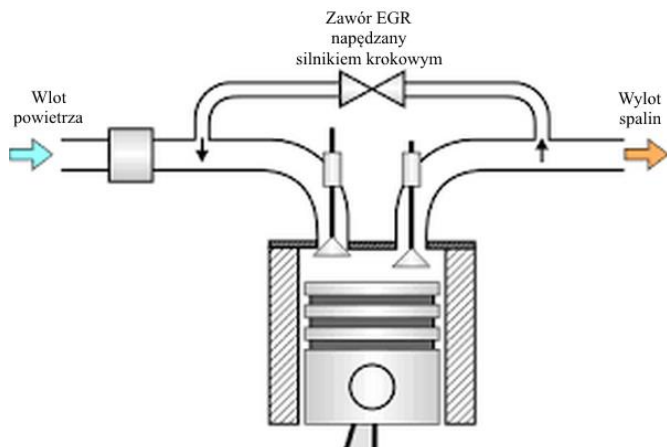


SPOSÓB POMIARU POŁOŻENIA ZAWORU EGR NAPĘDZANEGO SILNIKIEM KROKOWYM

W artykule omówiony został sposób pomiaru i rejestracji chwilowego położenia zaworu EGR napędzanego silnikiem krokowym. Sposób ten może być wykorzystany zarówno w badaniach naukowych nad rozwojem systemów sterowania silnikiem spalinowym jak i w procesie dydaktycznym. Polega on na stałej obserwacji napięć na zaciskach silnika krokowego i za pomocą właściwego algorytmu wyznaczenia każdego ruchu silnika a zatem zmiany położenia zaworu EGR. Opracowano algorytm umożliwiający na podstawie zarejestrowanych sygnałów sterujących uzwojeniami silnika krokowego określenie stopnia otwarcia zaworu recyrkulacji spalin zastosowanego w silniku GDI samochodu Mitsubishi Carisma.

WSTĘP

Recyrkulacja spalin ang. Exhaust Gas Recirculation (EGR) to doprowadzenie części spalin z układu wylotowego do układu dolotowego silnika spalinowego (rys. 1). Ma to na celu wypełnienie części objętości silnika gazem obojętnym (nie biorącym udziału w spalaniu) jakim są spaliny co w konsekwencji przyczyni się do obniżenia maksymalnej temperatury spalania a tym samym do obniżenia emisji tlenków azotu NO_x .



Rys. 1. Schemat recyrkulacji spalin w silniku spalinowym

Coraz bardziej rygorystyczne normy w zakresie emisji toksycznych składników spalin oraz coraz większe oczekiwania użytkowników w zakresie mocy i dynamiki samochodu sprawiły, że w wielu silnikach spalinowych stosuje się recyrkulację spalin. Jest ona nadzorowana przez komputer sterujący pracą silnika i regulowana za pomocą zaworu napędzanego elektrycznym silnikiem krokowym. Chwilowe położenie zaworu recyrkulacji spalin i jego zmiany w czasie mają istotny wpływ na pracę silnika spalinowego dla różnych punktów pracy opisanych prędkością obrotową i obciążeniem.

Obserwacja chwilowego położenia zaworu EGR jednocześnie z innymi parametrami pracy silnika spalinowego umożliwi analizę wpływu recyrkulacji spalin na parametry jego pracy. Niestety w elektronicznym systemie sterowania silnikiem spalinowym nie występuje sygnał wprost wskazujący na położenie zaworu EGR. Niektóre systemy diagnostyczne wyświetlają i dają możliwość rejestra-

cji położenia zaworu EGR w trybie (nr 2) odczytu parametrów bieżących. Informacje te dostępne są nie częściej niż jeden raz na sekundę w zależności od systemu diagnostycznego i jego konfiguracji. Taka częstotliwość informacji jest w wielu przypadkach niewystarczająca.

W artykule zaproponowano metodę pomiaru i rejestracji chwilowego położenia zaworu recyrkulacji spalin. Metoda ta pozwala obserwować i rejestrować każdy ruch silnika krokowego a zatem każdą zmianę położenia zaworu EGR.

1. SILNIK KROKOWY JAKO ELEMENT USTALAJĄCY POŁOŻENIE ZAWORU EGR

Silniki krokowe, zwane też skokowymi, działają na zasadzie przekształcania impulsów elektrycznych w ruch mechaniczny. Poszczególne impulsy sterujące podawane na uzwojenia silnika powodują obrót wirnika o niewielki kąt rzędu 0,72...3,6 stopnia. Kierunek obrotów zależy od sekwencji impulsów zasilających uzwojenia. Ze względu na mały skok wirnika można ustawiać wirnik w zadane położenie i przez to precyzyjnie dozować ilością spalin przez zawór recyrkulacji.

1.1. Rodzaje silników krokowych

Silnik krokowy składa się z dwóch zasadniczych elementów rotora (wirnika) i stojana. Ze względu na budowę tych elementów silniki te można podzielić na:

- silniki o zmiennej reluktancji (Variable Reluctance – VR), (rotor z miękkiej magnetycznie stali jego zęby przyciągane są przez zasilane prądem stałym (magnesyjące się) zęby stojana. Ilość zębów wirnika może być równa lub większa niż ilość zębów stojana),
- silniki z magnesem trwałym (Permanent Magnet – PM), (rotor jest trwale, naprzemiennie namagnesowany, może być „gładki” – bieguny dyskretne (utajone), lub „zębate” – bieguny jawne),
- silniki hybrydowe (Hybrid – HB) - (magnes trwały umieszczony na wirniku lub na stojanie wytwarza jednako-biegunowy strumień magnetyczny, który zamyka się w obwodzie magnetycznym: stojan – szczelina powietrzna – wirnik.

Uzwojenie stojana w silniku krokowym może być podzielone na części (pasma). Każde pasmo jest częścią uzwojenia i zasilane impulsowo. Stosuje się jedno-, dwu-, trzy-, cztero- lub pięciopa-

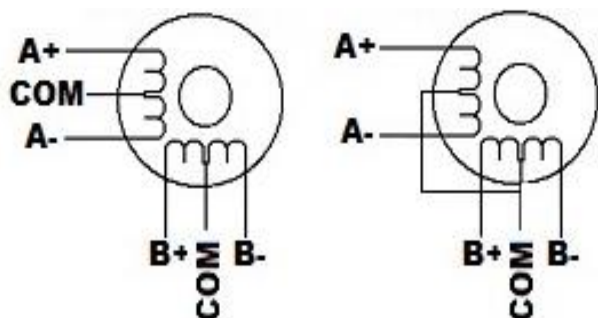
smowe silniki krokowe. Większa liczba pasm uzwojenia powoduje większy moment i wzrost liczby skoków na jeden obrót silnika.

1.2. Sterowanie silnikami krokowymi

Działanie silnika krokowego należy rozpatrywać jak całość: budowa oraz sterowanie. Układ sterowania zapewnia oczekiwane charakterystyki pod konkretne zastosowanie.

Sterowanie silnika może być unipolarnie tj. przepływ prądu w uzwojeniu (lub jego części odbywa się tylko w jednym kierunku) i bipolarne, gdzie kierunek prądu może się zmieniać.

Najpopularniejsze silniki krokowe mają cztery uzwojenia, a właściwie dwie pary uzwojeń jak pokazano na rys. 2:



Rys. 2. Silnik krokowy o czterech fazach uzwojenia A+, A-, B+, B-

Sterowanie uzwojeń silnika krokowego odbywa się za pomocą klucza-przełącznika. Przełączniki działają na przemian, przez co uzyskuje się potrzebną prędkość i kierunek obrotu. Jako przełączniki do sterowania silników krokowych stosuje się tranzystory. Tranzystor, bipolarny czy unipolarny pełni rolę przełącznika – klucza: pracuje w dwóch stanach: zatkanie – nasycenie. Do sterowania wykorzystuje się sekwencję impulsów wytwarzaną przez układy cyfrowe albo mikroprocesorowe. Przełączając prądy w uzwojeniach o pewnej indukcyjności wytwarzane jest napięcie samoindukcji o dużej wartości. Dlatego układy te wymagają zabezpieczeń przed przepięciami.

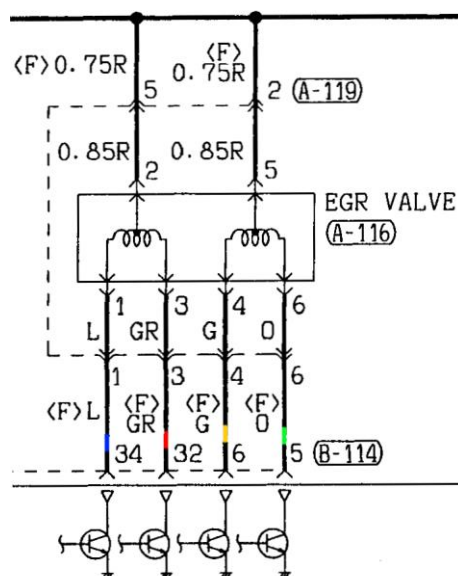
Podstawowe rodzaje sterowania:

- falowe – jednofazowe – w danej chwili prąd płynie w jednym paśmie uzwojenia,
- pełno krokowe – dwufazowe – w danej chwili prąd płynie w dwóch uzwojeniach,
- półkrokowe – kombinacja sterowania jednofazowego i dwufazowego,
- mikrokrokowe – płynna regulacja prądu w uzwojeniach

2. METODYKA I CEL BADAŃ

Jako obiekt badań wykorzystano zawór recyrkulacji spalin w silniku GDI samochodu Mitsubishi Carisma. Do napędu zaworu EGR w tym samochodzie wykorzystany jest popularny silnik krokowy o czterech uzwojeniach. Fragment schematu, przedstawiającego połączenie silnika krokowego ze sterownikiem, pokazano na rys. 3.

Używany w tym systemie silnik krokowy do napędu zaworu EGR posiada dwa uzwojenia między zaciskami 1-3 i 4-6, które posiadają odczep na środku – odpowiednio zaciski 2 i 5 złącza A-116. Odczepy uzwojeń połączone są do „+” źródła zasilania a końce uzwojeń do kluczy tranzystorowych w sterowniku. Taki sposób podłączenia uzwojeń silnika daje indywidualną możliwość zasilania każdej części uzwojenia. W tym rozwiązaniu prąd przez każdą z czterech części uzwojeń płynie tylko w jednym kierunku.



Rys. 3. Schemat podłączenia silnika krokowego ustalającego położenie zaworu EGR w silniku GDI samochodu Mitsubishi Carisma

Obserwując (rejestrując) napięcia na zaciskach: 1, 3, 4 oraz 6 silnika krokowego można określić w których częściach uzwojeń płynie prąd. Wartość napięcia bliska zeru oznacza zamknięty klucz tranzystorowy w sterowniku i przepływ prądu w uzwojeniu. Wartość napięcia bliska napięciu zasilania oznacza brak przepływu prądu w uzwojeniu.

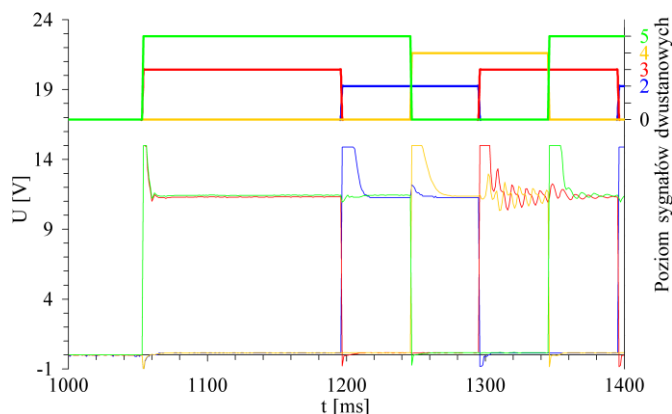
Zakładając cel prowadzonych badań jako określenie położenia zaworu recyrkulacji spalin na podstawie sygnałów sterujących prądem w uzwojeniach silnika krokowego, zestawiono stanowisko pomiarowe z wykorzystaniem komputera klasy IBM PC. Komputer wyposażony był w kartę przetworników OCTOPUS CS8380 firmy GAGE o rozdzielczości 14-bitowej oraz szybkości próbkowania do 10MS/s i program ją obsługujący.

Zarejestrowano napięcia na zaciskach silnika krokowego podłączonych do sterownika z najmniejszą możliwą szybkością tj. 1kS/s w trzech przypadkach:

- przed włączeniem zapłonu i przez kilka sekund po włączeniu zapłonu ale bez uruchamiania silnika,
- jak w przypadku pierwszym z uruchomieniem silnika i spokojną jazdą w czasie 200s,
- jak w przypadku pierwszym z uruchomieniem silnika i dynamiczną jazdą w czasie 200s.

Wyniki badań poddano wstępnemu przekształceniu zamieniając wartości zarejestrowanych napięć na wartości dwustanowe (stany: niski i wysoki) przypisując różne wartości stanowi wysokiemu dla poszczególnych uzwojeń. Takie rozróżnienie poziomu sygnałów sprawi, że będą one bardziej czytelne na wykresach (rys. 4).

Wykres na rysunku 4 w jego dolnej części przedstawia sygnały napięciowe zarejestrowane na stykach silnika krokowego w jednostkach napięcia wg skali na osi po lewej stronie. Wykres w górnej części rysunku 4 przedstawia stany odpowiadające zarejestrowanym napięciom wg skali na osi po prawej stronie. Tak przygotowane sygnały posłużyły do opracowania algorytmu wyznaczania położenia zaworu EGR. Także program analizujący położenie zaworu napisany na potrzeby tej metody pracuje w oparciu o tak przygotowane sygnały. Do przekształcania sygnałów z postaci napięciowej na dwustanową wykorzystano program komputerowy napisany na potrzeby analiz pomiarów wykonywanych z udziałem karty OCTOPUS CompuScope 8380.

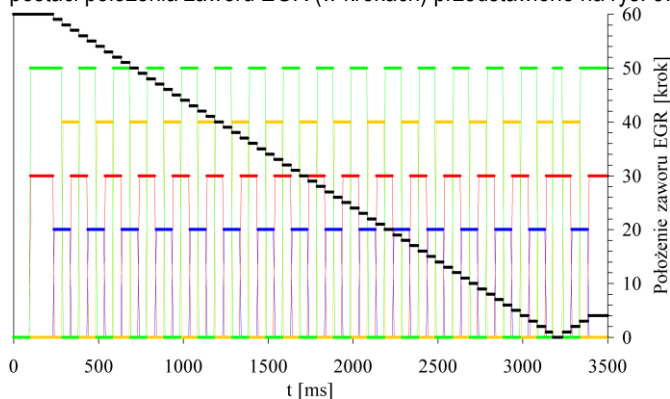


Rys. 4. Sposób przekształcenia zarejestrowanych sygnałów napięciowych na sygnały dwustanowe

Na podstawie zarejestrowanych sygnałów w przypadku „bez uruchamiania silnika” opracowano procedurę umożliwiającą wyznaczenie położenia zaworu recyrkulacji spalin. Na jej podstawie napisano program komputerowy do analizy tych sygnałów i przeprowadzono ją dla obu zarejestrowanych przypadków.

2.1. Wyniki badań

Pierwsza z przeprowadzonych rejestracji miała posłużyć opracowaniu algorytmu wyznaczania zmian położenia zaworu. Z tego powodu jest to tylko kilka sekund obejmujących fazę wysterowania silnika zaworu EGR po włączeniu zapłonu. W tej fazie sterownik wykonuje pewną liczbę kroków (60 - w przypadku badanego obiektu) powodujących zamykanie zaworu. Dzieje się tak, ponieważ nie ma innej możliwości weryfikacji wstępnego położenia zaworu po włączeniu zapłonu. Jeśli zawór był w pozycji zamkniętej lub otwartej ale na mniej niż 60 kroków to w wyniku wysterowania po włączeniu zapłonu zostanie przestawiony do pozycji całkowitego zamknięcia. Zarejestrowane sygnały po wstępnym przetworzeniu i ich analiza w postaci położenia zaworu EGR (w krokach) przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przebiegi czasowe sygnałów sterowania silnikiem krokowym zaworu EGR po włączeniu zapłonu oraz jego położenie w wyniku tego sterowania (kolory sygnałów zgodne z rys. 3)

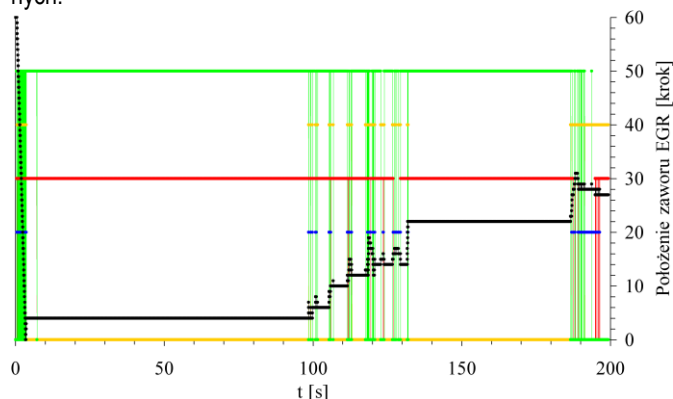
2.2. Analiza otrzymanych wyników

Rys. 5 przedstawia wyniki pierwszego badania. Przebiegi w kolorach: niebieski, czerwony, żółty i zielony przedstawiają poziomy sygnał na złączach silnika krokowego zgodnie z rys. 3. Przebieg koloru czarnego przedstawia położenie zaworu EGR. Po tej fazie wysterowania zawór został ustawiony w pozycji 4 kroków od pozycji całkowitego zamknięcia. Przed włączeniem zapłonu przez uzwojenia silnika krokowego nie płynie prąd co może prowadzić do niekontrolowanej zmiany położenia zaworu EGR.

Analiza faz przełączania prądu w przypadku czterech uzwojeń i dwóch stanów każdego z nich (prąd płynie bądź nie płynie) przy

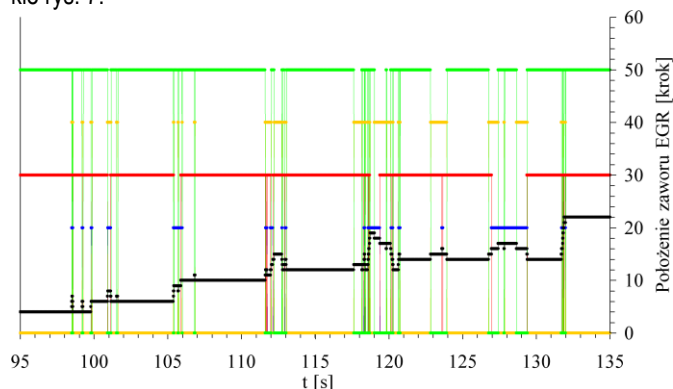
czym zawsze płynie w dwóch występuje 8 różnych kombinacji czyli po 4 dla każdego kierunku.

Częstotliwość przełączania prądu w uzwojeniach silnika nie przekracza 100Hz (w przypadku badanego silnika) co powoduje, że przedstawiona metoda nie wymaga gromadzenia dużej ilości danych.



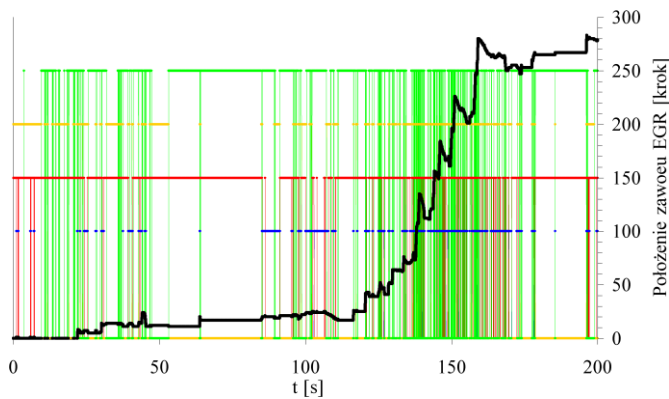
Rys. 6. Przebiegi czasowe sygnałów sterowania silnikiem krokowym zaworu EGR w czasie 200 sekund obejmującym włączenie zapłonu, uruchomienie silnika spokojną jazdę oraz jego położenie w wyniku tego sterowania (kolory sygnałów zgodne z rys. 3)

Rysunek 6 przedstawia zmiany sygnałów napięciowych na zaciskach silnika krokowego i odpowiadające im zmiany położenia zaworu EGR. Przebiegi te przedstawiają stany w których nie następowały zmiany położenia zaworu przez dłuższy czas (np. od 10 do 90s i od 135 do 185s) oraz takie gdzie zmiany te były bardzo szybkie rys. 7.



Rys. 7. Przykład szybkich zmian położenia zaworu EGR

Prezentowane dotąd zmiany położenia zaworu EGR są niewielkie, gdyż warunki pracy silnika w czasie pomiaru nie sprzyjały dużym zmianom emisji NO_x. Trzecia rejestracja sygnałów (rys. 8) pokazuje znacznie większe i szybsze zmiany położenia zaworu recyrkulacji. Każdej zmianie położenia zaworu EGR w prezentowanej metodzie przypisana jest chwila czasowa z dokładnością do 1ms. Można zatem przeprowadzić analizę sterowania zaworem EGR na tle innych szybkozmiennych parametrów pracy badanego silnika.



Rys. 8. Przebiegi czasowe sygnałów sterowania silnikiem krokowym zaworu EGR w czasie 200 sekund obejmującym włączenie zapłonu, uruchomienie silnika dynamiczną jazdę oraz jego położenie w wyniku tego sterowania (kolory sygnałów zgodne z rys. 3)

PODSUMOWANIE

Celem podjętego tematu było opracowanie metody umożliwiającej analizę sterowania silników spalinowych wyposażonych w recyrkulację spalin. Istnieją metody podglądu położenia zaworu EGR, ale dostrzeżono, że metody te są wolne i trudno ich wyniki zsynchronizować z innymi szybkozmiennymi parametrami pracy badanego silnika spalinowego.

Opracowano metodę opartą na analizie sygnałów na złączu silnika krokowego napędzającego zawór EGR i pozytywnie zweryfikowano ją na przykładzie systemu sterowania silnikiem GDI samochodu Mitsubishi Carisma.

Opracowana metoda położenia zaworu EGR poprzez obserwację sygnałów sterowania pozwala bardzo szybko i precyzyjnie określać położenie tego zaworu.

Metodę można stosować bez żadnych modyfikacji w każdym przypadku gdzie jest silnik krokowy z czterema uzwojeniami, w których prąd płynie w jednym kierunku. Jest to dość powszechne rozwiązanie. W innych napędach zaworu EGR z silnikiem krokowym o innej konstrukcji, pomiar napięć na zaciskach silnika umożliwi co prawda obserwację jego działania, ale algorytm wyznaczania położenia będzie różny od opracowanego w ramach tej pracy.

BIBLIOGRAFIA

1. Potocki L., *Silniki krokowe od podstaw cz.1÷6*, „Elektronika dla wszystkich”, lipiec-grudzień 2002.
2. Myszkowski S., *Recyrkulacja spalin w silnikach cz.1*, Dodatek techniczny do WIADOMOŚCI Inter Cars S.A. nr 35, czerwiec 2010
3. Myszkowski S., *Recyrkulacja spalin w silnikach cz.2*, Dodatek techniczny do WIADOMOŚCI Inter Cars S.A. nr 36, wrzesień 2010

The technique of measurement of the position of EGR valve powered by stepper motor

The article shows the technique of measurement and registration of temporary position of EGR valve powered by stepper motor. This method can be used in both scientific research on the development of systems of internal combustion engine control and in didactical process. It consists in constant observation of voltage across the terminals of stepper motor and by means of the appropriate algorithm of the designation of each engine traffic and thus the change of the position of EGR valve. The algorithm was developed that on the basis of registered signals controlling the stepper motor windings enables to define the degree of opening exhaust gas recirculation valve used in GDI engine of the car Mitsubishi Carisma.

Autorzy:

dr inż. **Marek Stępniewski** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Mechaniczny, Zakład Mechatroniki Samochodowej

dr inż. **Zbigniew Wołczyński** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Mechaniczny, Zakład Mechatroniki Samochodowej