

Układ sterowania miniaturowego robota kroczącego

Michał Bartyś

Zastosowanie niewielkich gabarytowo robotów mobilnych [2, 3] wymaga konstruowania odpowiednich układów sterowania [1]. Odnosnie do tych układów są formułowane wymagania zapewnienia: odpowiedniej niezawodności w warunkach silnych zaburzeń elektromagnetycznych, minimalnych wymiarów, akceptowalnej ceny i małego poboru mocy.

Sprostanie wymaganiom stawianym układom sterowania miniaturowych robotów mobilnych jest możliwe, z jednej strony dzięki osiągnięciom współczesnej technologii układów mikroprocesorowych [5], a z drugiej dzięki przyjęciu zasady konstrukcyjnej pozwalającej na możliwie jak najszerszą substytucję funkcji sprzętowych przez odpowiednie oprogramowanie. Pozwala to nie tylko na zmniejszenie liczby stosowanych elementów i obniżenie kosztów wytwarzania, ale także na istotne podwyższenie stopnia niezawodności konstrukcji.

W stosunku do zaprezentowanego rozwiązania układu sterowania napędu miniaturowego robota kroczącego sformułowano następujące ogólne założenia konstrukcyjne:

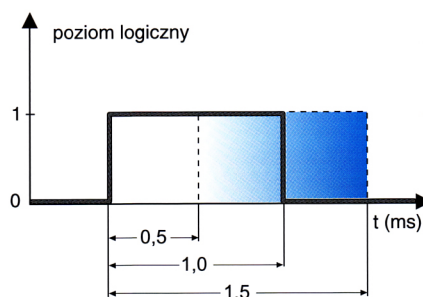
- minimalne zużycie własnej energii,
- minimalne wymiary,
- duża niezawodność eksploatacyjna,
- profesjonalny protokół komunikacyjny,
- szeroki zakres temperatury pracy,
- niska cena.

Układ sterowania został pierwotnie zaprojektowany dla prototypu robota kroczącego [3]. Robot ten ma 6 niezależnie sterowanych odnóży, kamerę wizyjną oraz zestaw 4 czujników dotykowych.

Charakterystyka sterowania serwomechanizmów położenia

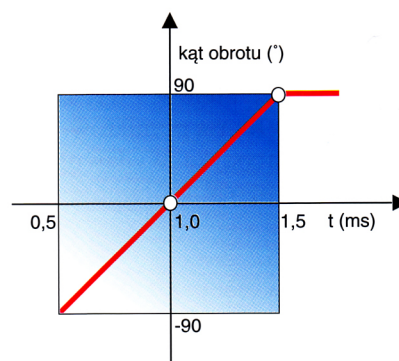
W układzie napędowym robota zastosowano obrotowe serwomechanizmy elektromechaniczne. Serwonapędy są zasilane ze źródła napięcia stałego 5 V. Serwonapęd umożliwia ruch obrotowy wału w zakresie od -90° do $+90^\circ$. Sygnał sprzężenia zwrotnego uzyskuje się w potencjometrycznym układzie pomiaru kąta obrotu wałka serwomechanizmu. Specjalny układ typu ASIC, wbudowany w serwomechanizm, realizuje jednocześnie funkcje regulatora położenia i układu mocy zasilającego komutatorowy silnik prądu stałego. Z punktu widzenia zewnętrznego układu sterującego, serwomechanizm jest układem regulacji nadążnej sterowanym wartością wielkości zadanej. Wartość tej wielkości jest kodowana metodą dewiacji czasowej szerokości impulsu,

będącej odmianą powszechnie znanej i stosowanej metody modulacji szerokości impulsu PWM. Schemat kodowania wartości zadanej przedstawiono na rys. 1. Sposób kodowania jest następujący. W odstępach czasu równych 10.. 30 ms układ sterowania generuje impulsy o wartości logicznej odpowiadającej poziomowi wysokiemu o czasie trwania w granicach 0,5.. 1,5 ms.



Rys. 1. Sposób kodowania wartości zadanej (położenie kątowne) dla serwonapędów odnoży robota

Impulsowi o czasie trwania 0,5 ms odpowiada skrajne lewe położenie wału serwomechanizmu (-90°), impulsowi o czasie trwania 1,0 ms odpowiada położenie środkowe (0°) zaś impulsowi o czasie trwania 1,5 ms odpowiada skrajne prawe położenie wału serwomechanizmu ($+90^\circ$). Charakterystyka statyczna serwomechanizmu (rys. 2) jest liniowa z nasyceniami wynikającymi z ograniczeń mechanicznych kąta obrotu wału silnika. Układ wewnętrznego sterowania serwomechanizmu toleruje wahania okresu repetycji impulsów kodujących wartość zadaną w granicach 10.. 30 ms. Jeśli okres

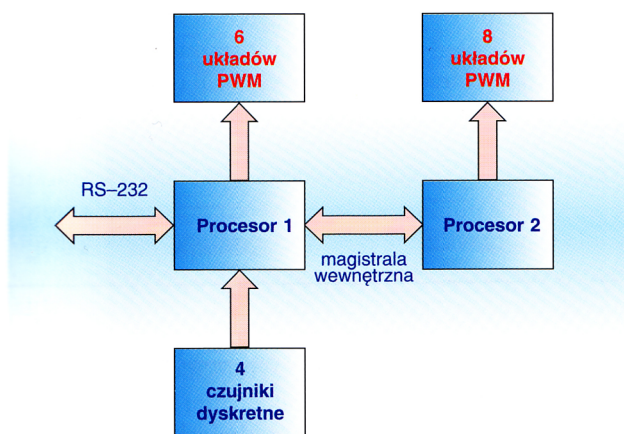


Rys. 2. Charakterystyka statyczna serwomechanizmu położenia (kąt obrotu wału serwomechanizmu w funkcji czasu trwania stanu wysokiego impulsu kodującego wartość zadaną)

impulsowania przekroczy założone granice, to jest to równoznaczne z zanikiem ciągłości transmisji wartości zadanej. Układ serwomechanizmu ignoruje wówczas takie impulsy. Sposób kodowania sygnału wartości zadanej zawiera zatem elementy zabezpieczeń sygnału wartości zadanej przed skutkami zaburzeń elektromagnetycznych, szczególnie istotnych w przypadkach realizacji zadań sterowania zdalnego.

Architektura układu

Uproszczony schemat blokowy układu sterowania robota przedstawiono na rys. 3. Osią konstrukcyjną układu jest tandem dwuprocessorowy. Pierwszy z procesorów pełni rolę procesora komunikacyjnego i układu

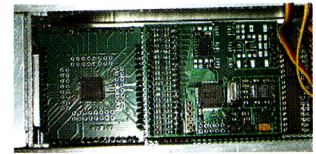


Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy dwuprocessorowego układu sterowania miniaturowego robota kroczącego

obsługującego 6 modulatorów szerokości impulsów oraz port wejść cyfrowych. Drugi z procesorów obsługuje 8 modulatorów szerokości impulsów. Procesory są sprzężone wzajemnie wewnętrzną magistralą 24-bitową. Magistrala została zoptymalizowana pod kątem szybkości przesyłania informacji między procesorami. Magistrala jest wyposażona w 16 linii przeznaczonych do równoległego, dwukierunkowego transferu danych (16-bitowych rejestrów RTU). Cztery linie magistrali są używane do transferu adresu przesyłanego rejestru RTU, cztery pozostałe do wskazania kierunku transferu i realizacji protokołu wymiany informacji. Podstawowy cykl transferu rejestru magistralą wewnętrzną wynosi 4 μ s. Każdy z procesorów [5] jest w istocie 16-bitowym mikrokontrolerem wyposażonym w jednostkę arytmetyczno-logiczną o architekturze ortogonalnej ze zredukowaną listą rozkazów (RISC). Mikrokontroler jest wyposażony w wewnętrzną reprogramowalną pamięć programu typu *flash* o pojemności 60 kB oraz 2 kB pamięci o swobodnym dostępie typu RAM. Mikrokontroler zasilany jest źródłem napięcia 3,3 V. Pobierana jest moc rzędu 5 mW przy częstotliwości oscylatora kwarcowego 4,9152 MHz. Mikrokontroler zawiera szereg dodatkowych modułów, w tym:

- 8 układów 16-bitowych modulatorów PWM;
- 2 moduły dwukierunkowej, jednoczesnej transmisji szeregowej;

Fotografia układu sterowania



- 12-kanalowy, 12-bitowy kompensacyjny przetwornik analogowo-cyfrowy;
- porty wejść/wyjść cyfrowych;
- układ pomiaru temperatury.

Mikrokontroler przystosowany jest do pracy w temperaturze od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$.

Interfejs transmisji szeregowej

Prototypowy układ sterowania zaopatrzonego w dwa opcjonalne interfejsy transmisji szeregowej: RS-485 do zastosowań przemysłowych i RS-232C do celów dydaktycznych. Interfejs umożliwia dwukierunkową naprzemienną transmisję szeregową danych z szybkością przesyłania 1200... 115200 bodów. Interfejs umożliwia sprzężenie jednostki sterowania robota z zewnętrzną jednostką nadrzędną typu *master* przez bezpośrednie połączenie kablowe lub bezprzewodowe, po dodatkowym wyposażeniu robota w radiomodem. Dla zminimalizowania poziomu zużycia energii w kanale RS-232 zastosowano energooszczędny układ z funkcją automatycznego wykrywania stanu bezruchu komunikacyjnego (*auto-shutdown*), zaś w kanale RS-485 układ sterownika magistrali o poborze prądu zaledwie 0,3 mA.

Komunikacja

Miniaturowym robotem krocącym steruje zewnętrzna, nadrzędna jednostka sterująca. Dla celów komunikacyjnych wybrano protokół MODBUS-RTU, dobrze ugruntowany w praktyce przemysłowej. Protokół ten zapewnia dostatecznie wysoki poziom bezpieczeństwa transmitowanych danych. Przyjęto skrajnie zredukowaną listę rozkazów standardu MODBUS-RTU. Zaimplementowano tylko trzy, ale wystarczające do obsługi układu sterującego, rozkazy RTU:

- rozkaz czytania rejestrów (funkcja 03),
- rozkaz zapisu rejestru (funkcja 06),
- rozkaz zapisu rejestrów (funkcja 16).

Sterownik jest traktowany jako typowe urządzenie podporządkowane (*slave*) o programowalnym adresie z zakresu 1.. 247 i programowalnej szybkości przesyłania z zakresu 1200.. 115200 Bd. Domyślny adres urządzenia jest równy 1, zaś domyślna szybkość przesyłania 9600 Bd. Dopuszczalny czas zwłoki odpowiedzi (*timeout*) wynosi 100 ms.

W strukturze wewnętrznej interfejsu RTU sterownika wyróżniono piętnaście 16-bitowych rejestrów RTU. Czternaście rejestrów typu zapis-odczyt, o numerach od 001 do 014, steruje napędami o numerach odpowiednio od 1 do 14, jeden rejestr typu tylko odczyt służy do odczytu rejestru binarnego nr 001 (słowa stanu wejść binarnych).

Rejestry sterowań napędów zapisuje nadrzędna jednostka sterująca kodami wartości zadanych przemieszczeń kątowych wałków serwomechanizmów. Zakres liczbowy wartości kodów wynosi od 1000 h do 3000 h. Wartości kodu 1000 h jest przyporządkowane skrajne lewe położenie wału serwonapędu (pozycja -90°) zaś kodowi 3000 h jest przyporządkowane skrajne prawe położenie wału serwonapędu (pozycja $+90^\circ$). Charakterystyka serwonapędu jest liniowa. Teoretyczna rozdzielczość kątowa serwomechanizmu wynosi zatem $1,31'$. Dokładny zakres kodów sterujących zależy od ograniczeń mechanicznych samego napędu i może się zmieniać w zależności od egzemplarza serwonapędu, a także od więzów mechanicznych narzuconych przez współpracujące z serwonapędem elementy mechaniczne. W praktyce zakres ten ustala się eksperymentalnie.

Rejestr odczytu wejść binarnych jest przeznaczony do transferu stanu 4-bitowego rejestru wejściowego odzwierciedlającego stan czterech mikroprzełączników zwierznych (zderzaków) zainstalowanych w robocie. Rejestr nie ma układu eliminacji drgań styków zwierznych. Jeśli jest to istotne dla zastosowania, to oprogramowanie jednostki nadrzędnej powinno być wyposażone w procedurę eliminacji wpływu drgań np. przez implementację prostego mechanizmu głosowania 2 z 3.

Oprogramowanie układu sterowania wykonano w języku adresów symbolicznych [6]. Struktura oprogramowania obejmuje dwa procesy, z których pierwszy obsługuje zadania komunikacji z jednostką nadrzędną realizując protokół RTU, drugi zaś obsługuje zadania komunikacji między obu procesorami realizując protokół wewnętrzny. Procesy są przełączane synchronicznie w takt przerwań generowanych przez sprzętowy, programowalny układ licznika czasu. Okres przerwań jest sprzężony z wybraną szybkością przesyłania i jest wyznaczany z zależności: $T = 5,5/f$; gdzie f – przepływność binarna w [Bd]. Przy szybkości przesyłania 115200 Bd generowanych jest 20945 przerwań na sekundę.

Protokół komunikacyjny, a system Windows

Jak już wspomniano wyżej do zadań komunikacyjnych zaimplementowano protokół MODBUS RTU. Wybór protokołu został podyktowany jego rozpowszechnieniem oraz prostotą implementacji w warstwach: fizycznej, łączenia danych oraz aplikacyjnej [4]. Z punktu widzenia realizacji sterowania w czasie rzeczywistym protokół ten nie jest najwygodniejszy, jeśli wziąć pod uwagę, że dla zachowania odpowiedniej jakości trajektorii sterowanego robota, zwłaszcza w zakresie dużych prędkości ruchu, wymagania odnośnie do czasu próbkowania układu są wysokie (10 ms). Np. przy szybkości przesyłania 115200 Bd zapis 14 rejestrów sterowania robota i odczyt rejestru wejść binarnych wymaga wysłania 60 bajtów co trwa ok. 5,8 ms.

Teoretycznie zatem, zapewnienie 100 Hz częstotliwości próbkowania regulatora sterownika trajektorii robota jest możliwe w układzie wyłącznie z jednym urządzeniem podporządkowanym. W przypadku

wyboru mniejszych szybkości przesyłania, utrzymanie okresu próbkowania 10 ms jest całkowicie niemożliwe.

Urządzenie podporządkowane ma jednak obowiązek odmówienia wykonania rozkazu jednostki nadrzędnej w następujących przypadkach:

- wydania przez jednostkę nadrzędną błędnego syntaktycznie rozkazu, w którym:
 - wystąpił błąd parzystości lub błąd przepelnienia lub błąd niedopełnienia znaku,
 - wystąpił błąd czasowy podczas odbioru informacji, polegający na powstaniu nieciągłości transmitowanej ramki RTU między kolejnymi znakami ramki o czasie trwania dłuższym niż czas transmisji 3 znaków,
 - wystąpił błąd cyklicznej sumy kontrolnej CRC;
- wydania przez jednostkę nadrzędną błędnego semantycznie rozkazu, w którym:
 - wystąpił błąd polegający na adresowaniu przez jednostkę nadrzędną nieistniejących rejestrów RTU,
 - wystąpił błąd w postaci nierealizowalnego przez adresowane urządzenie kodu funkcji RTU.

Odmowa wykonania rozkazu wywołuje określone reperkusje z punktu widzenia realizacji zadania sterowania robota w czasie rzeczywistym. Szczególnie istotnym czynnikiem okazał się warunek zapewnienia ciągłości transmitowanej ramki RTU. Dopuszczalna przerwa czasowa między poszczególnymi znakami w transmitowanej ramce jest czynnikiem krytycznym, zwłaszcza jeśli w warstwie aplikacyjnej jest stosowane oprogramowanie działające w środowisku systemu czasu nierzeczywistego. Jak wykazały badania [4] okres przełączania wątków w systemach: Windows 2000 i Windows NT jest stały i wynosi $10,2 \pm 0,3$ ms. Okres ten nie zależy od częstotliwości generatora zegarowego procesora. W systemach Windows 98, czy Windows Millenium sytuacja jest odmienna. Okres ten waha się w granicach 5.. 50 ms. System Windows jest tak skonstruowany, że może nastąpić zawieszenie realizacji wątku na czas realizacji innego wątku o wyższym priorytecie. Cecha ta jest szczególnie niekorzystna z punktu widzenia obsługi protokołu MODBUS RTU. Jeśli zostanie zawieszony proces obsługi kolejki znaków tworzących ramkę RTU na czas trwania transmisji 3 znaków (0,28 ms przy szybkości 115200 Bd), to urządzenie podporządkowane ignoruje rozkaz. Wznowienie obsługi kolejki przez system Windows skutkuje następną odmową wykonania rozkazu, ze względu na jego niekompletność. W rezultacie, zależnie od złożenia się niekorzystnego splotu przyczyn oraz aktualnego obciążenia procesora innymi zadaniami, efektywność transmisji istotnie spada. Zdecydowanie obniża to jakość procesu sterowania, lub nawet całkowicie go dyskwalifikuje. Prostem, jakkolwiek kosztownym rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie systemu czasu rzeczywistego. W przypadku układu sterowania robota kroczącego zastosowano dwa inne rozwiązania.

Pierwsze rozwiązanie polega na zmniejszeniu prawdopodobieństwa przerwania wątku obsługi transmisji ramki RTU przez zastosowanie techniki transmisji krótkich ramek (transfer pojedynczych rejestrów

zamiast grupy rejestrów). Jak wykazały badania [4] sposób ten jest akceptowalny, ale jedynie wówczas, gdy jest tolerowane wydłużenie okresu próbkowania do 400 ms.

Drugie rozwiązanie polega na odejściu od sztywnego ograniczenia protokołu MODBUS RTU odnośnie do akceptowalnej przerwy czasowej w transmitowanej ramce. W przypadku układu sterującego robota kroczącego okres ten zrównano z okresem dopuszczalnej zwłoki czasowej (100 ms) odpowiedzi urządzenia podporządkowanego. Odejście od standardu pozwoliło na praktyczne wyeliminowanie błędnych transferów spowodowanych nieciągłością strumienia bajtów ramki RTU.

Parametry techniczne

Układ sterowania robota charakteryzuje się następującymi parametrami technicznymi:

● napięcie zasilania	4.. 6 V DC
● liczba sterowanych napędów	14
● liczba wejść cyfrowych	4
● moment maks. każdego napędu	0,37 Nm
● maksymalna prędkość obr. napędu	1 obr/s
● zakres temperatury pracy	-40.. +85 °C
● protokół komunikacyjny	MODBUS-RTU
● szybkość przesyłania	1200... 115200 Bd
● warstwy fizyczne komunikacji	RS-232, RS-485

Podsumowanie

Przedstawiony układ sterowania ma cechy konstrukcji uniwersalnej, która może być aplikowana zwłaszcza w przypadkach, gdy są istotne takie czynniki jak: miniaturyzacja, minimalizacja zużycia mocy, duże szybkości przesyłania, odporność na wpływ temperatury, czy niska cena. Układ szczególnie nadaje się do aplikacji w miniaturowych robotach kroczących. Odpowiednio zaprojektowana architektura i oprogramowanie, jak również profesjonalne możliwości komunikacyjne umożliwiają zastosowanie układu sterowania także do prowadzenia prac eksperymentalnych, rozwojowych i dydaktycznych.

Bibliografia

1. Bartyś M.: Energooszczędny układ sterowania napędu minirobota mobilnego, PAR, 2001, nr 10, s. 12-15.
2. Chojecki R.: Miniaturowy robot mobilny Virtus. PAR, 2001, nr 9, s. 5-7.
3. Chojecki R.: Miniaturowy robot kroczący, PAR 1/2003 s. 5-7.
4. Marcinkiewicz P.: Projekt i wykonanie oprogramowania narzędziowego do zadań sterowania robota kroczącego, magisterska praca dyplomowa, Politechnika Warszawska, Instytut Automatyki i Robotyki, 2002, 92 s.
5. MSP430 Ultra-low-power microcontrollers, Texas Instruments, 2000, CD Rel. 1.30.
6. MSP 430 Family, Architecture Guide and Module Library, Data Book, Texas Instruments, 1996, 252 s. ■

Streszczenia artykułów naukowych

Układ sterowania miniaturowego robota kroczącego, Michał Bartyś — s. 12

W artykule przedstawiono charakterystykę konstrukcji i oprogramowania dwuprocessorowego energooszczędnego układu sterowania miniaturowego robota kroczącego o 14 stopniach swobody. Poszczególne jednostki kinematyczne robota napędzane są serwo mechanizmami przemieszczeń kątowych sterowanymi cyfrowo metodą dewiacji czasowej impulsów. Komunikacja z układem sterowania realizowana jest w trybie naprzemiennego transmisji szeregowo. W warstwie aplikacyjnej zaimplementowano protokół MODBUS-RTU. Układ sterowania może mieć zastosowanie także w konstrukcjach prototypowych robotów innych klas.

Control unit for miniature stepping robots, Michał Bartyś — p. 12
In the paper the multi-processor low power consumption control unit for miniature stepping robots with up to 14 of freedom degrees was presented. The robots joints are driven by the miniature encapsulated DC rotational servomotors controlled by the time pulse deviation modulation technique. The control unit can be particularly applied for remote control of inspection robots taking advantages of cable or wireless communication facilities. The control unit is capable to transmit data with the speed up to 115200 Bd. Well proved. MODBUS-RTU protocol was implemented.