

Konrad ZAJKOWSKI, Stanisław DUER

POPRAWA WŁASNOŚCI EKSPLOATACYJNYCH SILNIKÓW SKOKOWYCH

Streszczenie

W pracy dokonano oceny sposobu sterowania silnikami skokowymi w pojazdach samochodowych. Opisano możliwe sposoby sterowania tymi silnikami oraz omówiono skutki zmian na własności eksploatacyjne. Przedstawiono możliwości zmian sposobów zasilania pasm oraz sterowania silników skokowych w pojazdach na etapie modernizacji oraz projektu.

WSTĘP

Wykorzystanie silników skokowych w motoryzacji przyczyniło się do poprawy własności użytkowych i komfortu użytkowania pojazdów samochodowych. Ten szczególny typ silnika prądu stałego trafia coraz częściej do biur projektowych dzięki najważniejszej zalecie: stałej wartości momentu również przy pojedynczych krokach. Niestety często zapomina się o wadach tych silników (np. mały moment i moc w porównaniu do silników o działaniu ciągłym przypadające na jednakowe gabaryty silników). Przeprowadzając analizę algorytmów sterowania i sposobu zasilania uzwojeń silnika, można poprawić własności eksploatacyjne silnika, w tym zwiększyć: moment, precyzję nastawy, częstotliwość roboczą i rozruchową, a tym samym zredukować ryzyko pojawienia się zjawiska hazardu wirnika.

1. ANALIZA STANU OBECNEGO

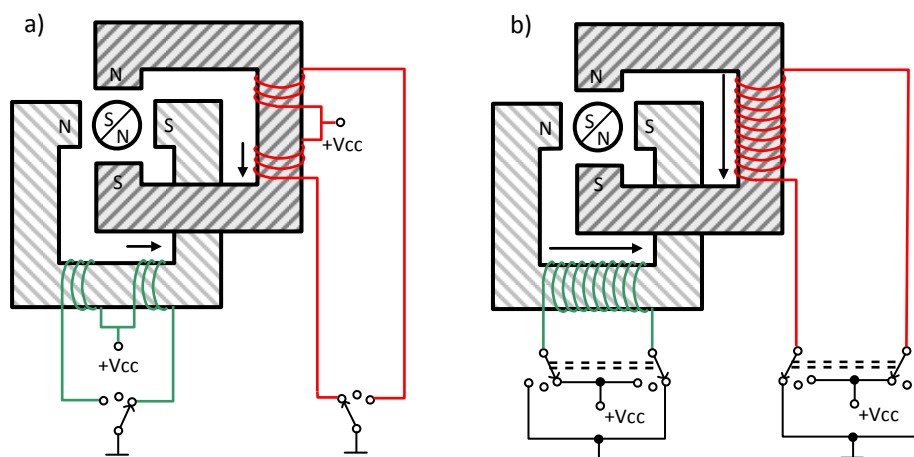
Silniki skokowe znalazły zastosowanie w napędach przepustnicy biegu jałowego, napędach układów wspomagania, sterowania kątem lusterek, silnikach wentylatorów i innych. Najczęściej są to silniki dwupasmowe bądź trójpasmowe o sterowaniu jednofazowym.



Rys. 1. Silniki skokowe: a) regulujący wtrysk silnika spalinowego, b) regulujący obroty biegu jałowego
Źródło: http://zme.iee.put.poznan.pl/Lab/labAiR/lab12_teoria.pdf.

Silniki unipolarne i bipolarne wymagają odmiennego układu sterującego, bowiem różnią się sposobem wyprowadzenia odczepów od cewek. Silnik unipolarny dwupasmowy posiada dwie pary podwójnych uzwojeń (uzwojenia z odczepem symetrycznym), czyli posiada 6 wyprowadzeń (lub 8, gdy wewnątrz nie zrealizowano połączenia początku z końcem kolejnych uzwojeń). Nazwa unipolarny wynika z jednokierunkowego przepływu prądu przez pasmo.

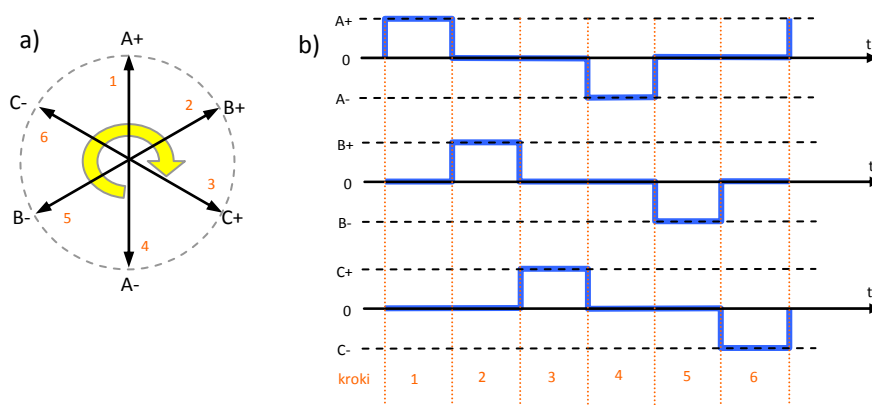
Silniki bipolarne wymagają stosowania czterech kluczy przełączających kierunek prądu w jednym paśmie. W przypadku silnika dwupasmowego kluczy tych jest 8, a w trójpasmowym dwanaście. Zaletą silników bipolarnych jest wyższa sprawność oraz większe momenty obrotowe przypadające na dane gabaryty silnika niż w silnikach unipolarnych. Wynika to z faktu, że w silnikach unipolarnych w każdym kroku czynna jest tylko połowa uzwojenia.



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

Źródło: Opracowanie własne.

Można zrealizować wiele algorytmów sterowania kluczami. Najprostszy z nich – sterowanie jednofazowe zwane również falowym – znalazł zastosowanie w tej klasie silników. W sterowaniu falowym, w każdym kroku prąd przepływa tylko przez jedno pasmo. W przypadku silnika dwupasmowego przy sterowaniu falowym, cykl pracy składa się z czterech kroków elementarnych. W przypadku silnika trójpasmowego przy sterowaniu falowym na cykl pracy przypada już 6 kroków elementarnych.



Rys. 3. Sterowanie falowe silnika trójpasmowego. a) wykres wektorowy, b) przebiegi strumienia w pasmach

Źródło: Opracowanie własne.

2. POPRAWA WŁASNOŚCI EKSPLOATACYJNYCH

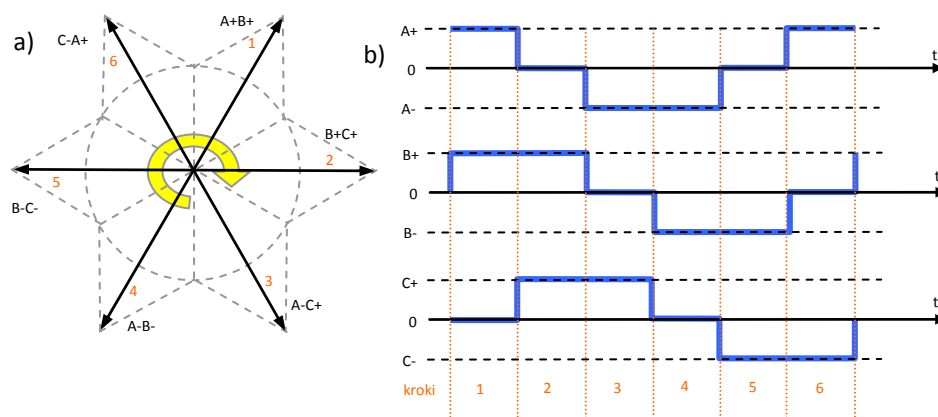
Zwiększenie momentu na wale silnika jest możliwe poprzez zmianę układu sterowania z unipolarnego na bipolarny. Silnik bipolarny posiada o około 40% większy moment obrotowy od silnika unipolarnego skonstruowanego na tej samej ramce. Przejście ze sterowania unipolarnego na bipolarny nie wymaga wymiany silnika, a jedynie układu sterowania. Silnik unipolarny może być sterowany jak bipolarny, zasilając całe pasma i pozostawiając środkowe odczepy uzwojeń niepodłączone.

Zwiększenie liczby pasm w silniku powoduje płynniejszą pracę silnika – dzięki regularniejszemu polu wirującemu w stojanie. Silnik taki ma mniejsze tendencje wpadania w hazard i większą dokładność nastawy. Wadą jest zwiększenie liczby kluczy w układzie sterującym. Liczba pasm jest ściśle określona już w trakcie produkcji silnika. Decyzja o zwiększeniu liczby pasm stojana powoduje zatem potrzebę wymiany silnika na inny model i zmianę układu sterowania.

Zmiana algorytmu sterowania nie wymaga wymiany silnika. Zazwyczaj jest to wymiana oprogramowania w sterowniku oraz w pewnych okolicznościach również przeróbki układu sterowania.

Oprócz sterowania falowego (jednofazowego) wyróżnić można algorytmy: pełnokrokowe (dwufazowe), półkrokowe i mikrokrokowe.

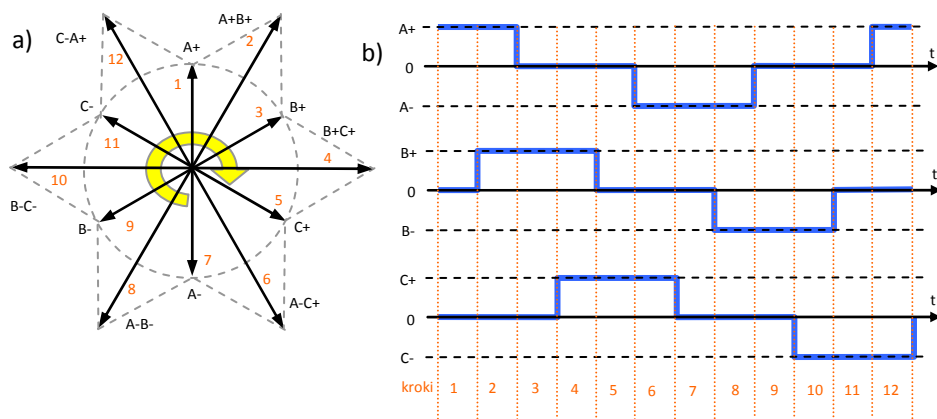
W sterowaniu pełnokrokowym prąd zawsze płynie przez dwa uzwojenia. W tym przypadku magnes rotora ustawia się na ukos w stosunku do nabiegunków stojana. Równoczesne zasilanie obu uzwojeń silnika powoduje wzrost momentu obrotowego a strumień oddziaływający na wirnik jest równy sumie wektorowej dwu strumieni.



Rys. 4. Sterowanie pełnokrokowe silnika trójfazowego. a) wykres wektorowy, b) przebiegi strumienia w pasmach

Źródło: Opracowanie własne.

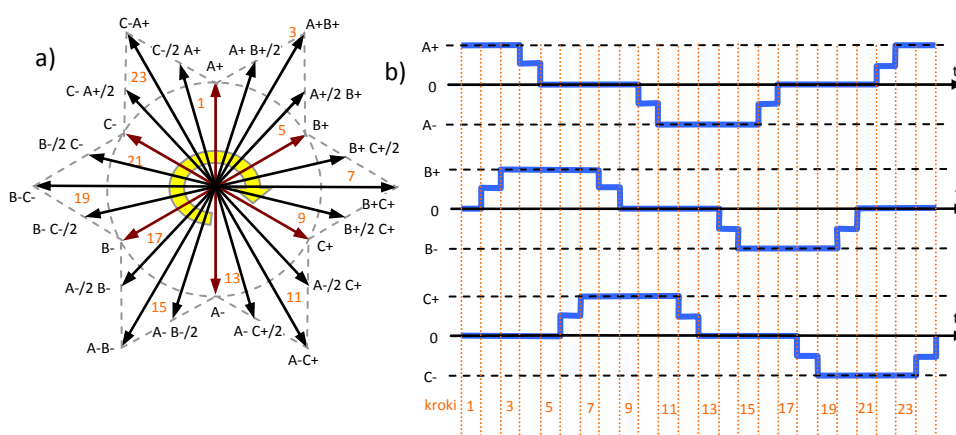
Trzeci rodzaj sterowania – praca półkrokowa łączy cechy obu poprzednich metod sterowania. Algorytm sterowania zawiera stany występujące w algorytmie falowym i pełnokrokowym na przemian. Z uwagi na fakt, że położenie kątowe wirnika w tych algorytmach jest przesunięte względem siebie o połowę elementarnego kroku, występuje tutaj dwa razy więcej kroków w jednym cyklu. Dla silnika dwupasmowego będzie to 8 kroków a dla trójfazowego będzie ich 12. Oznacza to, że przy tej samej częstotliwości zegara sterującego, silnik będzie obracał się dwa razy wolniej, lecz z podwójną dokładnością.



Rys. 5. Sterowanie półkrokowe silnika trójfazowego. a) wykres wektorowy, b) przebiegi strumienia w pasmach

Źródło: Opracowanie własne.

Praca ćwierćkrokowa umożliwia uzyskanie położeń pośrednich pomiędzy dwoma połozeniami półkrokowymi. Jest to możliwe w przypadku zasilania całego pasma i połowy drugiego, co jest możliwe przy wykorzystaniu silnika unipolarnego. Przykładowo w drugim kroku zasilane jest całe pasmo A w kierunku umownym (+) oraz połowa pasma B w kierunku umownym (+). Pełny cykl w silniku dwupasmowym składa się z 16 kroków a w trójfazowym z 24.



Rys. 6. Sterowanie ćwierćkrokowe silnika trójfazowego. a) wykres wektorowy, b) przebiegi strumienia w pasmach

Źródło: Opracowanie własne.

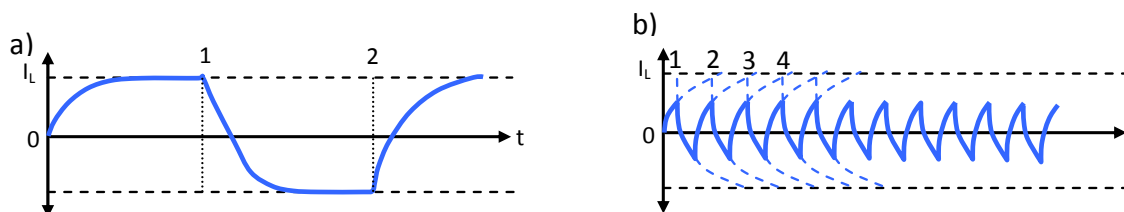
Wibracje i rezonans przy sterowaniu ćwierćkrokowym są znacznie mniejsze niż w poprzednich algorytmach.

Pracę mikrokrokową uzyskuje się przez dalszy podział poziomu prądu. 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 prądy 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 z wielokrotnością przez liczbę mikrokroków.

Uzyskanie takiej pracy jest możliwe przez dostarczenie do pasm silnika prądu o przebiegu pulsowym, tworzącym obwiednię zbliżoną do sinusoidy. Teoretycznie może być nieskończenie wiele mikrokroków, lecz z powodu występowania zjawiska histerezy, mogącego spo-

wodować opuszczanie kroków przy małych zmianach pola magnetycznego, w praktyce stosuje się skończoną liczbę mikrokroków.

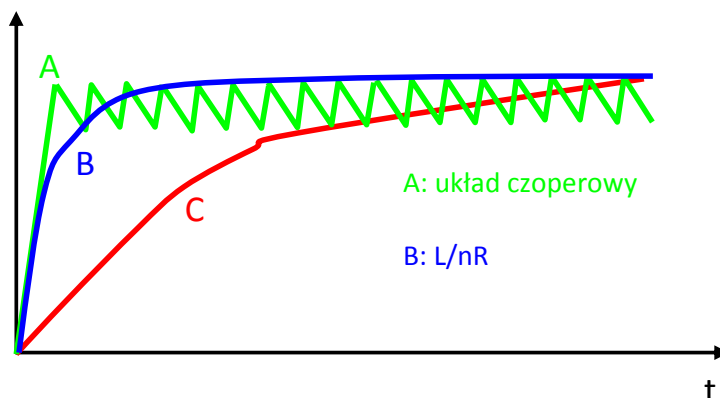
Na prędkość kątową silnika wpływają parametry elektryczne uzwojeń silnika. Uzwojenia silnika skokowego można interpretować jako szeregową rezystancję i indukcyjność. W zakresie niewielkich prędkości obrotowych wystarczające jest sterowanie napięciowe oznaczane przez L/R . Wartość prądu znamionowego jest osiągnięta w czasie krótszym niż następuje komutacja.



Rys. 7. Prąd w uzwojeniu przy: a) małych, b) dużych prędkościach obrotowych

Źródło: Opracowanie własne.

Indukcyjność uzwojeń powoduje narastanie prądu w określonym czasie. Wpływa to niekorzystnie na prąd silnika przy wyższych częstotliwościach zasilania (rys. 7b). Wartość chwilowa prądu w uzwojeniu nie zdąży osiągnąć wartości znamionowej w czasie jednego kroku. Powoduje to zmniejszenie momentu obrotowego. Rozwiązaniem tego problemu jest zmniejszenie stałej czasowej $\tau = L/R$. Podwyższa się napięcie zasilania i zwiększa się rezystancję wypadkową, podłączając szeregowo dodatkowy rezystor 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 .



Rys. 8. Przebiegi prądów w uzwojeniu dla różnych rodzajów sterowania

Źródło: Opracowanie własne.

Największe prędkości silnika osiąga się przy zastosowaniu układu czoperowego. Jest to metoda kluczowanego sterowania prądowego. Ponadto metoda ta umożliwiła nastawę prądu płynącego przez pasmo poprzez podanie odpowiedniej wartości napięcia V_{ref} . Zwiększenie prędkości silnika wymaga zmiany sterowania L/R na L/nR , bądź zastosowanie układu ze sprzężeniem zwrotnym – układ czoperowy.

PODSUMOWANIE

Omówione metody konfiguracji uzwojeń, algorytmów sterowania i sposobów zasilania pasm w silniku skokowym umożliwiają zmianę parametrów eksploatacyjnych w tym: zwiększenie prędkości wirowania, zwiększenie momentu roboczego na wale, oraz zwiększenie precyzji nastaw. Modernizacja układu sterowania wraz z silnikiem skokowym jest możliwa bez

potrzeby wymiany elementów składowych napędu, lub w pewnych obszarach działań wymagana jest wymiana układu sterowania i/lub silnika.

Dzięki poprawie własności użytkowych silnika skokowego zmniejsza się ryzyko powstania zjawiska hazardu polegającego na drganiach wirnika i gubieniu kroków.

Zwiększenie zapasu mocy mechanicznej silnika przyczyni się do wydłużenia pracy bezawaryjnej, będzie działaniem poprawiającym bezpieczeństwo, komfort, oraz ekonomiczność eksploatacji pojazdu.

BIBLIOGRAFIA

1. Cichoński D.: *Sterownik bipolarnych silników krokowych*, Praktyczny Elektronik 1997, nr 9.
2. Kosmol J.: *Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie*. WNT, Warszawa 1998.
3. Kamiński G., Kosk J., Przyborowski W.: *Laboratorium maszyn elektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
4. Kneba Z., Makowski S.: *Zasilanie i sterowanie silników*, WKiŁ, Warszawa 2004.
5. Gładysek J., Gładysek M.: *Poradnik diagnostyki samochodowej. Diagnoskop silnikowy Bosch z serii FSA 7XX*. Wyd. Bosch, Kraków 2008.
6. Zajkowski K.: *Stanowisko badawczo-dydaktyczne do wyznaczania parametrów eksploatacyjnych silników skokowych*, Słupskie XII Forum Motoryzacji, Innowacje w motoryzacji dla ochrony środowiska, t. 12, Słupsk 2009.
7. Duer S., Zajkowski K.: *Laboratorium elektrotechniki samochodowej*, t. 2, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2010.

IMPROVEMENT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF THE STEPPER MOTOR

Abstract

The evaluation of method for controlling stepper motors in motor vehicles has been presented. Described possible ways to control these motors and discusses the effects of the operational changes. Discussed the possibility of changes in ways of power and control windings of stepper motors in vehicles at the stage of modernization and development.

Autorzy:

dr inż. **Konrad Zajkowski** – Politechnika Koszalińska

dr inż. **Stanisław Duer** – Politechnika Koszalińska