

Silniki elektryczne w praktyce elektronika, część 1

Jak działa silnik elektryczny

„Na przewodnik z prądem w polu magnetycznym działa siła F równa...“ - tyle mniej więcej każdy pamięta ze szkoły. Żeby zrobić z tego silnik elektryczny, potrzebny jest nieruchomy stojan i osadzony na łożyskach wirnik. Każdy z tych elementów musi spełniać przynajmniej jeden warunek:

- musi umożliwić przepływ prądu,
- musi wytwarzać własne pole magnetyczne.

Żeby chciało się to jeszcze kręcić, potrzebna jest cykliczna zmiana kierunku przepływu prądu lub zmiana orientacji i natężenia (wirowanie) pola magnetycznego. Takie minimum teorii wystarczy do zrozumienia działania większości silników elektrycznych.

Podział silników elektrycznych

Istnieje ponad sto rodzajów silników, różniących się zasadą pracy, budową i właściwościami. Niektóre rodzaje występują tylko w podręcznikach i próżno ich szukać w sklepach. Poniższy podział obejmuje najważniejsze typy silników, produkowane masowo:

Silniki prądu stałego

- komutatorowe, w rodzinie których są produkowane:
 - silniki z magnesem trwałym;
 - silniki szeregowo;
 - silniki bocznikowe;
 - silniki szeregowo-bocznikowe;
- z wirującym magnesem, w rodzinie których są produkowane:
 - dwubiegunowe z czujnikami Halla,
 - wielobiegunowe z czujnikami Halla lub enkoderem,
- krokowe, w rodzinie których są produkowane:
 - unipolarne,
 - bipolarne,
- liniowe.

Silniki prądu zmiennego

- komutatorowe (uniwersalne),
- asynchroniczne 1-fazowe, w rodzinie których są produkowane:
 - kondensatorowe;
 - ze zwartą fazą rozruchową;
 - z odłączanym uzwojeniem rozruchowym;
- asynchroniczne 3-fazowe,
- synchroniczne.

Wybrane parametry silników elektrycznych

Podstawowe parametry silnika są zwykle podane na jego tabliczce znamionowej, pozostałe - np. moment rozruchowy, prąd rozruchowy, można znaleźć tylko w katalogach lub oszacować według właściwości poszczególnych rodzajów silników.

Moc znamionowa. Zazwyczaj jest podawana moc elektryczna w watach,

Na co dzień nie zdajemy sobie sprawy, jak olbrzymia liczba różnych silników elektrycznych nas otacza. Wielu elektroników budując sterowniki mikroprocesorowe, chciałoby skorzystać z tego bogactwa, ale nie zawsze wiadomo, jak to zrobić.

Dlatego postanowiłem przybliżyć Czytelnikom temat właściwości i sposobów sterowania typowych silników elektrycznych - może w sposób nienaukowy, przystępnie i bez stosowania wyższej matematyki.

ozn. moc pobierana przez silnik podczas pracy z normalną prędkością obrotową. Moc mechaniczna, tzw. moc na wale, jest mniejsza i zależy od sprawności silnika (typowo 40...80%).

Napięcie zasilania. Znamionowa wartość napięcia zasilającego (stałego lub zmiennego), przy której określane są inne parametry. Większość silników może być zasilana napięciem niższym (minimalnie od 5% U_z dla silników komutatorowych i od 70% U_z dla indukcyjnych). Nie należy stosować napięć dużo wyższych od znamionowego (maksimum +15%).

Moment obrotowy. W uproszczeniu jest to siła, z jaką silnik potrafi kręcić obciążeniem. Podawany jest w Nm (niuton * metr), typowe wartości dla małych silników: od 0,01 do 50 Nm.

Moment rozruchowy. Jest to bardzo ważny parametr, informujący o tym, czy silnik jest w stanie wystartować pod obciążeniem. Może być podany w Nm lub w procentach momentu obrotowego. W zależności od rodzaju silnika moment rozruchowy może być mały (do 150%), średni (150...250%) lub duży (powyżej 250%). Moment rozruchowy może być parametrem decydującym o przydatności silnika do określonych zastosowań. Najmniejsze wymagania stawia napęd wentylatorów - obciążenie startowe jest zerowe i rośnie z kwadratem prędkości obrotowej, można zastosować nawet silnik z momentem rozruchowym niższym od 100%. Najtrudniejsze warunki rozruchu występują w napędach sprężarek, dźwignów oraz pojazdów.

Obroty znamionowe. Zawsze są podawane obroty w normalnych warunkach pracy, tzn. przy znamionowym obciążeniu i napięciu zasilania. Obroty silników mogą zawierać się w granicach 100...100000 obr./min., ale najczęściej spotykane wartości to 1000...4000 obr./min.

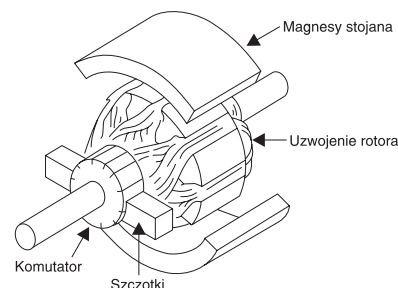
Prąd znamionowy i prąd rozruchowy. Prąd znamionowy jest to pobór prądu w normalnych warunkach pracy. Prąd rozruchowy występuje tylko pod-

czas rozpędzania silnika i jest 2...8-krotnie większy od prądu znamionowego (największe prądy rozruchowe mają silniki indukcyjne). Warto o tym pamiętać, projektując układ sterowania i zasilania silnika.

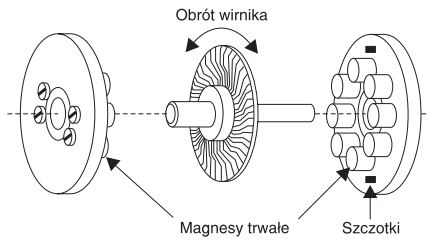
Silniki komutatorowe prądu stałego z magnesem trwałym (PMDC)

Konstrukcja silnika komutatorowego jest znana od 100 lat i mimo swoich wad silniki te nadal są powszechnie stosowane, głównie ze względu na łatwość regulacji obrotów i momentu obrotowego.

Konstrukcję silnika komutatorowego z magnesem trwałym przedstawiono na rys. 1. Uzwojenia wirnika umieszczone są w szczelinach żelaznego rdzenia i podłączone do komutatora. Komutator składa się z wielu płytek miedzianych umieszczonych na bocznej powierzchni walca, po którym ślizgają się węglowe szczotki zasilane prądem. Zadaniem komutatora jest przełączanie kierunku przepływu prądu w uzwojeniach, tak aby oddziaływanie z polem magnetycznym stojana sprawiło wirnik w ruch obrotowy. Obroty silnika komutatorowego zależą liniowo od napięcia zasilania, a moment obrotowy od natężenia prądu. Zmianę kierunku obrotów uzyskuje się poprzez zmianę bieguno-



Rys. 1. Budowa silnika komutatorowego z magnesem trwałym



Rys. 2. Budowa silnika z wirnikiem bez żelaza

wości zasilania. Obroty można łatwo regulować w szerokich granicach (od 5% do 110% obrotów znamionowych) z zachowaniem dużego momentu obrotowego. Istnieje też odmiana silnika komutatorowego - tzw. silnik z wirnikiem bez żelaza (rys. 2). W takim silniku wirnik nie posiada rdzenia żelaznego i jest wykonany podobnie do płytki drukowanej - uzwojenia są wykonane w postaci taśm miedzianych przyklejonych do krążka z laminatu. Ze względu na bardzo małą masę wirnika taki silnik ma małą bezwładność - może więc startować bardzo szybko i osiągać duże prędkości obrotowe. Szczotki są dociskane do obrzeża wirnika, rolę komutatora pełnią pola stykowe na jego obwodzie. Silniki tego typu używane są do napędu wirówek i do bardzo szybkich serwo-mechanizmów.

Dodatkową zaletą silników z magnesem trwałym jest łatwość hamowania. Wykorzystuje się tutaj odwracalność pracy takiego silnika: obracanie wirnikiem bez zasilania powoduje, że silnik staje się prądnicą. Wystarczy w chwili odłączenia zasilania zewrzeć zaciski silnika, aby powstał duży moment hamujący (zaawansowane sterowniki takich silników potrafią odzyskiwać energię hamowania silnika i zwracać ją do źródła zasilania).

Niestety silniki komutatorowe mają też wady. Najważniejsza z nich to zużywanie się szczotek i komutatora, co wymaga okresowej konserwacji silnika (trwałość komutatora jest szacowana na 2...3 tysiące godzin pracy). Poza tym iskrzenie na komutatorze wytwarza spore zakłócenia elektromagnetyczne, do tego dochodzi hałaśliwa praca i wysokie koszty produkcji.

Niskonapięciowe silniki komutatorowe z magnesem trwałym są powszechnie używane w zabawkach, starszych modelach magnetofonów, niektórych serwomechanizmach. Do niedawna były to najczęściej stosowane silniki w zakresie mocy do 20 W, obecnie są wypierane przez nowocześniejsze silniki bezszczotkowe z wirującym magnesem.

Silniki komutatorowe szeregowe i bocznikowe

Zamiast magnesu trwałego można do wytworzenia pola magnetycznego stojana użyć elektromagnesu, otrzymu-

jemy wtedy silnik z dwoma uzwojeniami: stojana i wirnika. W zależności od układu połączeń otrzymamy silnik szeregowy, bocznikowy lub szeregowo-bocznikowy (rys. 3). Silnik szeregowy ma bardzo duży moment obrotowy i rozruchowy, ale „miękką“ charakterystykę obciążenia, tzn. obroty bardzo silnie zależą od obciążenia silnika. Bez obciążenia silnik szeregowy może rozpedzać się bez ograniczeń, aż do jego zniszczenia - tzw. „rozbieganie się“ silnika. Wady tej jest pozbawiony silnik bocznikowy - jego obroty są stałe i prawie niezależne od obciążenia. Niestety silniki bocznikowe (poza bardzo małymi) wymagają skomplikowanych układów płynnego rozruchu ograniczających prąd rozruchowy, a moment rozruchowy jest dużo mniejszy niż w silnikach szeregowych. Silnik szeregowo-bocznikowy ma charakterystykę zbliżoną do szeregowego, dodatkowe uzwojenie bocznikowe ogranicza maksymalne obroty przy pracy bez obciążenia.

Regulacja obrotów jest możliwa poprzez zmianę napięcia zasilania. Kierunek obrotów jest stały bez względu na biegunowość zasilania, zmiana kierunku wymaga zamiany miejscami końcówek jednego z uzwojeń: wirnika lub stojana.

Szeregowe silniki prądu stałego na 12 V i 24 V są powszechnie stosowane w samochodach (dmuchawa - 120 W, wycieraczki - 50 W, rozrusznik - 1200 W) oraz w wiertarkach akumulatorowych. Silniki większej mocy spotyka się w napędach maszyn oraz - bardzo duże - w pojazdach szynowych. Silniki bocznikowe i szeregowo-bocznikowe używane są głównie w przemyśle - m.in. do napędu dźwigów.

Sterowniki silników komutatorowych

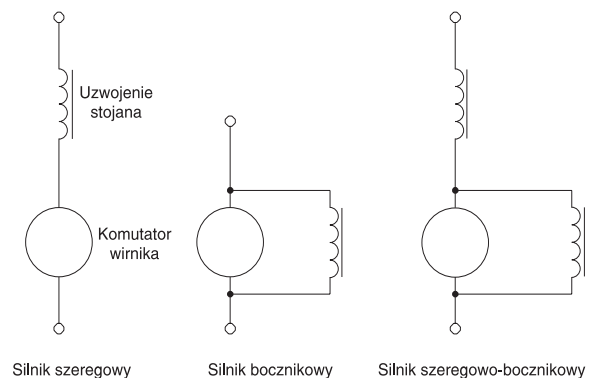
Opisane poniżej układy mogą być stosowane do wszystkich rodzajów silników komutatorowych, jednak zmiana kierunku obrotów i hamowanie jest możliwe tylko w przypadku silników z magnesem trwałym.

Najprostszym sposobem regulacji obrotów jest zastosowanie potencjometru o odpowiednio dużej mocy, trochę lepszym - regulowany stabilizator napięcia. Niestety podstawową wadą obu układów jest zamiana dużej traczonej mocy w ciepło. Dlatego też powszechnie stosowane jest zasilanie silnika falą prostokątną o zmiennym współczynniku wypełnienia PWM. Całkowanie impulsów sterujących, dzięki czemu ruch wirnika jest płynny, odbywa się w sposób naturalny - poprzez bezwładność wirnika. Częstotliwość impulsów zawiera się w przedziale od 100 Hz do kilku kHz. Zbyt

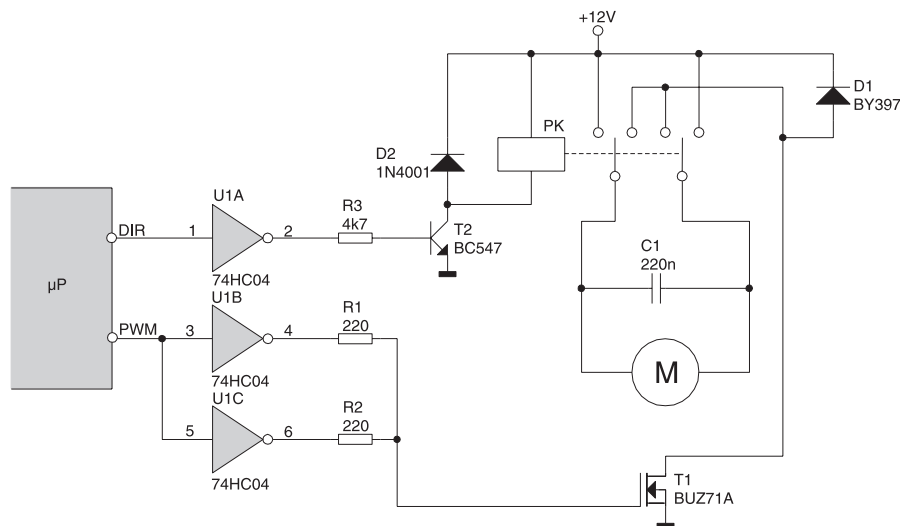
niska częstotliwość może powodować skokowe zmiany momentu obrotowego a zbyt wysoka - straty indukcyjne w silniku. Należy tak dobrać częstotliwość, aby na każdy obrót silnika przypadało przynajmniej kilka impulsów.

Taki sposób sterowania jest bardzo wygodny w przypadku mikroprocesorów - generator PWM może być łatwo zrealizowany programowo (niektóre procesory mają też sprzętowy generator PWM). Przykładowy układ sterowania obrotami silnika 12 V/20 W przedstawiono na rys. 4. W układzie dodatkowo wprowadzono możliwość zmiany kierunku obrotów za pomocą przełącznika sterowanego wyjściem DIR. Jeżeli nie ma takiej potrzeby to silnik podłącza się bezpośrednio między dren tranzystora mocy i „plus“ zasilania. Przy doborze elementów należy zwrócić uwagę na kilka istotnych szczegółów:

- Dioda D1 jest nie tylko elementem tłumiącym przepięcia, ale umożliwia także zachowanie ciągłości przepływu prądu w indukcyjności silnika. Nie powinna to być zwykła dioda prostownicza 1N4001, lecz dioda szybka na prąd 1...3 A (np. BY299, BY397, BYT03, BYW72).
- Tranzystor kluczujący może być typu MOS lub bipolarny, powinien mieć dopuszczalny prąd drenu (kolektora) przynajmniej 3-krotnie większy od prądu znamionowego silnika. Jeżeli stosujemy tranzystor bipolarny (np. Darlington TIP122), to $R1=R2=1,8\text{ k}\Omega$.
- Zastosowanie dwóch połączonych równolegle inwerterów 74HC04 ułatwia szybkie przeładowywanie pojemności bramki T1. W tym celu można zamiennie użyć np. bufora mocy 74HC240 i $R1=100\Omega$ (dla częstotliwości kluczowania powyżej 1 kHz lepiej jest użyć tranzystora bipolarnego).
- Warto zastosować w układzie ogranicznik prądu obciążenia (lub bezpiecznik) dla uniknięcia uszkodzeń w przypadku przeciążenia silnika.
- W programie sterującym trzeba uwzględnić konieczność zatrzymania



Rys. 3. W zależności od układu połączeń uzwojeń silniki mogą być szeregowe, bocznikowe lub szeregowo-bocznikowe



Rys. 4. Układ sterowania obrotami silnika 12 V/20 W

silnika przed przełączeniem kierunku obrotów, w przeciwnym razie przez silnik popłynie bardzo duży prąd w momencie zmiany kierunku.

- Iskrzenie komutatora może zakłócać pracę mikrokontrolera. Silnik może być fabrycznie wyposażony w szeregowy dławik przeciwzakłóceńowy, jeżeli ich brak, to należy zastosować dwa dławiki 22...100 µH przystosowane do odpowiednio dużego prądu (miniaturowe dławiki w obudowach „rezystorowych“ się nie nadają).

Na rys. 5 przedstawiono uproszczony schemat sterownika w układzie mostkowym X, umożliwiający sterowanie prędkością obrotową, kierunkiem obrotów oraz hamowanie silnika komutatorowego z magnesem trwałym. Jeżeli

przewodzą tranzystory T2 i T3, to prąd płynie od „plusa“ zasilania przez T3, silnik, T2 i R_s do masy. W momencie zatkania tranzystorów prąd samoindukcji przepływa przez D2 i D3. Sterowanie T2 i T3 impulsami z generatora PWM pozwala na regulację obrotów silnika. W przypadku wysterowania tranzystorów T1 i T4 prąd płynie przez silnik w przeciwnym kierunku, czyli mamy zmianę kierunku obrotów. Jednoczesne przewodzenie tranzystorów T1 i T2 to zwarcie zacisków silnika - hamowanie. Napięcie z rezystora R_s jest podawane na wejście komparatora - ogranicznika prądu. Nazwa mostek X lub mostek H pochodzi od graficznego przedstawienia przepływu prądu, przypominającego literę X lub H.

Na rys. 6 przedstawiono schemat aplikacyjny scalonego sterownika A3953 firmy Allegro Microsystems, działającego według opisanych powyżej zasad. Na wejście /ENABLE są podawane impulsy z generatora PWM, a stan logiczny na wejściu PHASE decyduje o kierunku obrotów. Na wejście /BRAKE należy podać '1' (stan '0' na wejściu /BRAKE powoduje hamowanie silnika), wejście MODE powinno mieć stan '0'. Do wejścia REF dołącza się napięcie stałe z zakresu 0...0,65 V w celu ustalenia wartości ograniczania prądu silnika (maksymalny prąd wyjściowy układu 3953 wynosi 1,3 A). Układ może być zasilany dwoma różnymi napięciami: V_{BB} (tranzystory wyjściowe) i V_{CC} (część cyfrowa), dzięki temu możliwe jest bezpośrednie sterowanie wejść A3953 z wyjść mikroprocesora.

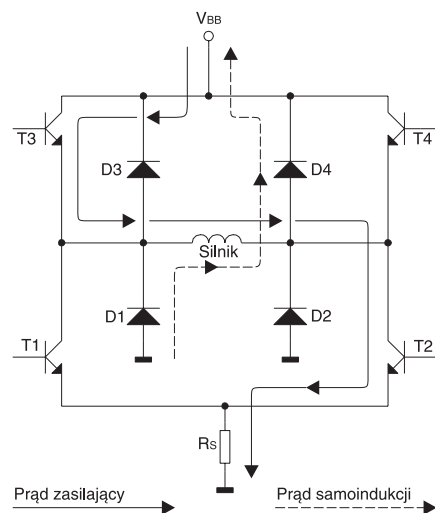
Silniki komutatorowe uniwersalne

Silniki uniwersalne występują w klasyfikacji jako silniki prądu zmiennego, jednak nie do końca jest to prawda. Jak wspomniano wcześniej, silnik komutatorowy szeregowy obraca się

Słowniczek wybranych angielskich terminów i skrótów

- Armature, winding - uzwojenie
- BLDC (Brushless DC motor) - bezszczotkowy silnik DC z wirującym magnesem
- Brush motor - silnik komutatorowy
- Cage motor - silnik indukcyjny AC z wirnikiem klatkowym
- Capstan motor - potoczna nazwa silnika głównego w magnetowidach, magnetofonach
- Clamp diode - dioda zamykająca obwód dla prądu samoindukcji
- PMDC (Permanent Magnet DC motor) - silnik komutatorowy z magnesem trwałym
- REPM (Rare Earth Permanent Magnet) - magnes trwały wykonany z pierwiastków ziem rzadkich (np. neodym)
- Spindle motor - 1) potoczna nazwa silnika głównego w napędach dyskowych i CD, 2) silnik z elementem napędzanym zamocowanym bezpośrednio na osi wirnika
- Rotor - wirnik
- Stator - stojan
- Torque - moment obrotowy
- Torque ripple - wahania momentu obrotowego zależne od kąta obrotu wirnika
- Voice Coil motor (actuator) - rodzaj silnika (silownika) liniowego z ruchomą cewką
- X-Bridge (H-Bridge) - mostek 4-tranzystorowy do bipolarnego sterowania uzwojeń silników

w tym samym kierunku niezależnie od biegunowości zasilania - czyli powinien prawidłowo pracować także przy zasilaniu prądem zmiennym. W praktyce często rdzeń wirnika i stojana jest wykonany z jednego kawałka metalu i straty wywołane prądami wirowymi byłyby bardzo duże. Dlatego też w silnikach uniwersalnych rdzenie wykonane są w formie pakietów z cienkich blaszek (jak w transformatorach sieciowych). Taki silnik może być zasilany prądem zmiennym lub stałym i dlatego nazywany jest silnikiem uniwersalnym. Tego typu silniki są powszechnie używane



Rys. 5. Uproszczony schemat sterownika w układzie mostkowym X

Przydatne linki internetowe

Polskie:

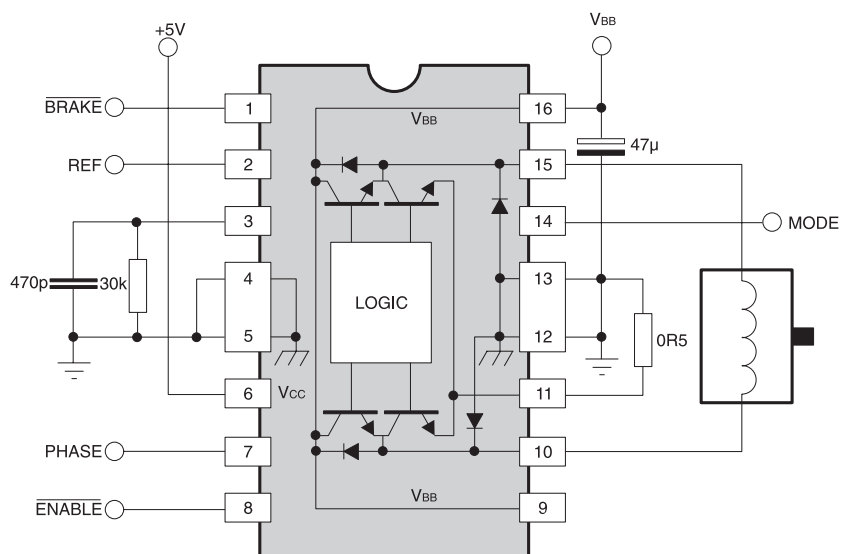
- <http://www.silniki.pl> - dystrybutor silników i sterowników, doskonale opracowane informacje praktyczne i teoretyczne,
- <http://www.robot.opole.pl> - dużo teorii na temat silników komutatorowych i liniowych,
- <http://www.mikroma.com>, <http://www.elcar.com.pl>, <http://www.wamel.com.pl> - polscy producenci silników,

Zagraniczne:

- <http://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,
- <http://www.maxonmotor.com> - strona renomowanego szwajcarskiego producenta silników DC,
- <http://www.compumotor.com> - strona firmy Parker Motion & Control, która opracowała doskonały poradnik "Motor Technologies" (dostępny także na stronie Allegro Microsystems).

w sprzęcie gospodarstwa domowego (roboty kuchenne, miksery, młynki, odkurzacze) oraz w elektronarzędziach. W przypadku używania silników uniwersalnych z odzysku, należy pamiętać o możliwości rozbiegania się silnika szeregowego przy braku obciążenia. Szczególnie dotyczy to silników z odkurzaczy: mają one prędkość znamionową ok. 12 000 obr./min. w warunkach obciążenia turbiną, a bez obciążenia potrafią osiągnąć kilkadziesiąt tysięcy obrotów. Przestrzegam przed próbami wykorzystania silnika z odkurzacza do budowy szlifierki - przy np. 30 000 obr./min. rozpadająca się tarcza szlifierska powoduje efekt zbliżony do wybuchu granatu!

Elektroniczne układy regulacji obrotów silników uniwersalnych zwykle budowane są w oparciu o triaki ze sterowaniem fazowym. Schematy takich układów można bez problemu znaleźć w literaturze (np. z układem U2008 lub U2010B firmy Temic). Można też zasilić silnik uniwersalny prądem stałym o napięciu 230 V, ale zbudowanie odpowiedniego zasilacza nie jest rzeczą prostą - wyprostowanie i odfiltrowanie napięcia sieci da na wyjściu ok. 320 VDC.



Rys. 6. Schemat aplikacyjny scalonego sterownika silników - A3953

Gdyby jednak to się udało, to uzyskamy odrobinę większą sprawność silnika (brak strat na przemagnesowanie rdzenia) i możemy regulować obroty opisaną wcześniej metodą PWM. Do celów przemysłowych uży-

wa się czasem silników uniwersalnych, przewidzianych do pracy przy napięciu 320 VDC (wyprostowane napięcie sieci) lub 550 VDC (wyprostowane napięcie trójfazowe).

Jacek Przepiórkowski