

# Magistrala USB w układzie sterowania numerycznego maszyn

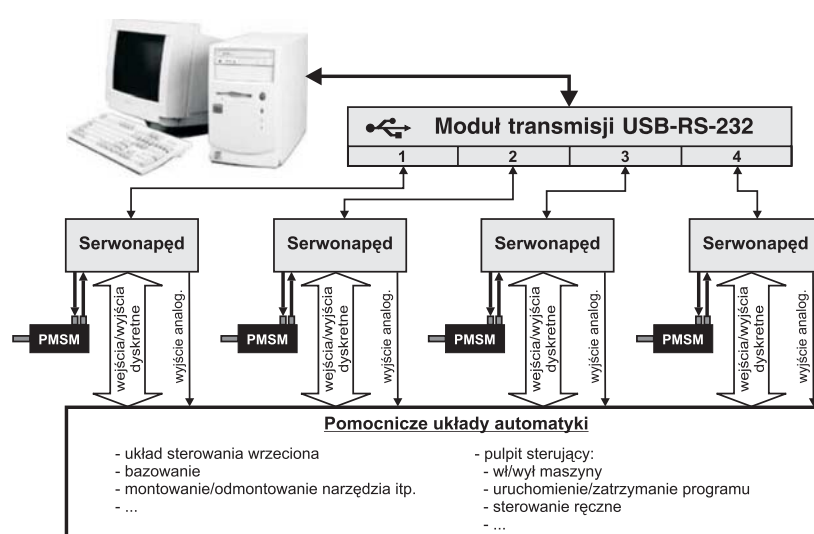
Sławomir Mandra  
Kazimierz Karwowski  
Andrzej Wawrzak \*

W artykule przedstawiono układ sterowania numerycznego maszyn, oparty na komputerze PC i magistrali USB. Przeprowadzono analizę jego przydatności do ciągłego, synchronicznego sterowania czterema serwonapędami z silnikami synchronicznymi prądu przemiennego. Opisano sposób komunikacji, budowę i zasadę działania serwonapędów. Przedstawiono wyniki badań opisywanego układu sterowania.

W ostatnich latach dynamicznie rozwijają się rozproszone systemy sterowania numerycznego maszyn oparte na magistralach sieciowych, złożone z komputera nadrzędnego i inteligentnych serwonapędów. W systemach tych są wymagane magistrale o dużej szybkości transmisji danych. Często stosowane są serwonapędy z trójfazowymi silnikami synchronicznymi, prądu przemiennego z magnesami trwałymi – PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*). Serwonapędy te mają wysokie parametry ruchu, dużą niezawodność, trwałość oraz szeroki zakres realizowanych funkcji. Cyfrowe regulatory napędów są zbudowane na procesorach sygnałowych – DSP (*Digital Signal Processor*) [3, 4]. Nadrzędnym komputerem często jest komputer klasy PC. Struktura ta cechuje się dużymi możliwościami sterowania, dużą elastycznością i jednocześnie niską ceną.

## Architektura układu sterowania numerycznego maszyn z magistralą USB

Układ sterowania numerycznego maszyn jest zbudowany z komputera PC i czterech serwonapędów sterowanych za pośrednictwem magistrali USB (*Universal Serial Bus*) (rys. 1). Komputer PC pełni rolę sterownika CNC (*Computer Numerical Control*). Serwonapędy mają interfejsy transmisji szeregowej (analogiczne do standardu RS-232 z tym, że wykorzystuje połączenia światłowodowe) [3]. Komendy oraz dane z kompute-



Rys. 1. Schemat blokowy układu sterowania numerycznego maszyn

ra są przesyłane w formie strumienia pakietów przy użyciu magistrali USB do modułu oznaczanego symbolem USB-RS i następnie w równych przedziałach czasu do serwonapędów. Komunikacja między modulem a serwonapędami odbywa się za pomocą światłowodów z szybkością 115200 bd. Użycie światłowodów ma na celu wyeliminowanie błędów transmisji spowodowanych zakłóceniami elektromagnetycznymi. Założono, że transmisja sygnału na duże odległości będzie realizowana pomiędzy modulem a napędami. Informacje zwrotne z serwonapędów (suma kontrolna, stan wejść/wyjść itp.) są buforowane w module USB-RS i jako pakiety wysyłane w postaci strumienia zwrotnego do komputera PC.

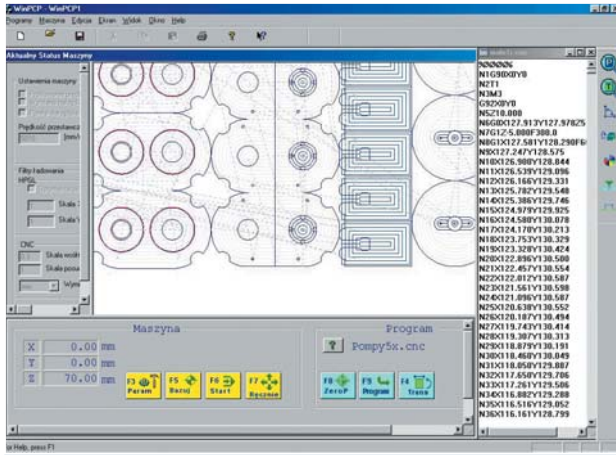
W przedstawionym układzie sterowania numerycznego maszyn program sterujący pracuje pod systemem operacyjnym Windows. Program realizuje następujące funkcje:

- interfejs użytkownika
- konfiguracja i diagnostyka maszyny
- konwersja programów w językach typu „G” (język programowania obrabiarek numerycznych) lub HPGL

\* mgr Sławomir Mandra, dr inż. Kazimierz Karwowski, mgr inż. Andrzej Wawrzak – Instytut Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

(Hewlett Packard Graphic Language) na kody zrozumiałe dla serwonapędów

- interpolacja, generowanie trajektorii ruchu dla 4 osi (sterowanie kształtowe)
- obsługa wejść i wyjść dyskretnych serwonapędów
- obsługa wyjść analogowych serwonapędów
- obsługa interfejsu USB.



Rys. 2. Okno programu sterującego wieloosiową maszyną numeryczną

## Komunikacja pomiędzy komputerem PC a serwonapędami

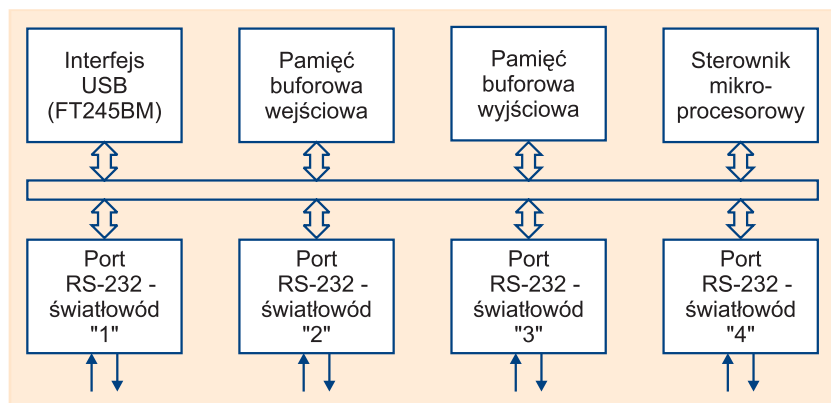
Magistrala USB powstała w celu ujednoczenia sposobu komunikacji urządzeń peryferyjnych z komputerem PC. Wkrótce po jej opracowaniu stała się światowym standardem. Obecnie większość urządzeń komunikujących się z komputerem ma interfejs USB. Magistrala USB jest szeregową magistralą danych, w której informacje są przesyłane w formie pakietów. Najnowsza specyfikacja magistrali (USB 2.0) określa trzy wartości szybkości, z jakimi jest przesyłany strumień bitów: wolna – do 100 kbit/s; pełna – do 10 Mbit/s i szybka – do 400 Mbit/s. Magistrala USB ma strukturę drzewiastą, w której znajduje się jeden kontroler magistrali (*host*), do którego dołącza się urządzenia USB. Wśród urządzeń USB wyróżnia się urządzenia wykonawcze i koncentratory (*hub*). Za pośrednictwem koncentratorów uzyskuje się dodatkowe złącza do przyłączenia urządzeń wykonawczych lub w razie potrzeby dodatkowych koncentratorów. Magistrala może zawierać maksymalnie 7 poziomów i 127 urządzeń. Warstwa fizyczna składa się z dwóch linii danych D+ i D- w postaci skrętki (transmisja różnicowa) i dwóch linii do przesyłania zasilania (+5 V, GND). Maksymalny pobór prądu z linii zasilania wynosi 500 mA. Urządzenia do magistrali USB mogą być dołączane i odłączane w trakcie pracy całego systemu, bez szkody dla sieci i samego urządzenia. Dołączenie urządzenia do magistrali jest automatycznie wykrywane, a samo urządzenie inicjalizowane (kontroler przydziela mu identyfikator, urządzenie informuje go o rodzaju i wymaganej szybkości transmisji itd.). Magistrala nie dysponuje linią zegarową. Sygnał zegara jest zawarty w strumieniu danych. Algorytm kodowania zapewnia obecność impulsów synchronizacji w dowolnej sekwen-

cji danych, nawet składających się z samych jedynek. Wszystkie akcje w sieci są inicjowane przez kontroler. Kontroler rozsyła w regularnych odstępach czasu specjalne pakiety z zapytaniem do kolejnych urządzeń, czy nie potrzebują obsługi (urządzenia USB nie mają możliwości zgłoszenia przerwania). Zaletą tego sposobu komunikacji jest zabezpieczenie się przed kolizją mogącą nastąpić podczas przesyłania danych przez kilka urządzeń jednocześnie. Jego wadą jest zajmowanie dużej części pasma transmisji przez pakiety odpytujące poszczególne urządzenia magistrali USB. Urządzenia USB nie mogą komunikować się między sobą. Urządzenie żądające dostępu do magistrali odsyła odpowiedź pozytywną (na zapytanie potrzeby obsługi). Na podstawie zebranych informacji w fazie inicjalizacji kontroler najpierw sprawdza, czy dysponuje wolnym pasmem transmisji, jeśli tak, to jest tworzony wirtualny kanał, po którym są transmitowane dane w postaci pakietów o ustalonej strukturze. Pakiety są zabezpieczone sumami kontrolnymi CRC, które umożliwiają nie tylko wykrywanie błędów, ale także ich korekcję (do dwóch uszkodzonych bitów). W systemie USB wyróżnia się cztery typy przesyłania danych [1]:

- transfer sterująco-kontrolny – przeznaczony do konfiguracji urządzeń w procesie inicjalizacji
- transfer masowy – ma charakter asynchroniczny przeznaczony do przesyłania dużych ilości danych. Zapewnia powtarzanie pakietów uszkodzonych, co gwarantuje poprawność otrzymanych danych. Typowe zastosowanie to obsługa pamięci, skanerów, drukarek itp.
- transfer izochroniczny – stosuje się go tam, gdzie jest wymagana stała szybkość transmisji w jednym kierunku. W trybie izochronicznym błędy transmisji nie są korygowane. Typ ten stosuje się głównie podczas przesyłania sygnałów wizyjnych i fonicznych
- transfer przerwaniowy – polega na okresowym (ustalonym w czasie inicjalizacji) odpytywaniu urządzenia (np. myszy komputerowej), czy nie potrzebują obsługi. Przesyłane ilości danych są bardzo małe.

Ze względu na duże liczby danych do sterowania numerycznego maszyn najbardziej odpowiednimi wydają się być transfery masowy i izochroniczny. Transferu izochronicznego nie wybrano, ponieważ nie jest sprawdzana poprawność transmitowanych danych. Użyto transferu masowego, ze względu na możliwość przesyłania dużych ilości danych z zagwarantowaniem ich poprawności.

W przyjętym rozwiązaniu układu sterowania CNC istotne jest, aby serwonapędy otrzymywały w równych odstępach czasu kolejne zadane przyrosty położenia osi maszyny, w celu zapewnienia ciągłości realizowanego toru ruchu. Spełnienie tego warunku w trybie transferu masowego jest niemożliwe, ponieważ z założenia jest to typ transmisji, w którym w krótkim czasie przesyła się duże ilości danych bez zagwarantowania równomierności ich przesyłania. Wymaga to, aby kolejne komendy i dane dla serwonapędów były buforowane przez urządzenie zewnętrzne i wysyłane do serwonapędów w równych przedziałach czasu.



Rys. 3. Schemat blokowy modułu USB-RS

Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy modułu USB-RS zapewniającego równomierność przesyłania komend do serwonapędu w przedstawionym układzie sterowania numerycznego maszyn. Interfejs USB zrealizowano na układzie FT245BM firmy FTDI [2]. Pracuje on w trybie transferu masowego i umożliwia przesyłanie strumienia danych z maksymalną szybkością 1 MB/s. Komunikacja pomiędzy komputerem a modulem odbywa się porcjami informacji (pakietami). Pakiety wejściowe (wysyłane z komputera do modułu) podzielono na dwa rodzaje: synchroniczne i asynchroniczne składające się odpowiednio z 11 i 21 bajtów. Pakiety niezależnie od rodzaju składają się z pola numeru pakietu, pola identyfikatora i pól danych przeznaczonych do przechowywania rozkazów dla czterech serwonapędów. Tryb pracy synchroniczny modułu USB-RS jest inicjowany przez wysłanie do niego 120 (2x60) pakietów synchronicznych (rys. 4), które są zapisywane do bufora wejściowego. Po jego wypełnieniu włączany jest zegar, w takt którego (co 1 ms) z bufora wejściowego jest odczytywany pakiet (synchroniczny), a zawarte w nim rozkazy są wysyłane do odpowiednich serwonapędów za pośrednictwem interfejsów RS-232. Po otrzymaniu rozkazu serwonapęd wykonuje go i odsyła sumę kontrolną. Z uzyskanych odpowiedzi w module USB-RS jest budowany pakiet zwrotny, który jest za-

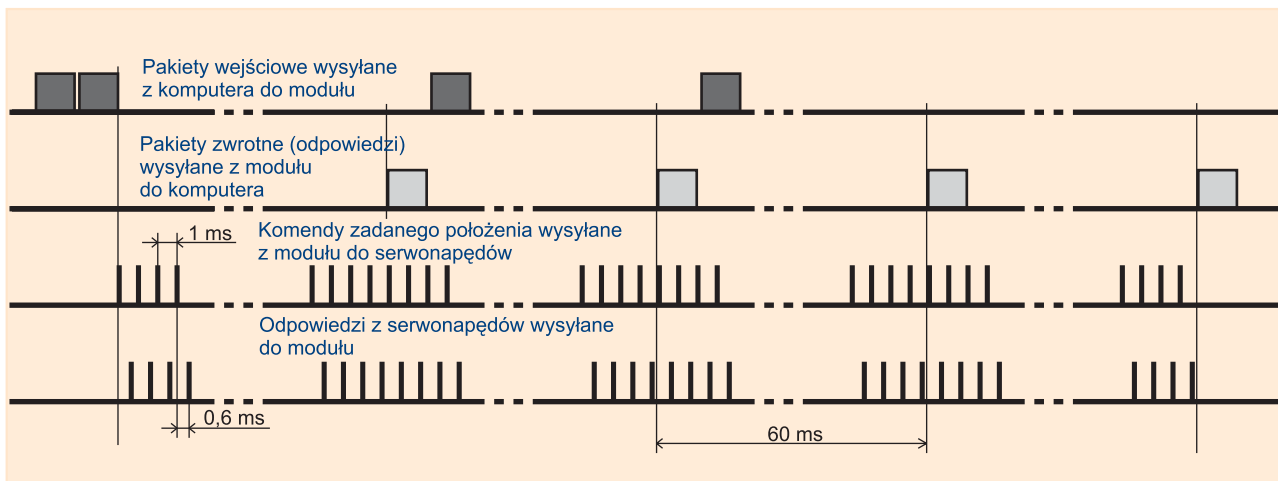
pisywany do bufora wyjściowego (niezależnie od rodzaju pakietu wejściowego pakiet zwrotny jest taki sam – składa się z 21 bajtów). Po opróżnieniu się bufora wejściowego do połowy, moduł wysyła do komputera zawartość bufora wyjściowego oraz pobiera kolejne pakiety synchroniczne do bufora wejściowego (60 pakietów).

Moduł zapewnia równomierne wysyłanie komend do serwonapędów, także w trakcie komunikowania się z komputerem. Tryb asynchroniczny modułu jest używany m.in. do włą-

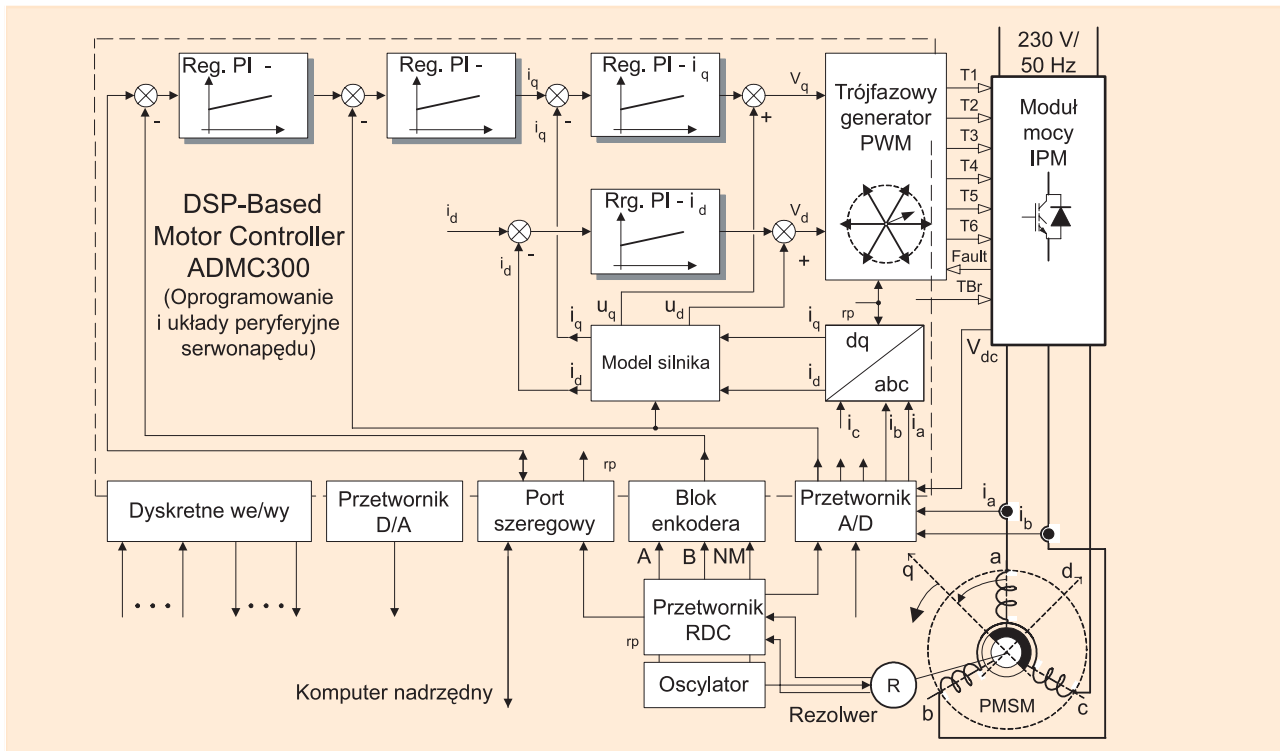
czenia, wyłączenia, odczytania statusu serwonapędu itp. Pakiety asynchroniczne nie są buforowane w module. Po otrzymaniu pakietu rozkazy w nim zawarte są wysyłane do odpowiednich serwonapędów. Także pakiet zwrotny (po otrzymaniu pakietu asynchronicznego) nie jest buforowany, ale tuż po jego skompletowaniu wysyłany do PC.

## Serwonapęd z silnikiem synchronicznym prądu przemiennego (PMSM)

Przedstawiony układ sterowania CNC współpracuje z serwonapędami typu SDO [3]. Rys. 5 przedstawia strukturę serwonapędu SDO z silnikiem PMSM, opartą na sterowaniu wektorowym z wykorzystaniem metody FOC (*Field Oriented Control*) [4]. Algorytm sterowania silnikiem zaimplementowano w mikrokontrolerze ADMC300 firmy Analog Devices [5]. Mikrokontroler zawiera stałoprzecinkowy procesor DSP z układami peryferyjnymi optymalizowanymi pod kątem sterowania silnikiem trójfazowym prądu przemiennego. Czasy przełączeń tranzystorów mocy są obliczane w bloku modulacji PWM, metodą SVM (*Space Vector Pulse Width Modulation*). Wewnętrzne przetworniki analogowo-cyfrowe są używane do pomiaru prądów fazowych



Rys. 4. Zależności czasowe pomiędzy danymi odbieranymi i wysłanymi na magistralach modułu USB-RS podczas realizacji transmisji synchronicznej



Rys. 5. Funkcyjny schemat blokowy serwonapędu

silnika ( $i_a$ ,  $i_b$ ), napięcia na tranzystorach mocy  $V_{dc}$  i prędkości silnika  $\omega$ . Kąt wału silnika  $\theta_{rp}$  jest mierzony za pomocą rezolwera i zewnętrznego przetwornika RDC (*Resolver to Digital Converter*). Użyty przetwornik AD2S90 firmy Analog Devices ma 12-bitową rozdzielczość, szeregowo wyjście danych informujące o położeniu wału, analogowe wyjście prędkości i dodatkowe wyjście cyfrowe emulujące przyrostowy przetwornik obrotowo-impulsowy (enkoder). To ostatnie wyjście jest połączone z blokiem enkodera w mikrokontrolerze i służy do określenia bezwzględnego (absolutnego) położenia  $\theta$  wału silnika. Położenie bezwzględne jest obliczane z rozdzielczością 32-bitów.

Serwonapęd może pracować w trzech trybach regulacji: momentu, prędkości i położenia. Tryb pracy jest wybierany odpowiednią komendą przesłaną z komputera PC. Regulatory prędkości i momentu są typu proporcjonalno-całkującego, przy czym ten ostatni składa się z dwóch oddzielnych regulatorów prądu (w wirującym układzie współrzędnych d i q). Regulator położenia zrealizowano także przy użyciu algorytmu PI, w którym ustawiono duże wzmocnienie członu proporcjonalnego. Wartość zadana dla tego regulatora może być podawana w sposób bezwzględny lub przyrostowy. Podczas bezwzględnego zadawania położenia, prędkość silnika może być ustalana przez program obrabiarzkowy w komputerze PC. Dla przyrostowego zadawania położenia do algorytmu regulatora jest dodane sprzężenie z wyprzedzeniem (*feed forward*). Jedną z bardziej istotnych części programu napędu jest protokół komunikacyjny. Podczas realizacji sterowania wieloosiowego jest istotne, aby kolejne komendy położenia były od-

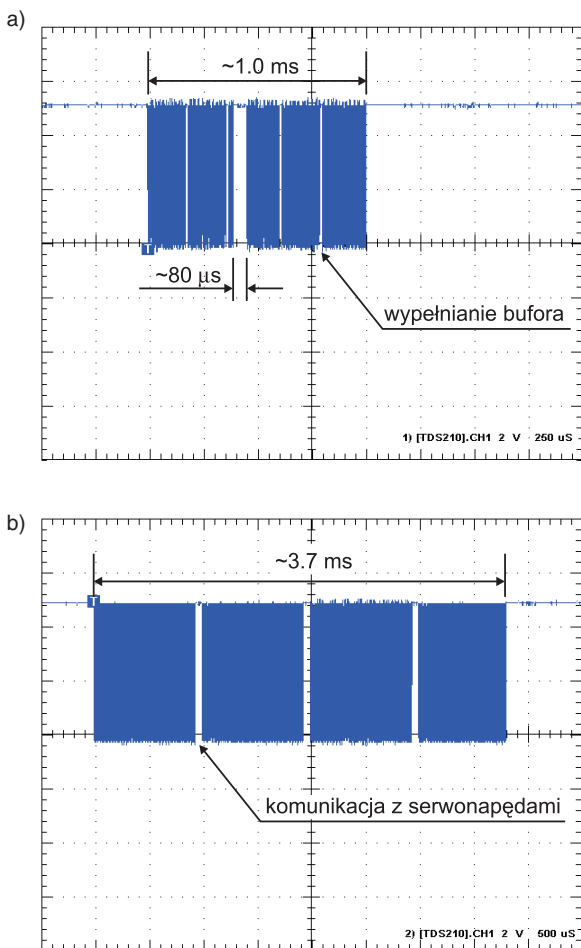
czytywane i przetwarzane przez serwonapęd bez opóźnień. Uzyskano to dzięki stałemu priorytetowi przebiegów w mikrokontrolerze, przez co port szeregowy obsługiwany jest zawsze natychmiastowo. PC może także sterować włączeniem i wyłączeniem serwonapędu, ustawieniem jego parametrów np. współczynników wzmocnienia regulatorów, czytać i inicjować zmienne, ustawiać wyjścia, czytać stan wejść itd. Wszystkie transmitowane informacje muszą być odczytane w ustalonym przedziale czasu.

## Wyniki badań

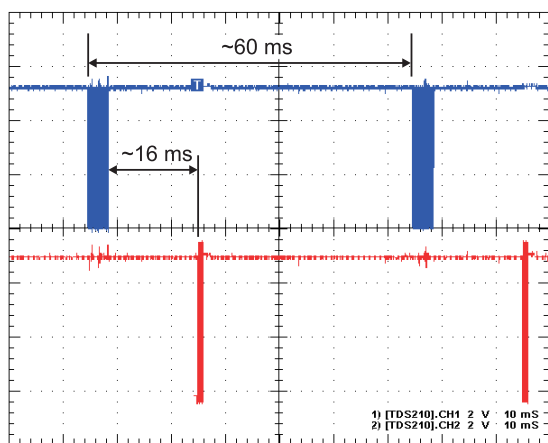
Przeprowadzone testy układu sterowania miały na celu potwierdzenie poprawności jego działania. Z komputera PC do modułu USB-RS wysyłano pakiety asynchroniczne i synchroniczne oraz odbierano pakiety zwrotne. W wyniku przeprowadzonych badań nie stwierdzono błędów transmisji, gubienia pakietów, nieprawidłowego odzwierciedlenia zadanego toru ruchu. Na rys. 6 przedstawiono przykładowe oscylogramy sygnałów odczytu i zapisu danych z układu FT245BM pełniącego rolę interfejsu USB.

Czas odczytu 60 pakietów synchronicznych (660 bajtów) z układ FT245BM wynosi ok. 1 ms (rys. 6a). Krótkie przedziały czasu (cztery), w których nie jest generowany sygnał odczytu, wskazują miejsce, w którym sterownik magistrali USB dosyła kolejne pakiety do bufora odczytu (128 bajtów) układu FT245BM. Jeden dłuższy odpowiada czasowi, w którym moduł USB-RS komunikuje się z serwonapędami (ok. 80  $\mu$ s).

Czas zapisu 60 pakietów zwrotnych (1500 bajtów) do modułu USB-RS (rys. 6b) trwa ok. 3,7 ms. Przedziały czasu (ok. 80  $\mu$ s), w których nie jest generowany sygnał zapisu, oddalone od siebie co 1 ms wskazują miejsca, w których moduł komunikuje się z serwonapędami.



**Rys. 6.** Sygnały odczytu i zapisu danych podczas transmisji synchronicznej: a) przebieg sygnału odczytu pakietu danych z układu FT245BM, b) przebieg sygnału zapisu pakietu danych do układu FT245BM



**Rys. 7.** Przebiegi sygnałów zapisu (górny) i odczytu (dolny) w układzie FT245BM w przedziale czasu 100 ms

Rys. 7 przedstawia sygnały zapisu do układu FT245BM i odczytu z układu FT245BM w przedziale czasu 100 ms.

Pakiety zwrotne z modułu USB-RS są wysyłane do komputera co ok. 60 ms. Po około 16 ms od otrzymania pakietu zwrotnego, komputer wysyła kolejne synchroniczne pakiety wejściowe (oscyllogram dolny) z nowymi rozkazami i danymi dla serwonapędów. Jest to czas, jaki magistrala USB potrzebuje na zmianę kierunku przesyłanego strumienia danych.

Fluktuacja czasu pomiędzy wysyłaniem pakietów synchronicznych do serwonapędów wynosi 0,5  $\mu$ s, opóźnienie wysyłania komend pomiędzy interfejsami RS-232 wynosi 0,7  $\mu$ s.

Podczas realizacji programu pracy maszyny, zmiana stanu na jednym z wejść dyskretnych serwonapędów zostanie zauważona przez program sterujący maszyną (w PC) maksymalnie po upływie ok. 60 ms (wynika to z buforowania pakietów w module USB-RS).

## Podsumowanie

Przedstawiony układ sterowania charakteryzuje duża elastyczność, łatwość montażu, prosta budowa i niska cena. Dzięki zastosowaniu magistrali USB uniknięto konieczności ingerencji w budowę komputera (brak specjalizowanych kart rozszerzeń do komputera). Istnieje możliwość łatwej rozbudowy oprogramowania oraz dodania komunikacji sieciowej. Zastosowanie światłowodów pomiędzy modulem USB a serwonapędami zapewnia odporność toru transmisji na zaburzenia elektromagnetyczne i separację galwaniczną pomiędzy serwonapędami a PC. Zastosowane serwonapędy charakteryzują się wysoką dynamiką, dokładnością i sztywnością (tj. dużą zmianą momentu w stosunku do uchybu przemieszczenia).

## Bibliografia

1. Universal Serial Bus Specification, Compaq, Hewlett-Packard, Intel, Lucent, Microsoft, NEC, Philips, Revision 2.0, 2000.
2. <http://www.ftdichip.com>
3. Cyfrowy regulator prędkości i położenia typu SDO, Ośrodek Badawczo Rozwojowy Urządzeń Sterowania Napędów (<http://www.obrusn.torun.pl>), Toruń 2003.
4. Karwowski K., Mizan M., Wawrzak A.: Serwonapędy prądu przemiennego (AC) z procesorem sygnałowym (DSP), Przegląd Elektrotechniczny 11/2001.
5. High Performance DSP-Based Motor Controller ADMC300, Analog Devices, Data Sheet Rev. B, 2000.
6. Karwowski K., Mizan M., Wawrzak A.: The computer numerical control system with permanent magnet synchronous motor servo-drives, XIV Międzynarodowe Sympozjum Mikromaszyny i Serwonapędy. Tuczno 2004. ■