

Paweł WOŚ  
Politechnika Rzeszowska

## ZASTOSOWANIE, PROJEKT I TECHNICZNA REALIZACJA KONSTRUKCJI WIELOCYLINDROWEGO SILNIKA TŁOKOWEGO O ZMIENNYM STOPNIU SPRĘŻANIA VCR

W artykule przedstawiono projekt i aplikację technologii zmiennego stopnia sprężania (ang. *Variable Compression Ratio* – VCR) w czterocylindrowym silniku badawczym. Regulacja stopnia sprężania wynika ze zmiany objętości przestrzeni nadłokowej cylindrów poprzez kontrolowany przesuw i pozycjonowanie zespołu blok cylindrowy–głowica względem ustalonego położenia wału korbowego. Dokonano analizy porównawczej przyjętego rozwiązania z innymi, będącymi wciąż w fazie studialnej projektami. W układzie przesuwu zespołu cylinder–głowica zastosowano precyzyjne pociągowe śruby rolkowe. Określono teoretyczny, możliwy do zrealizowania zakres zmienności stopnia sprężania. Opracowany na podstawie istniejącej jednostki 4 VD 14,5/12-1 SRW silnik będzie obiektem badań nad poprawą wskaźników energetycznych i ekologicznych napędów samochodowych wykorzystujących zaawansowane, czyste techniki spalania niskotemperaturowego.

### Oznaczenia i skróty

CAI	–	Controlled Auto Ignition – spalanie w trybie kontrolowanego samozapłonu
CO	–	tlenek węgla
CO <sub>2</sub>	–	dwutlenek węgla
HC	–	węglowodory
HCCI	–	Homogeneous Charge Compression Ignition – samozapłon ładunków homogenicznych
LTC	–	Low-Temperature Combustion – spalanie niskotemperaturowe
NO <sub>x</sub>	–	tlenki azotu
PCCI	–	Premixed Charge Compression Ignition – samozapłon ładunków wstępnie wymieszanych/odparowanych
PM	–	Particulate Matter – cząstki stałe
VCR	–	Variable Compression Ratio – zmienny stopień sprężania
VVA	–	Variable Valve Actuation – zmienny napęd zaworów

## 1. Wstęp

Dążenie do ograniczania niekorzystnych efektów zewnętrznych związanych z rozwojem motoryzacji i transportu, opartych głównie na tłokowym silniku spalinowym jako podstawowym źródle napędu, przejawia się przede wszystkim limitowaniem dopuszczalnego poziomu emisji szkodliwych związków zawartych w spalinach, tj. tlenku węgla CO, węglowodorów HC, tlenków azotu NO<sub>x</sub> i cząstek stałych PM. Ponadto, w obliczu narastającego zjawiska globalnego ocieplenia oraz kurczących się zasobów paliw płynnych, szczególną uwagę zwraca się także na redukcję zużycia paliwa, a tym samym emisji dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>. Niestety, specyfika procesów roboczych w silnikach tłokowych nie pozwala w prosty sposób spełnić jednocześnie wszystkich podanych wymagań. Pomimo znacznego postępu dokonanego w ostatnich latach, dalsza poprawa parametrów ekologiczno-energetycznych silników tłokowych wymaga kolejnych zmian w ich konstrukcji, obejmujących praktycznie wszystkie układy funkcjonalne.

Jedną z bardziej efektywnych ścieżek, chociaż na obecnym etapie rozwoju niosących wciąż wiele trudności natury technicznej i eksploatacyjnej, jest konstrukcja silników, w których stopień sprężania jest parametrem regulacyjnym i może być zmieniany bezstopniowo w szerokim zakresie i stosunkowo krótkim czasie. Technologia ta jest oznaczana symbolem VCR pochodzącym od anglojęzycznego terminu *Variable Compression Ratio* – zmienny stopień sprężania.

## 2. Wybrane cele stosowania technologii VCR

Pierwotnym źródłem idei zmiennego stopnia sprężania było dążenie do stosowania w silniku paliw o różnych właściwościach, tzw. **wielopaliwowość**. Chociaż nadal jest to cenna właściwość, to obecnie w rozwoju silników spalinowych szczególnie nacisk kładzie się na ograniczenie zużycia paliwa, a co za tym idzie – emisji CO<sub>2</sub>, oraz zmniejszenie emisji szkodliwych składników spalin – tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu czy cząstek stałych. Okazuje się, że jednoczesne osiągnięcie tych celów jest niezwykle trudne. Stosowane do tej pory metody optymalizacji i poprawy parametrów silnika w tym zakresie osiągały już limity efektywności, które mają charakter ograniczeń systemowych. Istnieje więc potrzeba poszukiwania nowych rozwiązań i kierunków rozwoju [1].

Odpowiedzią na silną presję redukcji zużycia paliwa jest tzw. **downsizing** – nowy trend rozwojowy silników tłokowych dla poprawy ich sprawności ogólnej [2]. Polega on na zmniejszaniu objętości skokowej jednostek napędowych i podwyższaniu wskaźnika mocy jednostkowej poprzez stosowanie coraz wyższych ciśnień doładowania. Mniejsza objętość skokowa, uzyskiwana m.in. poprzez redukcję liczby cylindrów, oznacza zmniejszenie strat mechanicznych, cieplnych i tzw. "pompowania". W efekcie wzrasta sprawność ogólna silnika. Z drugiej strony, wzrost ciśnienia doładowania wymaga zmniejszenia geome-

trycznego stopnia sprężania w celu uniknięcia niekorzystnych zjawisk w procesie spalania. Z uwagi na bezpośrednią relację ze sprawnością obiegu, korzystne jest jednak stosowanie jak najwyższych stopni sprężania. Wartość stopnia sprężania musi zatem stanowić kompromis pomiędzy uzyskaniem jak najwyższej sprawności cieplnej obiegu a innymi ograniczeniami, takimi jak: granica spalania stukowego, poziom obciążeń mechanicznych i/lub cieplnych, maksymalna szybkość narastania ciśnienia (twardość biegu) itp. Jednak ograniczenia te są istotne jedynie przy dużych obciążeniach silnika, właśnie przy wysokim stopniu doładowania. W konwencjonalnych silnikach dla takich warunków pracy jest optymalizowany i ostatecznie ustalany stopień sprężania. Jednakże nie jest to znaczący obszar ich normalnej pracy eksploatacyjnej. Przy niskich i umiarkowanych obciążeniach stopień sprężania mógłby być o wiele wyższy, skutkując podniesieniem sprawności eksploatacyjnej pojazdu. Dlatego technologia VCR umożliwia znaczne rozszerzenie zakresu "downsizingu", pozwalając na dalsze zmniejszenie objętości skokowej i stosowanie jeszcze wyższych ciśnień doładowania. Ocenia się, że ta metoda regulacji parametrów pracy silnika z zapłonem iskrowym może skutkować redukcją eksploatacyjnego zużycia paliwa nawet o 30%, bez znaczącego wzrostu emisji związków toksycznych [3].

Kolejnym obszarem potencjalnego wykorzystania technologii VCR jest możliwość efektywnej realizacji zaawansowanych, **niskotemperaturowych procesów spalania LTC** (*Low-Temperature Combustion*). Charakteryzują się one skrajnie niskim poziomem emisji toksycznych związków jako wynik wysokiej komplementarności fazy spalania, lecz prowadzonej w warunkach obniżonej temperatury ładunku, a zwłaszcza braku gradientów temperatury w przestrzeni komory spalania, co jest główną przyczyną formowania się tlenków azotu w konwencjonalnych silnikach, zarówno z zapłonem samoczynnym, jak i iskrowym. Do tej grupy procesów cieplnych w silnikach tłokowych, określanych właśnie mianem spalania niskotemperaturowego, należą m.in. systemy z kontrolowanym samozapłonem CAI (*Controlled Auto Ignition*) ładunków nieuwarstwionych w odmianach oznaczanych skrótami HCCI i PCCI (*Homogeneous/Premixed Charge Compression Ignition*) czy też metoda późnego wtrysku do komory spalania przy wysokim stopniu zawirowania ładunku i recyrkulacji spalin – system rozwijany w Wayne State University w Detroit (USA), [4, 5]. Spalanie ładunku nieuwarstwionego (homogenicznego), jak to ma miejsce w silnikach ZI, charakteryzuje się brakiem emisji cząstek stałych PM. Jest to wynik dobrego odparowania i wymieszania paliwa z powietrzem oraz braku obecności fazy ciekłej paliwa w obszarze objętym płomieniem. Zapłon samoczynny takiej mieszanki, w całej jej objętości jednocześnie, w przeciwieństwie do punktowego zapłonu od iskry elektrycznej, pozwala na uniknięcie pojawienia się wyraźnego frontu płomienia i wydzielonej strefy popłomiennej – obszarów o lokalnie bardzo wysokiej temperaturze, gdzie dochodzi do zasadniczego, szybkiego procesu formowania się tlenków azotu  $\text{NO}_x$ .



Pomimo wielu zalet procesów spalania niskotemperaturowego, zasadniczym problemem przy ich realizacji w silnikach tłokowych jest ograniczony obszar ich efektywności operacyjnej oraz duża wrażliwość na zmiany parametrów eksploatacyjnych, tj. stanu cieplnego silnika, temperatury zasysanego ładunku, rozrzutu właściwości paliwa, stopnia przepłukania cylindra itp. Dlatego sterowanie tymi procesami wymaga skoordynowanych wzajemnie, precyzyjnych działań regulacyjnych w zakresie m.in. stopnia recyrkulacji spalin EGR, temperatury zasysanego powietrza i składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Duże znaczenie ma również rodzaj i właściwości użytego paliwa, a zwłaszcza liczba cetanowa i oktanowa, prężność par czy temperatura zapłonu. Nadal jednak istnieją poważne trudności w uzyskaniu stabilności spalania niskotemperaturowego w zakresie dużych obciążeń silnika. Próby takie, przy zastosowaniu dotychczasowych metod regulacji, nie dają pozytywnych efektów, nawet przy użyciu specjalnych, niekonwencjonalnych paliw, jak np. eter dimetylowy DME. Zwiększenie dawki paliwa poza granice możliwości regulacyjnych danego systemu prowadzi zawsze do niekontrolowanego wzrostu obciążeń cieplnych i mechanicznych elementów silnika. Niezbędne jest więc przyjęcie nowych metod kontrolowania spalania niskotemperaturowego. W tym zakresie nieocenione możliwości daje nowa technologia zmiennego stopnia sprężania VCR, dzięki dużej efektywności moderowania warunków termodynamicznych w komorze spalania, decydujących o rozpoczęciu i przebiegu spalania ładunku w trybie niskotemperaturowym.

### 3. Analiza metod realizacji zmiennego stopnia sprężania

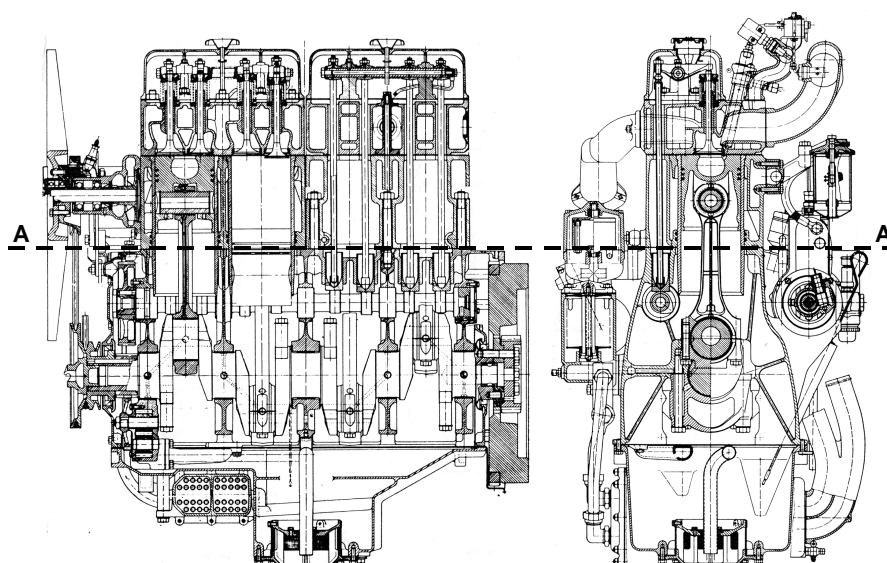
Istnieje kilka technicznych metod realizacji technologii VCR w silnikach tłokowych. Niektóre z nich zastosowano w prototypowych konstrukcjach studialnych [3, 5-8] i przechodzą one testy eksploatacyjne. W tabeli 1. przedstawiono schematycznie wybrane rozwiązania wraz z krótką analizą ich cech techniczno-eksploatacyjnych, w tym zalet lub wad w stosunku do konstrukcji konwencjonalnej silnika. Na uwagę zasługuje rozwiązanie f) o złożonej konstrukcji dźwigniowo-zębatej układu korbowego, opracowane i rozwijane przez francuską grupę badawczą MCE-5 Development [3], a także jednostka napędowa SVC firmy SAAB [5, 7], działająca wg zasady a), i rozwiązanie c), zaimplementowane w badawczym silniku FEV Motorentechnik [6].

Po przeanalizowaniu zalet i wad znanych technik realizacji zmiennego stopnia sprężania oraz istniejących konstrukcji prototypowych, biorąc pod uwagę określone możliwości techniczne, zdecydowano, że w konstrukcji własnej do celów badawczych zaadaptowana będzie technika g), polegająca na kontrolowanym pozycjonowaniu i przemieszczaniu zespołu cylinder-głowica wzdłuż osi cylindra. Charakteryzuje się ona stosunkowo niewielkimi kosztami realizacji, prostotą konstrukcji, minimalną ilością wad i cechuje ją szerokie pole zmian

stopnia sprężania przy wysokiej dokładności jego ustalania i kontrolowania (sterowania).

#### 4. Konstrukcja własna silnika o zmiennym stopniu sprężania

Do celów realizacji projektu wybrano średnioobrotowy, chłodzony cieczą 4-cylindrowy silnik wysokoprężny typu 4 VD 14,5/12-1 SRW [9]. Unikalną cechą konstrukcyjną tego silnika, decydującą o jego selekcji, jest fizycznie istniejąca płaszczyzna podziału kadłuba pomiędzy skrzynią korbową a zespołem cylindrów (rys. 1. – płaszczyzna A-A).



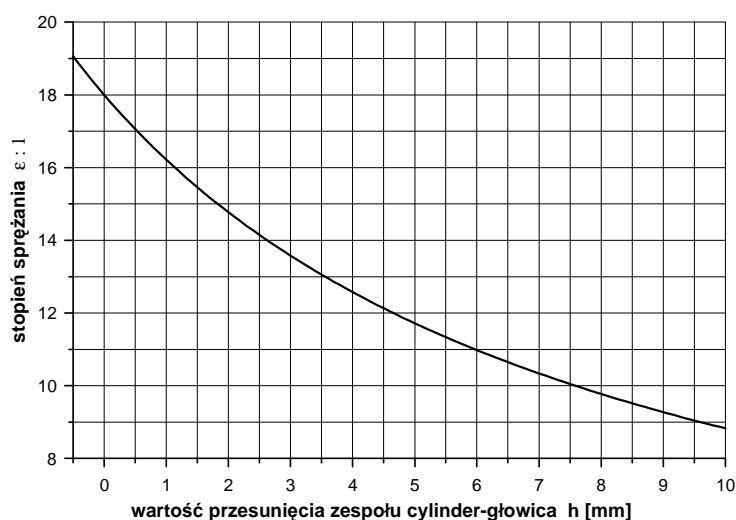
Rys. 1. Główne przekroje silnika 4 VD 14,5/12-1 SRW stanowiącego bazę do konstrukcji własnej jednostki badawczej w technologii VCR [9]

Parametry konstrukcyjne silnika 4 VD są następujące: średnica cylindra – 120 mm, skok tłoka – 145 mm, pojemność skokowa –  $6560 \text{ cm}^3$ , geometryczny stopień sprężania – 1:18. Układ rozrządu: górnozaworowy OHV z wałkiem rozrządu umieszczonym w kadłubie obok wału korbowego, przeniesienie napędu z krzywek za pośrednictwem popychaczy ślizgowych, lasek, dźwigienek zaworowych osadzonych na osi nad głowicą. Dane geometryczne silnika pozwalają określić, jak będzie się zmieniał stopień sprężania w wyniku przesuwania zespołu cylinder–głowica wzdłuż osi cylindrów wg zależności:

$$\varepsilon' = \frac{\frac{\varepsilon \cdot V_c}{\varepsilon - 1} + \pi \frac{D^2}{4} \cdot h}{\frac{V_c}{\varepsilon - 1} + \pi \frac{D^2}{4} \cdot h} : 1 \quad (1)$$

gdzie:  $\varepsilon'$  – stopień sprężania w funkcji przesunięcia zespołu cylinder–głowica,  
 $\varepsilon$  – wartość wyjściowa stopnia sprężania,  
 $V_c$  – objętość skokowa cylindra,  
 $D$  – średnica cylindra,  
 $h$  – wartość przesunięcia zespołu cylinder–głowica względem położenia wyjściowego.

Z równania (1), po podstawieniu danych geometrycznych silnika 4 VD wynika, że dla przyjętego zakresu przesunięć zespołu cylinder–głowica od  $-0,5$  do  $+10$  mm stopień sprężania będzie się zmieniał od 19:1 do wartości poniżej 9:1 wg krzywej pokazanej na rys. 2. Zakres tych zmian pokrywa się zasadniczo z pożądanym zakresem badawczym. W razie potrzeby może on być stosunkowo łatwo zmieniony poprzez wymianę tłoków mających komory spalania o innej objętości.



Rys. 2. Przebieg zmian stopnia sprężania w funkcji przesunięcia zespołu cylinder–głowica względem położenia wyjściowego dla silnika 4 VD 14,5/12-1 SRW

Przyjęta koncepcja zmiany stopnia sprężania wymaga zastosowania odpowiedniego, precyzyjnego układu przesuwu zespołu cylindrów względem bloku wału korbowego. Zadaniem tego mechanizmu, oprócz wysokiej dokładności

pozycjonowania i szybkiej zmiany położenia cylindrów, jest przeniesienie sił gazowych generowanych przez proces spalania w poszczególnych cylindrach silnika. Wartość tych sił można wyznaczyć z zależności:

$$F_{\max} = p_{\max} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3)$$

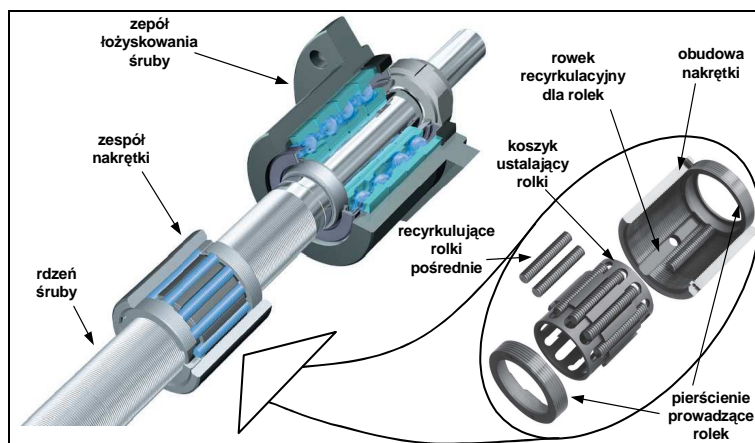
gdzie:  $F_{\max}$  – maksymalna siła działająca na układ przesuwu wskutek ciśnienia gazów w cylindrze,

$p_{\max}$  – maksymalne ciśnienie gazów w cylindrze,

$D$  – średnica cylindra.

Zakładając maksymalne ciśnienie gazów w cylindrach na poziomie 10 MPa, otrzymuje się siłę generowaną przez pojedynczy cylinder na poziomie 113 kN [9]. Stąd mechanizm przesuwu musi mieć odpowiednią wytrzymałość, ale także sztywność, niezawodność działania, niewielkie gabaryty oraz stosunkowo wysoką rozdzielczość pozycjonowania, zwłaszcza w zakresie wysokich wartości stopnia sprężania (rys. 2.).

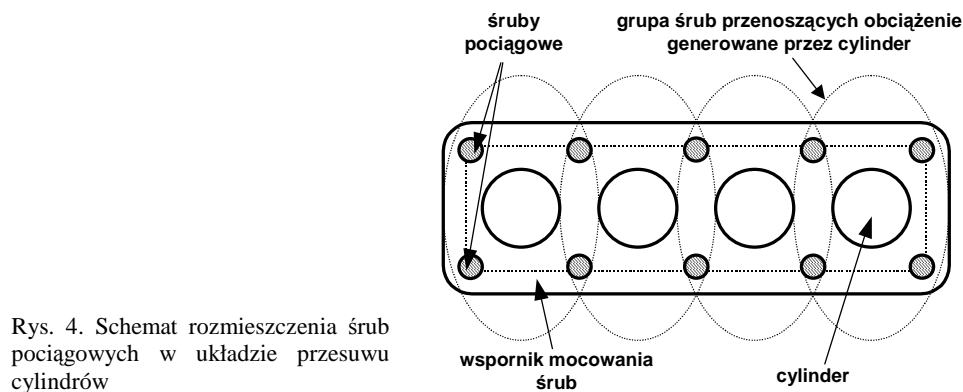
Na podstawie analizy wielu możliwych rozwiązań zdecydowano, że układ przesuwu oparty będzie na zestawie rolkowych śrub pociągowych napędzanych synchronicznie przez wspólną przekładnię łańcuchową. Tego typu śruby pociągowe, stanowiące niezaprzeczalną innowacyjność w technice napędów liniowych, spełniają całościowo postawione wymagania (tj. wytrzymałość, bezluzowość, niezawodność, niewielkie gabaryty), zwłaszcza śruby z rolkami recyrkulującymi, których rozdzielczość może być mniejsza niż 1 mm przesuwu nakrętki na 1 obrót śruby [10]. Budowę i zasadę działania tego typu śrub przedstawia rys. 3.



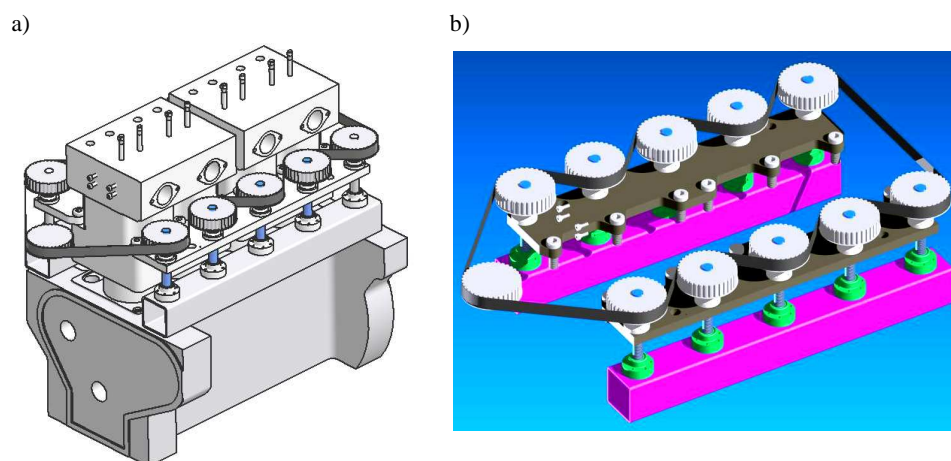
Rys. 3. Konstrukcja i zasada działania rolkowych śrub pociągowych z rolkami recyrkulującymi [10]



Układ przesuwu cylindrów powinien w taki sposób zapewnić też odpowiednią sztywność "pływającego" zespołu cylindrów wzdłuż osi wału korbowego, aby nie doszło do "skoszenia" cylindrów względem geometrycznej osi ruchu tłoków. Uzyskuje się to za pomocą odpowiedniej liczby śrub, rozmieszczonych po obu stronach cylindrów. W tym przypadku zastosowano po 5 śrub na stronę (rys. 4.). Taka konfiguracja ułatwia też zaprojektowanie synchronicznego napędu za pomocą wspólnej przekładni łańcuchowej (rys. 5.).



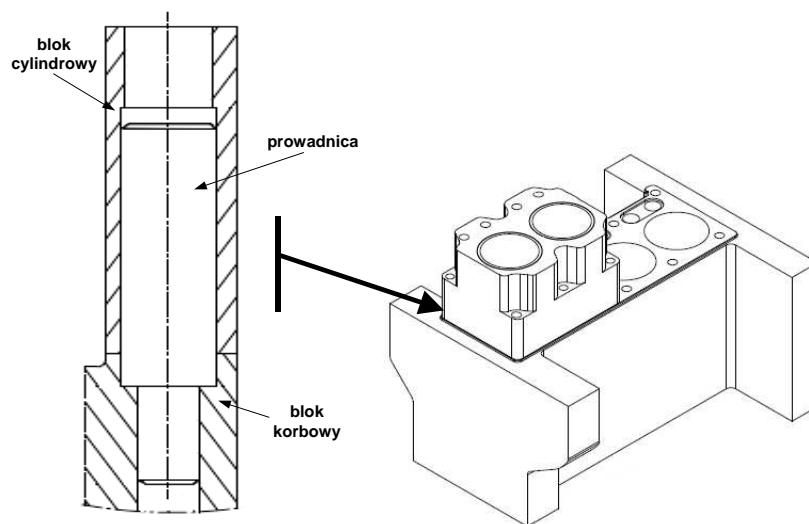
Rys. 4. Schemat rozmieszczenia śrub pociągowych w układzie przesuwu cylindrów



Rys. 5. Widok silnika z zamocowanym układem przesuwu cylindrów (a) oraz zespół przesuwu na bazie śrub rolkowych (b) – implementacja w systemie CAD [11]

Przy doborze wytrzymałościowym śrub założono, że każdy cylinder będzie ustalany przez cztery śruby, które będą przenosić całe obciążenie generowane przez siły gazowe w tym cylindrze. Ponieważ spalanie nie występuje w cylindrach jednocześnie, trzy pary śrub wewnętrznych mogą być wspólne dla dwóch

sąsiednich cylindrów (rys. 4.). Rozkładając obciążenie pojedynczego cylindra 113 kN na cztery śruby, otrzymuje się 28,25 kN na każdą z nich. Z danych katalogowych [10] dobrano śruby typu BVF 20×1 o wytrzymałości statycznej 36,6 kN, średnicy 20 mm i skoku 1 mm/obr. Mocowanie śrub do części korbowej i cylindrowej wykonano za pomocą wspólnych dla wszystkich cylindrów wsporników. Całość konstrukcji wraz z zębatkowym układem napędowym śrub zaprojektowano i sprawdzono obliczeniowo w komputerowym systemie CAD (rys. 5.).



Rys. 6. Przekrój przez jedną z prowadnic zabezpieczających śruby pociągowe przed obciążeniem poprzecznym i zginającym, zapewniających właściwy kierunek przesuwu bloku cylindrowego [11]

W celu uniknięcia przenoszenia przez śruby pociągowe niepożądanych sił poprzecznych i momentów zginających zastosowano precyzyjny układ wspólnego prowadzenia cylindrów za pomocą dwunastu prowadnic ślizgowych, mocowanych trwale w bloku korbowym i przesuwne w bloku cylindrowym (rys. 6.).

## 5. Podsumowanie

Przedstawiona konstrukcja silnika, zrealizowana w technologii zmiennego stopnia sprężania VCR na podstawie istniejącej jednostki napędowej 4 VD 14,5/12-1 SRW, stanowi cenne i innowacyjne narzędzie badawcze, odpowiadające najnowszym trendom i wymaganiom prac rozwojowych w dziedzinie

silników spalinowych. Dotychczas tego typu silniki w swych laboratoriach mają jedynie nieliczne, komercyjne jednostki o wysokim potencjale naukowo-badawczym, technologicznym i finansowym. Niewątpliwą zaletą tak wykonanej konstrukcji jest jej stosunkowo niski koszt.

Realizacja projektu wymagała dokonania określonych zmian konstrukcyjnych w silniku, które oprócz opisanego mechanizmu przesuwu i prowadzenia zespołu cylinder–głowica obejmowały m.in. układ rozrządu. Celem tych prac było zapewnienie automatycznej kompensacji luzu zaworowego przy zmieniającym się położeniu osi dźwigniów zaworowych w stosunku do wału rozrządu w trakcie zmian położenia zespołu cylinder–głowica. Na obecnym etapie zastosowano mechaniczny układ kompensacji. Wśród innych możliwych rozwiązań brano pod uwagę:

- hydrauliczny układ automatycznej kompensacji luzu zaworowego,
- przekonstruowanie rozrządu na układ z wałkiem rozrządu umieszczonym w głowicy, napędzanym wałkiem królewskim o zmiennej długości,
- bezkrzywkowy napęd zaworów typu VVA (*Variable Valve Actuation*).

Docelowo planuje się wprowadzenie ostatniego systemu, co pozwoli na uproszczenie konstrukcji i dalsze zwiększenie zakresu badawczego posiadanej jednostki.

#### Literatura

1. Shaik A., Shenbaga Vinayaga Moorthi N., Rudramoorthy R.: Variable compression ratio engine: a future power plant for automobiles – an overview. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE). Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 221, No D9, 2007, 1159-1168.
2. Brzeżański M., Śliwiński K.: Downsizing – a new direction of automobile engine development. Combustion Engines, Vol. 2 (119), 2004, 3-11.
3. MCE-5 Development Tech Newsletters: <http://www.mce-5.com>.
4. Gnanam G., Sobiesiak A., Reader G., Zhang C.: An HCCI Engine Fuelled With Iso-Octane and Ethanol. SAE Paper no 2006-01-3246.
5. Haraldsson G., Tunestal P., Johansson B., Hyvonen J.: HCCI combustion phasing in a multi cylinder engine using variable compression ratio. SAE Paper no 2002-01-2858.
6. Habermann K.: Demonstration Vehicle with Continuously Variable Compression Ratio (VCR). FEV Magazine "Spectrum", Issue 22, 2003: <http://www.fev.com>.
7. Larsen G.J.: Research Engine for Evaluating the Effects of Variable Compression Ratio (VCR) and/or Variable Valve Timing (VVT). SAE Paper no 910053.
8. Rabhi V., Beroff J., Dionnet F.: Study of a Gear-Based Variable Compression Ratio Engine. SAE Paper no 2004-01-2931.
9. Lejda K., Woś P.: A Preliminary Project of Multi Cylinder, Variable Compression Ratio (VCR) Engine for Research Purposes. Combustion Engines, Vol. SC2, Paper no PTNSS-2009-062, 152-157.
10. SKF Actuation & Motion Control product catalogue – roller screws: <http://www.linearmotion.skf.com>.

11. Woś P., Jakubowski M.: Silnik tłokowy o zmiennym stopniu sprężania. Zgłoszenie patentowe nr P.389951, Urząd Patentowy RP, Warszawa 2009.

**AN APPLICATION, DESIGN, AND REALIZATION  
OF THE VARIABLE COMPRESSION RATIO (VCR) FEATURE  
IN A MULTI-CYLINDER COMBUSTION ENGINE**

**S u m m a r y**

The paper presents the project and application of variable compression ratio (VCR) technology in a four-cylinder, research engine. Variation of the engine compression ratio is performed by changing combustion chamber volume due to shifting the cylinder block-head device perpendicularly to the fixed crankshaft axis. Some pros and cons of that method in comparison with few other, still studied projects are described. Precise roller screws were chosen as the main working elements in the shifting system. A theoretical range for CR variation was defined too. The new-developed engine, based at 4 VD 14,5/12-1 SRW design will be used for experiments on fuel economy improving and exhaust emission reduction including advanced, near-zero emission, low temperature combustion (LTC) strategies.

*Wpłynęło do redakcji w lipcu 2010 r.*