

Układy z rodziny DRV8x

Łatwe sterowanie silnikiem szczotkowym lub krokowym

Mostki H są przeznaczone przede wszystkim do sterowania silnikami prądu stałego lub bipolarnymi silnikami krokowymi. Ze względu na charakter obciążenia indukcyjnego wnoszonego przez silniki, mostki te są narażone na przepięcia i przetężenia. Konstruktor musi wziąć pod uwagę występujące hazardy i zapobiec uszkodzeniom komponentów. Uwzględnienie trudnych warunków eksploatacji powoduje, że kontroler silnika zajmuje sporo miejsca, jest nieporęczny i narażony na inne rodzaje uszkodzeń. W artykule opisano aplikacje mostków H, typowe problemy występujące podczas eksploatacji oraz sposób prawidłowego sterowania silnikami stałoprądowymi i krokowymi – bipolarnymi przy jednoczesnym zapewnieniu niezawodności oraz umiarkowanego kosztu rozwiązania.

Silnik krokowy jest stosowany przede wszystkim w aplikacjach wymagających dokładnej kontroli położenia rotora i jego prędkości obrotowej przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego. Ma on również wrodzoną zdolność do utrzymywania żądanej pozycji, jeśli porównać go do serwomechanizmów napędzanych przez szczotkowy silnik DC lub 3-fazowy silnik bezszczotkowy. Jednocześnie nie zaleca się stosowania silników krokowych do zwykłych, nieskomplikowanych napędów.

Mimo zalet, silniki krokowe „cierpią” na szereg dolegliwości. Głównym problemem są drgania. Natura silnika krokowego jest taka, że gdy występuje żądane kroku i rotor przesuwa się do danej pozycji, to pojawiają się oscylacje. Jest to powodowane przez fakt, że jeśli silnik pracuje z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego, to jego uzwojenia muszą być zasilane prądem o wyższym natężeniu od wymaganego, co upewnia, że silnik poruży się niezależnie od obciążenia rotora. Gdyby do uzwojeń silnika był dostarczany prąd o właściwym natężeniu, to każdy krok może być wykonywany bez żadnych oscylacji.

Zmiana natężenia prądu płynącego przez uzwojenia silnika wywołuje zmianę momentu obrotowego, która może powodować utratę kroków lub wibracje. Zbyt niskie natężenie prądu uzwojeń nie pozwala na uzyskanie nominalnej prędkości obrotowej i dokładności pozycjonowania. Dlatego powszechnie uzwojenia zasilają się prądem o natężeniu wyższym od wyma-

ganego, co umożliwia poprawną pracę krokową przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, bez znajomości obciążenia silnika.

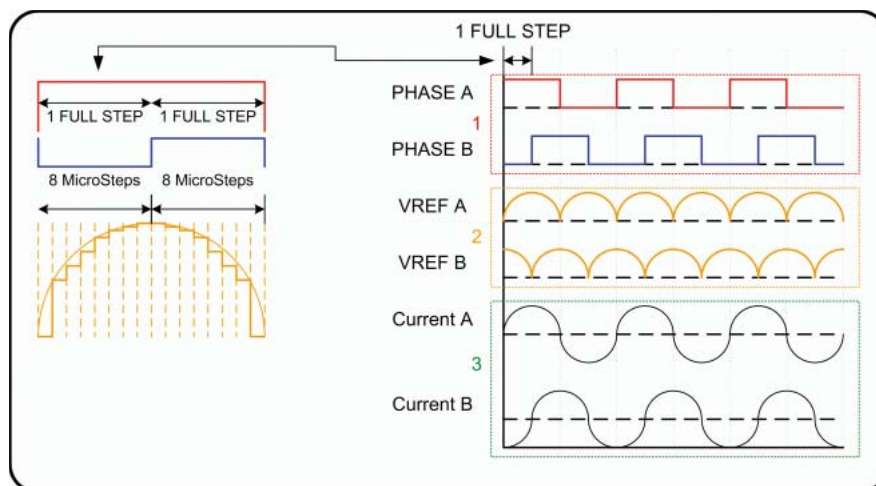
Pojawia się pytanie: skoro nie da się uniknąć przepływu nadmiernego prądu (w odniesieniu do faktycznych potrzeb), to w jaki sposób można usunąć niepożądane wibracje? Gdy przeanalizujemy przyczynę tego zjawiska, zauważymy, że problem leży w bezwładności mechanicznej rotora. Energia, którą dostarczone w celu wprawienia rotora w ruch, przy jego zatrzymaniu musi być rozproszona. Nie zagłębiając się w dokładną analizę zachodzących zjawisk powiedzmy, że efekt wibracji można zmniejszyć dzięki zmniejszeniu długości kroku.

Dodatkowe informacje:
 - www.ti.com/motor-ca
 - nota aplikacyjna MSP430F1612 nr SLVA416, Texas Instruments, Sierpień 2010

Silnik krokowy jest wytwarzany z pewną liczbą kroków przypadającą na obrót, która jest ściśle związana z jego konstrukcją mechaniczną. Jeśli silnik ma 200 kroków na obrót, to gdy wykonuje krok, jego rotor obraca się o 1/200 obrotu, a więc o 1,8°. Konstruktor chcąc zmniejszyć kąt obrotu ma do wyboru dwa rozwiązania: 1) zastosowanie silnika o większej liczbie kroków na obrót lub 2) modulowanie prądu zasilania. Po wybraniu konkretnego typu silnika, modulowanie prądu zasilającego jest jedyną dostępną alternatywą.

Mikrokroki

Modulowanie wartości prądu uzwojeń zmienia wielkość natężenia pola magnetycznego, które występuje wokół statora silnika i powoduje przemieszczanie się rotora. Jeśli siła wywołwana przez pole elektromagnetyczne, na skutek odpowiedniej modulacji prądu uzwojeń będzie częścią siły wymaganej do wykonania pełnego kroku, to rotor silnika przemieści się tylko o część pełnego kroku, o tzw. mikrokrok. Znając liczbę pozycji pośrednich się rotora dla posiadanego silnika. Jeśli sposób modulowania prądu umożliwi



Rysunek 1. Cały krok może być podzielony na wiele mikrokroków przez regulowanie prądu pomiędzy zerem a wartością maksymalną. Typowo stosuje się przy tym kształt sinusoidalny

Tabela 1. Różne stopnie mocy i ich prądy maksymalne vs moc rozpraszana. Wymienione układy są pojedynczymi mostkami H, więc do realizacji pełnego mostka H jest wymagane zastosowanie dwóch układów

Typ układu	Maksymalna wartość RDS(ON) [Ω]	Prąd maksymalny [A]	Prąd RMS [A]	Moc tracona [W]	$R_{\theta JA}$ [°C/W]	Wzrost temperatury [°C]
DRV8824	1.8	1.6	1.13137085	4.608	28	129.024
DRV8825	0.64	2.5	1.767766953	4.00	28	112
DRV8828*	0.9	3.0	2.121320344	4.05	28	113.4
DRV8829*	0.32	5.0	3.535533906	4.00	28	112
DRV8412	0.16	6.0	4.242640687	5.76	25	144
DRV8432	0.16	12.0	8.485281374	23.04	6	138.24

uzyskanie ośmiu pośrednich wartości natężenia pola elektromagnetycznego, to silnik w zakresie pojedynczego skoku może wykonać osiem mikrokroków. Innymi słowy, podzieliłiśmy $1,8^\circ$ (patrz wyżej) przez 8 – każdy mikrokrok ma teraz $0,225^\circ$. Na **rysunku 1** pokazano sposób, w który pełen krok jest dzielony na 8 mikrokroków przez generowanie wielu poziomów prądu pomiędzy wartością zero a maksymalną, z naśladowaniem typowego kształtu sinusoidalnego.

Chociaż zwiększona dokładność pozycjonowania jest jedną z zalet zastosowania mikrokroku, to ostatecznym celem jest ograniczenie wibracji występujących przy pełnym kroku. Dzięki temu aspektowi stosowania mikrokroku konstruktor zyskuje najwięcej. Im więcej mikrokroków wykonuje silnik, tym bardziej „gładko” przemieszcza się jego rotor. Zastosowanie tej techniki sterowania silnikiem ma największą wartość przy stosunkowo niewielkich prędkościach obrotowych.

W jaki sposób łatwo zaimplementować technikę mikrokroku we własnej aplikacji? Można użyć procesora sygnałowego DSP lub dowolnego mikrokontrolera, zaprogramować przetworniki cyfrowo – analogowe (DAC) w celu wygenerowania pary przebiegów sinusoidalny/kosinusoidalny, utworzyć kilka procedur obsługi przerwania, aby kontrolować poprawność czasów generowanych sygnałów i zastosować ten firmware do sterowania pracą mostka H zasilającego uzwojenia silnika krokowego. Niestety, w praktyce może to być o wiele trudniejsze niż się wydaje. Tu na ratunek mogą przyjść specjalizowane kontrolery silników krokowych, których zastosowanie niewątpliwie zaoszczędzi czas i pieniądze.

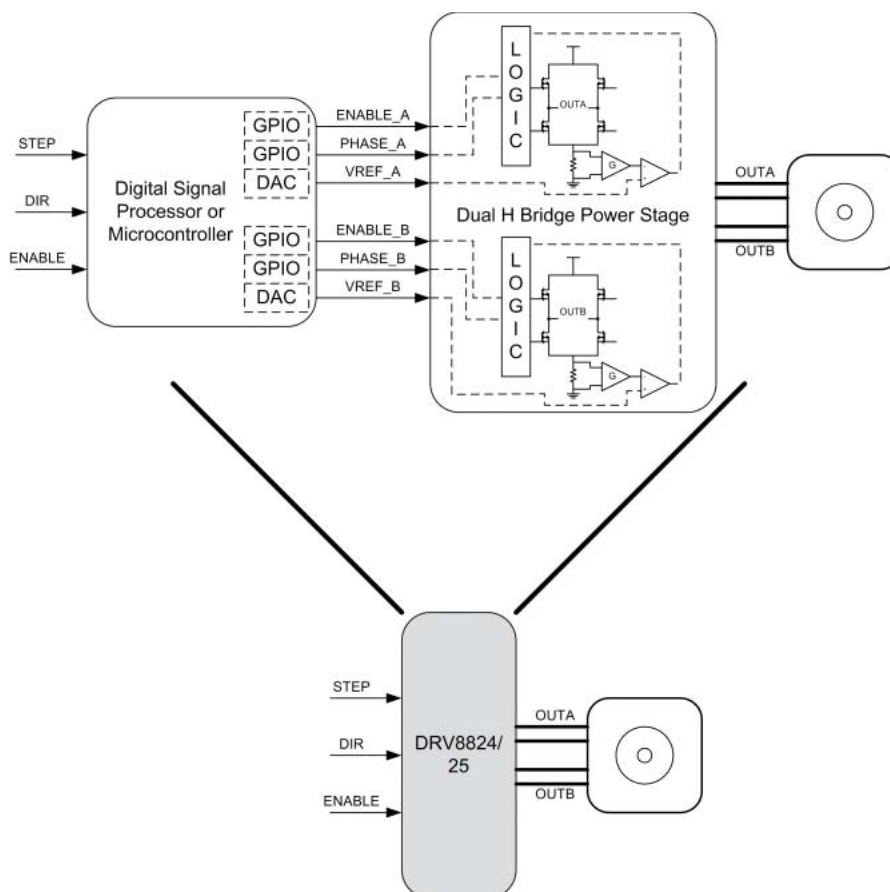
Na ratunek kontrolery silników krokowych

W ofercie Texas Instruments są dostępne kontrolery silników krokowych typu DRV8824 i DRV8825. Wspierają one tworzenie aplikacji umożliwiających uzyskanie 32 kroków bez konieczności pisania oprogramowania. Wewnętrzny indekserski będący częścią logiki układu

generuje wszystkie sygnały niezbędne do poprawnego sterowania silnikiem w obu kierunkach obrotu. Łatwy do wytworzenia sygnał fali prostokątnej doprowadzony do wejścia STEP powoduje wykonywanie kolejnych kroków w kierunku określonym przez poziom logiczny na wejściu DIR. Na **rysunku 2** pokazano sposób, w który skomplikowane rozwiązanie może być ograniczone do pojedynczego układu scalonego. Oba układy scalone są kompatybilne pod względem wyprowadzeń i zasilają silnik krokowy prądem o programowanym natężeniu maksymalnym. Wejście analogowe VREF i zewnętrzny rezystor SENSE są używane do programowania żadanego prądu szczytowego, zgodnie

z następującym wyrażeniem: $ITRIP = VREF / (5 \times SENSE)$. Układ DRV8824 ma możliwość zasilania silnika prądem do 1,6 A na fazę, natomiast DRV8825 do 2,5 A na fazę. Warunkiem jest zapewnienie układom driverów właściwych warunków chłodzenia.

Ale co, jeśli dokładność pozycjonowania wymaga zastosowania więcej niż więcej niż 32 mikrokroków? W takim wypadku można zastosować układy scalone bez zewnętrznego indeksersa, za pomocą którego można manipulować napięciem odniesienia w czasie rzeczywistym pozwalając na doprowadzenie przebiegów sinusoidalnych/kosinusoidalnych bezpośrednio do stopnia mocy. Innymi słowy, należy wrócić do zastosowania procesora



Rysunek 2. Jednostka przetwarzająca z podwójnym stopniem mocy używana do kontrolowania silnika bipolarnego może zostać zintegrowana w pojedynczym układzie scalonym

i podwójnego stopnia mocy pokazanych na rys. 2.

Osiągnięcie lepszej rozdzielczości mikrokroku jest jednym z głównych powodów niestosowania rozwiązań zintegrowanych w pojedynczym układzie scalonym. Jednakże jedną z głównych zalet takich rozwiązań jest lepsze odprowadzanie ciepła i dzięki temu – możliwość dostarczenia do obciążenia prądu o większym natężeniu w porównaniu z rozwiązaniami dyskretnymi.

Przeanalizujmy ciepło wydzielane w sterowniku silnika krokowego, o którym napisano wcześniej. Gdy przez mostek H przepływa prąd zasilający silnik, można zaobserwować straty mocy niego odpowiadające:

$$P = I^2 \times R,$$

gdzie:

- I to wartość skuteczna lub średnia prądu uzwojeń,
- R jest rezystancją tranzystora w warunkach nasycenia lub rezystancją RDS(ON).

Zgodnie z danymi katalogowymi, rezystancja RDS(ON) tranzystorów wbudowanych w strukturę DRV8824 może mieć wartość maksymalną 0,9 Ω . Przyjmując, że silnik będzie zasilany prądem sinusoidalnym o maksymalnym natężeniu szczytowym 1,6 A, można wyliczyć maksymalne straty mocy w mostku H podczas pracy w warunkach przewodzenia:

$$P = I^2 \times R = (1,6 \text{ A} \times 0,707)^2 \times 1,8 \Omega = 2,3 \text{ W}.$$

Należy zauważyć, że przemnożyliśmy prąd szczytowy przez 0,707 (lub $1/\sqrt{2}$), ponieważ generowany sygnał ma kształt sinusoidalny, a podawana wartość prądu jest prądem szczytowym o maksymalnym natężeniu 1,6 A. Podwojono również wartość RDS(ON) dla tranzystora FET, ponieważ każde uzwojenie jest zasilane przez dwa tranzystory połączone szeregowo z uzwojeniem. Ostatnim krokiem, którego jeszcze nie wykonaliśmy, jest przemnożenie otrzymanego wyniku przez 2, ponieważ wewnątrz układu są dwa mostki H, oba mające straty 2,3 W w trakcie zasilania silnika. W związku z tym, całkowite straty mocy wynoszą 4,61 W.

Jeśli silnik zatrzymuje się i jedna z faz nadal przewodzi prąd maksymalny, wówczas natężenie płynącego prądu będzie wynosiło 1,6 A. W związku z tym straty mocy będą wynosiły:

$$P = I^2 \times R = 1,6 \text{ A}^2 \times 1,8 \Omega = 4,61 \text{ W}$$

Wyrażenie to reprezentuje całkowite straty mocy występujące podczas przewo-

żenia, ponieważ mostek H nie reguluje płynącego prądu. Ze względu na naturę techniki mikrokroku z parą sygnałów sinus/kosinus, gdy mostek H reguluje prąd przy wartości maksymalnej, przeciwna gałąź mostka musi regulować prąd bliski wartości zerowej lub zostać wyłączona.

Strata mocy wewnątrz mostka ma ogromny wpływ na pracę całego systemu. Wyznaczone teoretycznie 4,61 W zamieni się we wzrost temperatury struktury i jeśli będzie on postępował, to w pewnym momencie zadziała zabezpieczenie termiczne i układ zostanie wyłączony. Dlatego jest bardzo ważne poprawne opracowanie systemu z uwzględnieniem odprowadzania ciepła do otoczenia, aby utrzymywać strukturę układu scalonego tak zimną, jak to tylko możliwe.

Oddanie ciepła do impedancji termicznej lub R_{THJA} (impedancja termiczna złącza do otoczenia) jest łatwe. Im mniejsza jest impedancja termiczna, tym jest łatwiej usunąć nadmiar ciepła. Jednostką R_{THJA} jest $^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Jeśli przemnożymy pobór mocy przez R_{THJA} otrzymamy aktualny wzrost temperatury.

Obudowy scalonych mostków H służących do sterowania silnikami są zbudowane na bazie Power Pad lub mają na spodzie obudowy blaszkę lutowaną do płytki drukowanej. Jedno i drugie rozwiązanie umożliwia odprowadzanie ciepła ze struktury. Po zamontowaniu mostka na płytce drukowanej staje się ona radiatorem i ścieżką rozpraszania ciepła. Poprawnie opracowana płytka drukowana powinna być wykonana z laminatu 4-warstwowego, z jedną warstwą masy. Jako zasadę należy przyjąć, że im więcej miedzi, tym lepsza będzie rezystancja termiczna.

Karta katalogowa podaje typową wartość R_{THJA} 28 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ układu DRV8824 zamontowanego na płytce drukowanej. Teraz można określić, jaka będzie temperatura struktury układu scalonego w warunkach przewodzenia prądu maksymalnego: $\Delta T = R_{THJA} [^{\circ}\text{C}/\text{W}] \times P [\text{W}] = 28^{\circ}\text{C}/\text{W} \times 4,61 \text{ W} = 129,08^{\circ}\text{C}$.

Pamiętajmy o tym, że jest to wzrost temperatury, który należy dodać do temperatury otoczenia! Jak można obliczyć, w temperaturze otoczenia wynoszącej 25 $^{\circ}\text{C}$ temperatura struktury wyniesie 154,08 $^{\circ}\text{C}$. Karta katalogowa układu DRV8824 podaje, że próg zadziałania zabezpieczenia termicznego wynosi około 160 $^{\circ}\text{C}$, ale jego wartość minimalna to 150 $^{\circ}\text{C}$. Jest to powód, dla którego ten

układ nie może zasilać silników prądem o natężeniu większym, niż 1,6 A.

W niektórych aplikacjach może być konieczne obniżenie rezystancji termicznej, co może być zrobione przez dodanie zewnętrznego radiatora lub wymuszenie przepływu powietrza chłodzącego. Może to powodować podwyższenie kosztów opracowania i gotowego wyrobu.

Dzięki zabiegom technologicznym, które obniżyły rezystancję RDS(ON) tranzystorów stopnia mocy, układ DRV8825 może sterować obciążenie wymagające prądu o większym natężeniu. Przy maksymalnej wartości RDS(ON) wynoszącej 0,64 Ω można zasilać obciążenie prądem o większym natężeniu, podczas gdy struktura nadal ma odpowiednią temperaturę. W tabeli 1 zamieszczono różne typy układów scalonych służących do sterowania silnikami. Jak można zauważyć z tego krótkiego porównania, niższe wartości parametru RDS(ON) zwykle oznaczają przewodzenie prądu o większym natężeniu.

Podsumowanie

Nowoczesne układy scalone przeznaczone do sterowania silnikami mogą sprawić rzeczywistą różnicę przy opracowywaniu systemu. Rodzina układów DRV8x zawiera szereg pojedynczych i podwójnych mostków H zoptymalizowanych do sterowania silnikami szczotkowymi DC lub bipolarnymi silnikami krokowymi, wyposażonych w różne wejściowe interfejsy sterujące, możliwość regulowania i modulowania prądu uzwojeń oraz konfigurowanie za pomocą sygnałów zewnętrznych.

Jeśli istnieje potrzeba sterowania małym silnikiem prądu stałego lub zbudowania kontrolera silników krokowych, to warto sięgnąć do komponentów pewnych, odpornych na warunki eksploatacji, łatwych w użyciu i elastycznych w zastosowaniu. Różne możliwości upewniamy, że można zbudować dokładnie taką aplikację, jaka jest potrzebna, a nie taką, która jest dostępna. Zaimplementowane zabezpieczenia sprawiają, że aplikacja będzie bezpieczna w użytkowaniu dla konsumenta, natomiast różne interfejsy pozwalają na wybranie komponentu odpowiedniego dla zastosowanego systemu nadrzędnego.

Jose Quinones
Inżynier Aplikacyjny Texas Instruments
dział Analog Motor Drivers
josequinones@list.ti.com