

JÓZEF TUTAJ\*

**STEROWNIK WTRYSKNIKÓW PALIWA  
DLA SILNIKÓW SPALINOWYCH  
Z BEZPOŚREDNIM WTRYSKIEM PALIWA**

---

**A CONTROLLER OF FUEL INJECTORS  
FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES  
WITH THE DIRECT FUEL INJECTION**

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono sposób i układ sterowania wtrysknikami paliwa dla silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Nowe rozwiązanie w tej materii opiera się na gromadzeniu energii w pojemności za pomocą pomocniczego przekształtnika prądu stałego na prąd stały, zapewniając szybkie otwarcie elektrozaworu wtryskownika paliwa bez stosowania prądu obciążenia wstępnego.

*Słowa kluczowe: bezpośredni wtrysk paliwa, sterownik wtryskników*

**Abstract**

In the paper is given a fuel injectors control method and system for internal combustion engines with the direct fuel injection. Novel concept of this method and system is based on the energy accumulation in a capacitance by means of the DC-DC converter, giving a fast ON state of the fuel injector electrovalves without an application of the initial load current.

*Keywords: direct fuel injection, injectors controller*

---

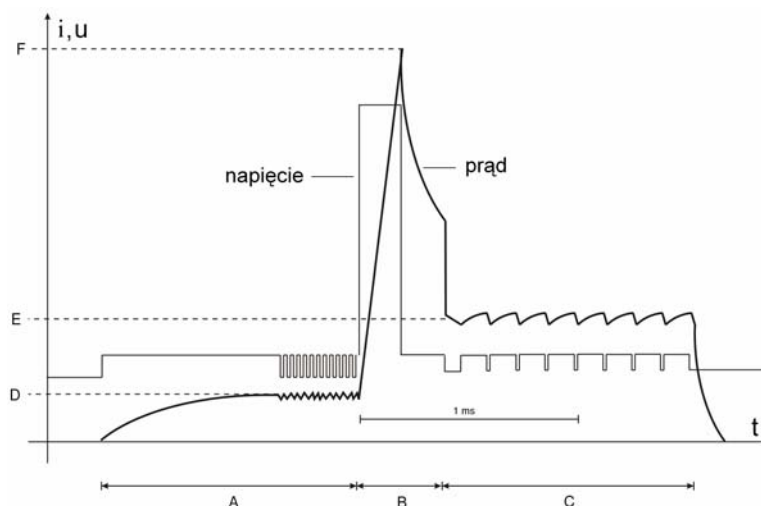
\* Dr inż. Józef Tutaj, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Obecnie na naszym rynku coraz więcej pojazdów samochodowych ma silniki spalinowe z zapłonem iskrowym i bezpośrednim wtryskiem paliwa. Idea bezpośredniego wtrysku paliwa polega na tworzeniu mieszanki wprost w komorze spalania. Aby to osiągnąć, elektromagnetyczny wtryskownik (elektrowtryskownik) paliwa umieszcza się w komorze spalania, a przez zawór dolotowy podawane jest tylko powietrze. Wtrysk paliwa następuje pod wysokim ciśnieniem, wynoszącym od 5 do 12 MPa, generowanym przez specjalną pompę wtryskową. Zadaniem wtryskownika jest dawkovanie paliwa i rozpylenie go na jak najmniejsze cząstki, aby można było uzyskać odpowiednie wymieszanie paliwa z powietrzem w określonym obszarze komory spalania. Po uaktywnieniu elektromagnesu wtryskownika paliwa odpowiednim impulsem prądowym paliwo jest wtryskiwane do komory spalania wskutek różnicy ciśnień wewnątrz i na zewnątrz wtryskownika paliwa. Idea bezpośredniego wtrysku benzyny jest dosyć stara [1–3], ale produkcja seryjna nastąpiła dopiero od 1995 r. wraz z wprowadzeniem silnika spalinowego GDI przez firmę Mitsubishi. Elektronicznie sterowany bezpośredni wtrysk paliwa stosowany jest obecnie coraz powszechniej, zarówno w silnikach spalinowych z zapłonem iskrowym o różnych oznaczeniach systemu zasilania (GDI, FSI, IDE, HPI, JTS itp.), jak i w silnikach spalinowych wysokoprężnych (HDI, JTD, CDI, dCi, TDI itp.). Wtrysk bezpośredni daje możliwość pełnej kontroli nad pracą jednostki napędowej dzięki precyzyjnemu dawkowaniu ilości wtryskiwanego paliwa oraz synchronizacji, jak też stopnia jego rozpylenia (np. możliwość stosunkowo łatwego uzyskania uwarstwionego spalania), co oznacza wyższą ekonomiczność pracy silnika spalinowego i obniżenie toksyczności spalin. Wtryskowniki paliwa dla silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa wymagają doprowadzenia do uzwojenia elektromagnesu wtryskownika paliwa impulsu prądowego o odpowiedniej wartości chwilowej mocy w początkowej fazie otwierania elektrozaworu wtryskownika paliwa ze względu na pracę, jaką należy wykonać, przesuując iglicę elektrozaworu wtryskownika paliwa o określonej masie w stosunkowo krótkim czasie otwarcia.

## 2. Sterowanie wtryskownikiem paliwa dla silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa

W konwencjonalnych układach sterowania wtryskownikiem paliwa sterownik wytwarza napięcie sterujące na uzwojeniu elektromagnesu wtryskownika paliwa o wartości 60–90 V, niezbędne do uaktywnienia wtryskowników paliwa silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Wartość napięcia jest dlatego tak wysoka, aby maksymalnie skrócić czas reakcji wtryskownika paliwa na sygnał sterujący i uzyskać możliwie krótki czas wtrysku paliwa, który powinien być mniejszy od czasu wtrysku paliwa dla silników spalinowych z wtryskiem paliwa do kanału dolotowego (rys. 1).



Rys. 1. Przebieg czasowy prądu i napięcia zasilającego wtrysznik paliwa: A – faza obciążenia wstępnego, B – faza pobudzenia, C – faza podtrzymania, D – prąd obciążenia wstępnego, F – prąd pobudzenia, E – prąd podtrzymania

Fig. 1. Waveforms of the fuel injector's current and supply voltage: A – initial load phase, B – excitation phase, C – hold-up phase, D – initial load current, F – excitation current, E – hold-up current

### 2.1. Faza obciążenia wstępnego

Uzwojenie elektromagnesu wtrysznika paliwa zasilane jest napięciem o wartości 12–14 V modulowanym szerokością impulsu (PWM) w celu uzyskania stabilizacji prądu na wartości ok. 1 A.

Faza obciążenia wstępnego przygotowuje wtrysznik paliwa (benzyny) do otwarcia w krótkim czasie poprzez wstępne wysterowanie wtrysznika paliwa (ok. 1,5 ms przed początkiem otwierania wtrysznika paliwa), aby wytworzyć początkową wartość prądu uzwojenia elektromagnesu wtrysznika paliwa. Uzwojenie elektromagnesu wtrysznika paliwa stanowi pod względem elektrycznym obwód typu RL, dlatego obecność indukcyjności (rzędu kilku milihenrów, w zależności od rodzaju wtrysznika paliwa oraz rezystancja rzędu 0,5–2  $\Omega$ ) powoduje, że przy podaniu napięcia zasilającego o wartości stałej na uzwojenie elektromagnesu wtrysznika paliwa prąd narasta od wartości zerowej do wartości ustalonej, ograniczonej rezystancją uzwojenia elektromagnesu wtrysznika paliwa. Faza obciążenia wstępnego pozwala na spowodowanie szybszego unoszenia się iglicy elektrozaworu wtrysznika paliwa podczas otwierania elektrozaworu przez wstępne gromadzenie energii elektrycznej w indukcyjności uzwojenia.

### 2.2. Faza pobudzenia

Faza pobudzenia ma na celu spowodowanie szybkiego podniesienia iglicy elektrozaworu wtrysznika paliwa przez chwilowe zwiększenie wartości prądu płynącego przez

uzwojenie elektromagnesu wtrysknika paliwa (forsowanie prądu). Uzwojenie elektromagnesu wtrysknika paliwa (benzyny) jest zasilane w następujący sposób: za pomocą klucza elektronicznego na krótką chwilę przełącza się napięcie o wartości ok. 80–90 V, co powoduje wzrost prądu uzwojenia do wartości chwilowej ok. 11–12 A. Następnie ponownie przełącza się uzwojenie elektromagnesu do obwodu o napięciu 12–14 V, co powoduje spadek prądowego impulsu forsującego. Należy zaznaczyć, że stosunkowo duży prąd płynie tylko przez bardzo krótki okres rzędu 0,5 ms, co nie powoduje przeciążenia cieplnego uzwojenia elektromagnesu. Duża wartość chwilowa mocy impulsu sterującego powoduje skrócenie czasu otwierania się elektrozaworu wtrysknika paliwa. Szerokość impulsu napięciowego (zob. przebieg czasowy napięcia zasilającego uzwojenie elektromagnesu wtrysknika paliwa na rys. 1) musi być kontrolowana z dużą dokładnością, gdyż nawet niewielka zmiana czasu trwania tego napięcia silnie wpływa na wartość chwilową prądu w uzwojeniu elektromagnesu wtrysknika paliwa.

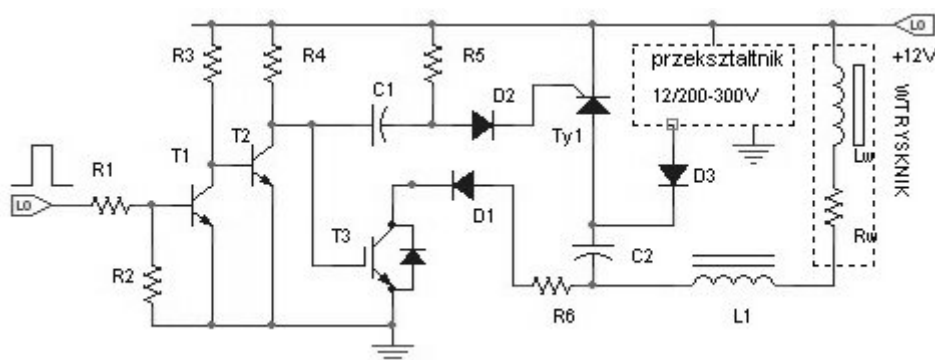
### 2.3. Faza podtrzymania

Faza podtrzymania pozwala kontynuować zasilanie (otwarcie elektrozaworu wtrysknika paliwa), ograniczając pobieraną moc elektryczną niezbędną do utrzymywania iglicy elektrozaworu w stanie otwarcia przez kilka milisekund w zależności od wymaganej dawki paliwa. Uzwojenie elektromagnesu wtrysknika paliwa (benzyny) jest zasilane w następujący sposób: napięcie ok. 12–14 V, prąd o wartości ok. 2,5–3 A, regulowany jest metodą modulacji PWM. Czas trwania fazy podtrzymania (1–5 ms) decyduje o wielkości dawki paliwa wtryskiwanego do komory spalania silnika spalinowego. Zanik impulsu prądowego powoduje zamknięcie elektrozaworu wtrysknika paliwa.

Opisany powyżej sposób sterowania wtrysnikami paliwa dla silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa, stosowany powszechnie przez wielu producentów pojazdów samochodowych, ma istotne mankamenty. Stosowanie prądowego impulsu obciążenia wstępnego (impulsu zapowiadającego otwarcie elektrozaworu wtrysknika paliwa) powoduje zarówno dodatkowe obciążenie cieplne wtrysknika paliwa – dodatkowe nagrzewanie się uzwojenia elektromagnesu wtrysknika paliwa podczas trwania fazy przygotowania otwarcia, jak również kłopotliwe sterowanie dawką paliwa, gdyż podczas synchronizacji impulsów sterujących wtrysnikami paliwa należy uwzględnić dodatkowy czas wyprzedzenia fazy obciążenia wstępnego (i przeliczyć na wartość kąta położenia wału korbowego), aby uzyskać otwarcie wtrysknika paliwa przy określonym położeniu kątowym wału korbowego silnika spalinowego. Drugim mankamentem tego sposobu sterowania jest niekorzystny kształt impulsu prądowego uzwojenia elektromagnesu wtrysknika paliwa w początkowej fazie otwierania (rys. 1). Kształt impulsu prądowego w tej fazie sterowania przypomina „szpilkę”, co powoduje indukowanie składowych harmonicznych o wyższych częstotliwościach oraz powstawanie większych start na prądy wirowe w obwodzie magnetycznym elektrozaworu wtrysknika paliwa. Wymagana jest dokładna stabilizacja czasu trwania przełączenia uzwojenia wzbudzenia na podwyższone napięcie, gdyż w przypadku niekontrolowanego przedłużenia tego impulsu dochodzi do zniszczenia wtrysknika paliwa (duży prąd uzwojenia elektromagnesu – wynikający z napięcia zasilania rzędu 80–90 V i impedancji o małej wartości – mógłby osiągnąć w dłuższym czasie wartość kilkudziesięciu amperów!).

### 3. Nowy sposób i układ sterowania wtrysznikiem paliwa dla silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa

Przedstawiony poniżej sposób i układ sterowania wtrysznikami paliwa dla silników spalinowych bezpośrednim wtryskiem paliwa (rys. 2) opiera się na gromadzeniu energii elektrycznej w pojemności, a następnie szybkim przekazaniu tej energii do uzwojenia elektromagnesu wtrysznika paliwa.



Rys. 2. Schemat ideowy sterownika wtrysznika paliwa dla silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa

Fig. 2. Ideal scheme of the fuel injector controller for direct fuel injection internal combustion engines

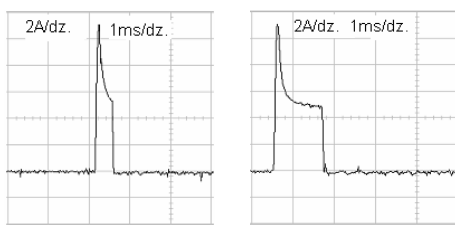
Kondensator C2 gromadzi energię elektryczną za pomocą diody D3 doprowadzającej napięcie z przekształtnika 12/300 V. Z chwilą pojawienia się na wejściu sterownika impulsu sterującego zostaje wysterowany jednocześnie tyrystor Ty1 i tranzystor T3 (IGBT). Energia zgromadzona w kondensatorze zostaje w bardzo krótkim czasie przekazana do indukcyjności dodatkowej L1 oraz do uzwojenia elektromagnesu wtrysznika paliwa. Po rozładowaniu kondensatora funkcję podtrzymania prądu uzwojenia elektromagnesu wtrysznika paliwa przejmuje tranzystor IGBT przez dwójnik złożony z diody wysokonapięciowej impulsowej D1 (400 V, 5 A) oraz rezystora dodatkowego R6. Wartość rezystora decyduje o wartości prądu podtrzymania (rys. 1). Ponieważ energia gromadzona w kondensatorze C2 zależy tylko od wartości napięcia wyjściowego przekształtnika i jego pojemności, dlatego wartość tej energii może być w prosty sposób stabilizowana, a wtryszniki paliwa zabezpieczone są przed uszkodzeniem nawet w przypadku pojawienia się błędnego impulsu sterującego (np. wskutek zakłóceń).

Po wymianie energii pomiędzy kondensatorem a uzwojeniem elektromagnesu wtrysznika paliwa podczas fazy pobudzenia układ komutacyjny złożony z elementów: L1, R6, D1, T3 podtrzymuje prąd w uzwojeniu elektromagnesu wtrysznika paliwa podczas fazy podtrzymania. Bardzo szybka wymiana energii pomiędzy kondensatorem C2 a indukcyjnością dodatkową i uzwojeniem elektromagnesu wtrysznika paliwa trwa ok. 0,3 ms (zamiast ok. 0,5 ms w konwencjonalnym układzie sterowania) i powoduje, że nie ma potrzeby stosowania impulsu wyprzedzającego otwarcie elektrozaworu wtrysznika paliwa, co upraszcza sterowanie, jak również powoduje obniżenie strat cieplnych w uzwojeniu elektromagnesu

wtrysknika paliwa (nie płynie prąd obciążenia wstępnego o wartości ok. 1 A przez ok. 1,5 ms). Dodatkową zaletą (oprócz skrócenia czasu otwarcia elektrozaworu) jest korzystniejszy kształt impulsu forsującego (zamiast impulsu „szpilki” pojawia się impuls „fragmentu sinusoidy” o częstotliwości drgań własnych obwodu LC), co powoduje zmniejszenie strat w obwodzie magnetycznym elektrozaworu. Napięcie pomocnicze rzędu 200–300 V wytworzone jest za pomocą przekształtnika prądu stałego na prąd stały (*DC-DC converter*) z pętlą sprzężenia zwrotnego dla stabilizacji napięcia wyjściowego z zastosowaniem układu scalonego specjalnego przeznaczenia (*ASIC*) typu SG3525 firmy STMicroelectronics.

### 3.1. Pomiar przebiegów czasowych impulsów prądowych wtryskiwaczy

Na rysunku 3 przedstawiono oscylogramy przebiegów czasowych impulsów prądowych sterujących elektromagnesami wtryskników paliwa dla silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa dla dwóch przypadków regulacji dawki paliwa.



Rys. 3. Oscylogramy przebiegów czasowych prądu elektromagnesu wtrysknika paliwa przy różnej szerokości impulsu sterującego

Fig. 3. Waveforms of the fuel injector electromagnet's current at the various control pulse width

Na oscylogramach przebiegów czasowych zauważyć można bardzo krótki czas narastania impulsu forsującego do wartości szczytowej ok. 12 A, bez stosowania fazy obciążenia wstępnego, oraz możliwość uzyskiwania krótkich czasów otwarcia elektrozaworu wtrysknika paliwa.

## 4. Wnioski

Przedstawiony elektroniczny sterownik wtryskników paliwa dla silników spalinowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa zapewnia bardzo krótki czas narastania prądu uzwojenia elektromagnesu w początkowej fazie otwierania elektrozaworu wtrysknika paliwa bez stosowania fazy obciążenia wstępnego, co poprawia niezawodność sterownika i upraszcza jego konstrukcję.

Dzięki licznym zaletom opisanego powyżej układu i sposobu sterowania wtrysknikami paliwa może być on wykorzystywany dla silników spalinowych z wtrysknikami paliwa nadającymi się do wtrysku paliwa dowolnego rodzaju, np. benzyny, oleju napędowego, alkoholu, metanu, gazu płynnego (LPG) itp.

## Literatura

- [1] BOSCH: Informator motoryzacyjny. Wydawnictwo Komunikacyjne, Warszawa 1958, 249-255.
- [2] Konopiński M., *Elektrotechnika w technice motoryzacyjnej*, WKiŁ, Warszawa 1977, 105-150.
- [3] BOSCH: Automotive Electric/Electronic Systems, VDI Verlag, Düsseldorf 1988, 180-184.