

Dr inż. Krzysztof Więclawski
Dr hab. inż. Jędrzej Mączak, prof. ucz.
Dr inż. Krzysztof Szczurowski

Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, IP
Politechnika Warszawska
Narbutta 84., 02-524 Warszawa, Polska
E-mail: krzysztof.wieclawski@pw.edu.pl

Przebieg prądowy jako źródło informacji o parametrach sterowania wtryskiwaczem paliwowym wtrysku pośredniego

Electric current waveform as a source of information about control parameters indirect injection fuel injector

Słowa kluczowe: *wtryskiwacz, diagnostyka wtryskiwacza*

Keywords: *injector, injector diagnostics, ciśnienie wtrysku, przebieg prądowy.*

Streszczenie:

Artykuł przedstawia wyniki eksperymentów laboratoryjnych polegających na testowaniu wtryskiwaczy paliwowych stosowanych w silnikach spalinowych z wtryskiem pośrednim. Podczas eksperymentów wykonano wiele cykli dawkowania wtryskiwaczy zmieniając parametry sterowania, dzięki czemu opracowano charakterystyki dawkowania i określono wpływ stosowanych parametrów sterowania na wynikowy przepływ paliwa. Jednocześnie rejestrowano przebiegi napięcia i natężenia prądu elektrycznego w cewce wtryskiwacza, dzięki czemu możliwe było powiązanie charakterystyk prądowych z determinantami pracy wtryskiwacza. Wykazano, iż parametry prądowe są precyzyjnym kryterium oceny pracy zaworu elektromagnetycznego, ponieważ dzięki wykonanej przez prąd pracy powstaje przepływ paliwa. Zatem poprzez obserwację zmian prądu płynącego przez cewkę zaworu, można precyzyjnie monitorować prawidłowość procesu otwierania przepływu oraz natężenie prądu, przy którym przepływ się rozpoczął oraz określać wielkości mechaniczne jak dawka i ciśnienie paliwa. Wynikiem badań jest opracowanie charakterystyki wiążącej ciśnienie paliwa z natężeniem prądu w punkcie podnoszenia iglicy, co jest podejściem nowatorskim. Taka charakterystyka może być wykorzystana w diagnostyce i sterowaniu wtryskiwaczy paliwowych oraz wszelkiego rodzaju zaworów elektromagnetycznych.

Abstract:

The article presents the results of laboratory experiments consisting in testing fuel injectors used in indirect injection internal combustion engines. During the experiments, many injector dosing cycles were made, changing the control parameters. As a result, the dosage characteristics were developed, and the effect of the control parameters used on the resulting fuel flow was determined. Simultaneously, voltage and electric current waveforms in the injector coil were recorded, so it was possible to link current characteristics with the determinants of the injector operation. It has been shown that current parameters are a precise criterion for assessing the operation of the solenoid valve, because the work done by the current creates a fuel flow. Thus, by observing the changes in the current flowing through the valve coil, one can precisely monitor the correctness of the process of opening the flow and the current at which the flow began and determine the mechanical quantities such as the dose and pressure of the fuel. The result of the research is the development of a characteristic linking the fuel pressure with the current intensity at the needle lifting point, which is

an innovative approach. Such characteristics can be used in diagnostics and controlling fuel injectors and all kinds of solenoid valves.

1. Wprowadzenie

Artykuł przedstawia wyniki eksperymentów laboratoryjnych, których celem było powiązanie parametrów prądowych zarządzających pracą wtryskiwacza elektromagnetycznego z jego parametrami mechanicznymi. Wykorzystanie związku parametrów mechanicznych z wielkościami prądowymi pozwala, na podstawie łatwo obserwowalnych parametrów prądowych, nadzorować pracę wtryskiwacza oraz precyzyjnie oceniać jakość poszczególnych faz wtrysku, czyli kontrolować stan techniczny układu paliwowego i wtryskiwacza podczas jego eksploatacji. Znajomość relacji tych parametrów można wykorzystać nie tylko w diagnostyce wtryskiwacza, ale również w sterowaniu nim. Wynika to z faktu, że dzięki pracy wykonanej przez prąd powstaje przepływ paliwa, doprowadzanego do wtryskiwacza pod odpowiednim ciśnieniem. Prąd elektryczny, przepływający przez cewkę zaworu, powoduje powstanie strumienia magnetycznego a w wyniku jego działania pojawia się siła magnetyczna działająca na iglicę (element odcinający przepływ paliwa). Siła ta, po pokonaniu wszystkich sił oporu przeciwstawiających się tej akcji, umożliwia podniesienie iglicy. Dodatkowo, połączenie elektryczne cewki wtryskiwacza realizuje jednocześnie jej sterowanie i zasilanie. Reasumując, praca wykonana przez siłę magnetyczną, wynikającą z przepływającego prądu, jest czynnikiem wiążącym prąd z wartościami mechanicznymi. Dzięki dokładnemu zdefiniowaniu powyższych relacji, można precyzyjnie określić rzeczywiste początki i końce kolejnych faz procesu wtrysku paliwa, co z kolei można wykorzystać w zarządzaniu pracą silnika. Taka identyfikacja może pozwolić na opracowanie odmiennej strategii w stosunku do dotychczasowej logiki sterowania. Posiadając określone na bieżąco informacje o rzeczywistym początku i czasie trwania kolejnych faz wtrysku, można opracować sterownik silnika wykorzystujący te informacje. Sterownik taki będzie odpowiednio korygował sterowanie wtryskiwaczami w przypadku wykrycia zmian w rozpoczęciu i zakończeniu dawkowania w przeciwieństwie do obecnie stosowanych metod bazujących wyłącznie na pomiarze jakości spalin i korekcie parametrów wtrysku na podstawie zaprogramowanych wcześniej map [1]. Dodatkową weryfikacją procesu sterowania może być wielkość dawki paliwowej, określona na podstawie całkowania przebiegu prądowego, w ramach danego sposobu sterowania przepływem prądu przez cewkę wtryskiwacza. Dokładna znajomość chwilowych parametrów faz wtrysku może być również wykorzystana do precyzyjnej diagnostyki wtryskiwaczy przyczyniając się do wczesnego wykrycia uszkodzeń, mogących wpłynąć na degradację układu oczyszczania spalin a nawet uszkodzenie silnika. Z tego też powodu wczesne wykrywanie uszkodzeń w układzie paliwowym jest niezmiernie istotne.

Działanie wtryskiwacza paliwowego może być oceniane na podstawie różnych wielkości. Weryfikacji może podlegać sygnał sterujący lub wynik sterowania, czyli jakość generowanej strugi [3]. Kształt, kąt i stopień rozpylenia mieszanki świadczą o jakości otrzymanej dawki. Lee i in. [5], przeprowadził analizę dynamicznego zachowania zaworu elektromagnetycznego, badając jednocześnie zjawisko pola elektromagnetycznego i przepływ przez kanał wylotowy [10]. W swojej pracy Harantova [2] przedstawiła projekt oraz analizę układu sterowania i zasilania wtryskiwacza. Analizowane było napięcie zasilania wtryskiwacza, ciśnienia w układzie paliwowym dla określonej szerokości impulsu sterującego (PWM) [9]. Jednocześnie starano się osiągnąć jak najwyższą wydajność i stabilność pracy wtryskiwacza. W pracy [12], przedstawiono metodę weryfikacji wtryskiwaczy paliwowych na podstawie charakterystyk prądowych oraz możliwość korygowania działania wtryskiwacza poprzez stosowanie odpowiednich algorytmów sterowania. Tan i in. [14] przedstawia, jak

można dostosować strategię sterowania wtryskiwaczem, żeby uwzględnić zmiany w rezystancji i indukcyjności jego cewki, uwzględniając efekty starzenia. Nikolić i in. [8] omówił procesy zachodzące w systemach dostarczania paliwa, mianowicie wtrysk paliwa, tworzenie mieszanki, spalanie a także emisję spalin. Wyznaczono funkcję K jako powiązanie między prędkością przepływu paliwa i ciśnieniem paliwa w zależności od jego rodzaju [4] [11]. Wahania ciśnienia paliwa mają zasadniczy wpływ na rozpylenie, spalanie i wielkość przepływającego strumienia paliwa oraz opóźnienia w pracy wtryskiwacza [6] [7]. Stępień [13], opisał proces tworzenia się osadów w kanałach paliwowych wtryskiwacza paliwowego, wpływ powstałych osadów na zmiany parametrów diagnostycznych wskazujących na stopień degradacji wtryskiwacza. W pracy [4] przedstawiono nową metodę wykorzystującą przepływomierz Coriolisa (CFM) oraz nową, opatentowaną technikę przetwarzania sygnału, do pomiaru przepływu paliwa. Wykazano, że jest możliwy pomiar prędkości przepływu poszczególnych wtryskiwaczy w silniku w czasie rzeczywistym, co pozwala na dokładną ocenę procesu wtrysku. Merola i in. [7] przedstawił metodę weryfikacji wtrysku paliwa i procesu spalania za pomocą diagnostyki optycznej za pomocą systemu endoskopowego sprzężonego z kamerą CCD zamontowany w kolektorze dolotowym.

Powyżej przytoczone zostało kilka przykładów aktualnych publikacji, przedstawiających metody oceny funkcjonowania wtryskiwacza paliwowego. Jest to końcowy element układu paliwowego i od jego prawidłowego działania, zależy prawidłowa praca silnika. Uszkodzenia wtryskiwacza mogą spowodować degradację układów oczyszczania spalin (reaktora katalitycznego). Z tych powodów prawidłowa diagnostyka i sterowanie wtryskiwaczem paliwowym jest niezmiernie istotnym zagadnieniem eksploatacyjnym. W kolejnych rozdziałach zaprezentowano, nowatorską metodę diagnostyki wtryskiwaczy paliwowych i wszelkiego rodzaju zaworów elektromagnetycznych. Metoda opiera się na identyfikacji wartości natężenia prądu sterującego wtryskiwaczem w punkcie podnoszenia iglicy. Wartość natężenia prądu w tym punkcie, nie jest wartością stałą. Zależy od kilku czynników wynikających z właściwości wtryskiwacza i parametrów sterowania. Precyzja określania wartości prądowych i szczegółowa analiza determinant sterowania wtryskiwaczem, pozwala na wykorzystanie współzależności wartości natężenia prądu, w charakterystycznych punktach przebiegu prądowego dawkującego wtryskiwacza z parametrami mechanicznymi wtryskiwacza. Na podstawie obserwacji charakterystycznych punktów prądowych, można wykryć praktycznie wszystkie uszkodzenia elektryczne i mechaniczne wtryskiwacza, bez potrzeby wykorzystywania diagnostyki poprzez złącze OBD oraz innych metod w tym opierających się na wymontowaniu wtryskiwacza z silnika pojazdu. Metoda diagnostyki przedstawiona w tym artykule, może być wykonywana w trakcie eksploatacji bez demontażu wtryskiwacza a po odpowiednim zaimplementowaniu w sterowniku silnika, uzyska się narzędzie działające automatycznie, zapewniające wczesne wykrywanie uszkodzeń zarówno wtryskiwacza jak i układu paliwowego. W literaturze dotyczącej diagnostyki wtryskiwaczy paliwowych, nie ma metod opartych na zależności przedstawionej w kolejnym rozdziale 3, niniejszego artykułu.

2. Dawka i strumień paliwa

Parametry prądowe precyzyjnie opisują zjawiska, którymi zarządzają. Przedstawia to rys. 1, w którym rosnące pole powierzchni pod przebiegiem natężenia prądu (ciągła, czerwona linia) odzwierciedla coraz większy przepływ określonego medium w odpowiedzi na wydłużanie impulsu napięciowego od 2 ms do 15 ms. Na każdym z przebiegów z rys. 1, na poziomie 0,6 V umieszczono kropkowaną granatową linię określającą wskazania fotodetektora, przetwarzającego natężenie światła lasera na napięcie. W wykonanych badaniach stanowiskowych strumień paliwa zakłócał światło lasera przebiegające pod dyszą

wtryskiwacza zmniejszając napięcie fotodetektora o około 0,15 V. Na podstawie tego sygnału można określić rzeczywisty czas przepływu paliwa przez wtryskiwacz.

Praca wtryskiwacza opiera się na prawidłowym współdziałaniu układów elektrycznego i hydraulicznego, sterowanie którymi zapewnia układ elektroniczny. Przepływ prądu w trakcie trwania zadanego czasu wtrysku określa równanie ciągłości:

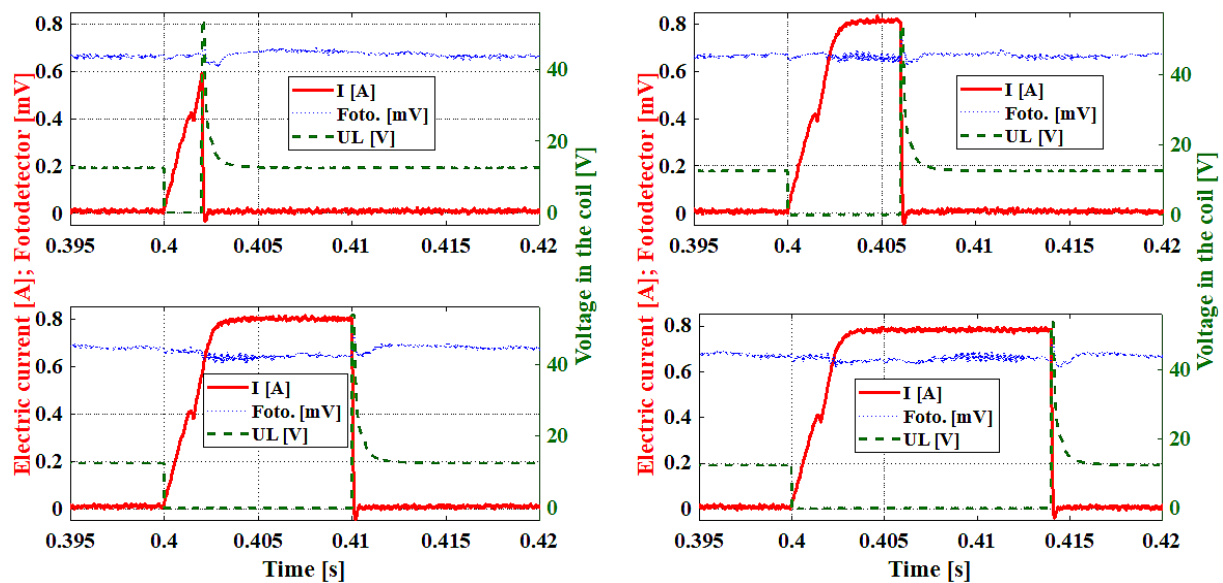
$$\nabla j + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

gdzie: j – gęstość prądu elektrycznego,

$\nabla j = \frac{\partial j}{\partial x} + \frac{\partial j}{\partial y} + \frac{\partial j}{\partial z}$ – mnożenie skalarne z operatorem wektorowym nabra,

ρ – gęstość ładunku elektrycznego,

t – czas [s].



Rys. 1. Przebiegi zmian prądu, napięcia oraz natężenia światła lasera odpowiadające zwiększonym czasom wtrysku, od 2 ms do 15 ms zarejestrowane na stanowisku badawczym

Gęstość prądu j , jest wynikiem różniczkowania natężenia prądu względem powierzchni, przez którą przepływa:

$$j = \frac{dI}{dA} \quad (2)$$

gdzie: I – natężenie prądu [A], A – powierzchnia przekroju [m²].

Ruch iglicy wtryskiwacza wynika ze zmiany strumienia magnetycznego φ , który z kolei wynika z przepływającego przez cewkę prądu I . Mamy wtedy do czynienia z przepływem ładunku elektrycznego Q :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{1}{RQ} \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{dt} dt = \frac{\varphi}{R} \quad (3)$$

gdzie R jest rezystancją [Ω], zaś φ to strumień magnetyczny [Wb].

Dzięki przepływowi ładunków elektrycznych uzyskujemy przepływ paliwa, opisany analogicznym równaniem. Równanie ciągłości strumienia:

$$\rho * \nabla v + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

We wzorze tym v oznacza objętość [m^3].

Zmiany strumieni przepływającego paliwa, można odnieść do przepływającego ładunku elektrycznego podczas dawkowania wtryskiwacza. Korzystając z przebiegów prądowych, wykonano charakterystyki dawki oraz strumienia paliwa odpowiadające przebiegom prądowym. Przykładowo, dla czasu wtrysku 10 ms i ciśnienia wtrysku $p = 0,3$ MPa, uzyskano przepływ strumienia o wartości: $0,0061 \pm 0,000124 \frac{mg}{ms}$, co związane jest z przepływem ładunku elektrycznego $Q = 0,00668$ C. Ładunek elektryczny Q , obliczono całkując przebieg prądowy (3). Następnie obliczono teoretyczną wielkość strumienia paliwa według równania (5):

$$\dot{m} = f_{s-c} * A * \rho * \sqrt{\frac{2*(p_1-p_2)}{\rho_i}} \quad (5)$$

gdzie: f_{s-c} – współczynnik przepływu,

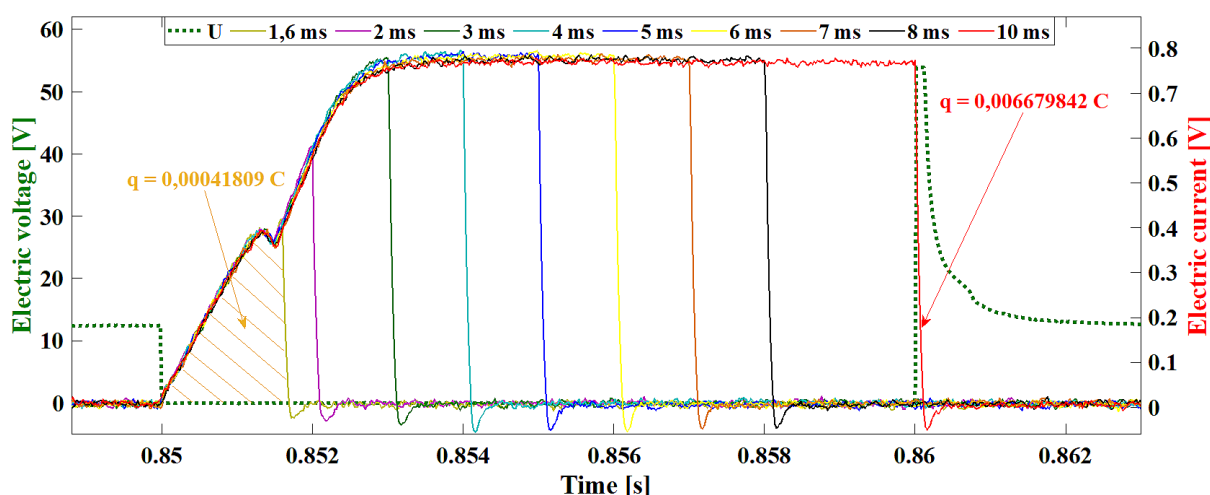
ρ_i – gęstość paliwa podczas przepływu przez dyszę wtryskiwacza,

p_1 – ciśnienie paliwa przed wtryskiwaczem,

p_2 – ciśnienie paliwa za wtryskiwaczem.

Dla podanego powyżej przykładu (10 ms i 0,3 MPa), otrzymano przepływ masowy o wielkości: $0,00556 \frac{mg}{ms}$. Wynik obarczony jest błędem pomiaru, wynikającym z niepewności pomiaru parametrów z równania (5) takich jak: ciśnienie paliwa czy gęstość paliwa. Wynik obliczenia różni się od rzeczywistego o $0,000416 \frac{mg}{ms}$. Z uwagi na niepewność pomiaru wielkości z równania (5), jest to wynik zadowalający.

Rys. 2, przedstawia nałożone na siebie przebiegi prądowe dla różnych szerokości impulsów napięciowych, od 1,6 ms do 10 ms.

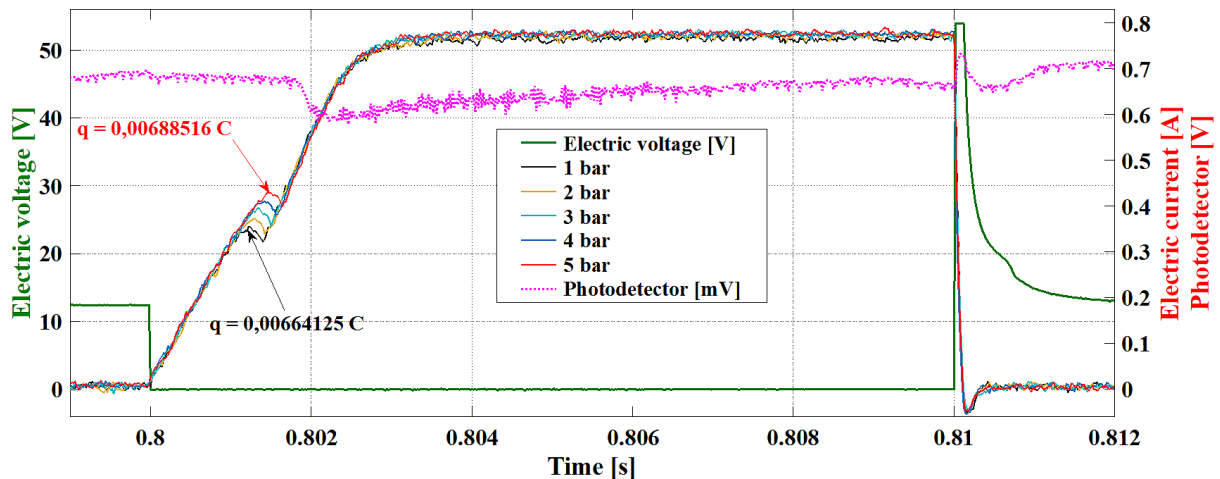


Rys. 2. Przebiegi prądowe dla różnych szerokości impulsów napięciowych, od 1,6 ms do 10 ms, z przyporządkowaniem pola powierzchni pod przebiegiem.

Do zakresu 1,6 ms (zakres pierwszy z lewej na rys. 2, objęty złotą ciągłą linią), przyporządkowano ładunek elektryczny $q_{1,6ms} = 0,000418$ C, natomiast do zakresu 10 ms

(cały przebieg prądowy – objęty czerwoną ciągłą linią) ładunek elektryczny o wartości $q_{10ms} = 0,00668$ C. Różnica między $q_{1,6ms}$ a q_{10ms} jest 16-krotna. Pola powierzchni kolejnych zakresów jak i ładunki elektryczne są proporcjonalne do odpowiadających im wartości.

W przypadku zakresów prądowych dla różnych ciśnień paliwa (rys. 3), różnice między ładunkami elektrycznymi, reprezentującymi kolejne przebiegi prądowe są zbyt małe, żeby na tej podstawie określić przy jakim ciśnieniu paliwa powstała dawka oraz jaką miała wielkość. Wartości te są w zakresie niepewności pomiaru. Wielkość dawki i strumienia można odnieść do wartości ciśnienia paliwa, określonej na podstawie natężenia prądu w punkcie podnoszenia iglicy, co będzie przedstawione w drugiej części artykułu.



Rys. 3. Przebiegi prądowe dla rosnących ciśnień paliwa od 0,1 do 0,5 MPa.

3. Ciśnienie paliwa

Przebieg prądowy zapisany podczas generowania pojedynczej dawki paliwowej, z zadaną ośmio-milisekundową długością impulsu sterującego przedstawia rys. 4. Obwód elektryczny cewki wtryskiwacza składa się ze źródła siły elektromotorycznej (ε_0), rezystancji (R) i indukcyjności (L) (obwód RL). Wzrost natężenia prądu w obwodzie RL, opisuje równanie Kirchhoffa (6), określając kształt i wartości natężenia elektrycznego zmiennego w czasie.

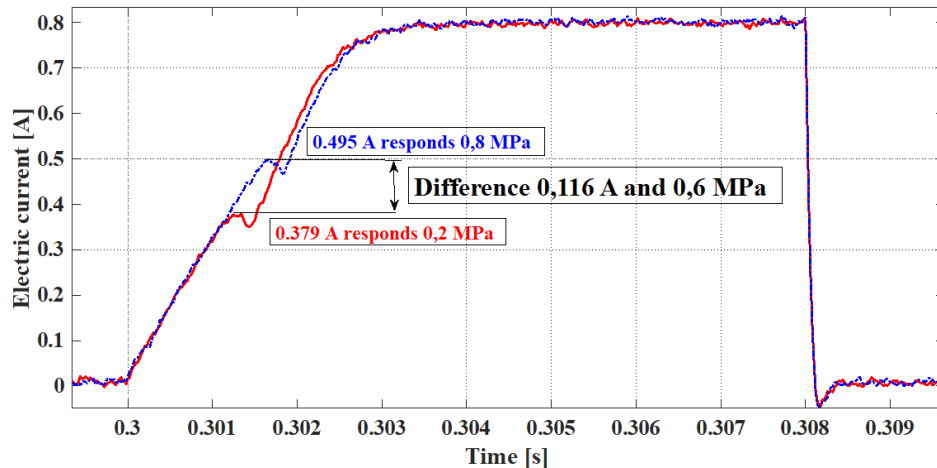
W przypadku przebiegu prądowego wtryskiwacza, w wyniku wykonywania pracy podnoszenia iglicy przez siłę magnetyczną, równania opisujące natężenie prądu muszą uwzględniać pokonywane przez tę siłę opory, co zostało omówione w tym rozdziale.

$$I_{op} = \frac{\varepsilon_0}{R} * \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (6)$$

Kształt przebiegów czasowych obserwowanych w trakcie pracy zaworu elektromagnetycznego zależy nie tylko od parametrów prądowych (natężenie prądu, napięcie elektryczne) oraz geometrii rdzenia zaworu. Położenie charakterystycznych punktów (zarówno ich wartość jak i chwila czasowa), zależy od gęstości właściwej przepływającego medium oraz ciśnienia z jakim jest ono doprowadzane do zaworu. W tym fragmencie artykułu powołano się na eksperymenty stanowiskowe w których ciśnienie za wtryskiwaczem było stałe. Dlatego w wynikach mowa jest tylko o ciśnieniu przed wtryskiwaczem. Analiza ma za zadanie pokazanie trendu zmian natężenia prądu elektrycznego w punkcie podnoszenia iglicy w zależności od ciśnienia (rzeczywiście, różnicy ciśnień przed i za wtryskiwaczem). Podczas

pracy silnikowej wtryskiwacza zmienia się ciśnienie w kolektorze dolotowym, którą to zmianę trzeba uwzględnić w przeprowadzanych analizach.

Wpływ paliwa do kanału wewnętrznego wtryskiwacza, diametralnie zmienia czasowy przebieg napięciowo – prądowy. W wyniku działania gęstości i ciśnienia paliwa (w sumie gęstości, bo ciśnienie powoduje jej wzrost) aby podnieść iglicę należy wygenerować większą siłę magnetyczną. Dla określonej wartości natężenia prądu w punkcie podnoszenia iglicy (I_{op}), można ściśle przyporządkować odpowiadające mu ciśnienie paliwa przed iglicą zaworu (p_{inj}). Rys. 4 przedstawia dwa przebiegi prądowe wtryskiwacza, dla dwóch ciśnień paliwa przed wtryskiwaczem. Zmiana ciśnienia wtrysku z 0,2 MPa do 0,8 MPa, skutkuje zmianą natężenia w punkcie podnoszenia iglicy z 0,379 A do 0,495 A.



Rys. 4. Graficzne przedstawienie zależności $I_{op} = f(p_{inj})$.

Na podstawie badań laboratoryjnych, dla określonego typu wtryskiwacza, można określić funkcję zależności natężenia prądu w punkcie podnoszenia iglicy od ciśnienia wtrysku:

$$I_{op} = f(p_{inj}) \quad (7)$$

Przepływ paliwa uzyskujemy po pokonaniu przez siłę magnetyczną F_m , wszystkich sił przeciwstawiających się podnoszeniu iglicy:

F_p – siły wynikającej z ciśnienia paliwa,

F_i – siły bezwładności,

F_f – siły tarcia,

F_s – siły sprężyny.

$$F_m > F_p + F_i + F_f + F_s \quad (8)$$

Siła magnetyczna F_m jest pochodną energii powstającej w cewce w wyniku działania prądu. Siłę magnetyczną, wystarczającą do podniesienia iglicy, określamy natężeniem prądu I_{op} zmierzonym w tym punkcie przebiegu prądowego wtryskiwacza. Najbardziej znaczącą siłą oporu jest siła F_p , pozostałe składniki są stałe lub zmieniają się z powodu jej zmiany. Z kolei natężenie prądu I_{op} , jest funkcją siły wynikającej z ciśnienia paliwa p_{inj} :

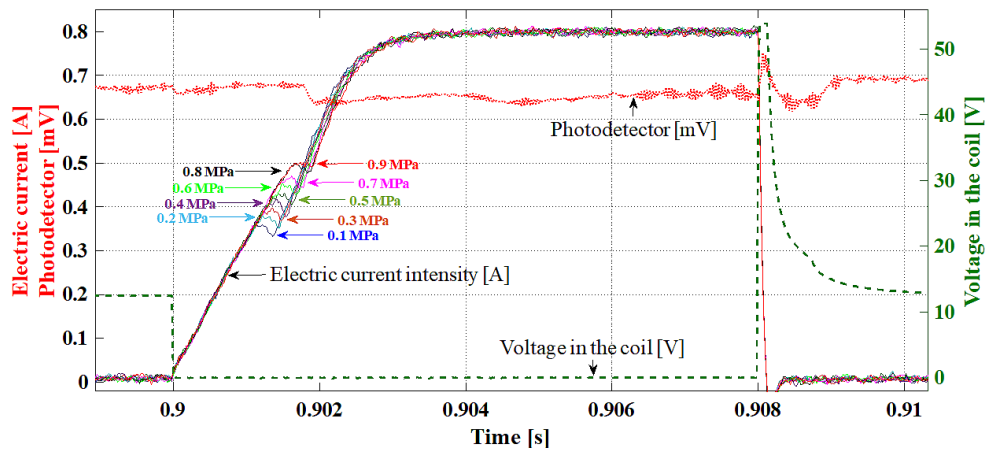
$$F_m = f(I_{op}) \quad (9)$$

gdzie: F_m – siła magnetyczna wynikająca z działania strumienia magnetycznego [N],
 I_{op} – natężenie prądu w punkcie podnoszenia iglicy [A],
 p_{inj} – ciśnienie wtrysku paliwa [MPa].

Dla wzrastającego ciśnienia paliwa wzrasta siła potrzebna do podniesienia iglicy, zatem wzrasta również prąd potrzebny do wygenerowania strumienia magnetycznego o odpowiedniej wielkości:

$$I_{op1} = f(p_1) < I_{op9} = f(p_9) \quad \{p_1 < p_9\} \quad (10)$$

Zależność (10) w sposób graficzny przedstawia rys. 5. Pokazano na nim obraz z przebiegu prądowego wtryskiwacza z zaznaczeniem wzrostu natężenia prądu w punkcie otwierania iglicy w zależności od ciśnienia wtrysku.



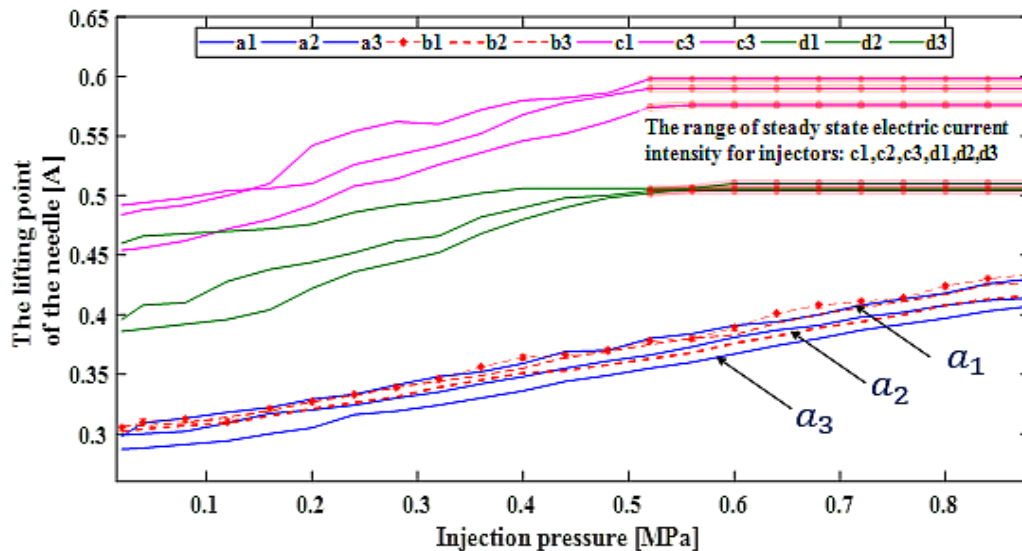
Rys. 5. Zmiany natężenia prądu w punkcie podnoszenia iglicy wtryskiwacza dla różnych ciśnień wtrysku.

Natężenie prądu w punkcie podniesienia iglicy (I_{op} , rys. 5), ściśle odpowiada ciśnieniu wtrysku. Jest ponadto niezależne od czasu wtrysku, a zależy od wielkości generowanej siły magnetycznej. Im większa jest różnica między ciśnieniem przed wtryskiwaczem a ciśnieniem w kolektorze dolotowym (za wtryskiwaczem), tym wyższe jest natężenie prądu I_{op} . Odwzorowanie pracy iglicy, czyli sytuacji, gdy iglica jest przemieszczana, wymaga zastosowania w równaniu (6) dodatkowego współczynnika f_{press} . Po wstawieniu współczynnika w równanie różniczkowe w składnik $\frac{\varepsilon_0}{R}$, otrzymamy oczekiwaną wartość prądu I_{op} :

$$I_{op} = \left(f_{press} * \frac{\varepsilon_0}{R} \right) * \left(1 - e^{-\frac{R}{L}} \right) \quad (11)$$

Pierwszy składnik określa wartość maksymalną którą osiągnie I_{op} , a z drugiego składnika wynika eksponencjalne dążenie do tej wartości (równanie Kirchhoffa). Dzięki wyrażeniu (11), można uwzględnić siły oporu w równaniu określającym prąd w obwodzie pracującego wtryskiwacza. Charakterystyka $I_{op} = f(p_{inj})$, konieczna w szczegółowym modelowaniu przebiegu prądowego wtryskiwacza, może służyć do oceny stanu technicznego danego typu wtryskiwacza, w porównaniu różnych rodzajów wtryskiwaczy lub we wczesnym diagnozowaniu jego uszkodzeń. Wszelkiego rodzaju defekty zaworu elektromagnetycznego, będą skutkowały zmianą natężenia prądu w punkcie podnoszenia iglicy. Można monitorować wtryskiwacz w trakcie pracy, kontrolując ten parametr oraz wartość różnicy między

ciśnieniem wtrysku i ciśnieniem w kolektorze dolotowym. Charakterystyka $I_{op} = f(p_{inj})$ to zależność o charakterze liniowym. W miarę wzrostu ciśnienia notujemy niewielki wzrost proporcji natężenia prądu I_{op} do p_{inj} . W ramach badań opracowane zostały charakterystyki dla kilku różnych typów wtryskiwaczy z różnym stopniem zużycia. Dla danego typu wtryskiwacza, charakterystyki mają podobny charakter, ale nie są identyczne co wynika z różnic w ich działaniu. Charakterystyki dwóch typów wtryskiwaczy, oznaczonych symbolami „a” i „b” (rys. 6), zmieniają się w całym zakresie ciśnienia wtrysku (od 0,1 do 0,8 MPa).



Rys. 6. Charakterystyki $I_{op} = f(p_{inj})$ dla różnych wtryskiwaczy: „a”, „b”, „c” i „d”.

Strumień magnetyczny wynikający z przepływającego prądu, generowany wokół cewek tych wtryskiwaczy, jest większy niż generowany przez cewki wtryskiwaczy „c” i „d” (rys. 6). Natężenie prądu dla wtryskiwaczy „c” i „d”, począwszy od ciśnienia 0.5 MPa, przechodzi w stan ustalony (maksymalna wartość – pozioma linia). Powyżej tego ciśnienia wtryskiwacze nie zwiększają swoich dawek a natężenie w punkcie podnoszenia iglicy jest stałe (takie jak natężenie prądu stanu ustalonego w obwodzie). Zdolność do pokonania sił przeciwstawiających się podnoszeniu iglicy przy niższym prądzie I_{op} , świadczy o większej sprawności danego wtryskiwacza.

Charakterystyka zależności natężenia prądu w punkcie podnoszenia iglicy od oporów mechanicznych podnoszenia, wynika z właściwości elektrycznych i geometrycznych wtryskiwacza, układu paliwowego i zadanych parametrów sterowania. Dokładne określenie odpowiadających sobie parametrów, pozwala weryfikować stan techniczny układu paliwowego również w czasie bieżącym. To nowatorskie podejście może być wykorzystane zarówno w diagnostyce jak i w korekcie sterowania wtryskiwaczem. Dodatkowo, przedstawiona analiza poparta eksperymentalnie pokazuje, że na podstawie wybranych punktów czasowego przebiegu prądowo – napięciowego, obserwowanego podczas dawkowania wtryskiwacza, można określić wartość różnicy między ciśnieniem wtrysku (ciśnienie przed wtryskiwaczem) a ciśnieniem w kolektorze dolotowym (ciśnienie za wtryskiwaczem) a łącząc te informacje z powierzchnią pola pod wykresem natężenia prądu, można scharakteryzować przepływ masowy.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentów laboratoryjnych polegających na testowaniu wtryskiwaczy paliwowych stosowanych w silnikach spalinowych z wtryskiem

pośrednim bez doładowania. Podczas eksperymentów rejestrowano m.in. przebiegi napięcia, natężenia prądu elektrycznego w cewce wtryskiwacza, opracowano charakterystyki dawkowania oraz określono wpływ stosowanych parametrów sterowania na wynikowy przepływ paliwa. Na tej podstawie wykazano, że parametry prądowe są precyzyjnym kryterium oceny pracy wtryskiwacza. Powiązanie przebiegów prądowych z parametrami dawkowania wtryskiwaczy paliwowych pozwoliło stwierdzić, że zmiany w przebiegach wynikają nie tylko z właściwości prądowych. Zależą również od wartości mechanicznych z których wynika przepływ (4), takich jak gęstość, ciśnienie wtrysku czy opory ruchu iglicy. Wypływa stąd wniosek, że przebieg natężenia prądu elektrycznego (6) w obwodzie cewki wtryskiwacza, zawiera informacje o mechanicznych parametrach wtrysku (11) oraz elektrycznych i mechanicznych właściwości wtryskiwacza. Zakres przebiegu prądowego czy przepływający ładunek elektryczny (3), można przyporządkować do przepływającego strumienia paliwa (5). Dla dokładnego odwzorowania dawki paliwa, konieczne jest określenie przy jakim ciśnieniu przepływ paliwa nastąpił. Charakterystycznym punktem przebiegu prądowego wykorzystanym w przedstawionej analizie, jest punkt podnoszenia iglicy. Wartość natężenia prądu w tym punkcie odnosi się wprost do sił przeciwstawiających się jej podnoszeniu (8). Największą z nich jest siła wynikająca z ciśnienia paliwa, która jest jedyną ze zmiennych. Drugą zmienną jest ciśnienie za wtryskiwaczem, czyli ciśnienie w kolektorze dolotowym. Odniesienie do wartości natężenia prądu w punkcie podnoszenia iglicy ma sens w przypadku takich samych warunków porównania, czyli z bieżącą kontrolą ciśnienia za wtryskiwaczem.

Wynika stąd wniosek, że skokowa zmiana natężenia prądu w tym punkcie następuje w wyniku zmiany stosunku ciśnienia paliwa (7) do ciśnienia w kolektorze dolotowym, co potwierdzają przeprowadzone eksperymenty laboratoryjne.

Obserwacja przebiegów prądowych i ich analiza, w połączeniu z wykonaną wcześniej charakterystyką odpowiadających sobie parametrów, pozwala weryfikować poprawność procesu dawkowania paliwa, jak również służyć ocenie stanu technicznego układu paliwowego i samego wtryskiwacza. Przedstawione przebiegi prądowe mogą być obserwowane przez sterownik w czasie bieżącym w trakcie eksploatacji, dzięki czemu taka weryfikacja może wspomagać diagnostykę OBD oraz systemy kontrolujące skład spalin pozwalając na szybsze wykrycie uszkodzeń w układzie paliwowym. Zależność wartości natężenia prądu w punkcie podnoszenia iglicy od ciśnienia paliwa, może być wykorzystana nie tylko w diagnostyce wtryskiwaczy paliwowych, lecz również w weryfikacji różnego rodzaju zaworów elektromagnetycznych.

Wyniki eksperymentów laboratoryjnych przedstawione w niniejszym artykule, to nowe spojrzenie na diagnostykę wtryskiwaczy paliwowych. Dodatkowo, weryfikacja o której mowa, może być wykonywana w czasie bieżącym w trakcie eksploatacji wtryskiwacza czy zaworu elektromagnetycznego. Diagnostyka „on-line” może przyczynić się do wcześniejszego wykrycia uszkodzeń więc może zabezpieczać przed degradacją układu oczyszczania spalin a nawet uszkodzeniem silnika. Funkcję ciśnienia paliwa można wykorzystać również w sterowaniu wtryskiwaczami. Określenie rzeczywistej fazy wtrysku paliwa może wspomóc zarządzanie pracą silnika. Jest to zmiana strategii w stosunku do dotychczasowej. Przedstawione informacje mogą być wykorzystane w module sterującym pracą silnika, który będzie wykorzystywał w algorytmie sterowania informacje o rzeczywistej chwili rozpoczęcia i zakończenia dawkowania a nie funkcjonował tylko na podstawie opracowanych wcześniej algorytmów, korygowanych przez adaptacje sterowania i sondę lambda.

Acknowledgement: Projekt finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu DOB-BIO9-04-02-2018.

Bibliografia

1. Ashok B, Ashok D, Ramesh S, Kumar C. A review on control system architecture of a SI engine management system. Elsevier Science. Annual Reviews in Control. 2016, 41; 94-118, doi: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.005.
2. Harantová, V., Otáhalová, Z., & Kasanický, M. (2019). Estimation of fuel consumption based on data from opening fuel injector valve. Transportation Research Procedia, 40, 236–243, doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.036
3. Kay P J, Bowen P, Bowen P. Gold M R. Sapsford S M. Studies of gasoline direct-injection sprays at elevated ambient gas temperatures and pressures. Atomization and Sprays. 2012; 4 (22), 305–331, doi: 10.1615 / AtomizSpr.2012005411.
4. Leach F, Davy M H, Manus P H, Tombs M, Zhou F. A new method for measuring fuel flow in an individual injection in real time. SAE International Journal of Engines. 2018; 11 (6); 687–696, doi: 10.2307/26649124.
5. Lee G S, Sung H J, Kim H C. (2013). Multiphysics analysis of a linear control solenoid valve. Journal of Fluids Engineering. 2013; 135(1). 011104 – 0111041, doi: 10.1115/1.4023079.
6. Li S, Nehl T, Gopalakrishnan S, Omekanda A, Namuduri C, Prasad R. A Dynamic solenoid model for fuel injectors. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2018; 3206 – 3213, doi: 10.1109/ECCE.2018.8558394.
7. Merola, S. S., Tornatore, C., & Sementa, P. (2012). Optical investigation of the fuel injector influence in a PFI spark ignition engine for two-wheel vehicles. Journal of Mechanical Science and Technology, 26(1), doi: 10.1007/s12206-011-0801-5.
8. Nikolić B, Jovanović M, Milošević M, Milanović S. Function K as a link between fuel flow velocity and fuel pressure, depending on the type of fuel. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. 2019; 15(1), 119–132, doi: 10.22190/FUME160628003
9. Peng, M., Deng, X., & Liang, X. (2011). Control strategy calibration of fuel injection impulse width on EFI motorcycle engine. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, 2047–2053, doi: 10.1109/ICEICE.2011.5776821.
10. Pielecha I, Skowron M, Mazanek A. Evaluation of the injectors operational wear process based on optical fuel spray analysis. Eksploatacja i Niezawodność. 2018; 20 (1): 83–89 doi: 10.17531/ein.2018.1.11.
11. Qiu T, Song X, Lei Y, Dai H, Cao C, Xu H, Feng X . Effect of back pressure on nozzle inner flow in fuel injector. Fuel. 2016; 173, 79-89, doi: 10.1016/j.fuel.2016.01.044.

12. Sebok, M., Jurcik, J., Gutten, M., Kornciak, D., Roj, J., & Zukowski, P. (2015). Diagnostics and measurement of the gasoline engines injection system. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1(8), doi: 10.15199/48.2015.08.20.
13. Stępień Z. A study of factors influencing the formation of harmful deposits in the diesel engine injectors. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2017; 9 (3), 331–337, doi: 10.17531/ein.2017.3.3.
14. Tan, T., Park, J. S., & Leteinturier, P. (2016). Enhanced Injector Dead Time Compensation by Current Feedback (SAE Technical Paper No. 2016-01-0088). SAE International, doi : 10.4271/2016-01-0088.