje ruch względem osi obrotu, która stanowi jednocześnie oś czopa korbowego, dzięki czemu tłok może wykonywać dodatkowy ruch zwiększając bądź zmniejszając tym samym stopień sprężania w trakcie pracy silnika.



Rys.3.Układ tłokowo-korbowy silnika o zmiennym stopniu sprężania firmy Nissan[3]
a — schemat kinematyczny, b — widok poszczególnych elementów składowych 1 — wał korbowy, 2 — sworzeń korbowodu prowadzącego, 3 — przystawka zmieniająca położenie wału sterującego, 4 — oś czopu głównego wału sterującego, 5 — oś czopu mimośrodowego wału sterującego, 6 — czop mimośrodowy wału sterującego, 7 — korbowód prowadzący, 8 — czop korbowy wału korbowego, 9 — korbowód dolny, 10 — czop stopy korbowodu górnego, 11 — korbowód górny, 12 — sworzeń tłokowy, 13 — tłok, 14 — wał sterujący, 15 — czop główny wału sterującego

Zaproponowane rozwiązanie umożliwiło poprawę sprawności ogólnej silnika przez dążenie do pracy przy możliwie najwyższej wartości stopnia sprężania. Pozwoliło ono także na uzyskanie dodatkowych pozytywnych efektów takich, jak:
— możliwość kształtowania przebiegu zmiany objętości nad tłokiem w suwie od GMP do DMP poprzez dobór wymiarów poszczególnych elementów składowych.
Wpływa to pośrednio na przebieg ciśnienia spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego i pozwala na optymalizację przebiegu sił stycznych, a zatem również momentu obrotowego silnika;

— poprawa wyrównoważenia sił bezwładności drugiego rzędu w wyniku doboru parametrów ruchu wahliwego korbowodu prowadzącego;
— zmniejszenie sił normalnych pomiędzy tłokiem a cylindrem i w rezultacie poprawa trwałości układu tłok - cylinder oraz sprawności mechanicznej silnika [3].

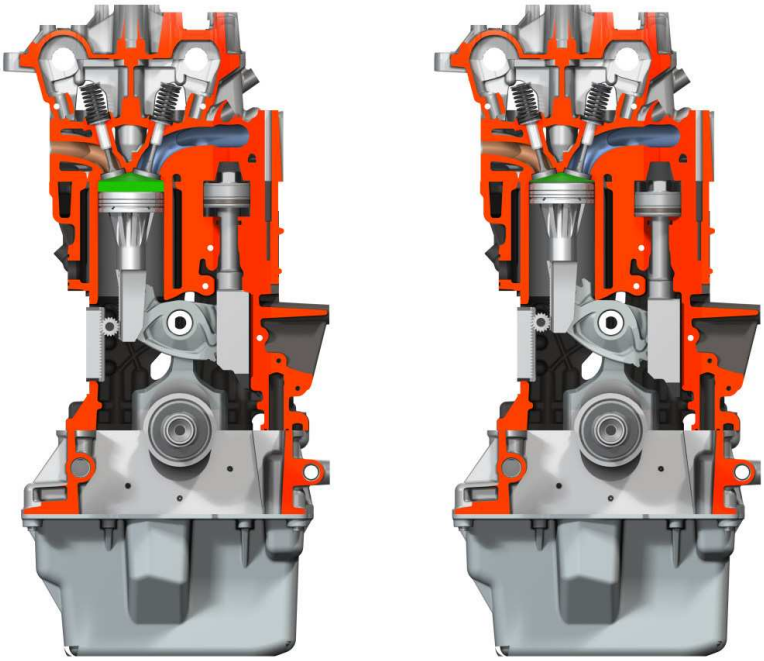


Rys.4.Zależność położenia tłoka od kąta obrotu wału korbowego[3]

Kolejnym mocno zaangażowanym technologicznie projektem silnika o zmiennym stopniu sprężania jest czterocylindrowa jednostka o nazwie MCE-5 (rys.5.) która podobnie jak we wcześniejszym rozwiązaniu wykorzystuje element dźwigniowy na wale korbowym gdzie jeden z końców tegoż elementu współpracuje z tłokiem zaś drugi z tłoczyskiem siłownika hydraulicznego. Tradycyjny korbowód łączy element dźwigniowy z czopem korbowym.

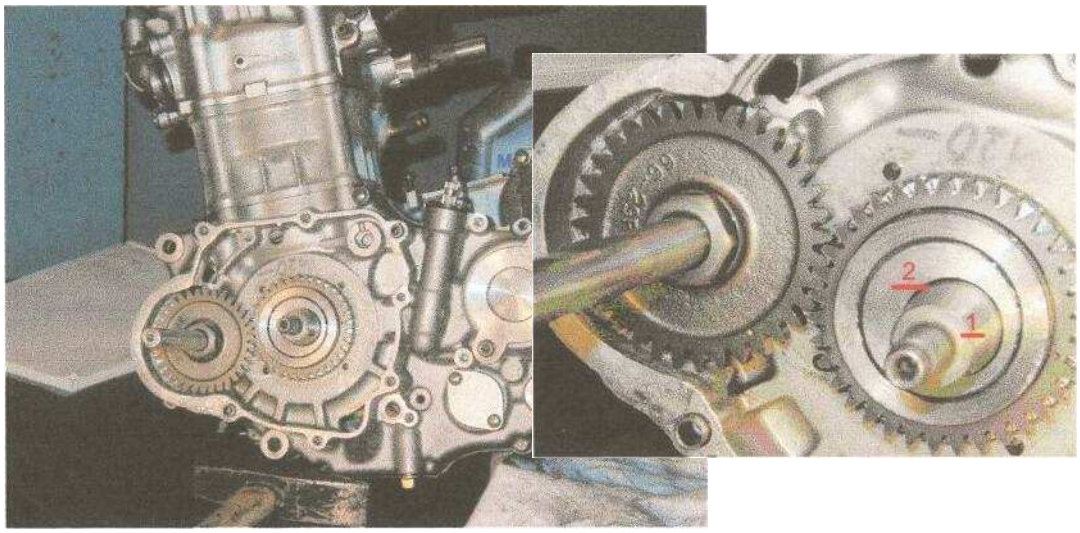
Zmiana stopnia sprężania realizowana jest poprzez zmianę punktu podparcia dźwigni w elemencie siłownika hydraulicznego. Przesunięcie siłownika w dół powoduje wzrost stopnia sprężania aż do $\varepsilon=18$, zaś przesunięcie siłownika w górę zmniejsza stopień sprężania do $\varepsilon=7$. Ponieważ ilość siłowników hydraulicznych jest równa ilości cylindrów, to w każdym z nich stopień sprężania może być regulowany indywidualnie. W tym silniku tłok pozbawiony jest płaszcza gdyż jego część prowadząca wykonuje ruch w osi cylindra.

Zaś ze względu na zmniejszony o połowę promień wykorbienia wał korbowy nie posiada przeciwciężarów.

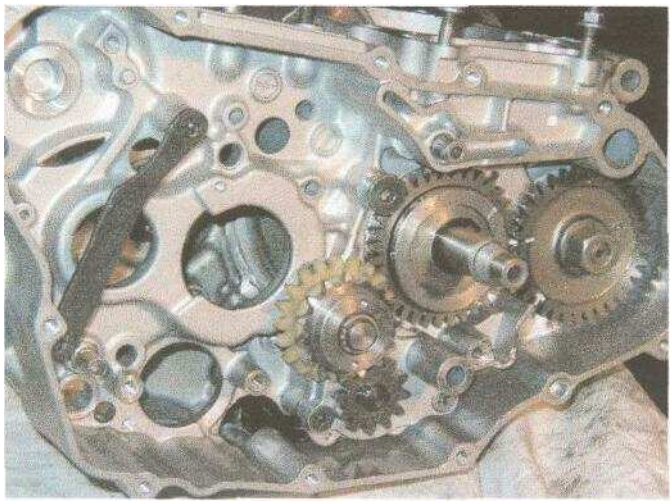


Rys.5.Silnik MCE-5 o zmiennym stopniu sprężania[5]

Innym rozwiązaniem pozwalającym na zmienność stopnia sprężania jest silnik wykorzystujący koncepcję mimośrodowego łożyskowania wału korbowego łożysk głównych (rys.6, rys.7.). Jest to silnik jednocylindrowy o pojemności 398cm^3 motocykla Suzuki DR-Z400E [4]. W silniku ze względu na uproszczenie oraz zmniejszenie tarcia zastosowano łożyskowanie toczne wału korbowego. Silnik ma możliwość zmiany stopnia sprężania poprzez umieszczenie czopów głównych wału korbowego na mimośrodach. Rozwiązanie to wydaje się najprostsze z omawianych w niniejszym artykule, nie wprowadza niestety dodatnich pozytywnych efektów i sprawia że w czasie regresji stopnia sprężania oś czopów głównych wału korbowego wychodzi z płaszczyzny ruchu osi sworznia tłokowego zmieniając tym samym geometrię i kinematykę ruchu układu korbowo tłokowego.



Rys.6. Na zdjęciu przedstawiony jest czop wału korbowego (poz.l), mimośród wału korbowego (poz.2) z jego sterowaniem za pomocą kół zębatych. Po lewej stronie pokazany jest wałek sterujący przekładnią mimośrodu. Widoczna jest także, modyfikacja kadłuba w celu umieszczenia przekładni zębatej również przy lewym czopie wału korbowego[4]



Rys. 7. Widok przekładni i mimośrodu z prawej strony silnika[4]

3. WNIOSKI

Analiza cech prezentowanych rozwiązań prowadzi do wniosku że najkorzystniejszym rozwiązaniem wydaje się być koncepcja firmy Nissan. Jest to rozwiązanie stosunkowo skomplikowane od strony mechaniki układu korbowego lecz, oprócz zmienności stopnia sprężania wiąże ze sobą szereg pozytywnych cech opisanych w artykule. Możliwości jakie daje zastosowanie zmiennego stopnia sprężania wydają się przemawiać za jak najszybszym wprowadzeniem tego typu rozwiązań. Mimo dość poważnych ingerencji w konstrukcję tradycyjnego silnika koniecznych do uzyskania możliwość zmiany stopnia sprężania, bardzo wyraźnie widoczne są powody dla których rozwiązania takie mają uzasadnienie.

4. BIBLIOGRAFIA

[1] Andrzej Kowalewicz:.*Teoria Samochodu Systemy spalania szybko obrotowych tłokowych silników spalinowych,* Warszawa WKŁ 1990
[2] Andrzej Kowalewicz:.*Teoria Samochodu Tworzenie mieszanki i spalanie w silnikach o zapłonie iskrowym.* Warszawa WKŁ 1984
[3] Sławomir Luft:.*Podstawy budowy silników* Warszawa WKŁ 2006
[4] Jacek Soczówka: Praca Doktorska
[5] Strona internetowa-www.mce-5.com