

CALCULATION AND VERIFICATION OF FORCES DRIVING OUTLET VALVES IN MAGNETOELECTRICAL VALVE TIMING OF COMBUSTION ENGINE

Krzysztof Zbierski

Politechnika Łódzka
Instytut Pojazdów, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, Poland
tel.: +48 42 6312390, e-mail: zbierski@p.lodz.pl

Krzysztof Siczek

Politechnika Łódzka
Katedra Konstrukcji Precyzyjnych, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, Poland
tel.: +48 42 6312251, e-mail: ks640709@p.lodz.pl

Abstract

A problem of camless magneto-electrical valve timing is the limited value of possible to generate force driving outlet valve. The physical model of integrated driving of outlet and of inlet valve with finite element mesh together, generated by computational program Ansys have been presented in article. The model has been based on the earlier built prototype of integrated assemblies driving - valve of magneto-electrical valve timing in experimental combustion engine, with single cylinder. Magneto-electrical valve timing has been supplied by current, with the voltage value equal 42 V. Calculated value of force generated in outlet valve driving has been equal 610 N, for the maximal value of current equal 60 A. The calculation has been verified on the mentioned prototype of integrated assemblies driving - valve of magneto-electrical valve timing, obtaining the value of force equal 628 N. Calculated values of forces were in a good agreement with the values obtained experimentally. It was found, the greater value of force driving outlet value could be obtained by increasing of driving gabarits, of magnetic flux density and of current value.

Key words: camless valve timing of combustion engine, magneto-electrical valve timing, magneto-electrical driving the valves of combustion engine

OBLICZENIE I WERYFIKACJA SIŁY NAPĘDZAJĄCEJ ZAWÓR WYLOTOWY MAGNETOELEKTRYCZNEGO ROZRZĄDU TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

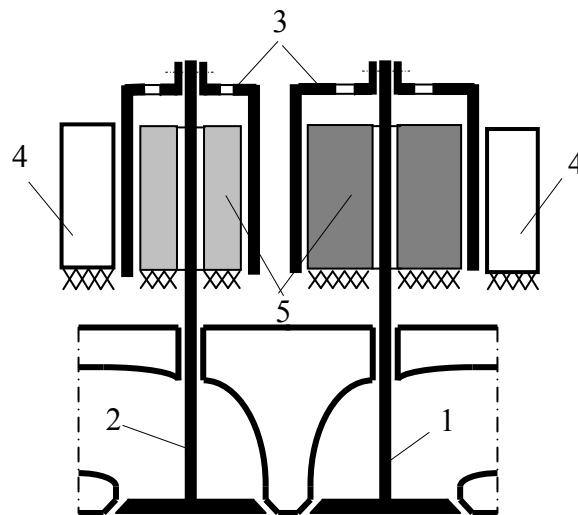
Streszczenie

Jednym z problemów bezkrzywkowego magnetoelektrycznego rozrządu jest ograniczona wartość możliwej do wygenerowania siły napędzającej zawór wylotowy. W artykule przedstawiono model fizyczny zblokowanych napędów zaworów wylotowego i dolotowego wraz z siatką elementów skończonych, wygenerowaną za pomocą programu obliczeniowego Ansys. Model ten oparto na zbudowanym wcześniej prototypie zblokowanych układów napęd - zawór magnetoelektrycznego rozrządu doświadczalnego, jednocylindrowego silnika spalinowego. Magnetoelektryczny rozrząd zasilano prądem o napięciu 42 V. Obliczona wartość siły generowanej w napędzie zaworu wylotowego wyniosła 610 N dla maksymalnej wartości natężenia prądu równej 60 A. Obliczenie to zweryfikowano na wspomnianym prototypie zblokowanych układów napęd - zawór magnetoelektrycznego rozrządu, otrzymując siłę o wartości 628 N. Obliczona wartość siły napędzającej zawór wylotowy wykazała zatem dobrą zgodność z wartością uzyskaną podczas eksperymentu. Stwierdzono, że możliwe jest uzyskanie jeszcze większej siły napędzającej zawór wylotowy na drodze zwiększenia wymiarów napędu, indukcji magnetycznej lub wartości natężenia prądu.

Słowa kluczowe: rozrząd bezkrzywkowy silnika spalinowego, rozrząd magnetoelektryczny, napęd magnetoelektryczny zaworów silnika spalinowego

1. Wprowadzenie

W pracach [3, 4, 5] opisano koncepcję magnetoelektrycznego rozrządu oraz jego bezsilnikowe badania, a także badania studialnego, jednocylindrowego silnika z takim rozrządem. Istota tego rozrządu polega na tym, że jego zawory wprawiane są w ruch za pomocą magnetoelektrycznych napędów, a ściślej ich ruchomych cewek, które wraz z pakietami magnetycznymi, składającymi się z magnesów i nabiegowników oraz rdzeniami tworzą magnetoelektryczne napędy zaworów. Natomiast magnetoelektryczny napęd i zawór tworzą układ: napęd – zawór. Na rysunku 1 pokazano schemat zblokowanych układów napęd – zawór. Z pracy [5] wynika, że każdy napęd powinien być napędem wielokrotnym, co oznacza, że musi zawierać w swych pakietach magnetycznych co najmniej dwie warstwy magnesów. Korpus ruchomej cewki posiada kształt cylindra, którego jeden koniec jest zamknięty za pomocą denka. Z denkiem połączony jest zawór rozrządu. Do uzwojeń cewek doprowadzany jest prąd, za pomocą sprężystych przewodów, nie zaznaczonych na rysunku 1. W denkach cewek znajdują się otwory wentylacyjne, które z jednej strony zmniejszają opory tłumienia aerodynamicznego, a z drugiej przyczyniają się do odprowadzenia ciepła od uzwojeń cewek, nagrzewających się pod wpływem przepływającego przez nie prądu elektrycznego. Wymagany docisk zaworów do ich gniazd, realizowany w rozrządzie krzywkowym za pomocą sprężyn zaworowych, uzyskany jest tu dzięki okresowo generowanej sile elektrodynamicznej.



Rys. 1. Schemat zblokowanych układów napęd – zawór

1 – zawór wylotowy, 2 – zawór dolotowy, 3 – ruchome cewki, 4 – pakiety magnetyczne (magnesy z nabiegownikami), 5 – rdzenie

Fig. 1. The scheme of integrated assemblies driving-valve

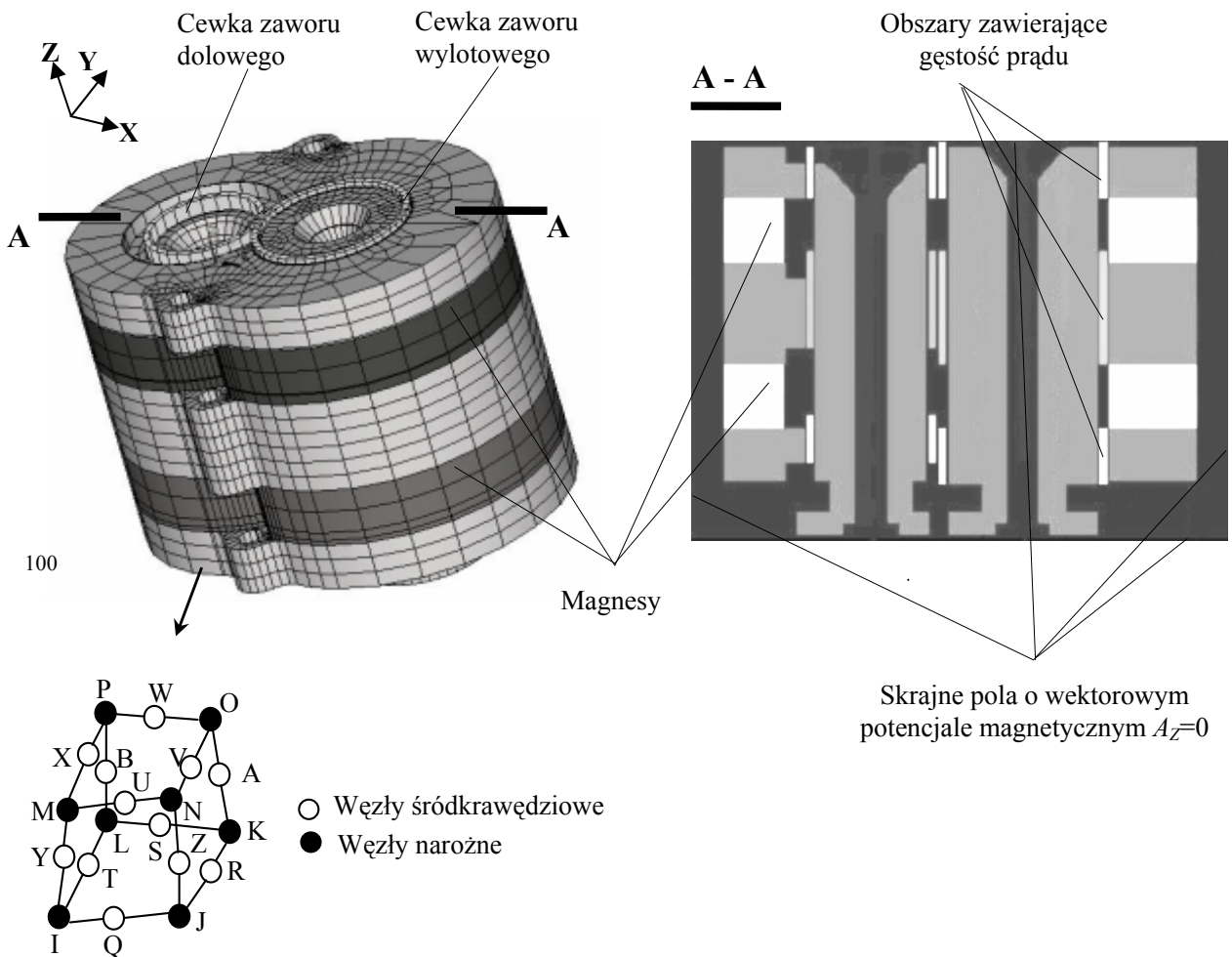
1 – outlet valve, 2 – inlet valve, 3 – movable coils, 4 – magnetic packets (magnets with pole pieces), 5 – cores

Jednym z problemów omawianego rozrządu magnetoelektrycznego jest ograniczona wartość elektrodynamicznej siły (siły Lorentza) napędzającej zawór wylotowy. Spowodowane jest to stosunkowo małą średnicą ruchomej cewki oraz ograniczoną wartością napięcia prądu stałego w instalacji elektrycznej silnika spalinowego. Zbyt mała siła napędzająca nie zapewnia otwierania zaworu wylotowego w całym polu obciążeń i prędkości obrotowych silnika spalinowego. W pracy [5] oszacowano, że przy napięciu prądu wynoszącym 42 V, możliwe byłoby wytworzenie siły napędzającej zawór wylotowy, wynoszącej około 700 N. Poniżej przedstawiono obliczenie i eksperymentalną weryfikację siły napędzającej zawór wylotowy w magnetoelektrycznym rozrządzie zasilanym prądem o napięciu 42 V.

Praca naukowa była finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyzacji w latach 2004 – 2006 jako projekt badawczy [6].

2. Obliczenie siły napędzającej zawór wylotowy

Na rysunku 2 przedstawiono model fizyczny zblokowanych napędów zaworów wraz z siatką elementów skończonych, wygenerowaną za pomocą programu obliczeniowego Ansys [1].



Rys. 2. Model fizyczny zblokowanych napędów zaworów rozrządu
 Fig. 2. The physical model of integrated magneto-electrical driving of valves

Wartości parametrów geometrycznych modelowanych magnesów stałych, rdzeni i nabiegowników odpowiadały parametrom tych elementów zbudowanego wcześniej prototypu zblokowanych napędów magneto-elektrycznego rozrządu doświadczalnego, jednocylindrowego silnika spalinowego. W obliczeniach uwzględniono magnesy AM20ST o niemal liniowym charakterze

krzywej odmagnezowania $B(H)$, rdzenie i nabiegunki z wyżarzonej stali niskowęglowej o charakterystyce odmagnezowania podanej w [1, 7].

Geometrię analizowanego napędu cechowała symetria względem płaszczyzny ZX (rys.2), co ułatwiło generowanie siatki elementów skończonych. W celu uproszczenia obliczeń założono, że indukcja magnetyczna, właściwości materiałowe nabiegunków, rdzenia, magnesów i cewek nie zmieniają się w czasie. Ponadto zaniedbano istnienie prędkości i przyspieszenia cewki w jej kolejnych położeniach względem magnesu, rdzenia i nabiegunków. Pominięto także powstające w cewce siły samoindukcji.

Do obliczeń wykorzystano element skończony (rys. 2), oparty na wektorowym potencjale magnetycznym. Węzły narożne: I, J, K, L, M, N, O, P elementu posłużyły do zdefiniowania jego geometrii i wprowadzenia wartości gęstości prądu, równomiernie rozłożonej na poszczególne węzły. Węzły środkowe: R, S, T, Q, A, B, Y, Z, X, U, V, W wykorzystywano do wyznaczenia podstawowych stopni swobody, tj. wartości wektorowego potencjału magnetycznego, obliczanych przez program [1]. Dodatkowymi stopniami swobody elementu skończonego były: indukcja magnetyczna B i natężenie pola magnetycznego H .

Warunki brzegowe były następujące (rys.2):

- w węzłach elementów skończonych, leżących na zewnętrznych powierzchniach obszaru powietrza wprowadzono wartości wektorowego potencjału magnetycznego $AZ = 0$,
- w węzłach elementów skończonych, leżących w obszarach górnego, środkowego i dolnego uzwojenia cewki zaworu wylotowego wprowadzono, uwzględniając kierunek przepływu prądu, wartości gęstości prądu. Wartości gęstości prądu obliczono dzieląc iloczyn liczby zwojów i wartości prądu przez pole przekroju poprzecznego cewki. W wyniku obliczeń uzyskano rozkłady wypadkowej indukcji magnetycznej obrazujące rozkład pola magnetycznego w napędzie.

Siły elektrodynamiczne F działające na ruchomą cewkę obliczono, jako siły Lorentza ze wzoru (1) [1]

$$\{F\} = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} \{N_i\}^T (\{J_i\} \times \{B_i\}) d(V_i), \quad (1)$$

gdzie:

N_i – funkcja kształtu i – tego elementu skończonego cewki;

J_i – gęstość prądu w obszarze i – tego elementu cewki;

B_i - indukcja magnetyczna w obszarze i – tego elementu cewki;

V_i – objętość i – tego elementu skończonego cewki.

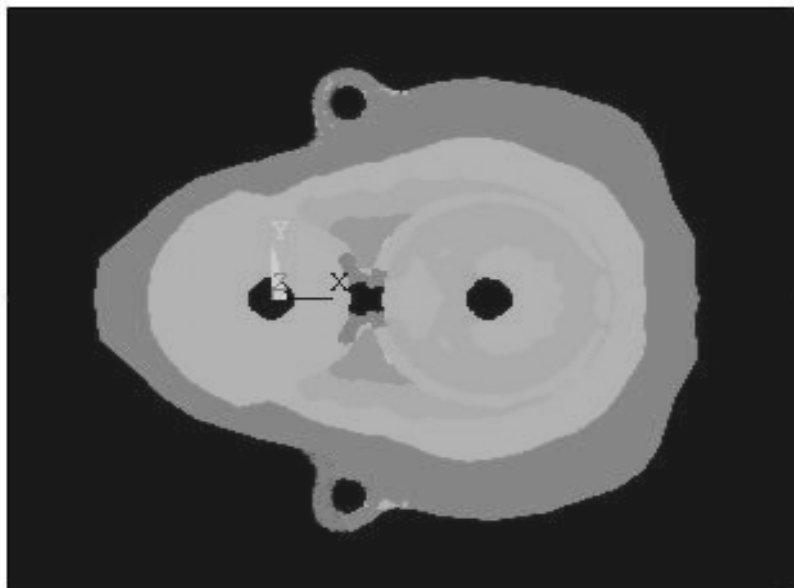
Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przykładowe rozkłady pól magnetycznych w przekrojach podłużnym i poprzecznym zblokowanych napędów dla przypadku, gdy w cewce zaworu wylotowego, w chwili otwierania tego zaworu, przepływa prąd o natężeniu 60 A, zaś w tej samej chwili brak jest przepływu prądu przez cewkę zaworu dolotowego. Nie uwzględniono tu prądu docisku zaworu dolotowego. W rzeczywistości, podczas pracy silnika w cewce zaworu dolotowego przepływa wtedy prąd, wytwarzający wymaganą się docisku zaworu dolotowego do jego gniazda. Przepływowi tego prądu, o małej wartości, towarzyszy pole magnetyczne w cewce zaworu dolotowego, którego wpływ na rozkład pola magnetycznego w napędzie pominięto. Rozkłady pola zostały wyznaczone w oparciu o obliczone wartości wektorowego potencjału magnetycznego w środkowych węzłach poszczególnych elementów. Cały zakres obliczonych wartości wektorowego potencjału magnetycznego podzielono równomiernie na kilka przedziałów wartości i przypisano tym przedziałom kolejne odpowiednie kolory, zgodnie z mapą kolorów wykorzystywaną przez program. Na rysunkach 3 i 4, zamieszczono obszary przestrzeni, z których każdy jest oznaczony innym kolorem, odpowiadającym stosownemu przedziałowi wartości wektorowego potencjału magnetycznego.



Wypadkowa indukcja w teslach [T]



Rys. 3. Rozkład indukcji magnetycznej w przekroju płaszczyzną ZX zblokowanych napędów zaworów rozrządu
Fig. 3. The magnetic flux density gradient in by ZX plane cut-set of integrated magneto-electrical driving of valves



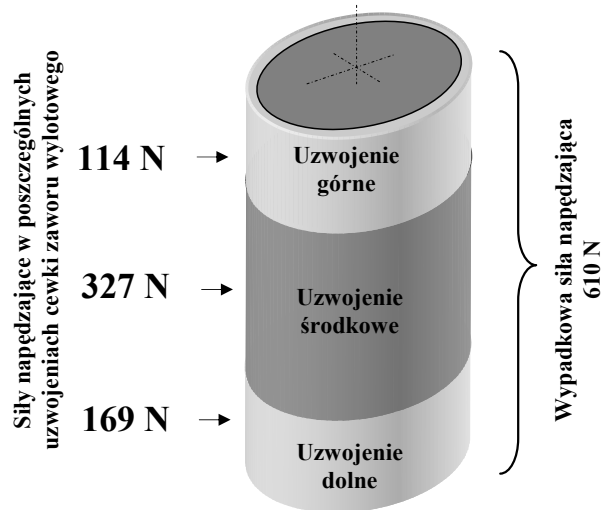
Wypadkowa indukcja w teslach [T]



Rys. 4. Rozkład indukcji magnetycznej w przekroju prostopadłym do osi cewek w połowie wysokości zblokowanych napędów zaworów rozrządu
Fig. 4. The magnetic flux density gradient in perpendicular to axis of coils cut – set of integrated magneto-electrical driving of valves in a half of height of the driving

Zauważalna jest występująca, między innymi, w obszarach zajmowanych przez poszczególne uzwojenia cewki asymetria rozkładu pola magnetycznego w kierunku osi X (oznaczenie jak na rys. 2), spowodowana przede wszystkim asymetrią geometrii napędu względem płaszczyzny YZ. Wartości indukcji pola magnetycznego w obszarze zajmowanym przez uzwojenia cewek w rejonie ich największego zbliżenia są o ponad 50% mniejsze niż w pozostałych obszarach. Bardzo małe wartości, poniżej 0.4 T, indukcji magnetycznej pola przechodzącego przez uzwojenia cewek występują w rejonie środkowych uzwojeń cewek napędzających zawory.

Wartości obliczonych elektrodynamycznych sił napędzających, generowanych w uzwojeniach cewki zaworu wylotowego podano na rysunku 5.

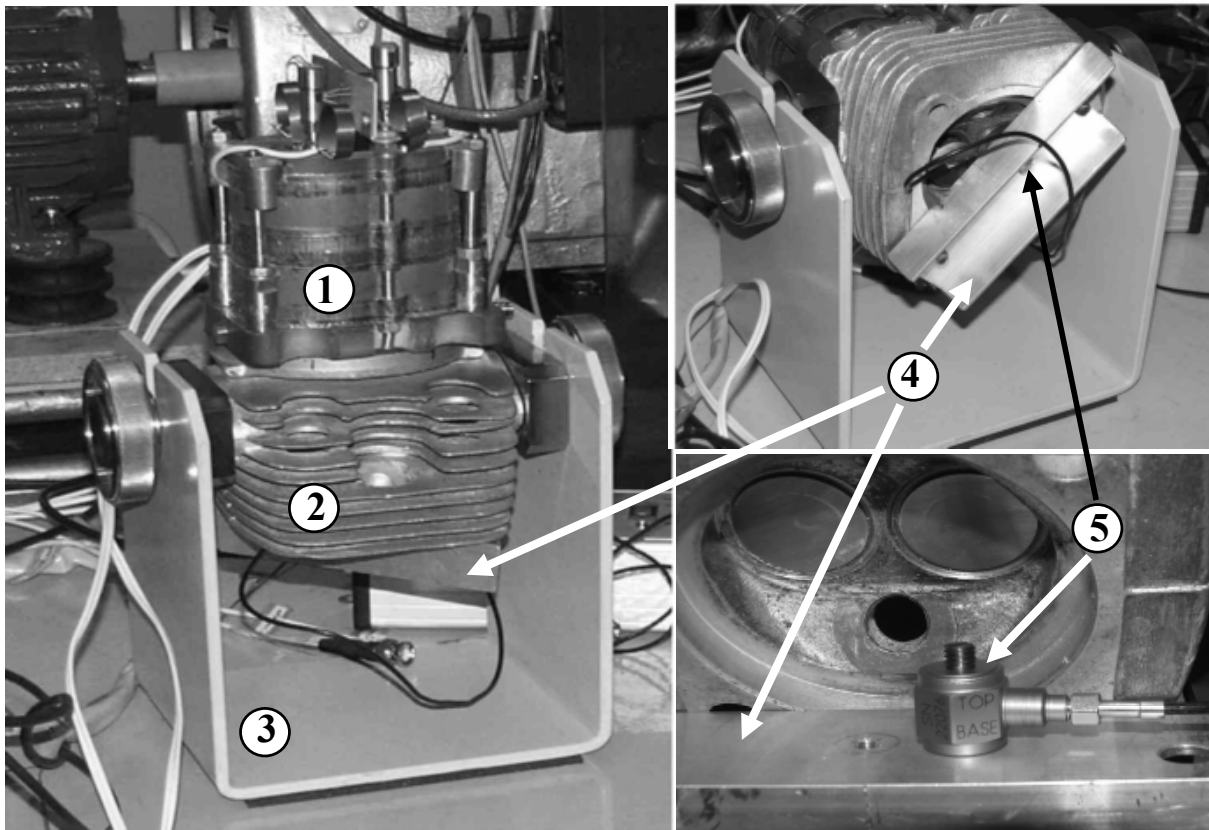


Rys. 5. Wartości sił elektrodynamicznych generowanych w uzwojeniach cewki zaworu wylotowego
Fig. 5. Values of electrodynamic force generated in wire of coil of outlet valve

Siły w poszczególnych uzwojeniach cewki zaworu wylotowego miały wartości odpowiednio: w górnym uzwojeniu 114 N, w środkowym 327 N, zaś w dolnym 169 N. Obliczona wypadkowa wartość siły napędzającej zawór wylotowy wyniosła 610 N. Wartość siły generowanej w środkowym uzwojeniu cewki ma największy udział, ponad 50 %, w wartości siły elektrodynamicznej, działającej na ruchomą cewkę napędu. Asymetria pola elektromagnetycznego względem osi cewki w kierunku osi X, jest największa w dolnej i środkowej części cewki. Mała wartość indukcji magnetycznej w obszarze największego zbliżenia cewek powoduje, że niektóre uzwojenia cewek pozostają niewykorzystane, do generowania siły napędzającej zawór. Największy stopień niewykorzystania dotyczy uzwojenia środkowego cewki.

3. Eksperymentalna weryfikacja siły napędzającej zawór wylotowy

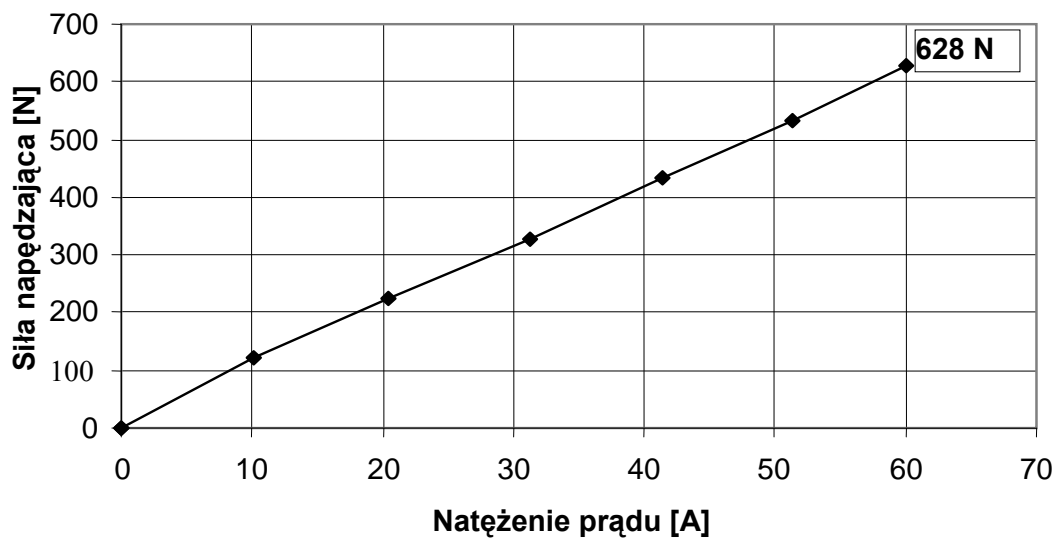
Eksperymentalną weryfikację obliczonej siły napędzającej zawór wylotowy magnetoelektrycznego rozrządu przeprowadzono na stanowisku bezsilnikowym pokazanym na rysunku 6. Widoczny jest na nim prototyp zblokowanych układów napęd – zawór, zamontowany na głowicy doświadczalnego, jednocylindrowego silnika spalinowego. Do niej, od strony jej dolnej płyty, przykręcona jest belka 4 z czujnikiem siły 5. Całość zamocowana jest w podstawie 3. Belka 4 umożliwia umieszczenie czujnika siły, zarówno pod zaworem wlotowym, jak i dolotowym. Przed rozpoczęciem pomiaru czujnik dociśnięty jest do zaworu z pewnym napięciem wstępnym. Zastosowano czujnik siły firmy PCB Piezotronics o zakresie pomiarowym od 0 do 1000 N. Pomiar siły wykonywano zasilając kolejno cewkę zaworu wylotowego impulsowymi prądami o natężeniach od 10 do 60 A. Prąd zasilający pobierany był z kondensatora ładowanego za pomocą zasilacza sieciowego.



Rys. 6. Widok stanowiska do pomiarów sił napędzających zawory magnetoelektrycznego rozrządu silnika spalinowego
 1 – prototyp zblokowanych układów napęd – zawór, 2 – głowica doświadczalnego, jednocylindrowego silnika spalinowego, 3 – podstawa stanowiska, 4 – belka do mocowania czujnika siły, 5 – czujnik siły
 Fig. 6. The view of investigative stand for measurement of forces driving valves in magnetolectrical valve timing of combustion engine

1 – prototype of integrated driving – valve system, 2 – the head of experimental combustion engine with single cylinder, 3 – base of investigative stand, 4 – the beam for fixing a force sensor, 5 – force sensor

Wyniki pomiarów, w postaci zależności siły napędzającej zawór wylotowy od natężenia prądu przepływającego przez cewkę, przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Zależność siły napędzającej zawór wylotowy od natężenia prądu przepływającego przez cewkę zaworu wylotowego

Fig. 7. The dependence of force driving outlet valves upon current flowing in wire of coil of the outlet valve

4. Podsumowanie

Obliczona wartość siły napędzającej zawór wylotowy wykazuje dobrą zgodność z wartością siły otrzymaną z eksperymentu. Zatem przedstawiony przestrzenny model napędu oraz procedury obliczeniowe pola magnetycznego i siły generowanej w napędzie zaworu wylotowego są w pełni wiarygodne. Ma to duże znaczenie z punktu widzenia optymalizowania magnetoelektrycznych napędów ze względu na maksymalizację siły napędzającej. Optymalizowanie to musi być kompromisem między wartościami trzech wielkości, od iloczynu których zależy wartość siły napędzającej. Do tych wielkości należą: natężenie prądu przepływającego przez cewkę, indukcja magnetyczna oraz długość uzwojenia cewki. Wartość pierwszej z wymienionych wielkości czyli natężenia prądu, pomijając ograniczenia wynikające, między innymi, z oporności uzwojenia cewki oraz jakości układu sterującego, zależy od wartości napięcia stojącego do dyspozycji źródła prądu. W przypadku ewentualnych przyszłościowych prądowych instalacji samochodowych, granicznym byłoby napięcie 42 V. Możliwość uzyskania znacznie większego napięcia istnieje w samochodach z napędami hybrydowymi (spalinowo-elektrycznymi). Większą indukcję magnetyczną można uzyskać stosując magnesy trwałe o większej gęstości energii magnetycznej. Jednak istnieje tu pewne ograniczenie wynikające z przebiegu charakterystyk odmagnesowania magnesów [2]. Na ogół nie można jednocześnie zwiększyć indukcji remanencji i natężenia koercji magnesu, ponieważ ogranicza to maksymalna wartość energii elektromagnetycznej zakumulowanej w magnesie. Zwiększenie długości uzwojenia jest również ograniczone ze względu na stosunkowo małe średnice cewek spowodowane niewielkimi odległościami między zaworami silnika spalinowego. Zwiększenie długości uzwojenia może natomiast istotnie poprawić inne ukształtowanie cewek, np. o przekroju prostokąta, o większym boku w kierunku osi Y omawianego napędu. Większa długość uzwojenia to jednak zwiększenie masy ruchomej cewki, a zatem większe zapotrzebowanie na siłę napędzającą, przy takim samym czasie otwierania zaworu. Istotne powiększenie siły napędzającej można uzyskać także przez określone podwyższenie napędu zaworu wylotowego.

Ogólnie można powiedzieć, że istnieją jeszcze możliwości zwiększenia siły napędzającej zawór wylotowy silnika, co jest między innymi przedmiotem dalszych prac rozwojowych w dziedzinie magnetoelektrycznego rozrządu tłokowego silnika spalinowego.

Literatura

- [1] Ansys Documentation Help on – line, version 8.0, 2004.
- [2] Leonowicz, M., Wysłocki, J., *Współczesne magnesy*, WNT, Warszawa 2005.
- [3] Zbierski, K., *Regulacja napelniania silnika o zaplonie iskrowym za pomocą rozrządu magnetoelektrycznego*, Journal of Internal Combustion Engines, Kones 2003, Warszawa - Wisła 2003.
- [4] Zbierski, K., *Theoretical basis of electromagnetic valve timing of combustion engine*, Journal of Internal Combustion Engines, Kones 2004, Zakopane 2004.
- [5] Zbierski, K., *Wstępne badania studialnego silnika z rozrządem elektromagnetycznym*. Journal of Kones Internal Combustion Engines. Kones 2005, Polanica 2005.
- [6] Zbierski, K., *Badania bezkrzywkowego, magnetoelektrycznego rozrządu silnika spalinowego*. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Nr 4 T12D 018 26, COBR Polmatex - Cenaro w Łodzi, Łódź maj 2006.
- [7] Zbierski, K., Siczek, K., Kossowski, Z., *Napęd magnetoelektryczny. Teoretyczne podstawy*. Napędy i Sterowanie, nr 9/2004.