

## Electromechanical actuator for valve timing changes in an internal combustion engine

*Abstract: The Department of Internal Combustion Engines and Automotive Technical University of Bielsko-Biala, work is underway on the development of internal combustion engines, both in research as well as the construction with a large share of graduates. This paper presents the concept of controlled electromechanical device designed to change the angular position of the camshaft and thus control valve timing. A preliminary draft of the device was made with the participation of students. The proposed mechanism for controlling the instantaneous angular position of the camshaft uses an electromagnet. Designed in line with the assumption features a small size. This mechanism does not require significant intervention in engine construction and the timing system such as drilling oil channels in the camshaft. The device can outperform time of operation most of described solutions of actuators. Presented in the work of the mechanism is a concept design sketches. The solution is continuously optimized in terms of kinematic, dynamic and endurance.*

*Keywords: timing four-stroke engine, changing valve timing, valve timing mechanism, timing control system, internal combustion engines, filling the engine, overall efficiency*

### Elektromechaniczny siłownik zmian faz rozrządu w silniku spalinowym

*Streszczenie: W Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno Humanistycznej w Bielsku-Białej prowadzone są prace dotyczące rozwoju silników spalinowych zarówno w zakresie badań jak i konstrukcji z dużym udziałem dyplomatów. W artykule przedstawiono koncepcję urządzenia sterowanego elektromechanicznie przeznaczonego do zmian kąтового położenia wałka rozrządu, a tym samym sterowania fazami rozrządu. Projekt wstępny urządzenia powstał przy udziale studentów. Proponowany mechanizm do sterowania chwytowym kątowym położeniem wałka rozrządu wykorzystuje elektromagnes przyciągająco-odpychający. Zaprojektowane urządzenie zgodnie z założeniami cechuje się małymi gabarytami. Zastosowanie tego mechanizmu nie wymaga istotnych ingerencji w konstrukcję silnika i w układ rozrządu takich jak, drążenie kanałów olejowych w wałku rozrządu. Urządzenie przewyższa szybkością działania większość opisanych rozwiązań zmiany faz rozrządu. Zaprezentowana w pracy koncepcja mechanizmu ma charakter szkiców konstrukcyjnych. Rozwiązanie jest ciągle optymalizowane pod względem kinematycznym, dynamicznym i wytrzymałościowym.*

*Słowa kluczowe: rozrząd silnika czterosuwowego, zmiana faz rozrządu, mechanizmy regulacji faz rozrządu, systemy sterowania rozrządem, silniki spalinowe, napełnienie silnika, sprawność ogólna*

### 1. Wstęp

Obecnie produkowane tłokowe silniki spalinowe są bardzo zaawansowane pod względem konstrukcji i wykonania. Rozwój układów sterujących i znajomość procesów spalania zapewnia wysoką precyzję działania i bardzo dobre właściwości eksploatacyjne. Sposób sterowania silnikiem wymaga kompromisu w zakresie doboru parametrów pracy silnika takich jak elastyczność, moc maksymalna, moment obrotowy, zużycie paliwa, emisja składników toksycznych. Wymaga to również rozwoju konstrukcji silników w obszarze zwiększenia możliwości sterowania Oprócz trudnej do realizacji idei zastosowania zmiennego stopnia sprężania w cylindrze, dużo prostszym w konstrukcji i wykonaniu, a realizującym podobny cel, stały się jak na razie systemy zmiennych faz rozrządu. Pojawienie się tych systemów wymuszają zaostrzające się normy emisji spalin oraz bardzo duża konkurencja na rynku. Pierwsze zastosowanie systemu zmiennych faz rozrządu w samochodzie seryjnym nastąpiło w

1983r. w silniku Alfa Romeo. Od tego czasu systemy te są ulepszone pod względem trwałości, precyzji sterowania i szybkości działania. Stosowane obecnie rozwiązania działają z dużą sprawnością, zapewniają wzrost momentu obrotowego silnika w zakresie średnich prędkości obrotowych i są sterowane mikroprocesorami kontrolującymi inne funkcje silnika. Sterowanie mechanizmami jest zależne od obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Ich działanie jest stopniowe, lub bezstopniowe. Regulowane są fazy zaworów dolotowych i wylotowych, choć często występuje tylko regulacja zaworów dolotowych. Zmiany faz rozrządu osiąga się przez zastosowanie zróżnicowanych mechanizmów, zmieniających położenie wału rozrządu względem wału korbowego, którymi między innymi są:

- wielowypust śrubowy,
- zmiana czynnej długości pasa (łańcucha) przekładni napędowej rozrządu,
- mechanizm różnicowy,
- siłownik hydrauliczny,

- mechanizm bezwładnościowo-dźwigniowy,
- mechanizm z rolką przesuwaną.

Mechanizmy te powinny spełniać szereg kryteriów, takich jak:

- duża trwałość,
- mała objętość pod zabudowę,
- małe zapotrzebowanie energii,
- niska hałaśliwość,
- niski koszt produkcji,
- łatwość napraw,
- łatwość sterowania.

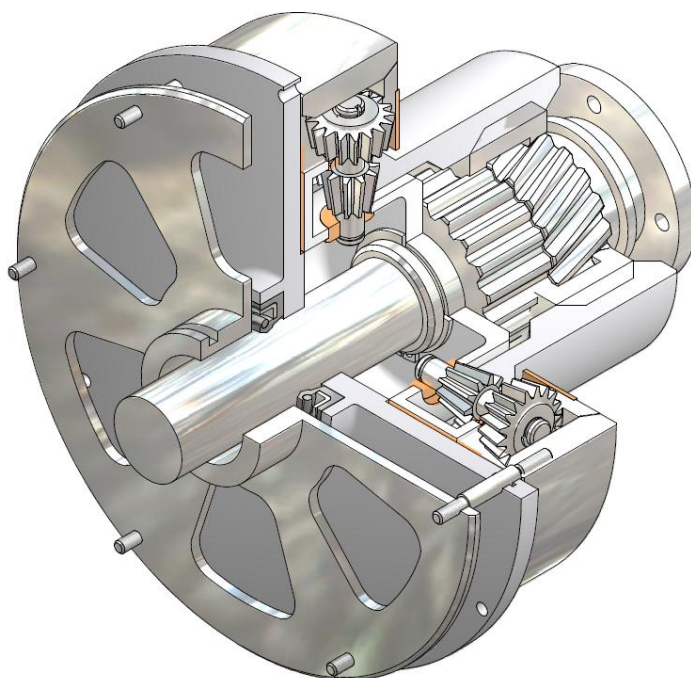
W większości przypadków, systemy zmiennych faz rozrządu są elektronicznie sterowanymi mechanizmami hydraulicznymi. Obecnie pojawia się tendencja do wycofywania urządzeń hydraulicznych i zastępowania ich bardziej zdolnymi do precyzyjnego sterowania układami elektromechanicznymi. Układy te, w przeciwieństwie do hydraulicznych, nie mają dużej bezwładności działania i histerezy.

W niniejszej pracy przedstawiono ideę mechanizmu sterowanego elektromechanicznie przeznaczonego do zmian kąтового położenia wałka rozrządu, a tym samym sterowania fazami rozrządu.

## 2. Zasada działania urządzenia

Proponowane urządzenie do sterowania chwilowym kątowym położeniem wałka rozrządu wykorzystuje elektromagnes przyciągająco-odpychający

współpracujący ze zworą magnetyczną. Zmiana położenia chwilowego wałka rozrządu, a tym samym zmiana fazy rozrządu wynika z działania zastosowanej przekładni śrubowej i wielowypustu śrubowego. W opisywanym rozwiązaniu oryginalna jest idea wspomaganie tych mechanizmów momentem obrotowym silnika. Urządzenie jest projektowane jako układ dwustanowy w zakresie sterowania, ale bezstopniowy w zakresie regulacji kąta położenia wałów – wejściowego i wyjściowego. Obecnie stosowane w tłokowych silnikach trakcyjnych czujniki elektroniczne mają możliwość bieżącego kontrolowania wzajemnego położenia wału korbowego i wałka rozrządu. Zakłada się, że w czasie pracy silnika, regulowanie chwilowego kąta położenia wału krzywkowego odbywa się z określoną częstością. Czulość regulacji wynika z zakładanych progów zmiany prędkości obrotowej i obciążenia wymaganych do przeregulowania. Przewidziana procedura regulacji wyznacza na podstawie chwilowej prędkości obrotowej i parametrów zasysanego powietrza wartość zadaną kąta położenia wału krzywkowego. Procedura sprawdza czy wartość ta leży w przewidzianych granicach uwzględniając wartości progowe, a następnie na drodze porównania tej wartości z wartością zmierzoną dokonuje odpowiedniego przeregulowania za pomocą siłownika elektromagnetycznego, który uruchamia mechanizm zmian wykorzystujący moment obrotowy silnika spalinowego.



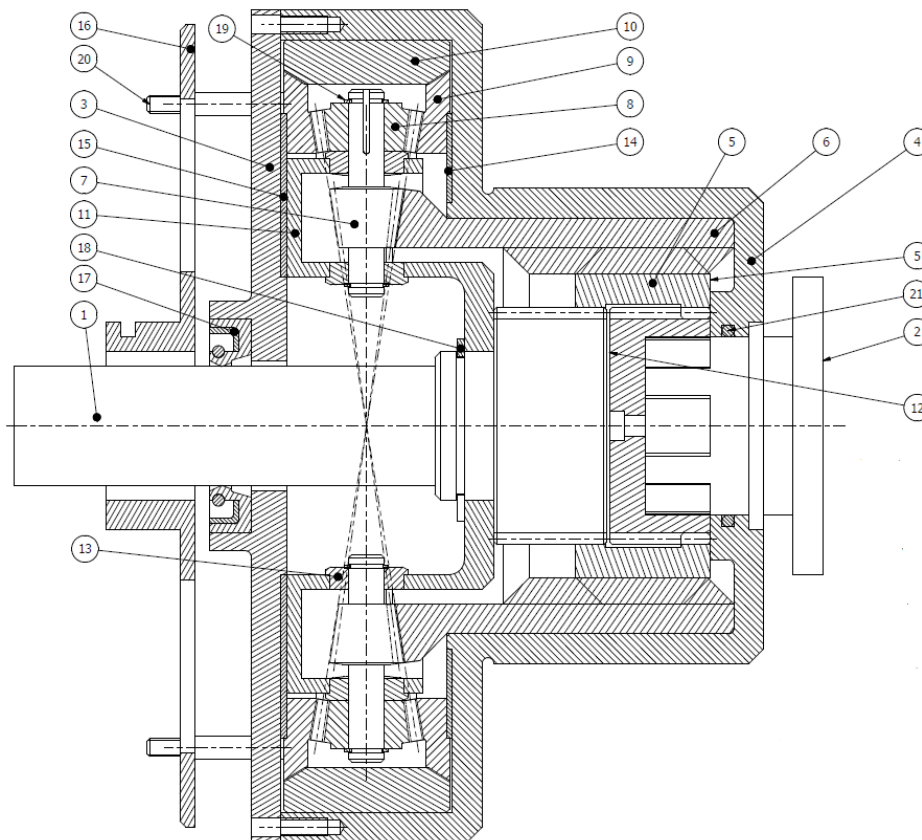
Rys. 1. Ogólny widok mechanizmu  
*Figure. 1. A general view of the actuator*

Na rys. 1 przedstawiono ogólny widok urządzenia razem z częściowym przekrojem, bez elektromagnesów sterujących które współpracują ze zwoją magnetyczną widoczną z przodu rysunku. Na rys. 3 przedstawiono wizualizację przekroju tego mechanizmu. Zaprezentowane rysunki w pracy mają charakter szkiców konstrukcyjnych o charakterze idei, ponieważ rozwiązanie jest ciągle optymalizowane pod względem kinematycznym, dynamicznym i wytrzymałościowym.

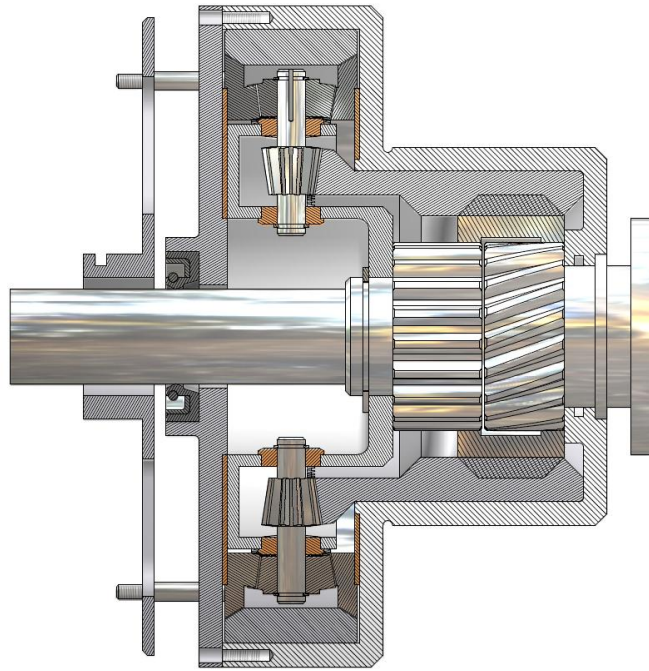
### 3. Elementy składowe urządzenia

Główne elementy wchodzące w skład mechanizmu przedstawiono na rys. 2. Są to:

1. wał wejściowy WE,
2. wał wyjściowy WY,
3. pokrywa z uszczelnieniem,
4. korpus (nie wykonuje ruchu obrotowego),
5. tuleja przesuwna z wewnętrznym wielowypustem prostym i śrubowym oraz zewnętrznym gwintem przekładni śrubowej,
6. tuleja z zewnętrzną przekładnią zębatą stożkową i wewnętrznym gwintem przekładni śrubowej,
7. koło zębate stożkowe współpracujące z tuleją 6 - 4 szt.,
8. koło zębate stożkowe współpracujące ze sprzęgłami ciernymi 9 - 4 szt.,
9. koło zębate stożkowe sprzęgła ciernego - 2 szt.,
10. tuleja sprzęgła ciernego stożkowego,
11. tuleja-korpus przekładni zębatych stożkowych,
12. nakładka na wielowypust (alternatywne rozwiązanie),
13. łożyska ślizgowe- 8 szt.,
14. pierścień oporowy sprzęgła,
15. pierścień oporowy sprzęgła,
16. zwora magnetyczna,
17. uszczelnienie,
18. pierścień osadczy,
19. pierścień osadczy - 8 szt.,
20. sworznie tulei włączającej sprzęgło 10,
21. uszczelnienie.



Rys. 2. Szkic konstrukcyjny siłownika  
Figure 2. Sketch of actuator



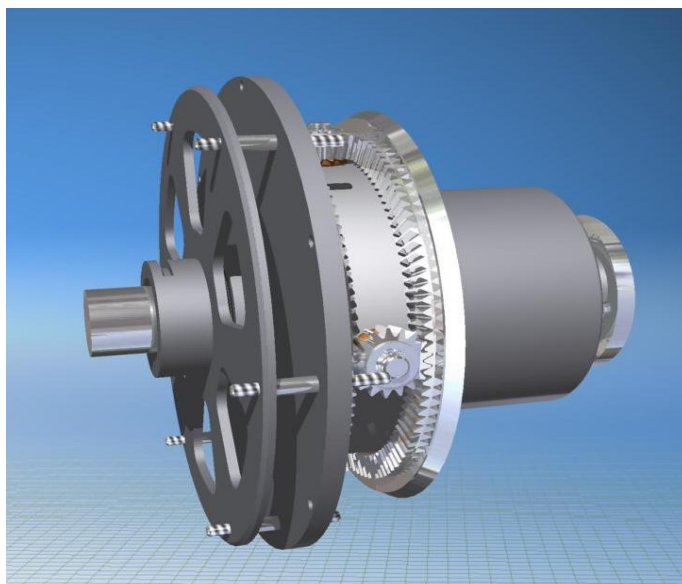
Rys. 3. Wizualizacja urządzenia  
Figure 3. Visualization of device

Do podstawowych zespołów wpływających na działanie urządzenia należą:

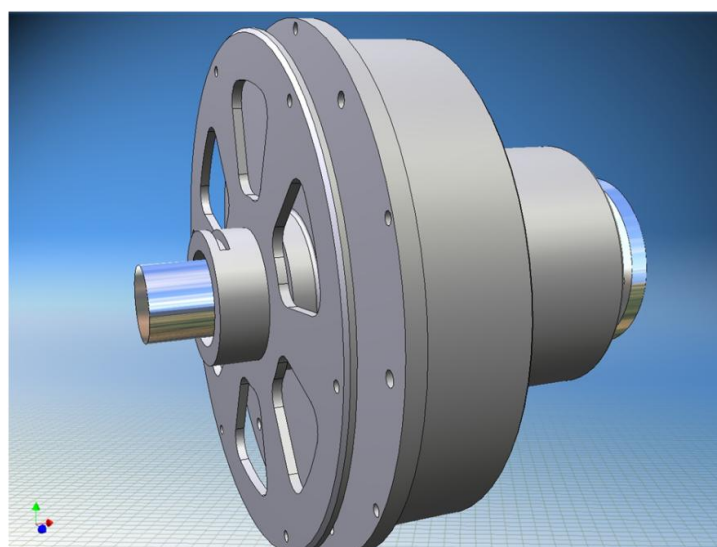
- **Walek WE -1**, - zawiera koło napędu rozrządu i dostarcza momentu obrotowego do zmiany faz rozrządu.
- **Tuleja sprzęgła ciernego stożkowego – 10**, - tuleja sprzęgła przemieszczana jest w lewo lub prawo za pomocą zwory elektromagnesu. W okresie gdy nie jest wymagana regulacja tuleja jest utrzymywana w położeniu środkowym.
- **Koła zębate stożkowe sprzęgła ciernego-9**, - dwa przeciwległe koła przekładni stożkowej współpracującej z kołami zębatymi 8. W okresie, gdy jest wymagana regulacja, koła są hamowane przez tuleję sprzęgła ciernego stożkowego 10.
- **Koła zębate stożkowe - 8**, - dwa lub cztery przeciwległe koła przekładni stożkowej współpracującej z kołami zębatymi sprzęgła ciernego 9, którego piasty są powierzchniami trącymi sprzęgła ciernego stożkowego. W okresie gdy nie jest wymagana regulacja zmian faz rozrządu, koła zębate 8 nie wykonują ruchu obrotowego wokół własnej osi, ale wirują wokół osi mechanizmu wraz z całym mechanizmem wewnątrz korpusu 4. Z chwilą przemieszczenia tulei włączającej sprzęgło 10, w lewo lub w prawo następuje przyhamowanie kół sprzęgłowych 9 i obrót względny kół zębatych 8 w jednym lub w drugim kierunku.
- **Koła zębate stożkowe -7**, - dwa lub cztery przeciwległe koła przekładni stożkowej współpracującej z kołami zębatymi tulei 6. W okresie gdy nie jest wymagana regulacja zmian faz rozrządu koła zębate 7 połączone kinematycznie z kołami zębatymi 8 nie wykonują ruchu obrotowego wokół własnej osi, Z chwilą przemieszczenia tulei włączającej sprzęgło 10, w lewo lub w prawo następuje względny obrót kół zębatych 7 w jednym lub w drugim kierunku, co powoduje obrót tulei 6.
- **Tuleja z zewnętrzną przekładnią zębatą stożkową i wewnętrznym gwintem przekładni śrubowej -6**, - tuleja z naciętym uzębieniem koła zębatego stożkowego współpracującego z kołami 7, Tuleja 6 przenosi obciążenie na przekładnię śrubową gdzie współpracuje z tuleją przesuwą 5.
- **Tuleja przesuwna -5**, - jej zadanie polega na przeniesieniu momentu obrotowego z wałka WE na wałek WY, oraz, przy pomocy przekładni śrubowej, zmianę położenia kąтового wałków względem siebie. Tuleja przesuwna 6 jest elementem przekładni śrubowej z naciętym na zewnętrznej średnicy gwintem trapezowym symetrycznym. Posiada podwójną piastę – z wielowypustem prostym na wałek WE i wielowypustem śrubowym na wałek WY. Stanowi połączenie WE-WY, a jej ruch osiowy powoduje przestawienie kątowe tych wałków względem siebie.
- **Walek WY-2**, - standardowy wałek rozrządu z krzywkami, zakończony nakładką wielowypustową o zarysie śrubowym.
- **Siłownik elektromagnetyczny** (nie pokazano na rysunku) - siłownik liniowy o ustalonym położeniu.

niu zerowym i możliwości dwustronnego odchylenia od tego położenia. Nie jest wymagana znajomość jego chwilowego położenia. Siłownik współpracuje ze zworką magnetyczną 16, która przemieszcza tuleję włączającą sprzęgło 10.

Widok podstawowych elementów sterowania mechanizmem przedstawiono na rys. 4, a na rys. 5 przedstawiono widok zewnętrzny siłownika do zmiany położenia wałka rozrządu



Rys. 4. Sprzęgło cierne i przekładnia stożkowa zmieniająca kierunek ruchu przekładni śrubowej  
*Figure 4. Friction clutch and bevel gear changing direction of screw*



Rys. 5. Siłownik do zmiany faz rozrządu (bez elektromagnesu)  
*Figure 5. Actuator to change the valve timing (without magnet)*

#### 4. Podsumowanie

Proponowany mechanizm nie wymaga istotnych ingerencji w układ rozrządu (przykładowo drążenia kanałów olejowych w wałku rozrządu), oraz ingerencji w inne zespoły silnika (blok, głowica). W obecnie rozwijanej konstrukcji wstępnie założono wymaganą zmianę położenia kąтового wałka **WY**

względem wałka **WE** o  $20^\circ$ , czego skutkiem będzie zmiana faz rozrządu o  $40^\circ$  OWK. Obrót wałka **WY** wynika z zastosowanego kąta nachylenia linii śrubowej wielowypustu na wałku **WY**. Korzystne jest uzyskanie zmiany położenia wałka **WY** obrotu przy jak najmniejszej sile bocznej działającej na tuleję przesuwaną 5. Zwiększenie osiowego przemieszczenia tulei przesuwnej 5 umożliwi zwiększenia zakre-

su zmian faz rozrządu kosztem większych gabarytów urządzenia. W skład oporów ruchu układu rozrządu wchodzi wszelkie opory tarcia elementów ruchomych, opory sprężyn zaworowych, opory bezwładności, oraz działanie gazów w komorze spalania na zawory głowicy. Ze względu na skomplikowany charakter obciążeń zadawanych przez układ rozrządu trudno jest precyzyjnie wyznaczyć rzeczywiste opory ruchu, i w obliczeniach wykorzystano zależności bardzo ogólne i przybliżone. Zaprojektowane urządzenie zgodnie z założeniami cechuje się małymi gabarytami. Wymagana siła włączająca mechanizm za pomocą elektromagnesu wynosi około 100 [N] i jest wyższa niż wstępnie oczekiwano. Do konstrukcji przyjęto stal ulepszoną, koła zębate stożkowe sprzęgła ciernego zaprojektowano jako jednolite, do wykonania podczas jednego procesu produkcyjnego. Jeżeli spełnienie warunku zadziałania siłą włączającą będzie trudne do pokonania z przyczyn konstrukcyjnych, można zastosować inne specjalne materiały zwiększające współczynnik tarcia sprzęgła ciernego stożkowego, lub zastosować rozwiązania z powodzeniem stosowane w samochodowych przekładniach automatycznych w postaci hamulców taśmowych. Aby kompensować siłę działającą w osi wałka rozrządu, wynikającą z rozkładu sił na wielowypuszcie śrubowym, korzystne jest zastosowanie kompensacyjnej sprężyny śrubowej, co zwiększa jednak gabaryty urządzenia. Bez względu na położenie tulei przesuwniej, siła ta zachowuje stałą wartość i zwrot. W tej wersji przyjęto mechanizm śrubowy samohamowny w związku z czym brak sprężyny nie wpły-

nie na precyzję działania mechanizmu. Możliwe jest jednak wykonanie siłownika elektromagnetycznego małych wymiarów, który spełni wymagania pracy z taką siłą włączającą.

Ze względu na małą bezwładność układu, pominięto czas pracy sprzęgła ciernego stożkowego w poślizgu, oraz czas reakcji elektromagnesu. Czas teoretyczny przestawienia mechanizmu pomiędzy skrajnymi położeniami to około 100 milisekund. Intensywność pracy urządzenia będzie zależała od wymaganego uchybu regulacji prędkości obrotowej i obciążenia. Zakładając czas wykonania pracy 100 milisekund, urządzenie przewyższa szybkością działania większość opisanych rozwiązań zmiany faz rozrządu (czas przełączania mechanizmu VANOS to ok. 250[ms]). Różnice prędkości obrotowej w zakresie 100-200 obr/min nie wydają się istotne z punktu widzenia potrzeby regulacji chwilowego kąta obrotu wałka rozrządu. Wpływa to istotnie na trwałość urządzenia. Ze względu na stosowane duże współczynniki bezpieczeństwa i wymiarowanie elementów wynikające głównie z możliwości zabudowy w mechanizmie, zużycie podzespołów powinno być minimalne. Najsilniej narażonym na zużycie elementem jest sprzęgło ciernie stożkowe pracujące w oleju smarującym, i na trwałość tego elementu wpływać będzie stosunkowo niewielka bezwładność mechanizmów, co minimalizuje pracę w poślizgu. Celowa wydaje się modelowa analiza urządzenia w celu optymalizacji pod względem kinematycznym, dynamicznym i wytrzymałościowym.

## Bibliography/Literatura

1. Brzeżański M.: System valvelift firmy Audi-innowacyjny system rozrządu silników spalinowych. Silniki Spalinowe nr 4/2008.
2. Goldstein R.J.: „Variables of electromagnetic valve actuator performance”, November 1997.
3. Karwas W.: Alfa Romeo 164. AUTO - Technika Motoryzacyjna 6'88.
4. Kollman K., Niefer H., Panten D.: Entwicklung der Ottomotoren. Motortechnische Zeitschrift 59 (1998) 10.
5. Michalak G.: Projekt wstępny urządzenia przeznaczonego do zmiany fazy wzniosu zaworów układu rozrządu w silniku czterosurowym. Praca dyplomowa magisterska nr 1419 wykonana w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, promotor- dr inż. Jerzy Larisch.
6. Staszek D.: Projekt wstępny urządzenia przeznaczonego do zmiany faz rozrządu w silniku spalinowym. Praca dyplomowa inżynierska nr 1537 wykonana w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, promotor- dr inż. Jerzy Larisch
7. Wajand J. A., Wajand J. T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybkoobrotowe. WNT W-wa 1993 r.
8. Materiały informacyjne firmy FEV Motorentechnik.
9. Materiały serwisowe firmy Fiat.
10. Materiały serwisowe firmy Honda

Mr Jerzy Larisch, DSc., – Adiunkt in the Faculty of Mechanical Engineering at University of Bielsko-Biala.

*Dr inż. Jerzy Larisch – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.*

