

Model empiryczny prądu w obwodzie impulsowego wtryskiwacza gazu

Streszczenie. W artykule przedstawiono model empiryczny przebiegu prądu w cewce impulsowego wtryskiwacza gazu w czasie jego pracy. Model ten pozwala na wyznaczenie wartości prądu w chwili wyłączenia impulsu sterującego. Wartość ta wpływa na czas wyłączenia wtryskiwacza co bezpośrednio przekłada się na jego charakterystykę masową. Model oparto o wyniki badań stanowiskowych 6 typów popularnych konstrukcji wtryskiwaczy gazu.

Abstract. The paper presents an empirical model of electrical current development in the coil of an operating pulse gas injector. The model can be used to determine the value of the current at the moment of end of the control signal. This value is related with the injector reaction time – and thus the injector's mass characteristics. The model is based on the results of test-bed experiments with six most popular injector design types. (An empirical model of current in the pulse gas injector's circuit).

Słowa kluczowe: model, wtryskiwacz gazu, prąd.

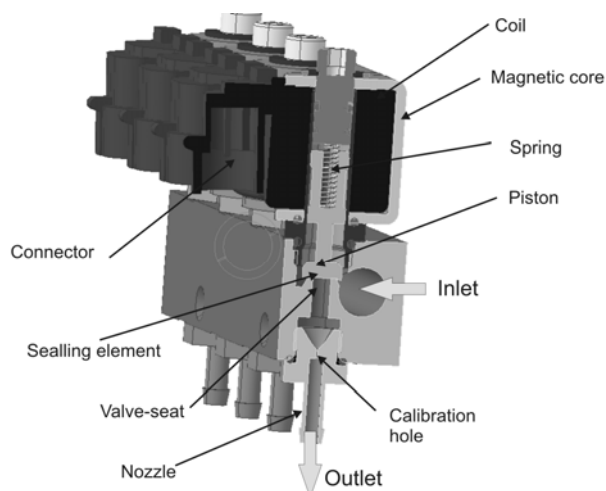
Keywords: model, gas injector, current.

doi:10.12915/pe.2014.03.44

Wstęp

Obecnie jednym z głównych kierunków rozwoju pojazdów samochodowych jest zastosowanie paliw o obniżonej zawartości węgla, spowodowane koniecznością obniżenia emisji dwutlenku węgla [1-3]. Paliwami najczęściej stosowanymi w nowoczesnych rozwiązaniach są paliwa gazowe takie jak metan (CNG) czy mieszaniny propanu i butanu (LPG). Paliwa dostarczane są do silnika za pomocą impulsowych wtryskiwaczy gazu.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładową konstrukcję impulsowego wtryskiwacza gazu Valtek typ 30. Jest to wtryskiwacz tłoczkowy, kalibrowany średnicą otworu zgrupowany w szynę paliwową. Paliwo doprowadzane jest kanałem dolotowym do komory znajdującej się nad gniazdem zaworowym. Elementem zaworowym w tym wtryskiwaczu jest tłoczek poruszający się osiowo wewnątrz cewki elektromagnetycznej, zamykający przepływ za pomocą elementu uszczelniającego znajdującego się na jego czole. Wydajność wtryskiwacza (rozumiana jako średni strumień masy wypływającego paliwa) kalibrowana jest za pomocą wielkości pola przekroju otworu kalibracyjnego.



Rys.1. Impulsowy wtryskiwacz gazu Valtek

Ze względu na swoją budowę wtryskiwacze paliw gazowych wymagają dużo większych elementów zaworowych niż wtryskiwacze paliw ciekłych (benzyny) co

z kolei prowadzi do zwiększenia sił potrzebnych do działania elementów przy jednoczesnym pogorszeniu szybkości ich działania. W konsekwencji konieczne jest dostarczenie do cewek elektromagnetycznych wtryskiwacza większej ilości energii elektrycznej, co z kolei skutkuje zwiększeniem mocy traconej w tak pobudzonej cewce.

Celem obniżenia temperatury pracy wtryskiwacza gazowego stosuje się sterowanie modulowane. Przez pierwsze około 4 ms (zależnie od konstrukcji wtryskiwacza od 1,7 do 5 ms) sygnał jest ciągły. Po tym okresie następuje przełączenie na sterowanie modulowane. Najczęściej stosowane jest sterowanie o częstotliwości 10 kHz i wypełnieniu 30%.

Takie sterowanie powoduje zmianę przebiegu prądu, co wpływa na charakterystykę czasową i masową wtryskiwacza [4-6]. Wykazano, że zwiększenie tego prądu powoduje wydłużenie czasu wyłączenia a przez to zwiększenie ilości paliwa podanego w jednym cyklu wtrysku.

Istotną jest zatem znajomość wartości tego prądu. W artykule przedstawiono model empiryczny przebiegu prądu w cewce impulsowego wtryskiwacza w czasie jego pracy. Model ten pozwala na wyznaczenie wartości prądu w chwili wyłączenia impulsu sterującego.

Badania stanowiskowe

W celu opracowania modelu przeprowadzono badania sześciu typowych dla rynku instalacji gazowych rozwiązań konstrukcyjnych impulsowych wtryskiwaczy gazu. Różnią się one zarówno elementem zaworowym (płytką, tłoczek), metodą kalibracji (średnicą otworu lub skokiem) oraz możliwością grupowania (pojedyncze, możliwe do grupowania, szyny paliwowe).

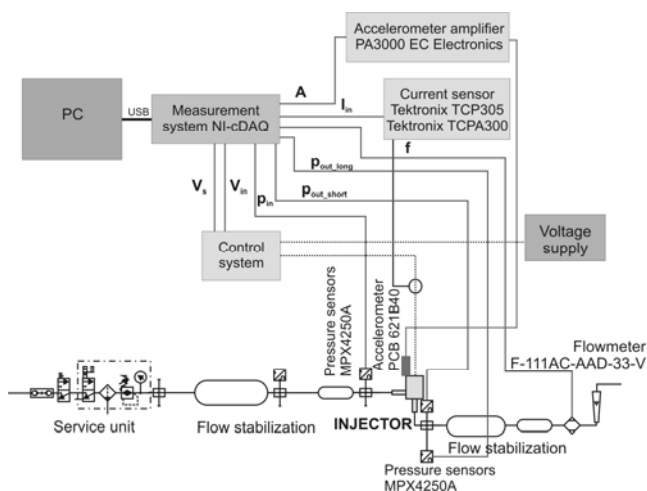
Badania przeprowadzono na 6 konstrukcjach:

1. Hana H2000 firmy Hana Engineering, Korea – wtryskiwacz tłoczkowy, pojedynczy z regulacją skokiem elementu zaworowego;
2. Horizon IG3 firmy Rail SpA, Włochy – wtryskiwacz tłoczkowy z możliwością grupowania regulowany średnicą otworu dyszy;
3. Magic Jet firmy HL Propan s.r.o., Czechy – wtryskiwacz tłoczkowy z możliwością grupowania regulowany średnicą otworu dyszy;

4. Valtek typ 30 firmy Valtek SpA Unipersonalne, Włochy – wtryskiwacz tłoczkowy w postaci szyny paliwowej (grupa 4 wtryskiwaczy) kalibrowany średnicą otworu dyszy;
5. PlaniJet firmy Planiplastic Ireneusz Močko, Polska – wtryskiwacz płytkowy z możliwością grupowania kalibrowany średnicą otworu dyszy;
6. WGs 14 firmy BD Plus Andrzej Przywicz, Polska – wtryskiwacz płytkowy pojedynczy kalibrowany skokiem elementu zaworowego.

Badania zostały wykonane na specjalnym stanowisku testowym, umożliwiającym badanie impulsowych wtryskiwaczy gazu zasilanych powietrzem. Stanowisko szczegółowo opisano w pozycjach [4, 7]. Stanowisko składa się z (rys. 2):

- a) układu pneumatycznego obejmującego sekcję przygotowania powietrza, stabilizacji jego przepływu, wtryskiwacza gazu, sekcji stabilizacji przepływu i przepływomierza masowego;
- b) systemu sterowania – opracowana dla celów badawczych jednostka sterująca pozwalająca na sterowanie wtryskiwaczem z regulacją zarówno częstotliwości impulsów jak i jego parametrów (długości impulsu ciągłego, częstotliwości i wypełnienia sygnału modulowanego);
- c) układu zasilania elektrycznego umożliwiającego regulację napięcia w pożądanym zakresie – prostownik z filtrem RC zasilany poprzez autotransformator;
- d) systemu pomiarowego NI cDAQ-9178 z kartami pomiarowymi NI-9215 BNC mierzącymi sygnały:
 - sygnał sterujący (sygnał przekazywany wewnątrz jednostki sterującej z procesora do klucza prądowego);
 - napięcie w obwodzie cewki elektromagnetycznej – mierzone bezpośrednio w obwodzie;
 - prąd w obwodzie cewki elektromagnetycznej – mierzony z wykorzystaniem sondy prądowej Tektronix TCP305;
 - ciśnienie zasilania wtryskiwacza – mierzone czujnikiem ciśnienia typu MPX4250A;
 - ciśnienie za wtryskiwaczem mierzone w dwóch odległościach od dyszy – mierzone czujnikiem ciśnienia typu MPX4250A;
 - przyspieszenia w osi ruchu elementu zaworowego – mierzone czujnikiem drgań PCB 621B40 wraz ze wzmacniaczem PA3000 EC Electronics.



Rys.2. Stanowisko badawcze

Zakres badań obejmował przeprowadzenie serii badań każdego typu wtryskiwacza obejmującej zmianę stopnia wypełnienia sygnału modulowanego (do 10 do 100%),

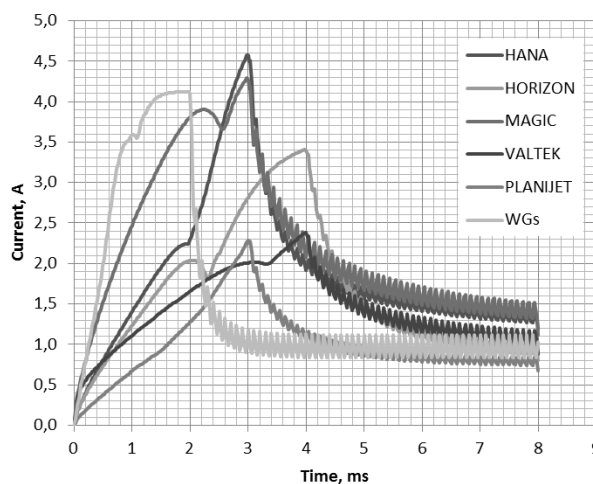
czasu impulsu ciągłego (od 2 do 6 ms) oraz czasu impulsu sterującego (od 3 do 10 ms).

Przyjęto także następujące stałe parametry pracy wtryskiwacza:

- a) ciśnienie zasilania: 200 kPa;
- b) ciśnienie odbioru (ciśnienie do którego prowadzony był wtrysk): 100 kPa,
- c) czynnik roboczy: powietrze,
- d) temperatura czynnika roboczego: $25 \pm 5^\circ\text{C}$,
- e) badania w warunkach ustalonych;
- f) napięcie zasilania: 12V;
- g) częstotliwość sygnału modulowanego: 10 kHz.

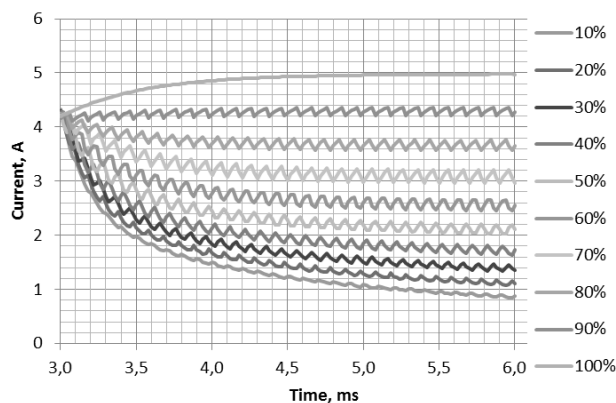
W każdym punkcie badawczym analizie poddano minimum 200 kolejnych cykli pracy.

Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi prądu dla poszczególnych konstrukcji przy czasie impulsu sterującego 8 ms i wypełnieniu sygnału modulowanego 30%. Jak można zauważyć przebiegi prądu różnią się przede wszystkim szybkością narastania prądu. Wynika to z różnic w indukcyjności obwodów elektromagnetycznych. Najszybciej prąd narasta we wtryskiwaczu WGs a najwolniej we wtryskiwaczu Hana. Także zmniejszanie się prądu po włączeniu sterowania modulowanego różni się dla poszczególnych konstrukcji.



Rys.3. Przebieg prądu w obwodzie cewki badanych impulsowych wtryskiwaczy gazu

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe przebiegi prądu we wtryskiwaczu Magic przy sterowaniu modulowanym o różnym stopniu wypełnienia. Przy wypełnieniu poniżej 90% prąd zmniejsza się po włączeniu sterowania modulowanego, przy czym czas stabilizacji tego prądu jest praktycznie stały.



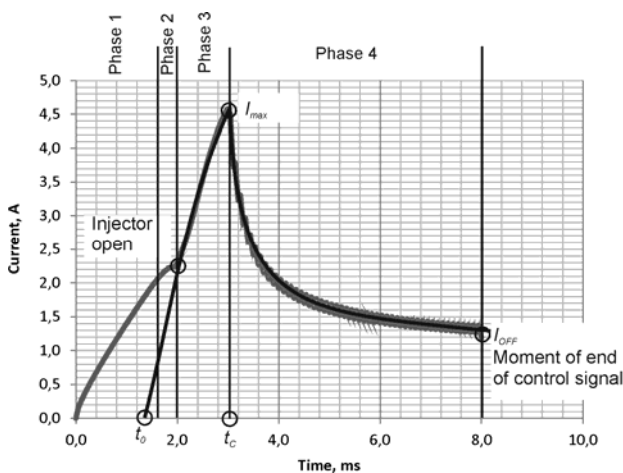
Rys.4. Przebieg prądu przy różnym wypełnieniu sygnału modulowanego wtryskiwacza MAGIC

Model empiryczny

Sterowanie wtryskiwaczem z wykorzystaniem sterowania modulowanego powoduje, że przebieg prądu w obwodzie cewki zmienia się z czasem.

Jak pokazano na rysunku 5 można wyróżnić 4 fazy:

- faza ładowania cewki – od początku sygnału sterującego do chwili początku otwierania wtryskiwacza,
- faza otwierania wtryskiwacza – od chwili początku otwierania do chwili jego zakończenia,
- faza stabilizacji prądu – od chwili otwarcia wtryskiwacza do przełączenia na sterowanie modulowane,
- faza sterowania modulowanego.



Rys. 5. Fazy przebiegu prądu w obwodzie cewki impulsowego wtryskiwacza gazu

Ze względu na skomplikowany kształt przebiegu prądu (rys. 5) przyjęto, że model obejmować będzie poszczególne fazy.

Faza pierwsza:

W fazie ładowania cewki prąd narasta zgodnie ze wzorem [8]:

$$(1) \quad I = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L_1} t} \right)$$

gdzie: I – prąd w obwodzie cewki, U – napięcie zasilania, R – rezystancja cewki, L_1 – indukcyjność obwodu elektromagnetycznego wtryskiwacza zamkniętego, t – czas od chwili włączenia sygnału.

W tym okresie następuje gromadzenie energii niezbędnej do wytworzenia siły elektromagnetycznej zdolnej do pokonania sił utrzymujących element zaworowy w pozycji zamkniętej (sił wynikających z różnicy ciśnień oraz docisku elementem sprężystym).

Faza druga:

W drugiej fazie (otwierania) prąd zmienia się na skutek przede wszystkim zmiany indukcyjności obwodu elektromagnetycznego wynikającej z ruchu elementu zaworowego. Opis matematyczny tej zmiany wymaga znajomości dokładnych parametrów obwodu elektromagnetycznego oraz trajektorii ruchu elementu zaworowego. Jest on zatem bardzo trudny do zamodelowania ogólnego i nie jest przedmiotem niniejszej pracy.

Faza trzecia:

Trzecia faza to dalszy wzrost prądu przy czym ze zmienioną wartością indukcyjności. Ze względu na tą zmianę oraz zużycie części energii zgromadzonej w cewce na wykonanie ruchu narastanie prądu jest przesunięte względem osi czasu o określoną wartość t_0 . Prąd ten można zapisać zatem zgodnie z następującym wzorem:

$$(2) \quad I = \frac{U}{R} \cdot \left[1 - e^{-\frac{R}{L_2} (t - t_0)} \right]$$

gdzie: I – prąd w obwodzie cewki, U – napięcie zasilania, R – rezystancja cewki, L_2 – indukcyjność obwodu elektromagnetycznego wtryskiwacza otwartego, t – czas od chwili włączenia sygnału, t_0 – czas zerowy narastania prądu.

Prąd narasta w tej fazie do wartości maksymalnej w całym cyklu, przy czym wartość ta nie musi być równa wartości prądu nasycenia I_F wyrażanego wzorem:

$$(3) \quad I_F = \frac{U}{R}$$

Wynika to faktu, że przełączenie sterowania może się odbyć przed całkowitym nasyceniem obwodu elektromagnetycznego i uzyskaniu prądu nasycenia. Zatem prąd maksymalny I_{max} przyjmuje wartość zgodną ze wzorem (2) dla chwili czasowej równej t_c – czas przełączenia sterowania.

Faza czwarta:

Ostatnia faza związana jest z działaniem sterowania modulowanego. Powoduje ono w odpowiednio długim czasie zmianę wartości prądu w obwodzie z wartości I_{max} do wartości prądu nasycenia przy sterowaniu modulowanym I_{PWM} . Z przeprowadzonych przez autorów badań wynika, że prąd ten zależy od stopnia wypełnienia sygnału modulowanego (rys. 4) co można zapisać jako:

$$(4) \quad I_{PWM} = I_F \cdot (a \cdot w^2 + b \cdot w + c)$$

gdzie: I_{PWM} – prąd nasycenia przy sterowaniu modulowanym, I_F – prąd nasycenia, w – wypełnienie sygnału modulowanego, a, b, c – współczynniki.

Jak wynika z badań autorów czas stabilizacji prądu w tej fazie jest zależna od konstrukcji wtryskiwacza i wynosi od 1 do 5 ms. W tym czasie prąd zmienia swoją wartość zgodnie ze wzorem:

$$(5) \quad I = I_{max} - (I_{max} - I_{PWM}) \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arctan[d \cdot (t - t_c)]$$

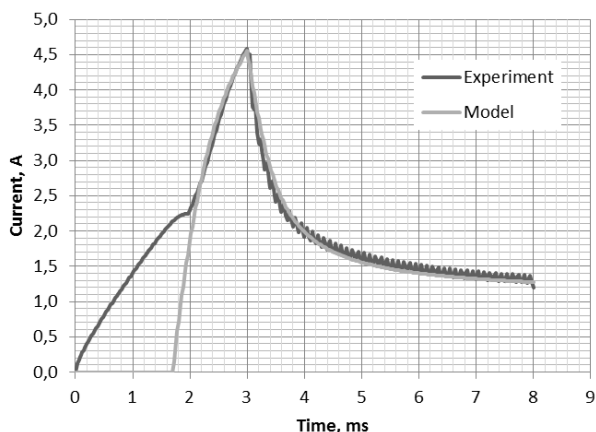
gdzie: d – współczynnik.

Zatem model prądu w chwili wyłączenia sterowania stanowi wzór 2 dla fazy sterowania sygnałem pełnym oraz wzór 5 dla fazy sterowania sygnałem modulowanym.

Na podstawie przeprowadzonych badań stanowiskowych dokonano identyfikacji parametrów modelu. Wyniki dla poszczególnych konstrukcji wtryskiwaczy przedstawiono w tabeli 1.

Tak opracowany model poddano weryfikacji. Polegała ona na porównaniu wartości zmierzonych do wartości uzyskanych w modelu w tych samych warunkach pracy wtryskiwacza. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy wynik weryfikacji dla wtryskiwacza Hana. Widoczna jest duża zgodność modelu z eksperymentem. We wszystkich

analizowanych przypadkach błąd aproksymacji nie przekraczał 4% a średnio wynosi 1,83%.



Rys.6. Porównanie wyników badań z modelem dla wtryskiwacza Hana

Tabela 1. Parametry techniczne badanych wtryskiwaczy oraz parametry modelu

	Hana	Horizon	Magic	Valtek	PlaniJet	WGs
Typ wtryskiwacza	Tłoczkowy, pojedynczy	Tłoczkowy, możliwy do grupowania	Tłoczkowy, pojedynczy	Tłoczkowy, szyna paliwowa	Płytkowy, możliwy do grupowania	Płytkowy, pojedynczy
Metoda kalibracji	Skokiem	Otworem	Otworem	Otworem	Otworem	Skokiem
R [Ω]	2,25	3,2	2,2	3,5	4,0	3,0
L_2 [mH]	1,6	3,1	2,05	5,2	3,0	0,8
a [-]	0,555	0,344	0,545	0,489	0,428	0,552
b [-]	0,315	0,593	0,309	0,362	0,487	0,405
c [-]	0,134	0,073	0,141	0,154	0,075	0,024
d [-]	2,534	2,212	1,935	2,872	2,592	7,892
t_0 [ms]	1,805	1,757	1,608	2,113	1,881	0,588

REFERENCES

- [1] Litschke A., Knitschky G., Future development in road freight transport regarding more environmentally friendly vehicle technology, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 48 (2012), 1557-1567
- [2] Bleischwitz R., Bader N., Policies for the transportation toward a hydrogen economy: The EU case, *Energy Policy*, 38 (2010), 5388-5398
- [3] Hunicz J., Kordos P., An experimental study of fuel injection strategies in CAI gasoline engine, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35 (2011), No. 1, 243-252
- [4] Czarnigowski J., Teoretyczno-empiryczne studium modelowania impulsowego wtryskiwacza gazu, *Monografie, Politechnika Lubelska*, Lublin 2012
- [5] Czarnigowski J., Jakliński P., Wendeker M., Pietrykowski K., Grabowski Ł., The Analyses of the Phenomena Inside a CNG Flap-valve Injector During Gas Flow, *PTNSS-2009-SS1-101 Combustion Engines, Silniki Spalinowe*, 1 (2009), 10-18
- [6] Jakliński P., Czarnigowski J., Wendeker M., The Effect of Injection Start Angle of Vaporized LPG on SI Engine Operation Parameters, *SAE 2007-01-2054*, 1-8, 2007
- [7] Duk M., Czarnigowski J., Metoda pośredniej identyfikacji czasu opóźnienia otwierania impulsowego wtryskiwacza gazu, *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*, 88 (2012), nr 10b, 59-63
- [8] Elbaum J., Obwody magnetyczne, *Państwowe Wydawnictwa Techniczne*, Warszawa 1959

Autorzy:

dr inż. Jacek Czarnigowski, Politechnika Lubelska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, E-mail: j.czarnigowski@pollub.pl;
 dr inż. Piotr Jakliński, Politechnika Lubelska, Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, E-mail: p.jaklinski@pollub.pl;
 dr inż. Tomasz Zyska, dr inż. Mariusz Duk, Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: t.zyska@pollub.pl; m.duk@pollub.pl.