

Silniki elektryczne w praktyce elektronika, część 2

Bezszczotkowe silniki DC są znane od bardzo dawna, jednak ich powszechne zastosowanie umożliwiły dopiero tanie scalone sterowniki impulsowe. Budowa silnika z wirującym magnesem jest "odwróceniem" budowy silnika komutatorowego z magnesem trwałym: uzwojenia znajdują się w stojanie a wirnik wykonany jest z odpowiednio ukształtowanego magnesu. W terminologii angielskiej używa się dla silników bezszczotkowych akronimu BLDC, od *Brushless DC Motor*.

Ze względu na liczbę uzwojeń, wyróżniamy silniki bezszczotkowe 2-fazowe i 3-fazowe, natomiast w zależności od sposobu zasilania uzwojeń - silniki unipolarne i bipolarne.

Właściwości i zastosowanie silników BLDC

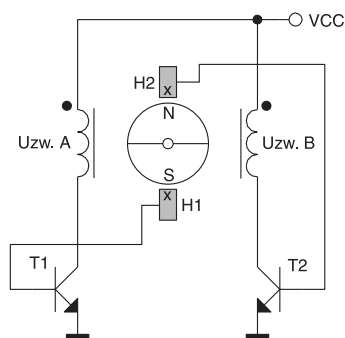
Parametry mechaniczne bezszczotkowych silników DC są porównywalne z silnikami komutatorowymi z magnesem trwałym - podobna moc i moment obrotowy przy zbliżonych wymiarach i masie. Istotnymi ich zaletami są:

- wysoka trwałość, ograniczona praktycznie wytrzymałością łożysk wirnika,
- możliwość bardzo precyzyjnej regulacji obrotów - dzięki zaawansowanym układom sterowników można sterować kątem obrotu wirnika podobnie jak w silnikach krokowych.

Cena silnika bezszczotkowego jest 2...3-krotnie wyższa od podobnego silnika komutatorowego, jednak kompensuje ją 20-krotnie większa trwałość. Możliwość precyzyjnego sterowania powoduje, że w wielu aplikacjach są one stosowane zamiast silników krokowych - od których są mniejsze, lżejsze i sprawują się lepiej przy dużych prędkościach obrotowych.

Obecnie silniki bezszczotkowe z wirującym magnesem są powszechnie stosowane w serwonapędach maszyn oraz w sprzęcie powszechnego użytku (magnetowidy, magnetofony, wideokamery, napędy CD/DVD). Wypierają też silniki krokowe w napędach dysków komputerowych.

Bardzo często elektroniczny sterownik jest wbudowany w silnik. W najprostszych silnikach na zewnątrz są wyprowadzone



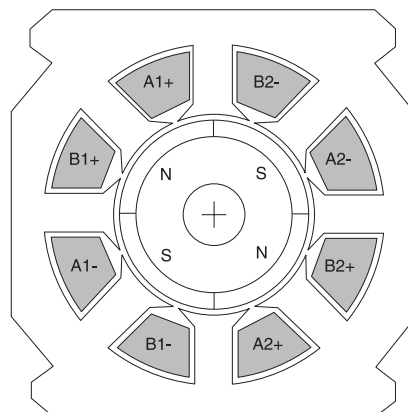
Rys. 7. Zasada działania i uproszczony schemat sterowania silnika 2-fazowego

Drugą część artykułu poświęcamy bezszczotkowemu silnikom DC z wirującym magnesem. Silniki tego rodzaju nie istniałyby bez elektronicznych układów sterujących, które także opisujemy w artykule.

tylko 2 zaciski zasilania, co uniemożliwia regulację kierunku i prędkości obrotowej (niektóre wbudowane sterowniki zmieniają kierunek obrotów silnika przy zmianie biegunowości zasilania). W bardziej rozbudowanych są wejścia sterujące (analogowe lub cyfrowe) do regulacji obrotów. Najwyższej klasy sterowniki mają także wejścia komunikacji szeregowej, umożliwiające konfigurowanie sterownika za pomocą mikroprocesora, komputera PC lub współpracy ze sterownikami PLC, czujnikami położenia i mają wbudowane algorytmy rozprędzania/hamowania i wiele innych „bajerów”. Sterowniki wyższej klasy zwykle nie są wbudowane, lecz stanowią moduł dołączony do silnika.

Zasada działania, silnik 2-fazowy BLDC

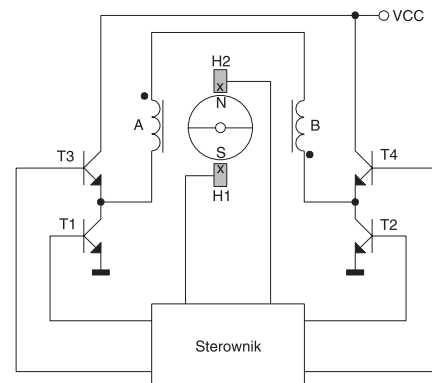
Zasadę działania silnika i uproszczony schemat sterowania silnika 2-fazowego przedstawiono na rys. 7. Elementy oznaczone jako H1 i H2 to czujniki Halla (scalone czujniki pola magnetycznego). Typowy czujnik Halla stosowany w silnikach jest elementem 3-końcówkowym („+“, „-“ i wyjście) w obudowie zbliżonej do obudowy tranzystorów małej mocy. Pod wpływem pola magnetycznego o określonej biegunowości, wyjście czujnika zmienia stan w momencie przekroczenia progowej wartości natężenia pola. Czujniki Halla produkuje wiele firm, m.in. Allegro (A3240, A3280, A3141), Texas (TLE4905, TLE4945), Everlight(HI300). Produkowane są także czujniki bipolarne, posiadające dwa wyjścia S i N (lub „+“ i „-“). Sygnał pojawia się na odpowiednim wyjściu w zależności od biegunowości pola magnetycznego.



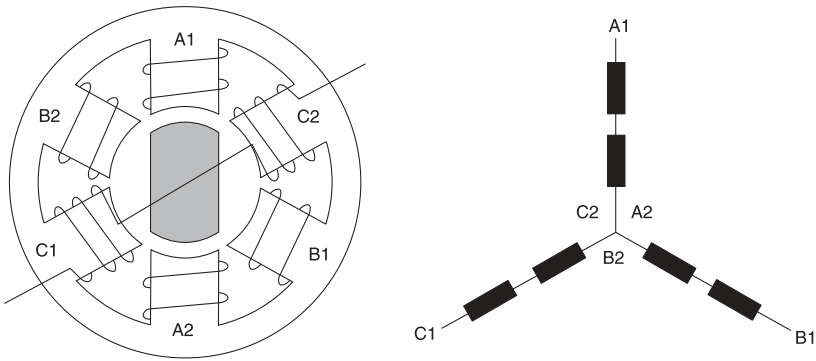
Rys. 8. Zmodyfikowane uzwojenie silnika dwufazowego

W układzie o schemacie z rys. 7 czujniki Halla powodują przepływ prądu przez uzwojenie A lub B w zależności od położenia kąтового wirnika. Pole magnetyczne cewek oddziałuje z polem magnesu, czego efektem jest obrót wirnika. Analizując działanie układu łatwo zauważyć, że moment obrotowy jest maksymalny w momencie poziomego ustawienia osi magnetycznej wirnika (jak na rysunku), natomiast po obrocie wirnika o 90° moment obrotowy wynosi zero. Konsekwencją tego faktu jest niemożliwość uruchomienia silnika przy niektórych położeniach wirnika. Można sobie z tym poradzić poprzez podział uzwojeń na pasma ułożone naprzemiennie lub zwiększając liczbę biegunów magnetycznych wirnika. Przykład silnika o takiej budowie pokazano na rys. 8. Każde uzwojenie jest podzielone na 4 pasma, a wirnik ma 4 bieguny. Symbole „+“ i „-“ oznaczają kierunki uzwojeń, sekcje A1+, A2+, A1-, A2- są połączone szeregowo (analogicznie dla uzwojenia B). W tak skonstruowanym silniku zmiany momentu obrotowego w funkcji kąta obrotu są mniejsze, ale nadal dokuczliwe.

Nieco zmodyfikowany układ z rys. 7 jest powszechnie stosowany w miniaturowych wentylatorach, używanych m.in. do chłodzenia urządzeń elektronicznych. Ze względu na brak generatora ustalającego prędkość obrotową, można zmieniać obroty takich wentylatorów poprzez zmianę napięcia zasilania (w zakresie 50...120 % prędkości znamionowej). Niestety przy takim sterowaniu moment obrotowy maleje przy zmniejszaniu obrotów. Powyżej pewnego napięcia granicznego wentylator może przestać pracować z powodu zadziałania układów zabezpieczających przed przeciążeniem.



Rys. 9. 2-fazowe sterowanie bipolarne



Rys. 10. Połączenie uzwojeń silnika 3-fazowego w gwiazdę

Sterowanie bipolarne

W układzie unipolarnym z rys. 7 wykorzystanie uzwojeń nie jest najlepsze - prąd płynie na przemian przez uzwojenie A lub B. Znacznie lepszy, lecz bardziej rozbudowany jest układ 2-fazowego sterowania bipolarnego, pokazany na rys. 9. Zastosowanie 4-tranzystorowego układu mostkowego typu X umożliwia zmianę kierunku prądu przepływającego przez uzwojenia i zasilanie obu uzwojeń jednocześnie, dzięki temu siła działająca na wirnik jest 2-krotnie większa. Na schemacie z rys. 9 cewki są połączone szeregowo. W praktycznych układach sterowników czasami stosuje się dwa oddzielne mostki dla cewek A i B. Sterowanie bipolarne 2-fazowe powoduje wzrost momentu obrotowego, lecz nadal nie rozwiązuje problemu zależności momentu od kąta obrotu wirnika. Znacznie lepsze pod tym względem są silniki DC 3-fazowe.

3-fazowy silnik BLDC

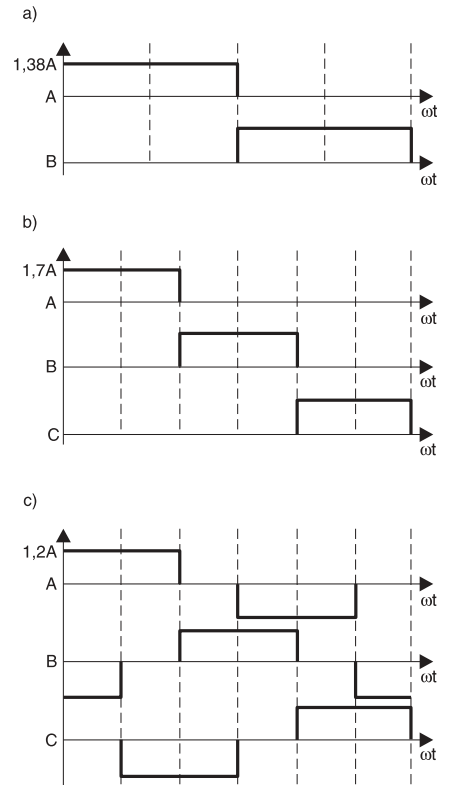
Silnik 3-fazowy ma trzy uzwojenia: A, B i C. Mogą być one sterowane niezależnie w układzie unipolarnym, ale najczęściej spotykany jest układ połączenia w gwiazdę (rys. 10). Każde z trzech uzwojeń jest podzielone na 2 pasma, co tworzy 6-biegunowy stojan. Wirnik pokazany na rysunku ma 2 bieguny, ale w praktycznych rozwiązaniach stosuje się wirniki czterolub sześciobiegunowe. Bipolarne sterowanie uzwojeń może być zrealizowane według schematu pokazanego na rys. 11. W silniku 2-fazowym do sterowania wymagane były dwa przebiegi prostokątne, przesunięte w fazie o 180°, silnik 3-fazowy wymaga trzech przebiegów z przesunięciem fazowym 120°. Na rys. 12 przedstawiono wykresy czasowe wartości prądu płynącego

w uzwojeniach dla silnika 2-fazowego, oraz 3-fazowego unipolarnego.

Zasadę działania silnika wyjaśniono na rys. 13, na którym przedstawiono poszczególne fazy obrotu wirnika w przypadku sterowania uzwojeń według rys. 12c. Zmiany momentu obrotowego w funkcji kąta obrotu są w silniku trójfazowym niewielkie. Można je jeszcze bardziej zredukować stosując impulsy prądowe o kształcie trapezowym. W celu uzyskania stałego momentu obrotowego należy zapewnić sinusoidalny przebieg prądu w uzwojeniach, ale wtedy nie można już mówić o silniku prądu stałego (w napędach przemysłowych często stosuje się 3-fazowe silniki prądu zmiennego z wirującym magnesem).

Silniki BLDC z wirnikiem wewnętrznym i zewnętrznym

Zarówno silniki bezszczotkowe 2-fazowe jak i 3-fazowe mogą mieć różną budowę wirnika. Silnik z wirnikiem wewnętrznym ma budowę „klasyczną”, czyli wirnik w kształcie walca znajduje się wewnątrz stojana z uzwojeniami. W silniku z wirnikiem zewnętrznym, magnetyczny wirnik ma kształt kubka i obraca się wokół nieruchomego stojana. Silnik z wirnikiem zewnętrznym ma większy moment obrotowy, ale i większą bezwładność, co ogranicza jego zastosowanie, gdy wymagane jest bardzo szybkie rozpędzanie i hamowanie silnika. Duża bezwładność wirnika może być także zaletą - ułatwia precyzyjną stabilizację prędkości obrotowej w przypadku wahań obciążenia (np. przesuw taśmy w magnetowidzie). Poza tym, wirnik zewnętrzny jest mniej podatny na drgania przy dużych prędkościach obrotowych - maksymalne obroty (bez stosowania dodatkowej stabilizacji wirnika) wyno-



Rys. 12. Wykresy czasowe prądu płynącego w uzwojeniach dla silnika 2-fazowego unipolarnego (a), oraz 3-fazowego unipolarnego (b) i 3-fazowego bipolarnego (c)

są ok. 15000 obr./min. dla wirnika wewnętrznego i ponad 30000 obr./min. dla zewnętrznego.

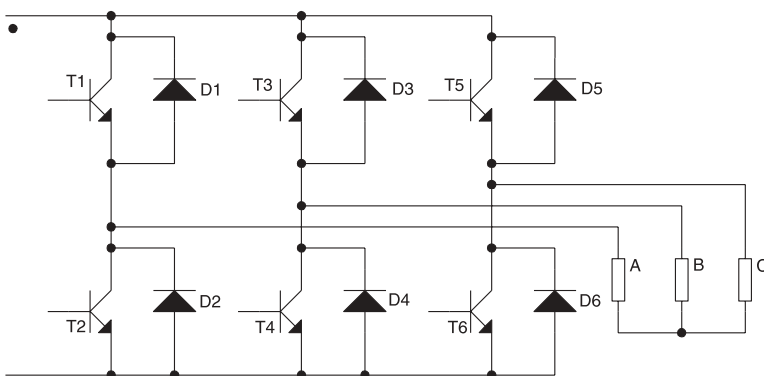
Silniki BLDC i krokowe - porównanie

Czytelnicy znający silniki krokowe zapewne zauważą podobieństwa między silnikami BLDC i krokowymi. Rzeczywiście, można przyjąć, że silniki BLDC są podgrupą silników krokowych o kroku 180° lub 120°. Także niektóre scalone sterowniki mogą być stosowane do obu typów silników. Jednak różnice konstrukcyjne i aplikacyjne spowodowały wydzielenie silników BLDC jako oddzielnej grupy.

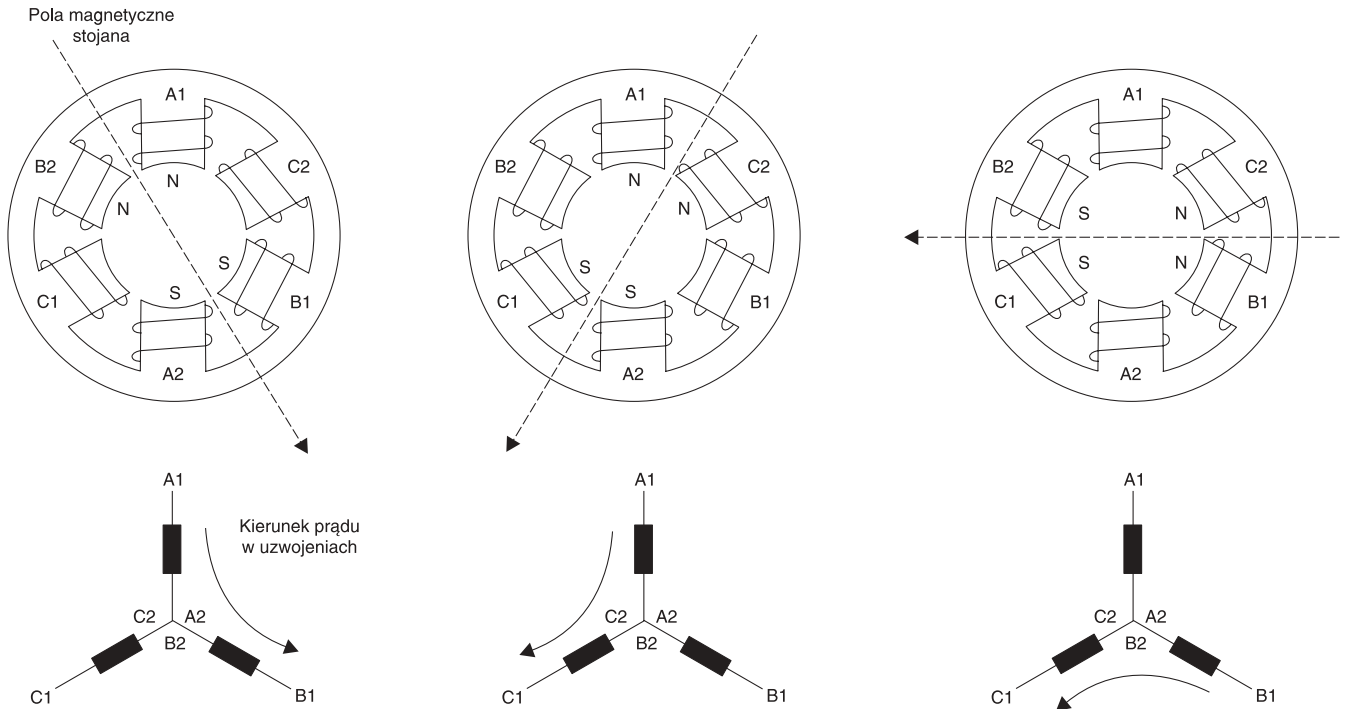
Mimo to można natknąć się na różne pułapki: w ofertach producentów określenie *brushless motor* (silnik bezszczotkowy) bywa używane zarówno dla silników BLDC, silników indukcyjnych AC, czasami także dla silników krokowych. Dopiero uważne przestudiowanie danych katalogowych uświadamia z jakim silnikiem mamy do czynienia. Kryterium rozróżniania silników krokowych od BLDC może być następujące: dla poprawnej pracy silnika BLDC sterownik musi mieć sygnał zwrotny o aktualnym położeniu kątowym wirnika (np. z czujników Halla), a w silnikach krokowych nie jest to konieczne.

Silniki liniowe VCM

Definicja: „silniki liniowe przetwarzają, za pośrednictwem pola magnetycznego, energię elektryczną na energię mechaniczną w ruchu postępowym“. Oczywiście, nie



Rys. 11. Bipolarny sterownik silnika 3-fazowego



Rys. 13. Zasada działania silnika 3-fazowego

musi to być ruch w linii prostej jak sugeruje nazwa, ale na przykład po łuku. Wiele konstrukcji jest po prostu rozwinięciem na płaszczyźnie „normalnego” silnika. Odpowiednikiem stojana jest szyna z uzwojeniami rozmieszczonymi w określonych odstępach, po której porusza się „wirnik” zawierający magnesy trwałe lub uzwojenie.

Na dokładniejsze omówienie zasługuje odmiana silnika liniowego o angielskiej nazwie *Voice Coil Motor* (VCM), przede wszystkim ze względu na powszechne stosowanie takich silników do przesuwu głowic w napędach dysków komputerowych. Nazwa silnika pochodzi od zasady jego działania - identycznie jak w zwykłym głośniku, cewka porusza się w szczeliny magnesu. Trudno powiedzieć czy należy takie urządzenie nazwać silnikiem czy siłownikiem, bo zakres jego ruchu nie przekracza kilku centymetrów (spotyka się określenie *Voice Coil Actuator* - VCA). Zgodnie z regułą Lorentza: jeżeli przez cewkę znajdującą się w polu magnetycznym przepływa prąd, to na cewkę działa siła

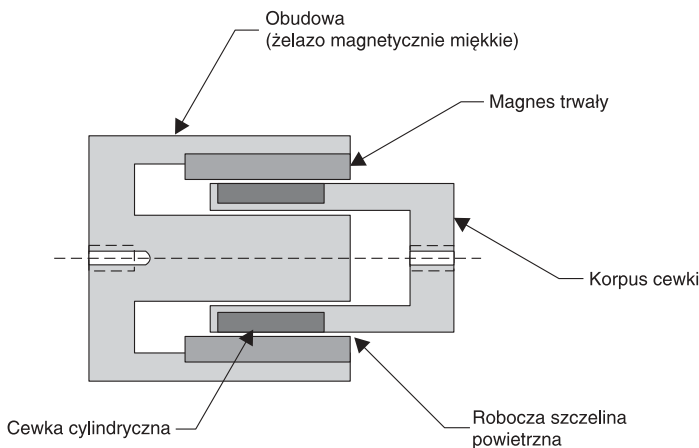
proporcjonalna do natężenia prądu, a napięcie samoindukcji jest proporcjonalne do szybkości poruszania się cewki. Poprzez zmianę natężenia i kierunku przepływu prądu można bardzo precyzyjnie sterować położeniem cewki. Praktyczne realizacje silników VCM przedstawiono na rys. 14 (cyldryczny) i rys. 15 (płaski). Podstawowe części składowe silnika VCM:

- dwa magnesy trwałe umieszczone tak, aby były skierowane tym samym biegunem w stronę cewki,
- cewka poruszająca się w szczeliny między magnesami,
- obudowa z miękkiego żelaza zamykająca obwód magnetyczny.

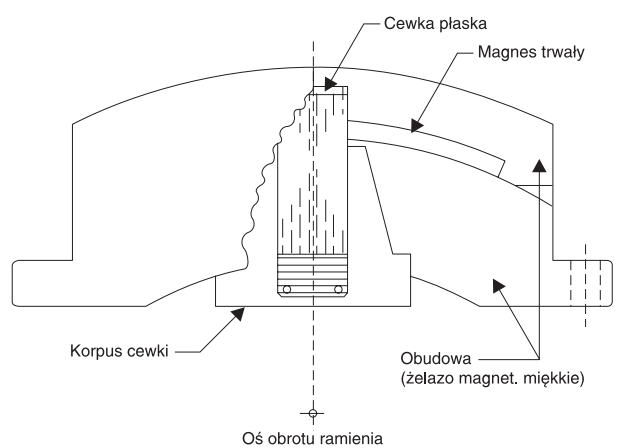
W napędach głowic dysków komputerowych jest stosowany płaski silnik VCM, w którym ruch ramienia odbywa się po łuku. Sterowanie takim silnikiem nie jest łatwe. Przykładowo: chcemy przesunąć głowicę dysku z położenia A do położenia B. Ruch cewki silnika będzie odbywał się w trzech fazach: przyspieszanie, ruch ze stałą prędkością, hamowanie. Jest to tzw. trapezoidalny tryb pra-

cy (wykres prędkości w funkcji czasu ma kształt trapezu). Jeżeli pominiemy fazę środkową, otrzymamy trójkątny tryb pracy - składający się z przyspieszania i hamowania. Układ sterujący musi zdecydować, jaki tryb pracy będzie najlepszy, ustalić maksymalną prędkość oraz moment rozpoczęcia hamowania (należy zauważyć, że w przypadku dysku komputerowego mamy do czynienia z mikrometrami i mikrosekundami).

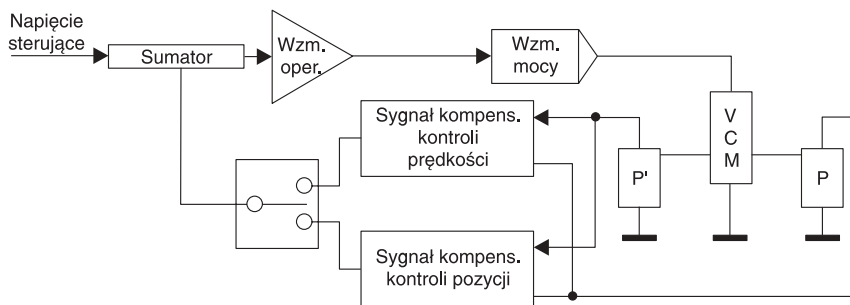
Na rys. 16 przedstawiono schemat blokowy pętli sterowania silnikiem VCM. Symbol P oznacza czujnik prędkości a P' - czujnik pozycji. Do pomiaru prędkości można wykorzystać np. napięcie samoindukcji cewki, a do pomiaru pozycji - sygnał z głowicy magnetycznych. Na rysunku pętlę regulacji przedstawiono jako analogową. W rzeczywistości do sterowania silników VCM wykorzystuje się specjalizowane cyfrowo-analogowe układy scalone współpracujące z kontrolerem dysku. Regulacja prądu cewki zwykle jest realizowana w trybie modulacji wypełnienia sygnału sterującego (PWM).



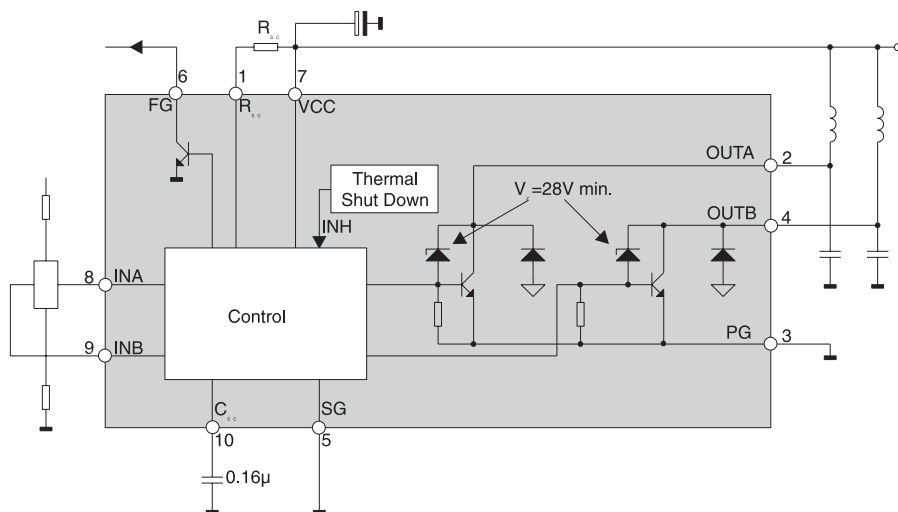
Rys. 14. Uproszczona budowa cylindrycznego silnika VCM



Rys. 15. Uproszczona budowa płaskiego silnika VCM



Rys. 16. Schemat blokowy pętli sterowania silnikiem VCM



Rys. 17. Schemat blokowy układu TA8420AF

Początkowo do napędu głowic w dyskach stosowano silniki krokowe, natomiast obecnie - ze względu na swoje zalety - przeważają silniki VCM. Charakteryzują się one małymi wymiarami, niewielką bezwładnością, dużą szybkością pracy, precyzyjnym pozycjonowaniem, brakiem błędów pozycjonowania wynikających z konieczności przełożenia ruchu obrotowego na liniowy. Inne, typowe zastosowanie silników VCM, to sterowanie położeniem lusterek w projektorach laserowych (oraz dziesiątki innych zastosowań w precyzyjnych urządzeniach mechanicznych i optycznych).

Właściwie nie są to samodzielne sterowniki, a jedynie układy mocy do sterowania uzwojeń. W jednym układzie scalonym może być jeden lub dwa mostki X oraz obwody przesuwania poziomym, umożliwiające kluczowanie tranzystorów mostka poziomami logicznymi TTL/CMOS. Układy są zwykle wyposażone w ogranicznik prądu i zabezpieczenie termiczne. Diody bocznikujące tranzystory mostka mogą być zintegrowane w strukturze lub dołączane zewnętrznie. Scalone mostki X są układami uniwersalnymi, można je stosować do sterowania silników BLDC, VCM, krokowych,

Przydatne linki (dotyczące silników BLDC i VCM)

- Polskie:**
- www.silniki.pl - dystrybutor silników i sterowników (DC, BLDC)
- Zagraniczne:**
- www.allegromicro.com - firma Allegro Microsystems - producent scalonych sterowników silników, ciekawe poradniki i noty aplikacyjne,
 - <http://us.st.com/stonline/books> - karty katalogowe i noty aplikacyjne sterowników firmy ST Microelectronics,
 - www.micromo.com, www.densitron.com/em, www.beikimco.com - producenci silników BLDC i VCM,
 - www.compumotor.com - strona firmy Parker Motion & Control która opracowała doskonały poradnik Motor Technologies.

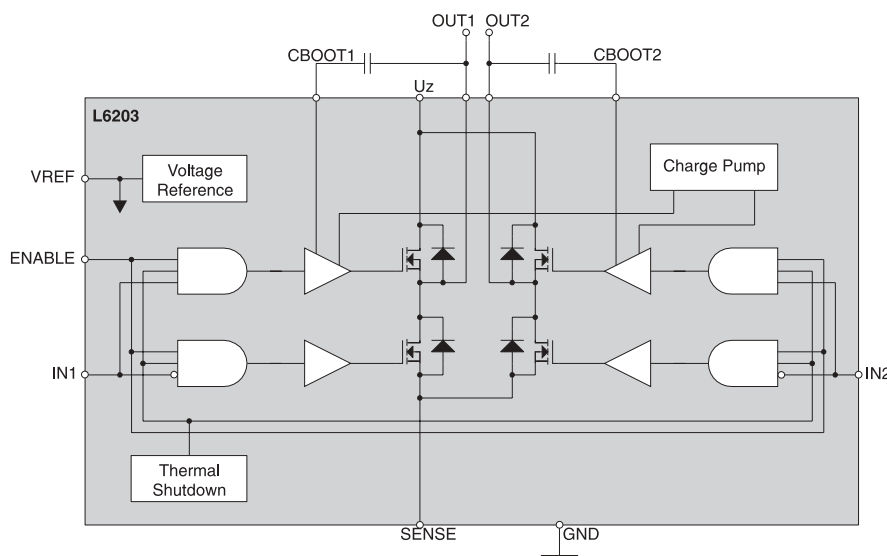
komutatorowych oraz innych urządzeń wykonawczych.

- c) Sterowniki wyposażone w prosty układ logiczny, umożliwiające sterowanie prędkością i kierunkiem obrotów silnika przy użyciu 2...4 wejść cyfrowych. Dla prądów wyjściowych do 1,5 A są zwykle wyposażone w elementy wyjściowe mocy. Sterowniki bez stopnia mocy wymagają dołączenia odpowiedniego układu z grupy b). Niektóre sterowniki mogą pracować z różnymi typami silników (BLDC, PMDC lub krokowymi), inne są przeznaczone do pracy z określonymi silnikami BLDC 3-fazowymi. Dzięki wbudowanej logice, układy z tej grupy realizują niektóre funkcje sprzętowo, obciążając główny procesor.
- d) Inteligentne sterowniki silników. Są to specjalizowane mikrokontrolery cyfrowo-analogowe, umożliwiające realizację skomplikowanych funkcji: programowane procedury rozpędzania i hamowania, precyzyjna stabilizacja obrotów, kontrola położenia wirnika itp. Takie sterowniki są stosowane m.in. w napędach dyskowych z silnikami 3-fazowymi BLDC i silnikami VCM. Sterownik jest wyposażony w wewnętrzne rejestry konfiguracyjne, łączy szeregowo do komunikacji z kontrolerem dysku, wejścia sygnałów

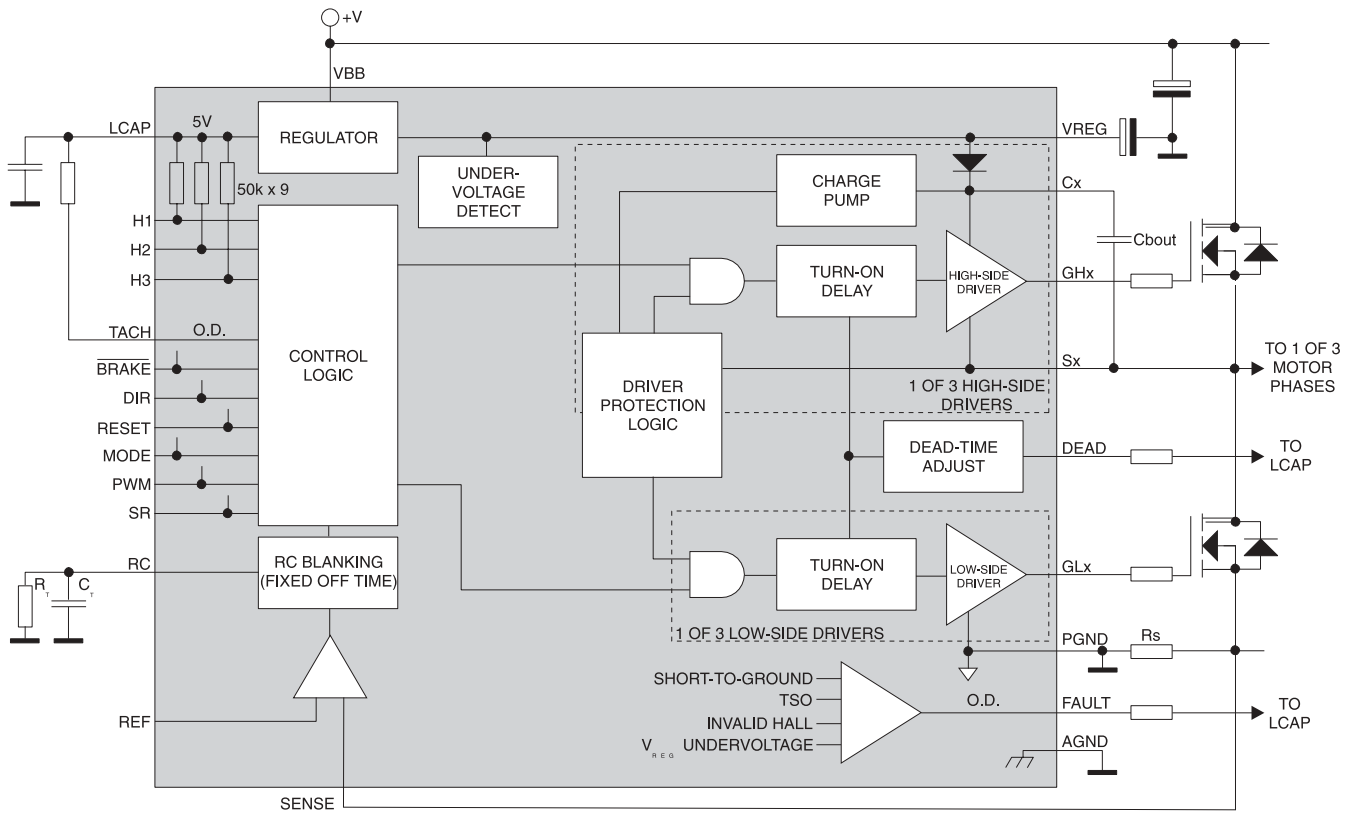
Scalone sterowniki silników BLDC i VCM

Na świecie produkuje się ponad 100 typów scalonych sterowników silników BLDC i VCM. Niniejszy artykuł może tylko dostarczyć pewnych informacji podstawowych, ułatwiających korzystanie z danych katalogowych producentów. Układy sterowników można podzielić na kilka grup. Wszystkie, bardzo różniące się między sobą układy, są przez producentów klasyfikowane do wspólnej grupy *motor drivers*:

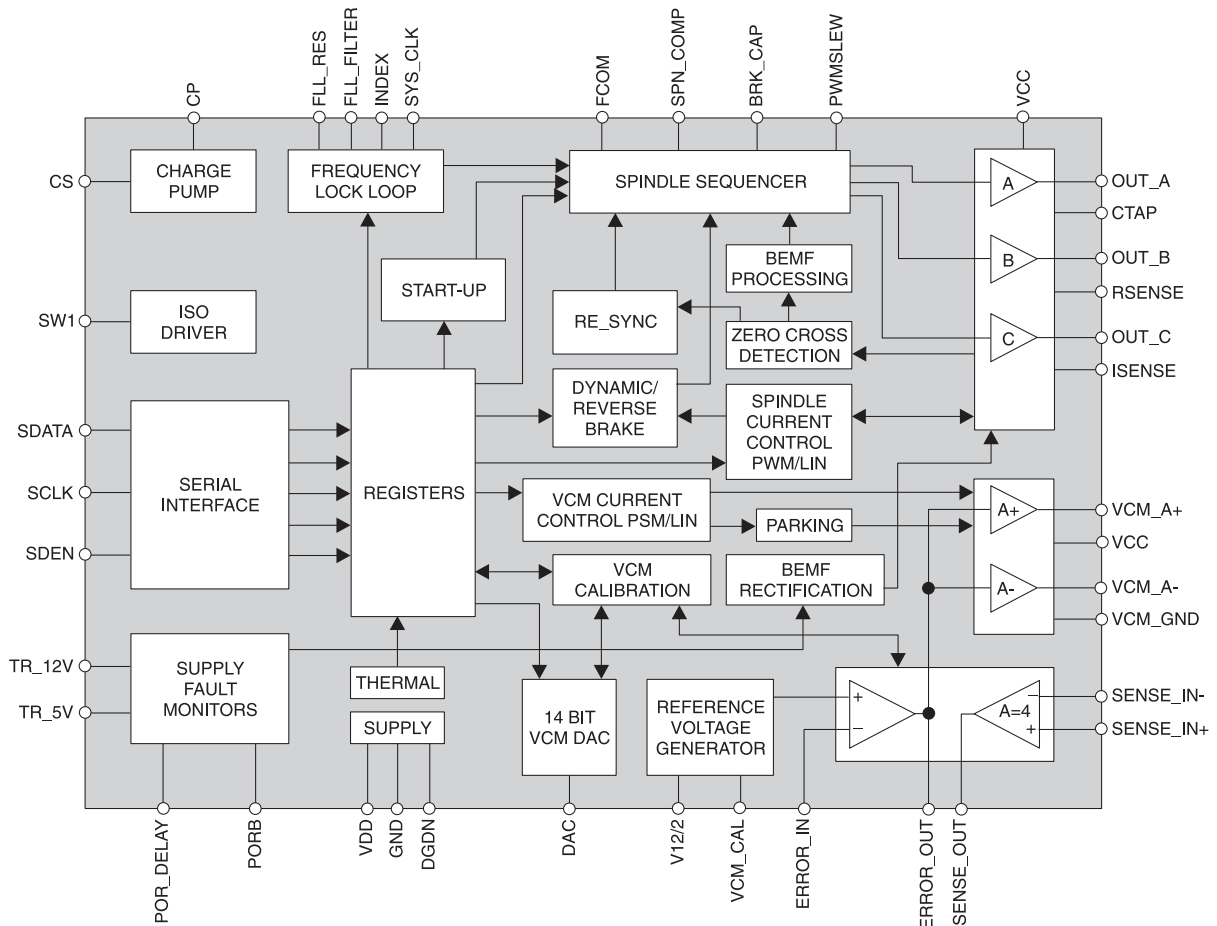
- a) Proste sterowniki unipolarne (zwykle silników 2-fazowych). Są to układy przewidziane do wbudowania w silnik, np. wentylatora, wymagają dołączenia tylko kilku elementów zewnętrznych RC. Nie są przystosowane do współpracy z mikroprocesorem, ale mają zwykle wyjście typu *open collector*, na którym pojawiają się impulsy synchronicznie z obrotem silnika (1 lub 2 impulsy/obrót).
- b) Scalone mostki 4-tranzystorowe typu X.



Rys. 18. Schemat blokowy układów L6201/02/03



Rys. 19. Schemat blokowy układu A3932



Rys. 20. Schemat blokowy układu L6268

z czujników prędkości i położenia, przetworniki A/C i C/A. Zwykle sterownik tego rodzaju nie zawiera elementów wykonawczych mocy.

Poniżej przedstawiono krótki opis wybranego układu z każdej grupy:

- a) Układ TA8420AF jest produkowany przez firmę Toshiba (rys. 17). Jest to sterownik 2-fazowego silnika wentylatora w 10-wyprowadzeniowej obudowie SMD, przystosowany do współpracy z bipolarnym czujnikiem Halla dołączonym do wejść INA i INB. Dopuszczalny prąd wyjściowy wynosi 1 A, a napięcie zasilania powinno się mieścić w zakresie 4...15 V. Układ wyposażono w zabezpieczenie termiczne, ogranicznik prądu wyjściowego (wartość prądu zależy od wartości rezystancji rezystora R_{sc}) oraz obwód ponownego startu w przypadku zablokowania wirnika (stała czasowa obwodu zależy od pojemności C_{sc}). Na wyjściu FG otrzymujemy impulsy o częstotliwości proporcjonalnej do obrotów wirnika. Kompletny sterownik składa się z układu TA8420, czujnika Halla i kilku elementów RC, czyli bez problemu może być wbudowany w silnik wentylatora.
- b) Układy L6201/02/03 są produkowane przez STMicroelectronics (rys. 18). Mostek typu X ma prąd wyjściowy od 1 A (L6201 w obudowie SMD SO20) do 4 A (L6203 w obudowie Multiwatt 11). Układ wykonano w technologii Multipower-BCD, pozwalającej na zintegrowanie

w jednej strukturze tranzystorów mocy DMOS oraz układów cyfrowych CMOS i bipolarnych. Dzięki temu sygnały wejściowe są kompatybilne z TTL i CMOS, a z wyjść można bezpośrednio sterować uzwojenia silnika dużej mocy - maksymalne napięcie zasilania wynosi 48 V. Wbudowane pompa ładunkowa i układy przesuwania poziomu napięcia służą do wytworzenia napięć polaryzujących bramki „górnych” tranzystorów MOS. Między wyjście SENSE a masę można podłączyć rezystor umożliwiający kontrolę prądu uzwojeń.

- c) Układ A3932 jest produkowany przez firmę Allegro Microsystems (rys. 19). Jest to sterownik trójfazowego silnika BLDC z wyjściami przystosowanymi do sterowania trzech układów półmostkowych, z wewnętrżnie dołączonymi tranzystorami mocy n-MOS (na rysunku przedstawiono tylko jeden z trzech identycznych obwodów wyjściowych). Układ może być zasilany napięciem do 50 V. Prąd wyjściowy zależy od zastosowanych tranzystorów. Sterownik A3932 jest wyposażony w: wewnętrzny generator PWM, układy zabezpieczające przed jednoczesnym załączeniem „górnego” i „dolnego” tranzystora, rozbudowany układ diagnostyczny z sygnalizującym błąd wyjściem FAULT, trzy wejścia do czujników Halla (H1, H2, H3), zabezpieczenia termiczne i prądowe, stabilizatory zasilania 13 V i 5 V (do czujników Halla). Wejścia

MODE, SR, PWM i RC służą do sterowania trybem pracy i prędkością obrotową silnika, wejście DIR steruje kierunkiem obrotów, a BRAKE - hamowaniem silnika. Układ A3932 jest produkowany w 32-wyprowadzeniowej obudowie SMD.

- d) Układ L6268 jest produkowany przez firmę STMicroelectronics (rys. 20). Jest to kompletny sterownik napędów dysku komputerowego z zasilaniem 12 V, umożliwiający sterowanie trójfazowym silnikiem BLDC napędu głównego (5400 obr./min.) oraz silnikiem VCM napędu głowic. Obwody wyjściowe mocy mają wydajność prądową do 2 A dla silnika BLDC (wyjścia OUT A, B, C) i do 1,5 A dla silnika VCM (wyjścia A+, A-). Konfigurowanie sterownika odbywa się poprzez wpisywanie odpowiednich wartości do bloku wewnętrznych rejestrów. Komunikację z mikroprocesorem - kontrolerem dysku zapewnia szybki port szeregowy. Wejścia cyfrowe są kompatybilne z poziomami logicznymi CMOS 3,3 V. Układ zawiera pętle stabilizacji obrotów silnika BLDC oraz precyzyjnego pozycjonowania silnika VCM z 14-bitowym przetwornikiem DAC. Rozbudowany układ logiczny może realizować złożone procedury - np. różne sekwencje rozpędzania i hamowania, kontrola poprawności pracy silników, diagnostyka błędów. Układ jest produkowany w obudowie SMD typu TQFP44.

Jacek Przepiórkowski