

Sebastian Styła

# Komputerowy model dydaktyczny elektronicznego układu sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.474

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule omówiony został komputerowy model układu sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym opracowany i wykorzystywany jako stanowisko dydaktyczne. Odzwierciedla on algorytmy pracy silnika ZS i daje możliwość obserwacji, a także wyznaczenia podstawowych parametrów i zależności występujących w elektronicznym układzie sterowania EDC. Ponadto przejrzysta struktura modelu pozwala na łatwe wprowadzanie zmian parametrów sterowania oraz modyfikację poszczególnych map. Model został opracowany z wykorzystaniem środowiska graficznego LabView.

**Słowa kluczowe:** EDC, ECU, zapłon samoczynny, silnik ZS, sterowanie silnika, model komputerowy, model dydaktyczny, LabView.

## Wstęp

Wprowadzenie na szeroką skalę mikroelektroniki i powiązanie jej z technologiami informatycznymi sprawiło, że współczesne pojazdy posiadają coraz większą ilość obwodów elektronicznych, które sterowane są mikroprocesorowo. Przyczynia się to zarówno do poprawy bezpieczeństwa podróżowania, jak również do zmniejszenia negatywnego oddziaływania transportu na środowisko. Dotyczy to przede wszystkim sposobów sterowania współczesnymi silnikami spalinowymi, w których wykorzystywane są elektroniczne jednostki sterujące (ECU – Electronic Control Unit). Zadaniem ich jest ciągły nadzór nad prawidłową pracą silnika, jego diagnostyka oraz komunikacja z innymi obwodami pojazdu [4, 7, 8].

Postęp w dziedzinie sterowania silnikami spalinowymi sprawia, że są to obwody coraz bardziej skomplikowane, o coraz większym stopniu integracji, w których stosuje się zaawansowane algorytmy sterujące [5, 7, 8]. W takim przypadku problemem staje się praktyczne kształcenie przyszłych diagnostów samochodowych, konstruktorów, czy też absolwentów szkół średnich i wyższych. W coraz mniejszym stopniu istnieje możliwość budowy fizycznych modeli laboratoryjnych odzwierciedlających istotne, z punktu widzenia sterowania, zależności występujące podczas pracy silników spalinowych. Z pomocą przychodzi tutaj technika komputerowa, która pozwala, w stosunkowo łatwy i szybki sposób, na opracowywanie i tworzenie modeli symulacyjnych zarówno przemysłowych, jak i dydaktycznych [3]. Wykorzystywane są w tym celu odpowiednie języki programowania. Daje to możliwość zastąpienia często kosztownych, trudnych w budowie i skomplikowanych modeli fizycznych.

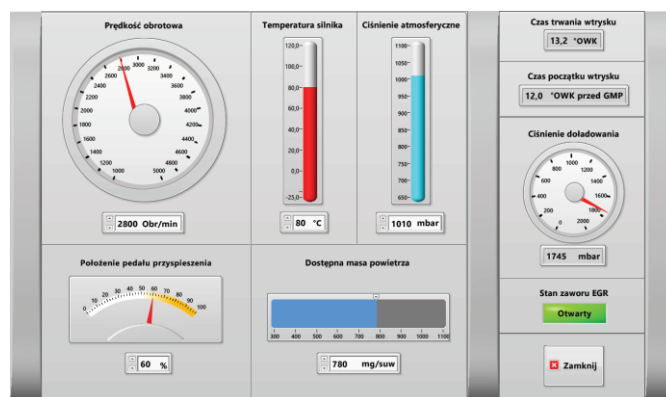
## 1. Model symulacyjny sterowania silnikiem ZS

### 1.1. Założenia modelu

Głównym założeniem modelu jest jak najwierniejsze odwzorowanie algorytmu sterowania silnikiem Diesla i przystosowanie otrzymanego programu do celów dydaktycznych. Narzędziem wykorzystanym do tego celu jest oprogramowanie LabView firmy National Instruments. Oprogramowanie to umożliwia opracowanie złożonych układów sterowania z wykorzystaniem graficznego języka G [2, 6]. Programowanie polega na odpowiednim łączeniu ikon, funkcji

oraz struktur. Niewątpliwą zaletą jest możliwość zastąpienia symulowanych elementów wejściowych (czujników i nastawników) oraz wyjściowych (elementów wykonawczych) rzeczywistymi podzespołami, poprzez zastosowanie kart rozszerzeń [2, 6]. W takim przypadku komputer staje się urządzeniem kontrolno – pomiarowym, które daje możliwość zmiany parametrów sterowania i obserwacji tych zmian. Takie rozwiązanie może być wykorzystywane na przykład w coraz bardziej popularnym „chip tuningu” [1].

Model symulujący pracę silnika o zapłonie samoczynnym ZS, przedstawiony w niniejszym artykule został wykonany w ramach pracy dyplomowej [9]. Panel czołowy (sterowania) opracowanego programu przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Panel czołowy modelu [9]

### 1.2. Struktura modelu

Ogólną strukturę programu przedstawia rysunek 2. Została ona podzielona na trzy główne bloki: blok danych wejściowych, blok sterowania i blok danych wyjściowych.



Rys. 2. Ogólna struktura działania modelu symulacyjnego

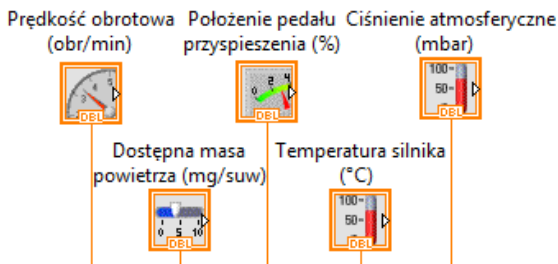
Dane wejściowe (blok „I”) do których należą:

- prędkość obrotowa silnika (obr/min),
- położenie pedału przyspieszenia (%),
- ciśnienie atmosferyczne (mbar),
- dostępna masa powietrza w kolektorze dolotowym (mg/suw),
- temperatura silnika (°C),
- wprowadzane są do programu za pomocą pokręteł, suwaków lub tablic wartości, które są umieszczone na panelu czołowym. W strukturze programu są one zdefiniowane w postaci ikon (rys. 3).

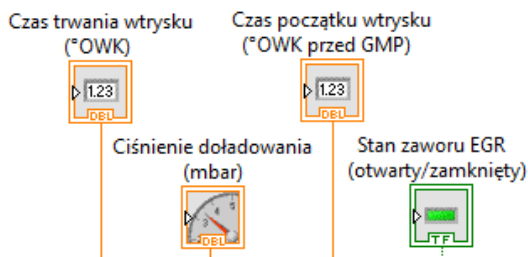
Dane wyjściowe (blok „III) dotyczą:

- czasu trwania wtrysku (°OWK),
- czasu początku wtrysku (°OWK przed GMP),
- ciśnienia doładowania (mbar),
- stanu zaworu recyrkulacji spalin EGR (otwarty/zamknięty).

- Informacje te wyświetlane są na panelu czołowym za pomocą wskaźników, które obrazują odpowiedzi układu na dane wymuszenie. Powyższe elementy w schemacie blokowym reprezentowane są za pomocą odpowiednich ikony (rys. 4).



Rys. 3. Ikony obrazujące dane wejściowe (schemat blokowy)



Rys. 4. Ikony obrazujące dane wyjściowe (schemat blokowy)

Główną częścią programu jest blok „II” (Sterowanie). Opisane są w nim, za pomocą odpowiednio przygotowanych struktur, funkcji matematycznych, tabel lub wartości stałych, powiązania między danymi wejściowymi a wyjściowymi. Odzwierciedlają one algorytm sterowania pracą silnika o zapłonie samoczynnym.

W programie zaimplementowanych zostało dwadzieścia jeden oryginalnych map pobranych z pamięci EPROM sterownika silnika 1.9 TDI 101 KM (EDC15P) [9]. Są to mapy:

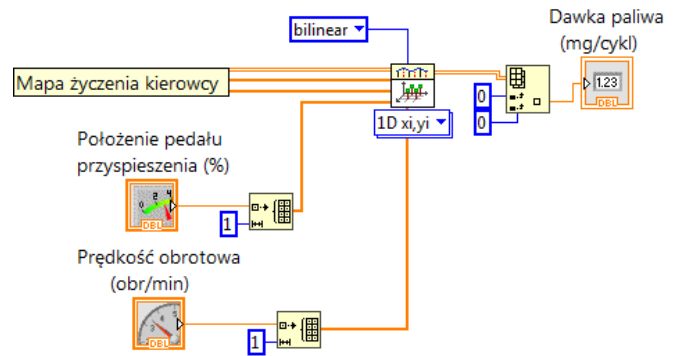
- życzenia kierowcy,
  - dymienia,
  - ograniczenia momentu obrotowego,
  - docelowego ciśnienia doładowania,
  - ograniczenia ciśnienia doładowania,
  - początku wtrysku paliwa – 9 map,
  - czasu trwania wtrysku paliwa – 6 map,
  - recyrkulacji spalin.
- Każda z map wprowadzona została do modelu w formie tabeli dwuwymiarowej (wartość wyjściowa Z) oraz dwóch jednowymiarowych tabel (wartości wejściowe X i Y). Przykładową strukturę tego typu przedstawiono na rysunku 5. Każda z map opracowana została jako oddzielny podprogram.

		100	200	600	800
0,5	3,7	2,6	1	0	
2	6,5	5,7	4,4	3,9	
5	7,3	6,8	5,4	5,7	
7	7,7	7,3	5,9	6,3	

Rys. 5. Fragment mapy czasu trwania wtrysku zaimplementowanej w modelu w postaci tabeli [9]: oś X – prędkość obrotowa silnika (obr/min), oś Y – dawka paliwa (mg/suw), wartość Z – czas trwania wtrysku (°OWK).

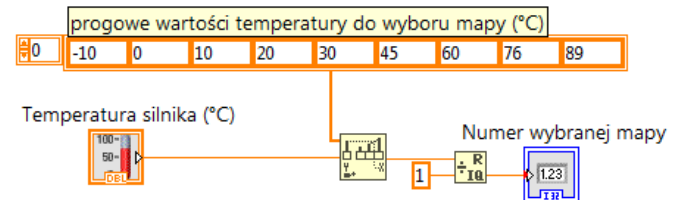
W celu odczytania wartości wyjściowej z mapy przy dowolnych wartościach zadanych (wejściowych) użyto interpolacji bilinearnej (gotowa funkcja znajdująca się w bibliotece LabView). Diagram

podprogramu interpolacji przykładowej mapy przedstawia rysunek 6.



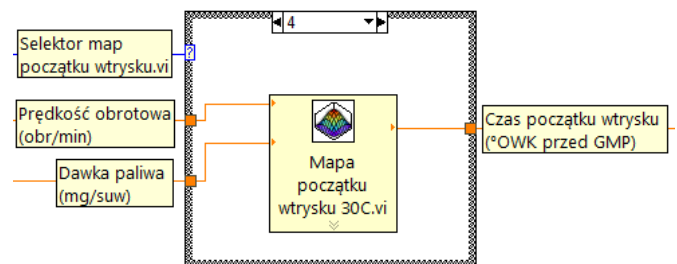
Rys. 6. Schemat blokowy interpolujący mapę życzenia kierowcy [9]

Ze względu na zastosowanie w układzie sterowania dziewięciu map początku wtrysku paliwa oraz sześciu map czasu trwania wtrysku paliwa koniecznym było wykonanie podprogramu, który wybierze po jednej z map w zależności od bieżących wartości programu sterującego. Opracowany podprogram nosi nazwę selektora map (rys. 7).

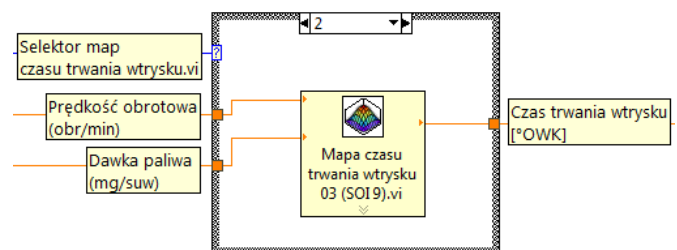


Rys. 7. Schemat blokowy podprogramu selektora map początku wtrysku paliwa [9]

Wartość zadana porównywana jest z wartością progową i na tej podstawie określany jest numer mapy. W celu wyboru odpowiedniej mapy wykorzystano strukturę „Case” (rys. 8 i 9).



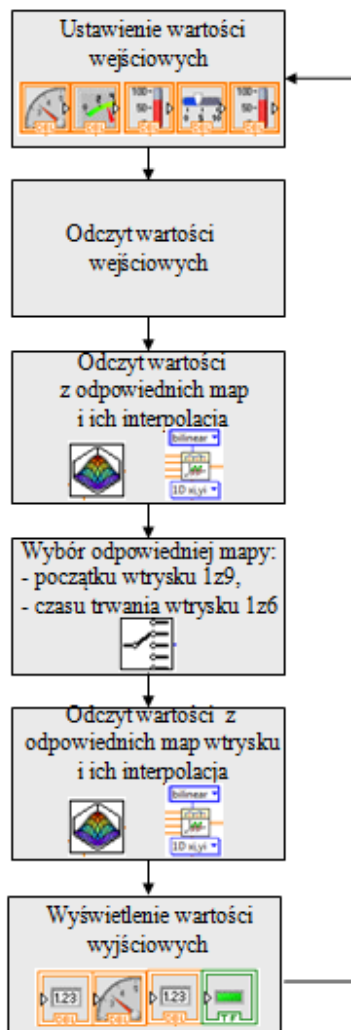
Rys. 8. Schemat blokowy struktury „Case” wyboru mapy początku wtrysku paliwa [9]



Rys. 9. Schemat blokowy struktury „Case” wyboru mapy czasu trwania wtrysku paliwa [9]

Ogólny algorytm działania programu symulacyjnego przedstawiono na rysunku 10. Program działa w pętli, która jest powtarzana co 50 ms. Model obejmuje tylko algorytm sterowania odzwierciedla-

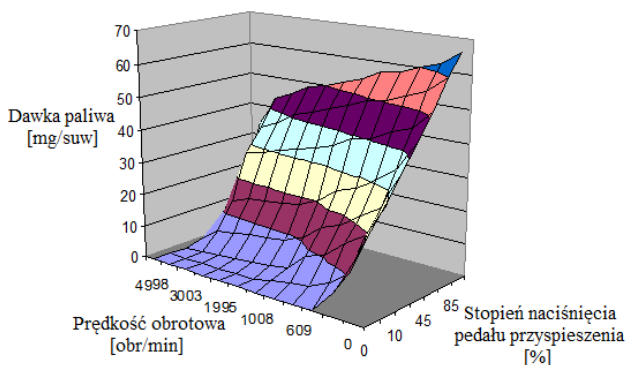
jący pracę silnika podczas jazdy. W symulacji nie uwzględniono biegu jałowego, dla którego przewidziany jest inny algorytm sterowania.



Rys. 10. Algorytm działania programu

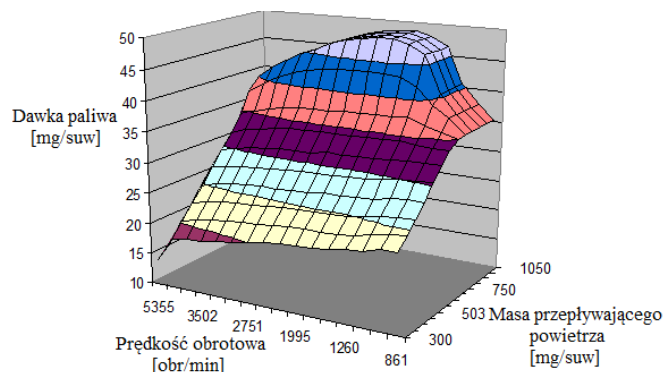
## 2. Mapy sterujące pracą silnika ZS

Za pomocą opracowanego modelu komputerowego można sprawdzić poprawność funkcjonowania systemu oraz wyznaczyć mapy sterujące pracą silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (rys. 11 – 18). Dzięki przejrzystej strukturze programu możliwa jest także samodzielna zmiana podstawowych parametrów pracy (m.in. powiązań między mapami oraz wartościami samych map), a także obserwacja efektu tych modyfikacji. Daje to możliwość lepszego zapoznania się z funkcją danego elementu lub algorytmu sterowania.



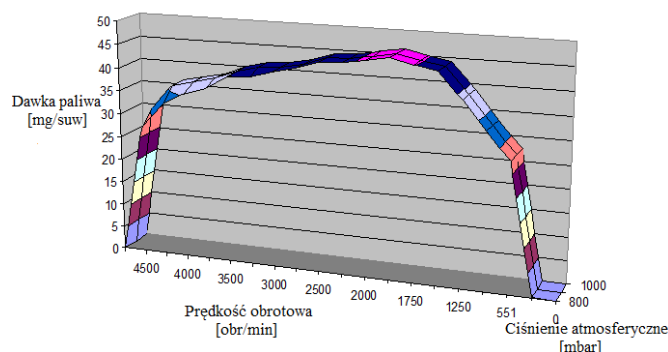
Rys. 11. Mapa życzenia kierowcy wyznaczona z modelu

Mapa życzenia kierowcy – driver wish (rys. 11) przedstawia dawkę paliwa, która powinna być dostarczona do komory spalania silnika. Dawka ta zależy od prędkości obrotowej silnika oraz stopnia naciśnięcia pedału przyspieszenia. Nie jest to ostateczna wartość, gdyż podlega ona jeszcze ograniczeniom. Przy biegu jałowym wykorzystywane są inne wartości (mapy).



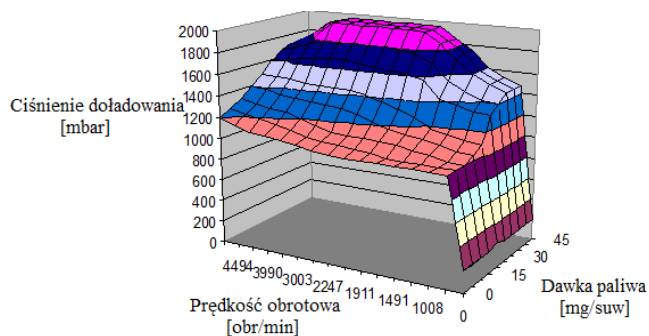
Rys. 12. Mapa dymienia wyznaczona z modelu

Mapa dymienia – smoke limiter (rys. 12) ogranicza dawkę paliwa w zależności od prędkości obrotowej silnika oraz masy przepływającego powietrza (sygnał z przepływomierza). W przypadku zbyt dużej dawki paliwa w porównaniu z ilością tlenu (jego niedoborze) występowałaby zwiększona emisja cząstek sadzy i tlenku węgla. Dlatego jeżeli ilość powietrza jest zbyt mała zmniejszana jest dawka paliwa.



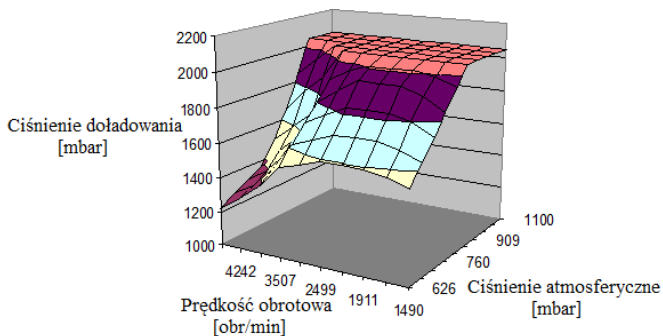
Rys. 13. Mapa ograniczenia momentu obrotowego wyznaczona z modelu

Mapa ograniczenia momentu obrotowego – torque limiter (rys. 13) odpowiada za kształtowanie momentu obrotowego silnika w zależności od prędkości obrotowej silnika oraz ciśnienia atmosferycznego. Dzięki temu elementy takie jak skrzynia biegów i sprzęgło nie ulegają zbyt dużym obciążeniom mechanicznym.



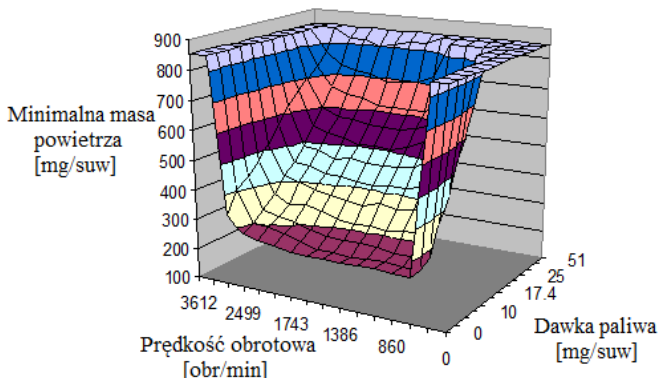
Rys. 14. Mapa docelowego ciśnienia doładowania wyznaczona z modelu

Mapa docelowego ciśnienia doładowania – turbo boost map (rys. 14) przedstawia wymaganą wartość ciśnienia sprężania powietrza dolotowego w zależności od prędkości obrotowej silnika oraz dawki paliwa. Dla wyższych dawek paliwa ciśnienie doładowania musi być odpowiednio stopniowane. Ma to na celu zapewnienie właściwej ilości powietrza.

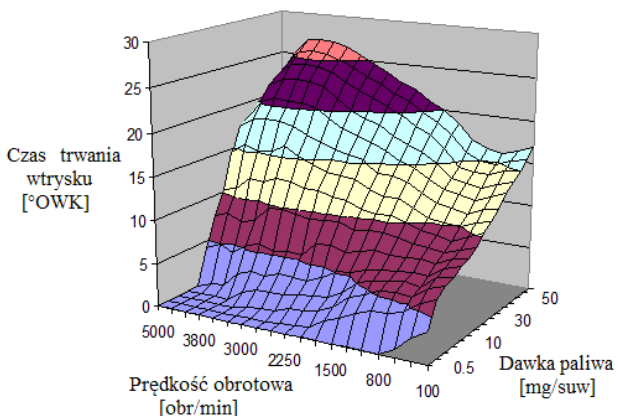


Rys. 15. Mapa ograniczenia ciśnienia doładowania wyznaczona z modelu

Mapa ograniczenia ciśnienia doładowania – boost limiter map (rys. 15) ogranicza ciśnienie wytwarzane przez turbosprężarkę w zależności od prędkości obrotowej silnika oraz ciśnienia atmosferycznego. Ograniczenie to ma na celu niedopuszczenie do dostarczenia do cylindrów zbyt dużej ilości powietrza i powstania zbyt ubogiej mieszanki paliwowo – powietrznej oraz przeciwdziałania uszkodzeniu turbosprężarki przy zbyt małym ciśnieniu atmosferycznym.



Rys. 16. Mapa recyrkulacji spalin wyznaczona z modelu

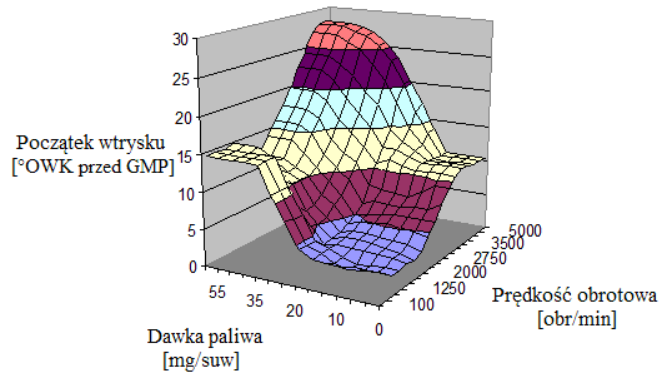


Rys. 17. Mapa czasu wtrysku paliwa (1 z 6) wyznaczona z modelu

Mapa recyrkulacji spalin – EGR (rys. 16) określa minimalną masę powietrza w zależności od prędkości obrotowej silnika i dawki paliwa. Wartość masy powietrza odczytana z mapy porównywana

jest z wartością masy powietrza uzyskaną z przepływomierza. Na tej podstawie regulowany jest stopień otwarcia zaworu EGR.

Mapa czasu trwania wtrysku paliwa (rys. 17), jest to jedna z sześciu map występujących w algorytmie sterującym, zmieniająca w zależności od momentu początku wtrysku. Określa czas otwarcia wtryskiwacza w celu dostarczenia określonej dawki paliwa w funkcji prędkości obrotowej silnika. Dłuższy czas otwarcia wtryskiwacza powoduje zwiększenie dawki paliwa.



Rys. 18. Mapa początku wtrysku paliwa (1 z 9) wyznaczona z modelu

Mapa początku wtrysku paliwa (rys. 18) określa moment rozpoczęcia wtrysku w zależności od prędkości obrotowej silnika oraz dawki paliwa. Jest to jedna z dziewięciu map występujących w algorytmie sterowania wybierana na podstawie temperatury silnika. Utrzymanie optymalnego momentu wtrysku paliwa oraz jego zapłonu przyczynia się zarówno do optymalnej pracy silnika, jak i do zmniejszenia szkodliwych składników spalin emitowanych do atmosfery. Zbyt wczesny wtrysk może działać hamująco na tłok, zbyt późny może spowodować niepełne spalanie mieszanki paliwowo – powietrznej.

Wartości czasów podane w ostatnich dwóch mapach zostały odniesione do stopnia obrotu wału korbowego [°OWK].

### Podsumowanie

Opracowany model elektronicznego układu sterowania silnikiem samoczynnym daje możliwość sprawdzenia algorytmów sterowania odpowiedzialnych za poprawną pracę silnika ZS w warunkach laboratoryjnych. W łatwy sposób można wprowadzić własne wartości map, w celu sprawdzenia poprawności ich działania i porównania różnych wariantów sterowania silnikiem. Dzięki temu nie ma konieczności testowania nowych ustawień na rzeczywistym sterowniku i nie istnieje możliwość uszkodzenia poszczególnych elementów obwodu. Model komputerowy umożliwia ponadto rozbudowę o nowe obwody oraz zastąpienie symulowanych czujników (elementów wejściowych) oraz elementów wykonawczych (wyjściowych) elementami rzeczywistymi z wykorzystaniem kart rozszerzeń. W takim przypadku komputer staje się urządzeniem kontrolno – pomiarowym o bardzo dużych możliwościach.

Ze względu na szereg korzyści, przedstawiony model jest doskonałym narzędziem umożliwiającym wykorzystanie go w dydaktyce. Dzięki takiemu sposobowi prezentacji w łatwy sposób można zapoznać słuchaczy z algorytmami sterowania oraz zależnościami występującymi we współczesnych silnikach wysokoprężnych. W przeciwieństwie do modeli fizycznych, model komputerowy daje możliwość ingerencji w wewnętrzną strukturę programu bez jakichkolwiek dodatkowych zewnętrznych programatorów, co zmniejsza koszty wykonania tego typu stanowiska dydaktycznego. Ponadto przy próbie ingerencji w strukturę modelu rzeczywistego (zarówno fizyczną jak i programową) istnieje możliwość wystąpienia uszko-

dzeń. Przedstawiony model komputerowy eliminuje to ryzyko praktycznie do zera.

### Bibliografia:

1. Boguta A., Elektroniczna modyfikacja parametrów pracy silnika samochodowego o zapłonie samoczynnym, „Motrol” 2011, nr. 13, s. 21-27.
2. Boguta A., Styła S., Wykorzystanie programowania graficznego w symulacji pracy układu sterowania silnikiem ZI i ZS, „Autobusy” 2013, nr 3, s. 947 – 955.
3. Buczaj M., Walusiak St., Sumorek A., Pietrzyk W., Zastosowanie komputerowych programów symulacyjnych do tworzenia wirtualnych stanowisk laboratoryjnych, IX Konferencja Naukowo - Techniczna pod patronatem Komitetu Elektrotechniki PAN "Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice", Poznań/Kiekrz, 2004, Materiały Tom II, s. 651-654.
4. Hubertus G., Układy wtryskowe Common Rail w praktyce warsztatowej, WKŁ, Warszawa 2014.
5. Janiszewski T., Mavrantzas S., Elektroniczne układy wtryskowe silników wysokoprężnych, WKŁ, Warszawa 2016.
6. National Instruments, LabVIEW User Manual, 2003.
7. Praca zbiorowa, Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym. Informatory techniczne Bosch, WKŁ, Warszawa 2014.
8. Praca zbiorowa, Zasobnikowe układy wtryskowe Common Rail. Informatory techniczne Bosch, WKŁ, Warszawa 2009.
9. Stanicki W., Komputerowy model symulujący pracę silnika o zapłonie samoczynnym ZS, praca dyplomowa, Politechnika Lubelska, Lublin 2016.

---

### Computer didactic model of the electronic control unit of compression ignition engine

The article presented a computer model of the control unit of compression ignition engine developed and used as a didactic stand. It reflects the operating algorithms of the CI engine and gives the possibility of observation as well as determining the basic parameters and relationships occurring in the electronic control system EDC. In addition, the transparent structure of the model allows for easy introduction of changes in control parameters and modification of individual maps. The model was developed using the LabView graphic environment.

---

**Keywords:** EDC, ECU, compression ignition, CI engine, engine control, computer model, didactic model, LabView.

Autorzy:  
dr inż. **Sebastian Styła** – Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, e-mail: s.styla@pollub.pl.