

dr inż. Michał Porzeziński
mgr inż. Marcin Drewka
Politechnika Gdańska
wydział Elektrotechniki i Automatyki

ZASTOSOWANIE MAGISTRALI USB W MIKROPROCESOROWYCH URZĄDZENIACH AUTOMATYKI

W artykule przedstawiono właściwości magistrali USB oraz oceniono możliwość zastosowania jej w urządzeniach automatyki. Wnioski wyprowadzono w oparciu o doświadczenia związane z uruchomieniem prostego układu pomiarowego wykorzystującego popularny mikrokontroler z rodziny 8051 i scalony sterownik magistrali USB - FTU245AM.

EMPLOYMENT OF THE USB BUS IN MICROPROCESSOR DEVICES OF AUTOMATION

This article presents specificity of USB interface and evaluates the capability of its employment in microprocessor devices of automation. The deduced conclusions are based upon experiences related with the design and start-up of a simple measuring device, which was built using a popular family 8051 microcontroller and an integrated USB bus driver.

1. WSTĘP

W ostatnim czasie powszechne stało się wykorzystywanie komputera do komunikacji z urządzeniami automatyki przemysłowej, np. do wizualizacji i prezentacji danych określonego obiektu lub procesu, czy też jako nadrzędnych urządzeń sterujących i rejestrujących. Praktycznie wszystkie produkowane aktualnie urządzenia automatyki takie jak sterowniki przemysłowe, czy urządzenia pomiarowe, bądź to wymagają współpracy z komputerem, bądź przynajmniej umożliwiają opcjonalnie taką współpracę. Dlatego nieodzownym elementem większości współczesnych urządzeń automatyki stały się szeregowy interfejsy cyfrowe.

Ze względu na obszar zastosowań oraz pewne cechy charakterystyczne, szeregowy interfejsy cyfrowe podzielić można na trzy grupy. Pierwszą grupę stanowią interfejsy sieciowe, których podstawowym zadaniem jest umożliwienie wymiany danych w systemach rozproszonych na dużym obszarze. Do podstawowych cech takich interfejsów należeć muszą: możliwość przesyłania danych na duże odległości, komunikacja wielu elementów systemu między sobą, rzadko zmieniany zestaw urządzeń funkcjonujących w sieci. Przykładami takich interfejsów są m.in. RS-485, CAN, TOKENBUS. Do drugiej grupy zaliczyć można interfejsy służące do lokalnego zarządzania urządzeniem. Z założenia interfejsy takie służą jedynie do tymczasowego dołączania urządzenia peryferyjnego do komputera w celu jednorazowej wymiany

danych, np. oprogramowania, konfiguracji, czy pobrania zgromadzonych danych. Ze względu na swoje zastosowanie muszą mieć one możliwość łatwego dołączenia i odłączenia urządzeń, zazwyczaj niezbyt istotny jest osiągalny zasięg ani szybkość transferu danych. Najczęściej stosowanym w tym obszarze interfejsem jest RS-232 oraz bezprzewodowy interfejs IrDa. Trzecia grupa to interfejsy łączące lokalne moduły pomiarowe z komputerem. Ważną cechą tego typu interfejsów jest zapewnienie odpowiedniej przepustowości, a także możliwości dołączenia odpowiedniej liczby peryferiów. Najczęściej nie jest konieczny duży zasięg. Typowym zastosowaniem są stanowiska pomiarowe czy laboratoryjne. Oprócz standardu RS-232 często stosowanym w tym obszarze rozwiązaniem jest wykorzystanie interfejsów równoległych, takich jak IEC-625 lub umieszczanie kart pomiarowych, wykorzystujących magistralę PCI czy ISA, bezpośrednio w obudowie komputera.

Niektóre spośród wymienionych wyżej interfejsów dostępne są standardowo w typowym komputerze PC (RS-232, PCI, Ethernet), inne z kolei wymagają zastosowania kart rozszerzeń lub modułów obsługujących dany interfejs.

Wszystkie produkowane współcześnie komputery wyposażone są standardowo w interfejs USB. Choć aktualnie popularne są liczne urządzenia peryferyjne dołączane do komputera za pośrednictwem magistrali USB, to jednak są to głównie urządzenia o charakterze multimedialnym. Tymczasem właściwości tej magistrali sprawiają, iż stanowi ona potencjalnie doskonałe rozwiązanie do prostego i taniego zastosowania w mikroprocesorowych urządzeniach automatyki w dwóch ostatnich, spośród wymienionych wyżej, obszarów zastosowań.

2. MAGISTRALA USB

2.1 Rys historyczny

Magistrala USB miała być początkowo jedynie standardowym interfejsem urządzeń do transmisji danych po łączach telefonicznych [3]. Wkrótce jednak okazało się, że może być wykorzystywana z powodzeniem do dołączania komputerowych urządzeń peryferyjnych. Opis uniwersalnej magistrali szeregowej (USB) w wersji 1.1 z 23 września 1998r. stał się podstawowym standardem stosowanym w przypadku dołączania do systemów komputerowych urządzeń zewnętrznych. Według tej wersji standardu możliwe jest przesyłanie za pomocą magistrali USB strumienia bitów z prędkością 1,5Mb/s lub 12Mb/s.

W nowej wersji normy dotyczącej uniwersalnej magistrali szeregowej „Universal Serial Bus Specification Revision 2.0” [2] z 27 kwietnia 2000r, możliwości magistrali USB zostały znacznie rozszerzone. Wprowadzono dodatkową, 40-krotnie większą od dotychczas osiągalnej, szybkość transmisji danych – 480Mb/s. W nowej specyfikacji magistrali przewidziano zachowanie obustronnej kompatybilności urządzeń zgodnych z wcześniejszą wersją 1.1.

2.2 Najważniejsze cechy magistrali USB:

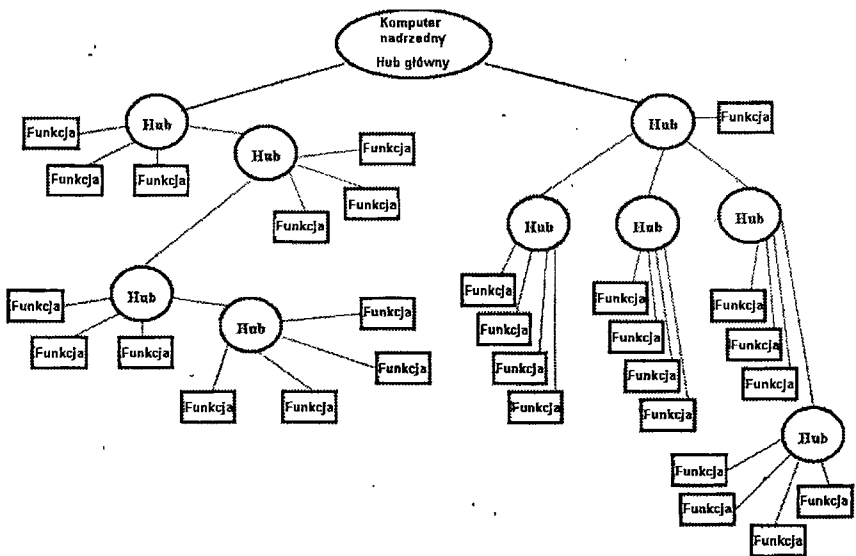
Poniżej przedstawione zostały najważniejsze cechy charakteryzujące magistralę USB [1,2]:

- przepustowość w wersji 1.1 1,5Mb/s lub 12Mb/s, w wersji 2.0 do 480Mb/s,
- możliwość dołączenia do 127 urządzeń peryferyjnych do komputera PC,

- zasilanie urządzeń peryferyjnych niewielkiej mocy (do 2,5W) bezpośrednio z magistrali USB,
- dołączanie i odłączanie urządzeń peryferyjnych bez konieczności wyłączenia zasilania (hot – pluggability),
- dołączanie urządzeń peryferyjnych na zewnątrz obudowy komputera, bez potrzeby jej otwierania,
- automatyczna konfiguracja urządzeń peryferyjnych USB w momencie wykrycia ich przez system,
- automatyczne przydzielanie dostępnej przepustowości szyny (kolejne peryferia nie są rejestrowane w systemie w razie braku dostępnej dla nich przepustowości).

2.3 Topologia magistrali USB

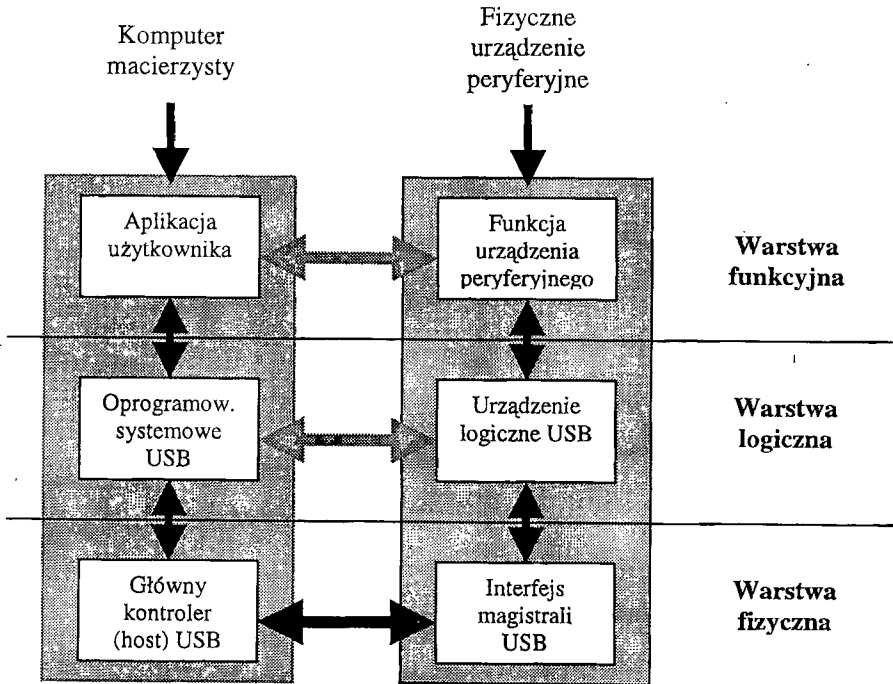
W systemie USB istnieje zawsze jeden sterownik główny (host), na który składają się układy sprzęgające oraz oprogramowanie wchodzące w skład komputera [3]. Sterownik główny może obsługiwać do 127 podległych urządzeń wykonawczych, przy czym rozbudowywanie liczby urządzeń peryferyjnych wymaga stosowania dodatkowych koncentratorów (hubów). Hub pełni rolę retransmitera oraz rozgałęźnika sygnału, jednocześnie nie stanowiąc samodzielnego urządzenia peryferyjnego, chociaż stanowi jedno ze 127 dostępnych przyłączy. Spotyka się niekiedy urządzenia typu kombinowanego, zawierające w sobie zarówno peryferyjne urządzenie wykonawcze, jak i hub. Każdy hub dodaje od 2 do 8 dodatkowych przyłączy, pozwalających na dodanie do systemu kolejnych urządzeń peryferyjnych. Sieć połączeń systemu USB po rozbudowaniu o dodatkowe huby tworzy strukturę drzewiastą, gdzie maksymalna liczba poziomów wynosi 7 (maksymalnie 5 kaskadowo połączonych hubów). Na rys. 1 przedstawiona jest przykładowa topologia drzewiasta USB:



Rys. 1. Przykładowa struktura topologii magistrali USB

2.4 Model warstwowy magistrali USB

Możliwość dołączenia do 127 urządzeń do pojedynczej magistrali USB jest realizowana przy wykorzystaniu metod, które mają wiele cech wspólnych z modelami komunikacji sieciowej. Działanie magistrali USB można przedstawić na podstawie diagramu reprezentującego ułożone w stosie warstwy funkcjonalne dla urządzeń nadawczych oraz odbiorczych [3]. Komunikacja fizyczna dokonywana jest pomiędzy przyległymi warstwami jednego stosu, zaś komunikacja logiczna pomiędzy blokami odpowiednio urządzenia nadawczego i odbiorczego znajdującymi się w tej samej warstwie. Rys. 2 przedstawia schemat połączeń i wymiany danych pomiędzy urządzeniem nadawczym a odbiorczym. Na rysunku czarnymi strzałkami zaznaczono komunikację fizyczną, natomiast szarymi komunikację logiczną.



Rys. 2. Model warstwowy magistrali USB

2.5 Warstwa fizyczna

Ze względu na szeregowy charakter magistrali USB, jej warstwa fizyczna charakteryzuje się dużą prostotą i niskim kosztem realizacji. Kabel USB składa się jedynie z czterech żył: dwóch żył sygnałowych oraz dwóch żył zasilania [3]. W przypadku dużych prędkości transferu wykorzystywanych w trybie magistrali USB2.0, żyły sygnałowe tworzyć muszą skrętkę ekranowaną (STP – shielded twisted pair), jednak w przypadku przesyłu danych z mniejszymi prędkościami nie jest to konieczne. Żyły zasilania muszą mieć przekrój wystarczający, aby dostarczyć maksymalny prąd obciążenia do 500 mA.

2.6 Warstwa logiczna

W warstwie logicznej komputer macierzysty traktuje wszystkie urządzenia dołączone do magistrali USB tak, jakby każde z nich było dołączone bezpośrednio do głównego portu wejścia – wyjścia [3].

Dane wysyłane na magistralę dzielone są na pakiety i kodowane metodą NRZI (Non Return To Zero Inverted – odwrotny kod bez powrotu do zera). Dzięki zastosowaniu tego samosynchronizującego kodu nie ma potrzeby stosowania impulsów zegarowych w magistrali. Pomimo, że zasadniczo sygnał nie zawiera impulsów zegarowych, to jednak po stronie nadajnika stosowane jest wstawianie bitów (bit stuffing), które zapewnia, że jeśli na magistrali 6 następujących po sobie bitów nie spowoduje zmiany stanu logicznego magistrali, to wstawiany jest po nich jeden bit przeciwny, zapewniający zmianę stanu magistrali i tym samym zapewniający prawidłową synchronizację zegarów.

2.7 Warstwa funkcjonalna

- * Z poziomu aplikacji użytkownika obsługa urządzeń wykonawczych jest niezależna od ich usytuowania na magistrali USB [3]. Rozpatrywany jest jedynie przepływ danych między buforem w pamięci komputera przyporządkowanym do danego programu – klienta, a jednym z punktów końcowych w urządzeniu zewnętrznym. Jest to możliwe dzięki pośrednictwu wchodzącego w skład oprogramowania systemowego – programu obsługi magistrali USB.

Z punktu widzenia aplikacji warstwa fizyczna oraz logiczna magistrali USB są transparentne [1]. Oznacza to, że dla klienta dowolna funkcja zaimplementowana w urządzeniu peryferyjnym jest widoczna bezpośrednio. Ta cecha jest niezmiernie ważnym atrybutem magistrali USB, zapewnia jej bowiem bardzo szerokie możliwości zastosowania w rozbudowie komputera. Przy wykorzystaniu urządzeń USB można dodawać w komputerze macierzystym dodatkowe porty wejścia – wyjścia w dowolnym formacie (COM, LPT lub jakimkolwiek innym), dodawać zewnętrzne pamięci masowe, urządzenia multimedialne, tworzyć konwertery innych interfejsów itp.

2.8 Zasilanie urządzeń peryferyjnych

Magistrala USB może dostarczać zasilania +5V dla urządzeń małej mocy [3]. Bezpośrednio po dołączeniu urządzenia peryferyjne mogą z niej czerpać do 100mA, po skonfigurowaniu urządzenia dostępne obciążenie może wzrosnąć do 500mA. Urządzenia pobierające do 100mA określane są jako urządzenia małej mocy (low power), natomiast pobierające od 100mA do 500mA określane są jako urządzenia dużej mocy (high power). Oczywiście każde urządzenie może mieć własne źródło zasilania. Zarządzanie dostępnym zasilaniem w bardziej złożonych strukturach USB realizowane jest poprzez układy hubów. Każdy koncentrator może dostarczać zasilania dla urządzeń do niego dołączonych, zaś podczas dokonywania ewidencji dołączonych urządzeń peryferyjnych koncentratory same negocjują między hostem a sobą własne możliwości w zakresie dostarczania zasilania.

2.9 Porównanie magistrali USB z popularnymi interfejsami szeregowymi

W poniższej tabeli przedstawiono zestawienie cech magistrali USB [1,2] z innymi powszechnie stosowanymi interfejsami szeregowymi [4]:

Tabela 1. Zestawienie właściwości wybranych interfejsów szeregowych

	USB 1.1	USB 2.0	RS-232	RS-422	RS-485
Przepustowość maksymalna	12Mb/s	480Mb/s	128kb/s	10Mb/s	10Mb/s
Maksymalna liczba peryferiów	127	127	1	10	32
Maksymalny zasięg	10m	10m	15m	1200m	1200m
Zasilanie peryferiów	z magistrali lub własne	z magistrali lub własne	własne	własne	własne
Liczba żył	4	4	2	2	2

3. PRZETWORNIK POMIAROWY Z INTERFEJSEM USB

Dla wykazania, że magistrala USB nadaje się do komunikacji z peryferyjnymi urządzeniami pomiarowymi, zbudowany został układ, który pełni funkcję prostej przystawki pomiarowej do komputera PC, zaś wyniki dokonywanych pomiarów przesyła do komputera za pośrednictwem magistrali USB. Układ zbudowany został w oparciu o przetwornik analogowo/cyfrowy ADC0804, mikrokontroler AT89S53 oraz układ scalony FT8U245AM, który stanowi scalony konwerter interfejsu magistrali USB na interfejs równoległy. Choć ani rozdzielczość pomiarowa, ani maksymalna dostępna w przyrządzie częstotliwość pomiarów nie pozwalają na wykorzystanie układu jako profesjonalnego urządzenia pomiarowego, to jednak jego zadaniem jest głównie wykazanie możliwości wykonania dwukierunkowej komunikacji prostego mikroprocesorowego urządzenia pomiarowego z komputerem PC.

3.1 Założenia techniczne

Założono, że zaprojektowany układ powinien spełniać następujące założenia:

- transmisja danych ma się odbywać za pośrednictwem magistrali USB,
- musi być możliwe dołączanie wielu podobnych urządzeń peryferyjnych,
- powinna być możliwa transmisja danych z przepustowością przynajmniej 10-krotnie przekraczającą możliwości standardowego interfejsu RS-232, czyli ponad 1 Mb/s,
- urządzenie musi być „Hot-pluggable” czyli dołączalne i odłączalne podczas normalnej pracy komputera nadrzędnego bez wyłączenia zasilania.

Choć na rynku dostępna jest szeroka gama urządzeń wyposażonych w interfejs magistrali USB, w tym m.in. liczne urządzenia multimedialne, to jednak konstrukcja tych urządzeń oparta jest o dedykowane układy scalone przeznaczone wyłącznie do realizacji jednego, konkretnego zadania. Niemożliwe jest zatem wykorzystanie układów tego rodzaju do realizacji uniwersalnego interfejsu mikrokontroler/komputer. Odrębną trudność stanowi konieczność zastosowania oddzielnych sterowników, obsługujących

konkretny typ układu scalonego. Sterowniki te są pisane również zgodnie z przeznaczeniem danego układu, czyli ze strony komputera dany układ peryferyjny widziany jest już poprzez sterowniki jako konkretne urządzenie zewnętrzne, nie zaś jako interfejs wejścia/wyjścia.

Łatwo dostępnym i bardzo prostym we wdrożeniu rozwiązaniem okazało się być zastosowanie scalonego układu konwertera magistrali USB FT8U245AM na interfejs równoległy 8-bitowy, który produkowany jest przez firmę FTDI.

3.2 Układ scalony FT8U245AM

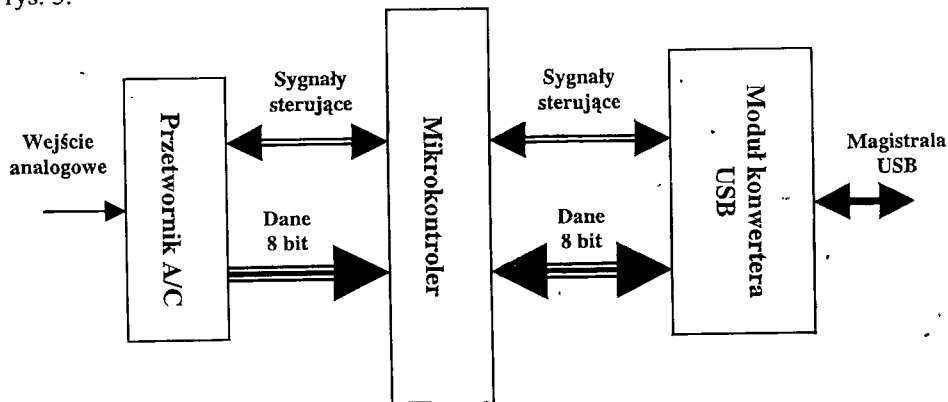
Układ scalony FT8U245AM jest scalonym konwerterem między magistralą USB, a standardowym buforowanym 8 – bitowym portem równoległym [4]. Zastosowanie konwertera nie wymaga znajomości specyfikacji magistrali USB, jako że cała obsługa transmisji danych, jak również automatycznej konfiguracji układu wykonywana jest w pełni sprzętowo przez zgodny ze standardem USB 1.1 transceiver USB, stanowiący jeden z bloków funkcjonalnych konwertera. Przy wykorzystaniu dedykowanych sterowników wirtualnego portu szeregowego (Virtual COM Port) od strony komputera macierzystego (hosta) konwerter widziany jest jako dodatkowy port szeregowy, jednakże o większej niż standardowa przepustowości. Ta cecha jest niezmiernie ważna, oznacza ona bowiem, że układ kompatybilny jest z oprogramowaniem napisanym dla standardowego interfejsu RS-232. FT8U245AM pozwala na łatwe uzyskanie transmisji danych między urządzeniem peryferyjnym a komputerem głównym (hostem) z teoretyczną prędkością do 8Mbitów/s. Jego zgodny z koncepcją FIFO równoległy interfejs wejścia/wyjścia pozwala na łatwą współpracę z typowym mikroprocesorem.

Najważniejsze cechy układu FT8U245AM:

- przesyłanie danych przez USB z przepustowością do 1MB/s,
- bufor FIFO nadawczy 384 – bajtowy oraz odbiorczy 128 – bajtowy,
- prosty interfejs do połączenia z szyną mikrokontrolera,
- typowa 32-pinowa obudowa MQFP,
- zintegrowany stabilizator napięcia 3,3V – brak konieczności stosowania zewnętrznego regulatora napięcia, zasilanie bezpośrednio z magistrali USB.

3.3 Osiągnięte wyniki

Schemat blokowy układu, który posłużył do przeprowadzenia badań przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy układu przetwornika

Podczas testów uzyskano poprawną pracę układu dla danych przesyłanych z prędkością do 160 kB/s. Powyżej tej prędkości wąskim gardłem okazała się moc obliczeniowa wykorzystanego mikrokontrolera. Ponieważ głównym celem było sprawdzenie poprawności działania układu od strony funkcjonalnej, na tym etapie badań nie przeprowadzono prób dalszej optymalizacji programu. Należy sądzić, że przy zastosowaniu szybszego mikrokontrolera i zoptymalizowaniu aplikacji odbierającej dane szybkość przesyłu może być jeszcze większa (prędkość deklarowana przez producenta to 1MB/s.)

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły, że istnieje możliwość wykorzystania interfejsu USB 1.1 dla potrzeb urządzeń automatyki, oraz że właściwości tego interfejsu przewyższają własności stosowanego dotychczas powszechnie interfejsu RS-232, tak pod względem przepustowości, jak i pod względem liczby możliwych do dołączenia peryferiów. Uzyskana w praktyce przepustowość przesyłania danych z przetwornika do komputera osiągnęła 160kB/s, dzięki czemu przekroczono maksymalną przepustowość interfejsu RS-232, wynoszącą 16kB/s, ponad dziesięciokrotnie.

Zaprojektowanie, zbudowanie i uruchomienie układu przetwornika pomiarowego pozwoliło ponadto na praktyczne przetestowanie proponowanego rozwiązania, które może potem zostać zaadaptowane i wykorzystane przy projektowaniu dowolnego urządzenia mikroprocesorowego. Zastosowanie proponowanego układu pozwala na realizację wymiany danych między komputerem a mikroprocesorem poprzez interfejs USB przy niewielkim nakładzie środków technicznych. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest kompatybilność z istniejącym oprogramowaniem wykorzystującym interfejs RS232.

Bibliografia

1. Specyfikacja magistrali USB w wersji 1.1, opublikowana w wersji elektronicznej pod adresem <http://www.usb.org/developers/docs/>
2. Specyfikacja magistrali USB w wersji 2.0, opublikowana w wersji elektronicznej pod adresem <http://www.usb.org/developers/docs/>
3. T. Jamrógiewicz, Magistrala USB, Politechnika Warszawska, opublikowane w wersji elektronicznej pod adresem <http://www.ire.pw.edu.pl/zejim/rois/dydaktyka/syko/usb.pdf>
4. W. Mielczarek: Szeregowe interfejsy cyfrowe, HELION, Gliwice 1993
5. Dokumentacja techniczna układu FT8U245AM firmy FTDI