

ZAJKOWSKI Konrad¹
DUER Stanisław²

DIAGNOSTYKA SILNIKA SKOKOWEGO I UKŁADU STERUJĄCEGO

W pracy opisano sposoby diagnostyki silników skokowych stosowanych w pojazdach samochodowych. Omówiono typy silników i algorytmów sterowania. Dokonano oceny sposobu sterowania silnikami skokowymi w pojazdach samochodowych. Opisano możliwe sposoby sterowania tymi silnikami.

DIAGNOSTICS OF STEPPER MOTOR AND CONTROL SYSTEM

This paper describes the diagnostic methods of stepper motors used in vehicles. Discusses the types of motors and control algorithms. Assessed ways to control the stepper motors in vehicles. Describes the possible ways to control these motors.

1. WSTĘP

Zwiększenie złożoności i liczby elementów wykonawczych w samochodach przyczynia się do poprawy własności użytkowych i komfortu użytkowania pojazdów samochodowych. Większością elementów wykonawczych małej mocy sterują silniki skokowe. Dzięki najważniejszej zalecie - stałej wartości momentu przy pojedynczych krokach z zachowaniem wysokiej precyzji ruchowej - ten szczególny typ silnika o działaniu dyskretnym trafia coraz częściej do aplikacji motoryzacyjnych. Przeprowadzając analizę algorytmów sterowania i sposobu zasilania uzwojeń silnika, można przedstawić metody diagnozy silnika.

Silniki skokowe znalazły zastosowanie między innymi w napędach przepustnicy biegu jałowego, napędach układów wspomagania, sterowania kątem lusterek, silnikach wentylatorów sterowania układów wspomagania i inne. Analizując zaimplementowane rozwiązania w pojazdach zazwyczaj są to silniki dwufazowe bądź trójfazowe o sterowaniu uni- i bipolarnym.

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-620 Koszalin; ul. Raławicka 15-17.
Tel: +48 3478-426, E-mail: konrad.zajkowski@tu.koszalin.pl

² Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-620 Koszalin; ul. Raławicka 15-17.
Tel: +48 3478-262, E-mail: stanislaw.duer@tu.koszalin.pl

2. SILNIK WRAZ Z UZWOJENIAMI

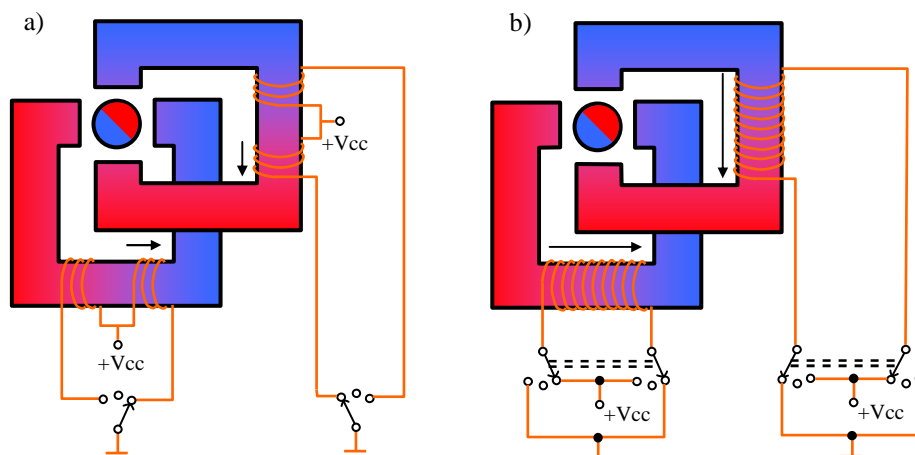


Rys.1. Silniki skokowe a) regulujący wtrysk silnika spalinowego, b) regulujący obroty biegu jałowego

Pierwszym wskaźnikiem w trakcie diagnozy jest informacja o liczbie przewodów zasilających silnik. Rozwiązania trójprzewodowe wskazują na silnik trójfazowy z uzwojeniami połączonymi w gwiazdę bądź w trójkąt. Cztery przewody zasilające wskazują na silnik trójfazowy z wyprowadzonym punktem gwiazdowym bądź silnik dwufazowy bipolarny. Do dokładniejszej identyfikacji zatem potrzebny jest również pomiar rezystancji uzwojeń. Pomiar ten jest szczególnie wymagany w przypadku rozwiązań z większą liczbą przewodów. W przypadku sześciu przewodów najczęściej mamy do czynienia z silnikiem unipolarnym dwufazowym. W tym przypadku pomiar rezystancji powinien wskazać przewody wyprowadzające środek uzwojenia (odczep środkowy cewki).

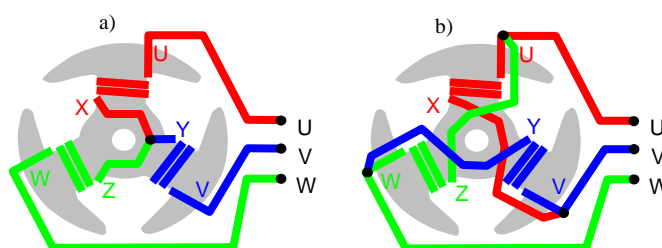
Silniki unipolarne i bipolarne do prawidłowegoysterowania wymagają odmiennego układu sterującego, bowiem różnią się sposobem komutacji prądu i zmianą kierunku prądu w uzwojeniach. Silnik unipolarny dwufazowy posiada dwie pary podwójnych uzwojeń (uzwojenia z odczepem symetrycznym) czyli posiada sześć wyprowadzeń (lub osiem gdy wewnątrz nie zrealizowano połączenia początku z końcem kolejnych uzwojeń). Nazwa unipolarny wynika z jednokierunkowego przepływu prądu przez uzwojenie. Silniki bipolarne wymagają stosowania czterech kluczy elektronicznych przełączających kierunek prądu na jedno uzwojenie. Dla silnika dwufazowego kluczy tych jest osiem a w trójfazowym dwanaście.

W silnikach bipolarnych dzięki jednemu uzwojeniu na sekcję mamy wykorzystanie efektywniejsze przestrzeni wewnątrz silnika. Można wykonać w tym przypadku uzwojenia grubszym drutem o mniejszej rezystancji, co umożliwi zwiększenie prądu płynącego przez sekcję przy zachowaniu tych samych strat mocy na rezystancji. W efekcie tego silnik bipolarny posiada o około 40% większy moment obrotowy od silnika unipolarnego skonstruowanego na tej samej ramce.



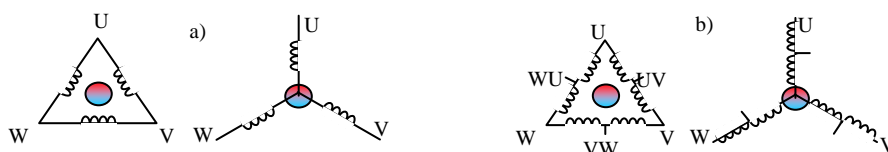
Rys.2. Sterowanie silnika skokowego a) unipolarnego, b) bipolarnego

W silniku trójfazowym znajdujemy rozwiązania z topologią gwiazdy, rzadziej trójkąta.



Rys.3. Topologia połączeń wirnika silnika skokowego trójfazowego: a) gwiazda, b) trójkąt

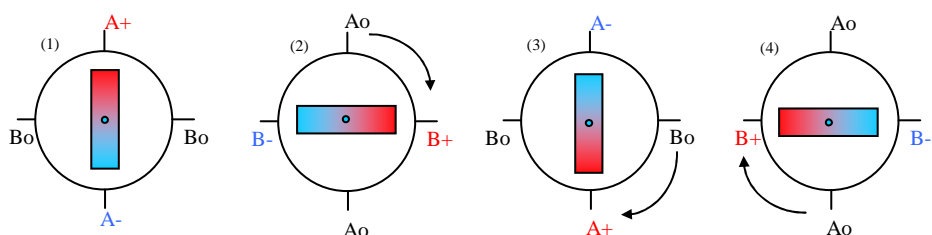
Zazwyczaj silniki te mają wyprowadzone tylko trzy przewody (bez przewodu gwiazdowego). Spotkać można wykonanie silnika uni- i bipolarnego. Silnik unipolarny wymaga 2 krotnie większej liczby wyprowadzeń od bipolarnego.



Rys.4. Uzwojenia silnika trójfazowego a) bipolarnego i b) unipolarnego

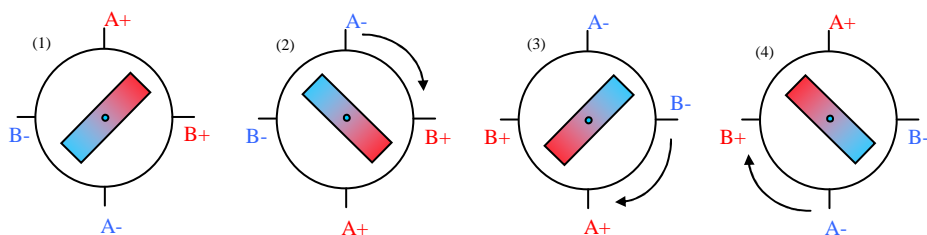
3. STEROWNIK I JEGO ALGORYTMY

Możliwa jest realizacja wielu algorytmów sterowania kluczami. Najprostszy z nich - sterowanie jednofazowe (inaczej **falowe**) znalazł zastosowanie w tej klasie silników. W sterowaniu falowym w każdym kroku prąd przepływa tylko przez jedno pasmo. W przypadku silnika dwufazowego przy sterowaniu falowym, cykl pracy składa się z 4 kroków elementarnych. W przypadku silnika trójfazowego przy sterowaniu falowym przypada 6 kroków elementarnych na jeden cykl pracy.



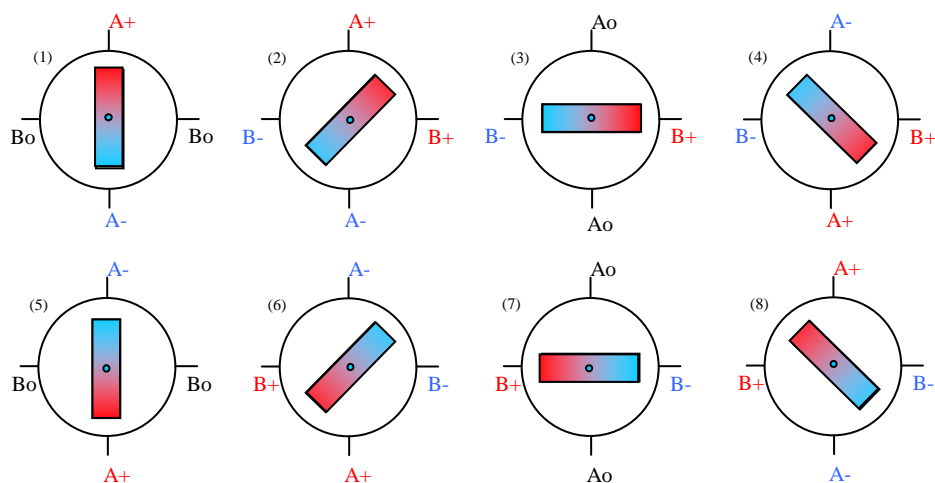
Rys.5. Fazy ruchu silnika skokowego dwufazowego przy sterowaniu falowym. Symbole A+ i A- oznaczają umowny kierunek prądu płynącego w uzwojeniu

Sterowanie **pełnokrokowe** charakteryzuje się przepływem prądu przez dwa uzwojenia. W silniku trójfazowym jedno uzwojenie jest nieobciążone. Aktywność dwóch uzwojeń powoduje zwiększenie strumienia magnetycznego oddziałującego na rotor. W tym przypadku magnes rotora ustawia się na ukos w stosunku do nabiegunków stojana. Równoczesne zasilanie obu uzwojeń silnika powoduje wzrost momentu obrotowego. Strumień oddziałujący na wirnik jest sumą wektorową dwu strumieni.



Rys.6. Fazy ruchu silnika skokowego dwufazowego przy sterowaniu pełnokrokowym

Sterowanie **półkrokowe** odznacza się zdwojoną precyzją nastaw w porównaniu do poprzednich metod. Występuje zatem osiem kroków na pełen cykl. Przy tej samej częstotliwości zegara sterującego silnik będzie obracał się dwa razy wolniej, lecz z podwójną dokładnością.



Rys. 7. Fazy ruchu silnika skokowego dwufazowego przy sterowaniu półkrokowym

Przy sterowaniu półkrokowym wibracje i rezonans są znacznie mniejsze niż w poprzednich metodach. Wadą tego sposobu sterowania jest nieco mniejszy moment występujący co drugi krok.

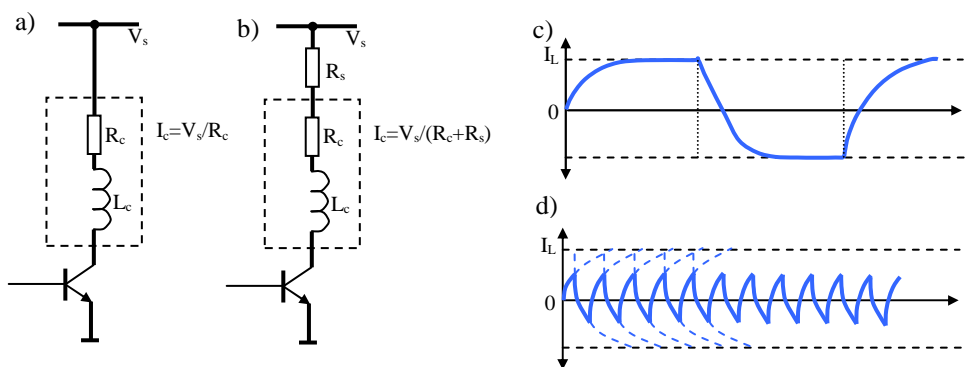
Praca **ćwierćkrokowa** umożliwia uzyskanie położeń pośrednich pomiędzy dwoma położeniami półskokowymi. Jest to możliwe w przypadku zasilania całego pasma i połowy drugiego, co jest możliwe przykładowo w sterowaniu silnikiem unipolarnym. Pełny cykl w silniku dwufazowym przy pracy ćwierćkrokowej składa się z 16 skoków. Pracę **mikrokrokową** uzyskuje się przez dalszy podział poziomu prądu w uzwojeniach. Aby zapewnić pracę mikrokrokową silnika skokowego stosuje się układ sterowania wytwarzający sygnały o poziomach pośrednich pomiędzy maksymalną i minimalną wartością sygnału źródła. Dzięki takiemu wymuszeniu prądu w pasmach silnika wytwarzają wektor strumienia magnetycznego, o położeniu określonym przez wartości tych prądów. Wektor strumienia magnetycznego zajmuje położenia pośrednie pomiędzy położeniami określonymi przez konstrukcję silnika. Konstrukcyjna liczba kroków bazowych zostaje w ten sposób zwielokrotniona przez liczbę mikrokroków.

Uzyskanie takiej pracy jest możliwe przez dostarczenie do pasm silnika prądu o przebiegu impulsowym w taki sposób, aby wypadkowy strumień magnetyczny zmieniał się z obwiednią zbliżoną do sinusoidy. Teoretycznie może być nieskończenie wiele mikrokroków, lecz z powodu występowania zjawiska histerezy, mogącego spowodować opuszczanie kroków przy małych zmianach pola magnetycznego, w praktyce stosuje się skończoną liczbę mikrokroków.

Kierunek pracy silnika jest kwestią umowną. Zależy on od algorytmu sterowania i od kierunku prądu w sekcji. W praktyce oznacza to, że zmiana kierunku prądu w jednym uzwojeniu, czyli zamiana końcówek w jednej fazie, powoduje zmianę kierunku wirowania silnika dwufazowego.

Diagnostyka uzwojeń silnika opiera się na pomiarze ich indukcyjności lub oporności. Do tego potrzebna jest znajomość budowy uzwojeń silnika. Liczba faz i liczba przewodów przypadających na każdą z nich (włącznie z odczepami) ułatwia proces diagnostyki. Ewentualne odczepy dzielą rezystancję cewki na równe części. Przy pomiarach spodziewać się należy równych wartości indukcyjności i oporności w poszczególnych sekcjach uzwojeń. Wszelkie odstępstwa od tego wskazują na uszkodzenia uzwojeń. Uszkodzenie uzwojenia może prowadzić do przepalenia kluczy.

Uzwojenia silnika skokowego można interpretować jako szeregowe połączenie rezystancji i indukcyjności tworzącej dla przepływającego prądu układ z inercją. Inercyjność uzwojenia o stałej czasowej bliskiej odwrotności częstotliwości przebiegu zasilającego prowadzi do osłabienia strumienia magnetycznego i spadku mocy silnika.



Rys.8. Sterowanie napięciowe: schematy układów a) L/R , b) L/nR . Przebiegi prądów przy c)-małych, d)-dużych prędkościach obrotowych

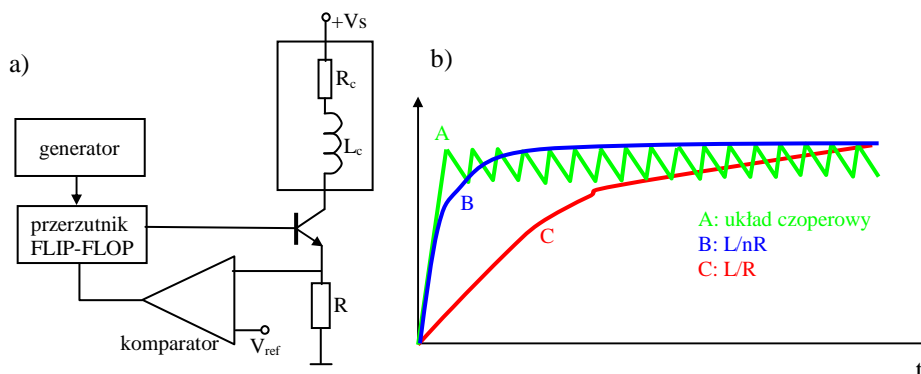
W zakresie niewielkich prędkości obrotowych wystarczające jest sterowanie napięciowe. Wtedy zgodnie z prawem Ohma wartość prądu osiąga stan ustalony i wynika z rezystancji uzwojenia (rys.8.c). Takie sterowanie nazywa się sterowaniem L/R . Indukcyjność powoduje narastanie prądu w uzwojeniu z określoną stałą czasową. Wpływa to niekorzystnie na prąd silnika przy wyższych częstotliwościach zasilania (rys.8.d). Wartość chwilowa prądu w uzwojeniu nie zdąży osiągnąć wartości znamionowej. Powoduje to zmniejszenie momentu obrotowego. Rozwiązaniem tego problemu jest zmniejszenie stałej czasowej.

$$\tau_{L/R} = \frac{L_C}{R_C}, \quad \tau_{L/nR} = \frac{L_C}{R_C + R_S}, \quad \tau_{L/R} > \tau_{L/nR} \quad (1)$$

Prowadzi to do potrzeby podwyższenia napięcia zasilania i zastosowania dodatkowej rezystancji szeregowej R_s . Suma rezystancji $R_c + R_s$ jest tak dobrana, aby przy podwyższonym napięciu przepływał prąd znamionowy. Taki typ sterowania nazywa się L/nR , gdzie n – określa wielokrotność wartości rezystora R_s w stosunku do R_c . Ze względu

na znaczne straty mocy w rezystorze szeregowym R_s , ten typ sterowania jest rzadko stosowany w praktyce.

Najbardziej ekonomiczne jest stosowanie metody kluczowanego sterowania prądowego w układzie ze sprzężeniem zwrotnym (rys.9).



Rys.9. Schemat układu czoperowego a); przykładowy przebieg prądu w uzwojeniu dla różnych rodzajów sterowania b)

Realizacja tej metody opiera się na układzie czoperowym. Tranzystor spełnia rolę klucza włączającego w odpowiednim momencie prąd płynący przez uzwojenie i kluczuje ten prąd w układzie pętli sprzężenia tak, aby prąd nie przekroczył wartości zadanej. Rezystor R o niewielkiej wartości umożliwia pomiar prądu płynącego przez uzwojenie.

W chwili włączenia tranzystora sterowanego przez przerzutnik, prąd w uzwojeniu zaczyna narastać. Równocześnie rośnie prąd w rezystorze R i napięcie podawane na wejście pomiarowe komparatora. Po przekroczeniu napięcia V_{ref} przerzutnik zmienia stan blokując tranzystor. Ponowne włączenie tranzystora jest możliwe po zmianie stanu generatora. Dzięki takiemu sterowaniu prąd płynący przez uzwojenie osiąga szybko wartość nominalną, a później jest kluczowany utrzymując stałą wartość. Regulując napięcie V_{ref} można ustawić żądaną wartość prądu płynącego przez pasmo.

Diagnostykę układu sterowania najłatwiej jest przeprowadzić kontrolując stan tranzystorów kluczujących prądy w fazach. Spotkać tu można rozwiązania oparte na elementach dyskretnych, którymi w tym przypadku są tranzystory mocy bipolarne, MOSFETy i technologie łączone. Najczęstsze rozwiązania opierają się na scalonych stopniach wykonawczych, które w swojej strukturze zawierają nieraz oprócz stopnia mocy układy pomocnicze. W przypadku rozwiązania scalonego diagnostykę przeprowadzamy sprawdzając stany na wejściach sterownika. Spodziewać się tu można wysokich/niskich stanów aktywnych pojawiających się zgodnie z algorytmem sterowania.

W przypadku zastosowania układu czoperowego do sprawdzenia również wymaga poziom napięcia referencyjnego V_{ref} . Wartość ta definiowana jest w układzie zewnętrznego źródła napięciowego ze stałą wartością napięcia bądź zmienną. Zmienne napięcie referencyjne jest najczęściej kontrolowane przez mikroprocesor z przetwornikiem C/A.

4. WNIOSKI

Prawidłową diagnostykę silnika skokowego można przeprowadzić poznawszy zasadę działania, budowę uzwojeń silnika i algorytmy sterowania. Ze względu na wysokość ceny nowego podzespołu naprawa tych silników jest zadaniem uzasadnionym. Dotychczasowa znajomość teoretyczna w serwisach powodowała ograniczenie naprawy do oceny jakości części mechanicznych silnika. Pomimo mniejszej awaryjności tych silników lecz przy zwiększonym zastosowaniu i liczebności aplikacji ten rodzaj silnika coraz częściej trafia do serwisów. Diagnostykę uzwojeń silnika można przeprowadzić na jednym z produkowanych sterowników silników skokowych. Diagnostyka sterownika musi być przeprowadzana przy znajomości algorytmów i przy użyciu oscyloskopu. Dla silników wolnoobrotowych można zbudować diagnostykę wskazującą poziomy napięcie na poszczególnych kluczach sterownika.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Cichoński D.: *Sterownik bipolarnych silników krokowych*. Praktyczny Elektronik 9/97
- [2] Duer S., Zajkowski K.: *Laboratorium Elektrotechniki Samochodowej tom.2*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2010
- [3] Kneba Z., Makowski S.: *Zasilanie i sterowanie silników*. WKiŁ Warszawa 2004
- [4] Kosmol J.: *Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie*. WNT, Warszawa 1998
- [5] Zajkowski K., Duer S.: *Diagnostyka układu elektrycznego w torze pomiaru równoległego*. Słupskie XIII Forum Motoryzacji, Innowacje w motoryzacji dla ochrony środowiska Tom 13, Słupsk 2010
- [6] Zajkowski K., Duer S.: *Analiza stanu nieustalonego w obwodzie silnika skokowego z układem czoperowym*. Słupskie XIV Forum Motoryzacji, Innowacje w motoryzacji a ochrona środowiska, Miesięcznik AUTOBUSY Nr 5/2011 s.471-476