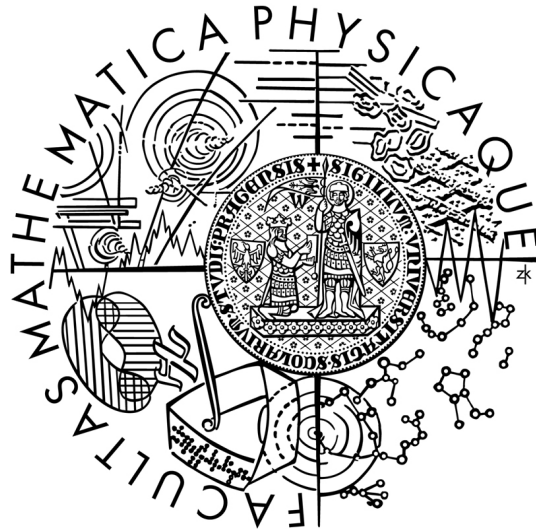


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Vojta Molda

Univerzální USB modul pro sběr dat a řízení fyzikálního experimentu

Katedra fyziky nízkých teplot

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miloš Pfeffer, CSc.

Studijní program: Obecná fyzika

2009

Chtěl bych v první řadě poděkovat vedoucímu mé práce Ing. Miloši Pfefferovi, CSc., za neocenitelné rady, konzultace, připomínky a pomoc při výrobě i návrhu plošných spojů. Bez této pomoci by práce vznikala s daleko větší námahou a s mnohem menší radostí.

Velké díky také patří Katedře fyziky nízkých teplot MFF UK, která nesla veškeré náklady na součástky spojené se stavbou a vývojem měřicí desky.

V neposlední řadě chci poděkovat volitelnému předmětu Elektronické praktikum, jehož úloha s USB modulem byla zdrojem inspirace a poskytla základní myšlenku, která se rozšířila až do zde prezentované podoby. Je prakticky jisté, že bez tohoto předmětu by tato práce nemohla vzniknout.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze 29. května 2009

Vojta Molda

0 Introduction

Title: Universal USB Module for Data Acquisition and Control of Physical Experiments

Author: Vojta Molda

Author's email: vojta.molda@gmail.com

Department: Department of Low-Temperature Physics

Supervisor: Ing. Miloš Pfeffer, CSc.

Supervisor's email: Milos.Pfeffer@mff.cuni.cz

0.1 Abstract

Work concentrates on design and construction of measuring device, which communicates over USB bus. Designed measuring device contains 16 analog inputs with 10-bit resolution, 16 TTL level digital inputs protected by optocoupler, 16 digital open-collector outputs out of which is 4 capable of withstanding current up to 1.5 A, 8 PWM outputs also capable of handling current up to 1.5 A and 2 analog outputs with 12-bit resolution. Key point in the design is ability to program controlling microprocessor directly in the application without necessity to connect any external programmer. That allows large variety and ease of usage. Tools required for programming together with source codes in C language are included on CD. Emphasis was put on free technologies and portability.

Keywords: USB, measuring, microprocessor, data acquisition

1 Úvod

Název práce: Univerzální USB modul pro sběr dat a řízení fyzikálního experimentu

Autor: Vojta Molda

Email autora: vojta.molda@gmail.com

Katedra (ústav): Katedra fyziky nízkých teplot

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miloš Pfeffer, CSc.

Email vedoucího: Milos.Pfeffer@mff.cuni.cz

1.1 Abstrakt

Práce se zabývá procesem vývoje, návrhu a stavby měřicího a řídicího zařízení, které komunikuje po sběrnici USB. V práci navržena a postavená měřicí deska obsahuje 16 analogových vstupů s 10-bitovým rozlišením, 16 digitálních vstupů TTL úrovně chráněných optovazbou, 16 digitálních výstupů typu open-kolektor, z nichž 4 jsou zatížitelné proudem do 1.5 A, 8 PWM výstupů s proudovou zatížitelností taktěž do 1.5 A a 2 analogové výstupy s rozlišením 12-bitů. Stěžejním bodem návrhu je programovatelnost řídicího mikroprocesoru přímo v aplikaci bez nutnosti připojovat externí programátor. Z toho plyne široká univerzálnost a snadné použití měřicí desky. Potřebné nástroje spolu se zdrojovými kódy v jazyce C jsou k dispozici na přiloženém CD. Důraz byl kladen na svobodné technologie a co největší multiplatformnost.

Klíčová slova: USB, měření, mikroprocesor, sběr dat

1.2 Zadání a motivace práce

- Navrhněte a realizujte autonomní univerzální externí modul s vlastním napájením a požadovanými analogovými i digitálními vstupy a výstupy, který bude připojen přes USB rozhraní k libovolnému PC a jehož vstupy a výstupy bude možné modifikovat pro připojení k libovolnému fyzikálnímu experimentu.
- Napište obslužný program v C++ k tomuto modulu pro operační systém Windows XP.
- Vzhledem k univerzálnosti modulu je třeba počítat s minimálně 16 analogovými a digitálními vstupy.
- Výstupy modulu budou rovněž analogové i digitální. Digitální výstupy budou minimálně velikosti 8 b. Nejméně část z nich bude schopna výkonového zatížení (např. pro řízení krokových motorů).

Současná generace PC již upouští od zaběhlých počítačových I/O portů (RS-232, Centronix, aj.), používaných často pro sběr dat a on-line řízení fyzikálních experimentů. Jejich roli převzalo definitivně rozhraní USB, které je vzhledem k rychlosti přenosu i v možnosti řetězení optimální volbou i pro připojení přístrojů fyzikálního experimentu. Právě pro tyto účely je třeba mít univerzální modul, který by zprostředkoval komunikaci mezi USB rozhraním počítače a nejrůznějšími vstupy a výstupy připojitelných zařízení. Takovýto modul se běžně na trhu však nevyskytuje, pokud ano, jeho možnosti v univerzálnosti jsou velmi omezené. Realizace takového modulu spolu s obslužným software v předkládané podobě by umožnila na experimentálních fyzikálních pracovištích rozšíření možností on-line komunikace PC s přístroji fyzikálního experimentu.

Obsah

0	Introduction	2
0.1	Abstract	2
1	Úvod	3
1.1	Abstrakt	3
1.2	Zadání a motivace práce	4
2	Sběrnice USB	7
2.1	Funkce	7
2.2	Přenos dat	8
3	Zvolená koncepce	10
4	Použité integrované obvody	13
4.1	FT232R - USB USART převodník	13
4.2	UMS3 - DIP-24 USB USART převodník	14
4.3	MCP4922 - Dvojkánalový D/A převodník	15
4.4	ATmega1280 - Osmibitový RISC mikroprocesor	16
4.5	ATmega168 - Osmibitový RISC mikroprocesor	17
4.6	PC849 - Čtyřnásobná analogová optovazba	17
4.7	6N134 - Dvojnásobná optovazba pro přenos digitálních dat	17
4.8	ULN2803A - Osmikanálové darlingtonové pole	18
4.9	ULN2064B - Čtyřkanálové darlingtonové pole	18
4.10	LM385 - Napěťová reference 2.5 V	19
5	Prototyp	20
5.1	ATmega168 UMS3	20
6	USB měřicí deska	24
6.1	Digitální výstupy	24
6.2	PWM výstupy	25
6.3	Analogové výstupy	25
6.4	Digitální vstupy	25
6.5	Analogové vstupy	29
6.6	Proudová spotřeba	29

7	Software	32
7.1	Firmware mikroprocesoru	32
7.2	Řídící aplikace pro PC	33
7.3	Použití ve Windows	33
7.4	Použití v linuxových distribucích založených na Debianu	34
7.5	Obsah doprovodného CD	34
	Literatura	35
8.6	Použitá literatura	35
8.7	Zdroje obrázků	37

2 Sběrnice USB

2.1 Funkce

Rozhraní USB je uživatelsky přívětivé. Po připojení zařízení do USB portu vše další obslouží sám operační systém (instalaci a zavedení ovladačů). Práci spojenou s instalací a zaváděním ovladačů zařídí operační systém sám, aniž by tím byl uživatel obtěžován.

Tato jednoduchost z uživatelského hlediska je vyvážena složitější prací pro vývojáře zařízení. Každé zařízení musí obsahovat minimálně řadič schopný pracovat s USB sběrnici. Ten navíc není nijak jednoduchý ani úplně levný. Pracuje s přenosovými frekvencemi v řádech desítek MHz a je vybaven značně rozsáhlým firmwarem. Po softwarové stránce je nutný ovladač, jehož psaní také není nejsnadnější. Navíc pokud chceme uvést na trh nové zařízení, je nutné požádat organizaci USB o přidělení unikátního čísla dodavatele VID (vendor ID). To se děje za poplatek zhruba \$ 2 000.

Cílem standardu bylo nahradit velké množství různých konektorů na zadní straně počítačů, zjednodušit způsob softwarové komunikace periférií a odstranit konektory s piny.

Rozhraní USB je tvořeno čtyřmi vodiči. Jejich názvy jsou GND, VCC, D+, D-. Signály na D+, D- slouží k diferenciálnímu přenosu dat. Používané napěťové úrovně jsou 0 V a 3.3 V. Na VCC se přivádí napětí 5 V. To umožňuje napájení menších zařízení přímo ze sběrnice bez nutnosti externích kabelů. Standartně lze odebírat proud 100 mA. Po domluvě s rozbočovačem až 500 mA. GND vodič rozvádí po sběrnici zem.

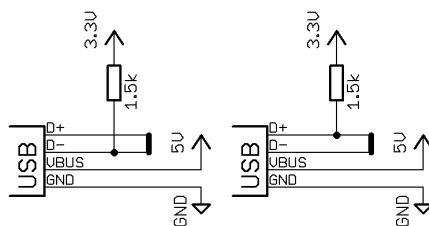
USB zařízení musí být schopna při absenci komunikace na sběrnici snížit svou spotřebu. Absencí komunikace na sběrnici se indikuje USB suspend režim pro připojená zařízení. Hlavním cílem je zvýšit výdrž baterií laptopů. Povolený proudový odběr v USB suspend režimu je 500 μ A, pokud zařízení nemá schopnost remote wakeup¹ nebo na 2.5 mA, pokud má schopnost remote wakeup [12, str. 32].

Hvězdicovitá topologie umožňuje místo zařízení připojit do portu rozbočovač (hub). Každý rozbočovač má na svém výstupu USB porty, do kterých lze připojovat další zařízení, respektive huby. Maximální počet hubů zapojených v sérii je 5. Toto omezení je dáno přirozeně vznikajícím zpožděním v každém hubu. Nejvyšší možný počet zároveň připojených zařízení včetně hubů je 127. Verze sběrnice USB 1.1 je povolena délka propojovacího kabelu 3 m, u USB verze 2.0 je to již 5m. [12, str. 447].

První generace USB standardu označovaná jako USB 1.1 umožňuje zařízením přenos na dvou rychlostech low speed (1.5 Mbit/s) a full speed (12 Mbit/s) i nižší z obou rychlostí mnohonásobně překračuje možnosti sériového portu. Volba rychlosti přenosu probíhá 1.5 k Ω pull-up rezistorem na linku D+ pro full speed respektive D- pro low speed zařízení. Schéma

¹Remote wakeup je schopnost probudit master zařízení z USB suspend režimu. Typické použití je probuzení notebooku z úsporného režimu při zmáčknutí klávesy nebo kliknutí myši.

zapojení je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Zapojení pull-up rezistoru pro výběr rychlosti. Vlevo low a vpravo full speed zařízení.

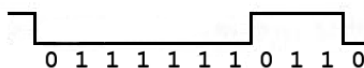
Ukázalo se, že přenosové rychlosti první generace USB nedosahují dostatečných velikostí pro nově vyvinutá zařízení jako například externí pevné disky, flash paměti, digitální fotoaparáty nebo kamery. Proto byla na konci roku 2001 standardizována specifikace USB 2.0. Teoretická propustnost se zvýšila téměř čtyřicetnásobně na 480 Mbit/s (high speed). Zároveň zůstala zachována zpětná kompatibilita se starším hardware. Volba rychlosti USB 2.0 zařízení probíhá softwarově. Zařízení se tváří jako full speed s pull up rezistorem na D+ a komunikací s operačním systémem si vyjedná vyšší přenosovou rychlost.

2.2 Přenos dat

Na sběrnici USB může být pouze jedno zařízení typu master. Tím je obvykle stolní PC, laptop nebo některý typ PDA. Veškerá aktivita na sběrnici vychází od master zařízení. Žádné jiné zařízení nemůže vysílat data samo od sebe. Data se po sběrnici posílají v rámcích (frame) o délce přesně 1 ms. V rámci jednoho framu běžně posílá své pakety několik zařízení, přičemž se mohou vyskytovat pakety s low i full speed přenosovými rychlostmi. High speed přenos se uskutečňuje v mikrorámčích o délce $125 \mu\text{s}$, jimiž se vyplní 1 ms rámeček.

Po sběrnici se nepřenáší hodinový signál. Na začátku každého rámce se vysílá synchronizační signál. Na ten se všechna zařízení zasynchronizují a během přenosu zachovávají časování. Délka paketu může být 8 až 1024 bajtů. Samotný přenos dat se děje diferenciálně. To znamená, že různým logickým úrovním odpovídají stavy D+ na 3.3 V, D- na 0 V a D+ na 0 V, D- na 3.3 V. D+ i D- na úrovni 0 V znamenají reset sběrnice.

Kódování použité na sběrnici je NRZI (Non-Return to Zero Inverted) se vsouváním bitů (bit stuffing). NRZI funguje tak, že každá nula v datech vede ke změně úrovně. Jedničky nechávají logickou úroveň nezměněnou. Vsouvání bitů se uskutečňuje z důvodu hrozící ztráty synchronizace. Vsouvá se nula po každých šesti po sobě jdoucích jedničkách. Tím se vynutí změna úrovně přenosu. Vsunutá nula se v přijímajícím zařízení opět odstraní, takže se nijak neprojeví. Sekvence bitů 011111110, jak se fyzicky přenáší po sběrnici, je znázorněna na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Přenos 011111110 pomocí NRZI kódování a vsouvání bitů. Vsunutá nula je podtržená.

Přes USB lze připojit velmi širokou paletu zařízení, například myš, klávesnici, pevný disk, flash paměť, digitální fotoaparát, tiskárnu nebo zvukovou kartu. Různé periferie mají rozdílné požadavky na přenos. Myš nebo klávesnice přenáší velmi málo dat, ale potřebují rychlou a pravidelnou odezvu. Flash paměť nebo tiskárna přenáší velké objemy dat, ale není potřeba krátkých přístupových dob. Zvuková karta potřebuje oboje. Rychlou odezvu i velkou datovou propustnost. Aby sběrnice zvládla všechny tyto různorodé požadavky, probíhá přenos několika typů. Každý má jiné vlastnosti a využívá jej jiná třída zařízení.

Bulk přenos je určen pro situace, kdy není důležitá přenosová rychlost ani odezva. Příklad je přenos souboru do tiskárny nebo skenování. Při tomto použití mohou přenosy v případě nutnosti počkat, pokud je sběrnice vytížená jinými typy přenosů, jež mají garantovanou přenosovou rychlost. Pokud sběrnice není vytížená, bulk přenos je velmi rychlý.

Interrupt přenos je určen pro zařízení, jež potřebují periodicky obsloužení od mastera sběrnice. Jedná se o jediný druh přenosu, kterým mohou komunikovat low speed zařízení. Klávesnice a myši používají interrupt přenos k neustálému odesílání dat o pohybu kurzoru a zmáčknutých klávesách.

Izochronní přenosy mají garantovanou odezvu, ale na rozdíl od ostatních typů přenosů není zajištěna kontrola dat. Ostatní typy přenosů při chybě opakují transakci. V případě izochronního přenosu to vzhledem ke garantované odezvě není možné, takže zařízení musí být schopna vyrovnat se s malými chybami v datech. Izochronních přenosů využívají externí zvukové karty pro přenos dat, která mají být přehrána v reálném čase. Občasná chyba v přenosu je v takovém případě snesitelnější než výpadek datového toku.

Posledním typ přenosu se nazývá kontrolní (control). Tento druh přenosu je určen výhradně pro mastera ke zjišťování specifikací připojených zařízení, nastavování jejich adres nebo vybírání konfigurací. Kontrolní přenos musí na rozdíl od všech ostatních typů podporovat každé USB zařízení. Ostatní typy přenosů jsou typické pro jistý druh periférií a není důvod, proč by tiskárna podporovala interrupt nebo izochronní přenos.

Všechny přenosy dat putují buď do tzv. koncového bodu (endpoint) nebo z něj. Koncový bod je obvykle tvořen blokem paměti nebo registrem v řídicím obvodu daného zařízení. Každý koncový bod přenáší data pouze v jednom směru. Koncových bodů může jedno high nebo full speed zařízení obsahovat až 32-16 vstupních (in) a 16 výstupních (out). Low speed zařízení jsou omezena pouze na dva endpointy. Vstupní a výstupní endpointy se posuzují podle master zařízení. Z hlediska softwaru se po inicializaci každý endpoint chová jako logická roura, která přenáší data daným typem přenosu a daným směrem. Od topologie rozbočovačů a zařízení je zcela abstrahováno.

3 Zvolená koncepce

Před započítím návrhu je vždy potřeba udělat rozvahu nad tím, jaké řešení bude použito. V případě komunikace po USB sběrnici jsem po jisté době hledání zjistil, že existuje velmi široká paleta možností. Prakticky každý významnější výrobce elektroniky má svoje řešení. Někteří výrobci dodávají i několik různých způsobů, jak komunikaci zařídit. Pevné základy znalostí v tomto směru mi poskytly zejména knihy [12], [11] a známý vyhledávač Google.

Většina komunikace je řešena tak, že příslušná firma vybavila některou svoji řadu již vyráběných a ověřených mikroprocesorů SIE¹ jednotkou pro USB a přidala několik řídicích registrů. Příklady takových řešení jsou 68HC05 68HC08 od Motoroly, PIC16C7x5 od Microchipu, Intel 8051UX od Standard Microsystems, AN2121 od Cypress Semiconductor, StrongARM od Intelu, ...

Tato řešení mají nevýhodu v tom, že obsluha USB rutin se musí naprogramovat do firmware mikroprocesoru. To jednak snižuje odezvu procesoru a to omezuje použití procesoru pro další měřicí a řídicí účely. Za druhé je potřeba znalost příslušného mikroprocesoru a způsobu jeho programování, což je v některých případech pouze assembler. A to je je krajně nepohodlný programovací jazyk. Výhodou řešení založených na mikroprocesoru je velká flexibilita.

Takovéto řešení není ideální pro cíle této práce. Cílem komunikace po USB sběrnici je pouze přenášet data. Přičemž struktura dat bude v podstatě libovolná díky tomu, že její bude obsluhovat vlastní aplikace. Z toho důvodu není potřeba splňovat jakékoli podmínky na komunikaci pevně definované pro danou třídu USB zařízení jako třeba HID² pro myši nebo klávesnice a USB Mass Storage pro flashdisky.

Pro naše účely je daleko flexibilnějším řešením je speciální obvod, který převede USB do některého mikrokontroléry běžně používaného rozhraní například SPI, I²C, Microwire nebo USART. Takovýchto obvodů je k dispozici spousta od různých výrobců například USBN9603 od National Semiconductor, PDIUSB od Philips, FT232 od FTDI,...

Rozhodl jsem se pro obvod FT232R od firmy FTDI. Důvodů pro toto rozhodnutí je několik. Prvním je snadná dostupnost na českém trhu a druhá je převod na USART rozhraní. To jsou klíčové vlastnosti, které značně usnadňují použití.

Dalším důvodem je široká multiplatformnost dodávaných ovladačů. Pokryty jsou snad všechny dnes myslitelné platformy včetně Windows Mobile pro PDA zařízení. Mimo proprietárních ovladačů s uzavřeným zdrojovým kódem je k dispozici i ovladač v licenci GPL s názvem Libftdi.

V neposlední řadě je potřeba započítat kvalitu a dostupnost dokumentace dokonce i v češtině. Kniha [10] mi byla cenným zdrojem inspirace po koncepční stránce v kapitole 10 je

¹Jednotka sériového rozhraní (Serial Interface Engine).

²Zařízení lidského rozhraní (Human Interface Device).

navrženo podstatně jednodušší nicméně koncepčně velmi podobné zařízení. Nevýhodou knihy [10] je skutečnost, že používá předchozí generaci obvodu FT232B, který se zapojuje odlišně než současné generace FT232R, a vyžaduje několik podpůrných součástek. Tím pádem se kniha hodí spíše pro inspiraci ve fázi návrhu než, ža by byla zdrojem zapojovacích schémat.

Dalším obvodem, který je potřeba zvolit je srdce celé aplikace - řídicí mikrokontrolér. Jeho úkolem bude posílat hodnoty vstupů obvodu FT232R a zároveň přijímat příkazy k nastavení výstupů. V podstatě jsou možné dva přístupy. Malý mikroprocesor s velkým množstvím připojených periférií nebo velký mikroprocesor, který má již vše potřebné vestavěno. Zvolil jsem druhou variantu, protože umožňuje rychlejší vývoj a snadnější modifikovatelnost.

Volba mikroprocesoru je komplikovaný problém a striktně vzato nemá správnou odpověď³. Na trhu existuje spousta výrobců nabízejících své mikrokontroléry. Nejvhodnější volbou se po průzkumu trhu shledal 8-bitové mikroprocesory firmy Atmel. Jsou navrženy s ohledem na programování primárně v jazyce C, které je daleko pohodlnější než assembler. Konkurenční 8-bitové mikroprocesory od firmy Freescale nebo Microchip mají v podstatě shodné vlastnosti. Nicméně jejich návrh od počátku nepočítá s vývojem firmware ve vyšších programovacích jazycích. Tato vlastnost byla dodělána dodatečně. To spolu s omezenější instrukční sadou způsobuje, že při stejné frekvenci se stejný kód neprovádí stejně rychle.

Pro mikroprocesory firmy Atmel existuje mimo upravené verze populárního kompilátoru gcc i sada vývojových nástrojů se svobodnou licencí. To rozhodně nelze říct o všech na trhu dostupných mikroprocesorech, kde licenční poplatky za vývojové nástroje dosahují nemalých částek. Instalační program svobodného vývojového prostředí WinAVR je k dispozici na doprovodném CD. Mimo něj je možné k vývoji použít AVR Studio od samotné firmy Atmel i s proprietárním kompilátorem.

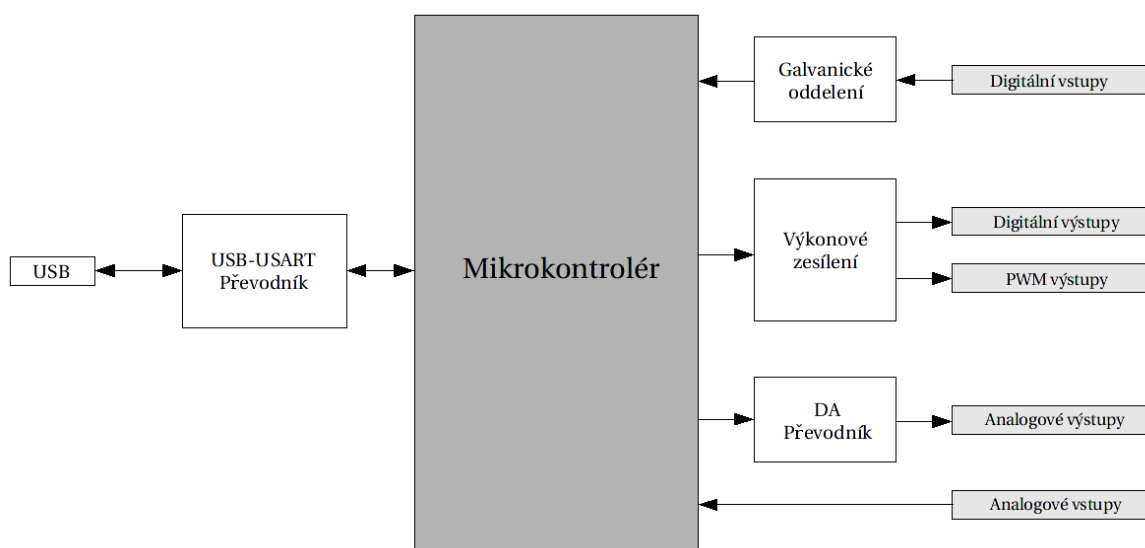
Jedná-li se o samotné vstupy a výstupy modulu je vhodné je nějakým způsobem ošetřit. Vyvádět přímo nožičky mikroprocesoru je poměrně riskantní, jelikož chyba zapojení vnějších zařízení může vyřadit celou měřicí desku. Proto je vhodné digitální vstupy galvanicky oddělit. Ideální volbou jsou optovazby. Mimo šumově eliminačních vlastností disponují průrazným napětím v řádu kV.

Pro digitální a PWM³ výstupy, které mají být schopny snášet výkonovou zátěž, je vhodné ošetřit jejich výstupy nějakým druhem zesilovače. Nejvhodnějším řešením je výkonový darlingtonový tranzistor spínaný proti vnější výkonové zemi, jehož kolektor vyvedeme jako výstup.

Jedním ze způsobů, jak ošetřit analogové vstupy, je speciální typ optovazby s lineárním přenosem. To ovšem přináší komplikace s napájením. Není dost dobře možné napájet jedním vodičem logiku a zároveň na stejném vodiči měřit analogový signál. Vnější napájení by zkomplikovalo použití analogových vstupů do té míry, že jsem se rozhodl od ošetření analogových vstupů upustit.

Blokové schéma navrhovaného zařízení je na obrázku 3.

³Pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)



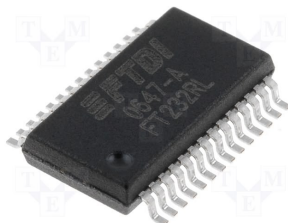
Obrázek 3.1: Blokové schéma navrhovaného zařízení.

4 Použité integrované obvody

4.1 FT232R - USB USART převodník

Jak napovídá název obvodu, jeho hlavní využití spočívá v převodu mezi sériovým rozhraním a USB. Zjednodušeně řečeno, z jedné strany se do čipu přivedou datové vodiče USB a z druhé strany je sériové rozhraní. Zbytek zařídili inženýři, kteří obvod navrhovali. Jediný problém, který obvod dělí od úplné kompatibility s RS232, je nízká napěťová úroveň vývodů daná 5 V napájecím napětím na USB sběrnici. Připojením převodníku urovná MAX232 lze tuto obtíž jednoduše vyřešit. Tím získáme velmi snadno převodník z USB na sériový port včetně správných napěťových úrovní.

Obvod se vyrábí ve dvou verzích FT232RL a FT232RQ. Obě varianty se liší pouze pouzdrem. FT232RL se dodává v SSOP-28 a FT232RQ v QFN-32. Fotka pouzdra SSOP-28 FT232RL je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Převodník FT232RL.

Sériové rozhraní čipu je opatřeno všemi běžně využívanými vlastnostmi. Lze měnit počet datových bitů a stop bitů, kontrolovat sudost nebo lichost parity, existuje možnost volby XON/XOFF, DTR/DSR, RTS/CTS nebo žádného hardwarového řízení toku. Zařízení je opatřeno 256 bytovou přijímací a 128 bytovou odesílací FIFO vyrovnávací pamětí. Přenosové rychlosti sériového rozhraní je možné vybírat z intervalu 300 Bd až 1 MBd.

Oproti předchozí generaci označované jako FT232B obvod doznal řady podstatných změn a vylepšení. Nejviditelnější změnou je absence vnějšího krystalu, EEPROM a pro USB charakteristického 1.5 k Ω pull-up rezistoru. Všechny součástky jsou integrovány uvnitř čipu, což zlevňuje konstrukci a zjednodušuje návrh plošných spojů.

Další novinkou je FTDIChip-IDTM, což je unikátní seriové číslo zapsané do každého vyrobeného obvodu. Toto číslo se nedá uživatelsky změnit. To umožňuje obvod použít jako součást ochrany proti kopírování komerčního software.

Na první pohled nedůležitou schopností obvodu se může zdát BitBang režim. V tomto režimu se mohou linky modemu změnit v paralelní vstupně-výstupní port. K dispozici je syn-

chronní¹ a asynchronní² přenos. Díky tomuto režimu je možné jednodušší periferie navrhnout bez použití řídicího mikroprocesoru.

Jedná-li se o software, tak výrobce obvodu dává k dispozici na svém webu dva typy ovladačů. Prvním je VCP, což je zkratka pro Virtual Communication Port. Tento ovladač neumožňuje využití některých pokročilých funkcí. Na druhou stranu umožňuje převod již existujících aplikací, jež využívají služeb sériového portu na sběrnici USB, bez nutnosti výrazných změn v obslužné aplikaci. Ovladač pracuje tak, že v systému vytvoří virtuální sériový port, ke kterému lze přistupovat pomocí standardních funkcí daného operačního systému pro přístup k zařízení. Tento ovladač je dle [1] k dispozici pro operační systémy Windows 98, 98SE, ME, 2000, Server 2003, XP, Server 2008, XP, XP 64-bit, XP Embedded, Vista, Vista 64-bit, CE 4.2, 5.0 a 6.0, Mac OS 8/9/X a Linux ≥ 2.4 .

Další typ ovladače má název D2XX. Tento ovladač umožňuje využití všech funkcí obvodu FT232R, včetně přístupu do EEPROM a režimu BitBang. Spolu s ovladačem pro příslušný operační systém se dodává i dynamicky linkovaná knihovna s funkcemi, které aplikace využívají. Jeho podstatnou nevýhodou je uzavřený vývoj. Výrobce nedává k dispozici zdrojové kódy. Tento ovladač je dle [1] k dispozici pro operační systémy Windows 98, 98SE, ME, 2000, Server 2003, XP, Server 2008, XP, XP 64-bit, XP Embedded, Vista, Vista 64-bit, CE 4.2, 5.0 a 6.0 a Linux ≥ 2.4 .

V této práci je preferovaný způsob komunikace knihovna s názvem Libftdi. Tento ovladač ke své funkci používá Libusb 0.1. Libusb je knihovna pro přístup k USB zařízením, která se snaží nabídnout API³ funkce nezávislé na operačním systému. Tím pádem není potřeba pro každý operační systém psát kód pro jeho jádro. To je technologicky a časově mnohem náročnější, než napsat ovladač pouze jednou, a pak jej jednoduše překompilovat pod jiným operačním systémem. Libftdi je k dispozici na platformách, pro něž existuje port Libusb. To jest Linux, Mac OS X, Darwin, 32-bitové Windows, NetBSD, FreeBSD a OpenBSD. Jak libusb, tak libftdi je svobodný software v licenci GPL. Tím pádem je k dispozici zdrojový kód, který je možné libovolně měnit a zkoumat jeho fungování bez porušení jakýchkoliv licenčních smluv.

4.2 UMS3 - DIP-24 USB USART převodník

Modul UMS3 od firmy Asix je založen na čipu FT232R. Mimo samotného obvodu FT232R se na plošném spoji nacházejí pouze filtrační kondenzátory na napájecích vstupech VCC, VIO a 3V3OUT, jak je patrné z obrázku 4.2. Hlavní výhodou modulu je snadná manipulace a používání. Nevýhodou je několikanásobně vyšší cena ve srovnání s obvodem FT232R. Plošný spoj modulu je navržen tak, že vývody jsou rozměrově kompatibilní s pouzdrem DIP-24. Toto pouzdro umožňuje mimo jiné značně jednodušší pájení nebo použití v kontaktních polích, což by šlo jen velmi těžko s malými SSOP-28 nebo ještě hůře s QFN-32 pouzdry, v nichž se čip FT232R dodává.

¹Zápis i čtení probíhá zároveň.

²Zápis a čtení jsou nezávislé.

³Aplikační programové rozhraní (Application Programming Interface)



Obrázek 4.2: Modul UMS3.

4.3 MCP4922 - Dvojkánalový D/A převodník

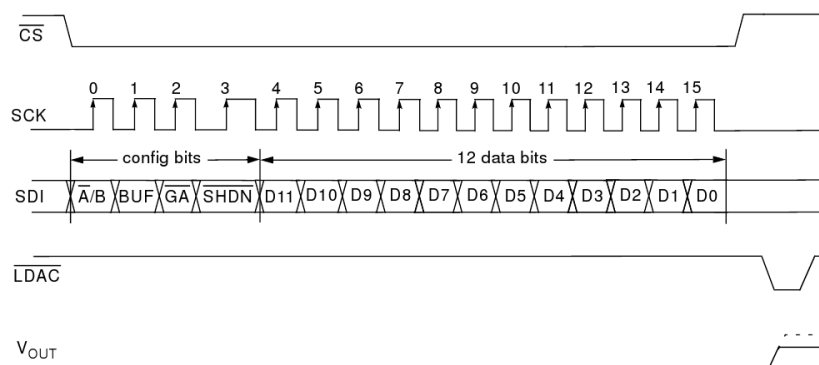
Obvod MCP4922 vyrábí firma Microchip. Jedná se digitálně analogový převodník se dvěma analogovými kanály a 12-bitovým rozlišením. Typická doba ustalování výstupního napětí je $4.5 \mu s$. Převodník pracuje na principu rezistorové kaskády zapojené jako dělič napětí. Výstupní napětí V_{OUT} může mít díky integrovanému zesilovači referenčního napětí V_{REF} velikosti až $2V_{REF}$. Výstupní napětí se řídí vztahem

$$V_{OUT} = G \frac{V_{REF} D}{2^{12}}. \quad (4.1)$$

G značí zesílení a nabývá hodnot $\times 1$ nebo $\times 2$. D je digitální hodnota poslaná převodníku.

Diferenciální nelinearita dosahuje nejvýše hodnoty $\pm 0.2 \text{ LSB}^4$, integrální nelinearita $\pm 2 \text{ LSB}$ [5, str 2]. Na výstup převodníku je možné připojit interní zesilovač zapojený jako sledovač. Díky tomu se dramaticky zvýší vstupní impedance a omezí se oscilace při použití zátěže s vysokou kapacitou. Pokud se zesilovač nepoužije, je vstupní impedance převodníku $167 \text{ k}\Omega / 7 \text{ pF}$ [5, str 2]. Omezení napětí a offset nulové hodnoty při použití výstupního zesilovače jsou velmi malé. Přesné hodnoty lze najít v [5].

Komunikace s převodníkem probíhá po sběrnici SPI^{TM5} s maximální hodinovou frekvencí 20 MHz. Průběh signálu a pořadí bitů v řídicí sekvenci je na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Přenos dat D/A převodníku MCP4922.

\overline{CS}^6 signál slouží k vybraní převodníku pro komunikaci. SPITM sběrnice umožňuje připojení více zařízení. Pomocí \overline{CS} se vybírá, které zařízení na sběrnici bude přijímat následující vysílaná

⁴Nejméně významný bit (Least Significant Bit).

⁵Sériové rozhraní pro periferie (Serial Peripheral Interface).

⁶Výběr čipu (Chip Select).

data. SCK^7 je hodinový signál sběrnice.

Po SDI^8 proudí data. Jejich struktura je

- \bar{A}/B Bit sloužící pro výběr výstupu, pro který budou platit následující data.
- BUF Připojení nebo odpojení výstupního zesilovače a tím pádem i volba impedance výstupu.
- \bar{GA} Invertovaná hodnota zesílení referenčního napětí. Pro G z rovnice 4.1 platí vztah $G = GA + 1$.
- \bar{SHDN} Softwarové vypnutí převodníku kvůli snížení spotřeby. Mimo tento druh vypnutí má obvod ještě nožičku sloužící ke stejnému účelu se shodným názvem. Vypnutí pomocí vývodu umožňuje odpojit i přenosovou logiku SPI^{TM} rozhraní a snížit spotřebu proudu na $1.5 \mu A$. Softwarové vypnutí má spotřebu $5 \mu A$.
- D11..D0 12-bitové číslo určené k převodu na napětí podle rovnice 4.1.

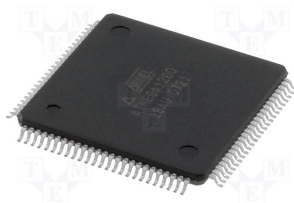
\bar{LDAC} vývod na převodníku umožňuje po předchozím sériovém odeslání dvou digitálních hodnot pro oba kanály současné přivedení napětí na oba výstupy.

Další detaily ohledně časových přesahů nebo náběžných a sestupných dob nutné k správnému naprogramování komunikace lze nalézt v [5, str 6].

4.4 ATmega1280 - Osmibitový RISC mikroprocesor

Mikroprocesor ATmega 1280 je výrobkem firmy Atmel. Jedná se o osmibitový RISC⁹ mikroprocesor. Paleta jeho vlastností a funkcí je velmi pestrá a široká. Podrobný popis všech vlastností je k dispozici v [3].

Procesor je vybaven 16 multiplexovanými A/D převodními kanály s převodníkem o rozlišení 10 bitů. Dále obvod obsahuje čtyři nezávislé 16 bitové časovače schopné generovat PWM signál. Dalšími důležitými vlastnostmi je maximální povolená taktovací frekvence 16MHz. Některé z portů jsou opatřeny logikou pro komunikaci po známých sběrnících jako USART, SPI, nebo I²C či Microwire.



Obrázek 4.4: Fotka mikroprocesoru ATmega1280-16AU

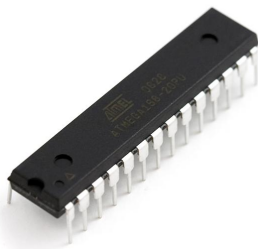
⁷Sériový hodinový signál (Serial Clock).

⁸Sériová data dovnitř (Serial Data In).

⁹Počítač s redukovanou instrukční sadou (Reduced Instruction Set Computer).

4.5 ATmega168 - Osmibitový RISC mikroprocesor

Mikroprocesor ATmega168 má shodnou instrukční sadu a jeho kód je binárně kompatibilní s procesorem ATmega1280. Rozdíl mezi oběma obvody je pouze v počtu zastoupení jednotlivých funkcí. Výhodou mikroprocesoru je, že se dodává i v DIP-28 pouzdře, které je použitelné při vývoji v kontaktním nepájivém poli. Detailní specifikace mikroprocesoru lze nalézt v [4].



Obrázek 4.5: Fotka mikroprocesoru ATmega168-20PU

4.6 PC849 - Čtyřnásobná analogová optovazba

Optovazbu PC849 vyrábí firma Sharp. Ze schématu zapojení integrovaného obvodu na obrázku 4.6 je patrné, jak optovazba pracuje. Na jedné straně je LED dioda, která vyzařuje v infračerveném spektru, a na straně druhé je fototranzistor. Kolektorový proud je řízen množstvím dopadajícího světla a to je učeno proudem procházejícím LED diodou. Diody a fototranzistory jsou v DIP-16 pouzdře integrovaného obvodu PC849 umístěny čtyři.

Hlavní charakteristikou optovazby je převodní poměr C_{TR} ¹⁰ mezi proudem tekoucím diodou I_F a kolektorovým proudem I_C .

$$I_C = C_{TR} I_F \quad (4.2)$$

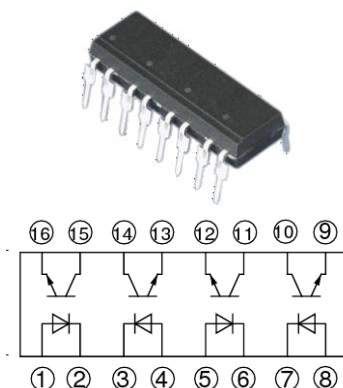
Optočlen PC849 má C_{TR} v rozmezí 50% až 400%. Typicky je však tato hodnota mezi 100% a 140% podle [7, str 3].

Uspořádání optovazby umožňuje galvanicky oddělit větve obvodu s různými potenciály nebo impedancemi a zároveň je schopno přenášet signál. Výhodou optického přenosu je mimo galvanického oddělení ještě eliminace šumu a ochrana proti přepětí. Optovazba PC849 je schopna vydržet bez proražení rozdíl potenciálů až 5 kV po dobu jedné minuty. Nevýhoda optovazby je zpoždění signálu a neschopnost přenášet vysoké frekvence. Typická doba reakce na změnu signálu na vstupní diodě je zhruba 5 μ s. Detaily lze najít v [7, str 3].

4.7 6N134 - Dvojnásobná optovazba pro přenos digitálních dat

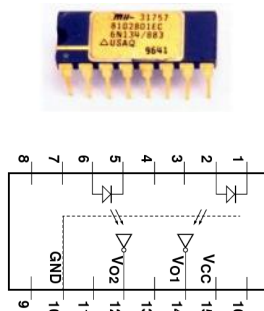
Optovazba je výrobkem firmy Hewlett-Packard. Schéma a fotografie obvodu jsou na obrázku 4.7. Místo fototranzistoru, který obsahuje výstup PC849, je 6N134 na výstupech vybaven negovaným hradlem CMOS úrovně. Díky tomu se dá dosahovat přenosových rychlostí až

¹⁰Proudový převodní poměr (Current Transfer Ratio).



Obrázek 4.6: Fotka a schéma optovazby PC849.

10 Mbit/s. Výstup je na logické jedničce pokud proud vstupní LED diodou je menší než $250 \mu\text{A}$ a na logické 0, jestliže je tento proud v rozmezí 10 mA až 20 mA. Průrazné napětí optočlenu je 1.5 kV.



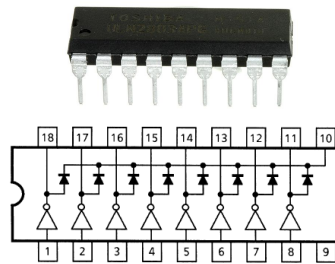
Obrázek 4.7: Schéma a fotka 6N134 v DIP-16 pouzdře.

4.8 ULN2803A - Osmikanálové darlingtonové pole

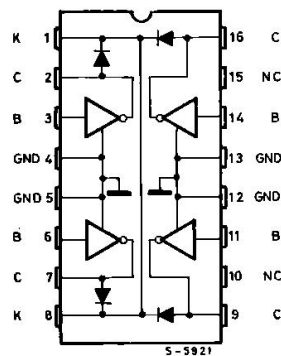
Známý integrovaný obvod ULN2803A tvoří 8 NPN darlingtonových tranzistorových párů. Schéma a fotografie obvodu jsou na obrázku 4.8. Vstupy obvodu jsou opatřeny hradlem, jež je schopno komunikovat se logickými úrovněmi TTL a CMOS. Každý výstup je zatížitelný proudem 500 mA a napětím 30 V. Zátěž může mít indukční charakter, protože v obvodu jsou obsaženy i ochranné diody pro každý výstup. Změna úrovně trvá typicky 10 ns.

4.9 ULN2064B - Čtyřkanálové darlingtonové pole

Obvod ULN2064B je navržen prakticky stejně jako ULN2803A. Pracuje s TTL nebo CMOS vstupem. Pouze výstupy jsou schopny většího výkonového zatížení. Každý ze čtyř darlingtonových tranzistorů obsažených v obvodu je schopen dodávat proud do 1.5 A pod napětím 30 V. Schéma obvodu je na obrázku 4.9. Změna úrovně zabere obvodu obvykle $1.5 \mu\text{s}$.



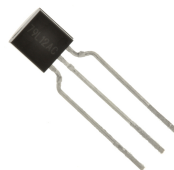
Obrázek 4.8: Fotka a schéma darlingtonového pole ULN2803A



Obrázek 4.9: Schéma darlingtonového pole ULN2064B

4.10 LM385 - Napěťová reference 2.5 V

LM385 je napěťová referenční dioda s výstupním napětím 2.5 V. Tolerance referenčního napětí je 1%. Pracovní proudy se pohybují v rozmezí 10 μA až 20 mA. Výstupní impedance má velikost do 1.5 Ω a teplotní drift je 20 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ¹¹. Dioda je vyfocena na obrázku 4.10.



Obrázek 4.10: Fotka napěťové referenční diody LM385.

¹¹Část z milionu (Part Per Milion).

5 Prototyp

5.1 ATmega168 UMS3

Před samotnou stavbou konečné verze zařízení jsem se rozhodl v kontaktním nepájivém poli postavit zjednodušenou verzi měřicí desky. Kontaktní pole umožňuje velmi rychle přidávat a odebrat součástky a změnit zapojení, pokud něco nefunguje. To na tištěném spoji není dost dobře možné. Na zjednodušené verzi jsem vyvinul, odladil a otestoval software pro PC a firmware pro mikrokontrolér. Firmware jsem psal tak, aby šel jednoduše rozšířit pro konečnou verzi desky s větším mikroprocesorem.

Schéma a fotka zařízení, které jsem postavil na kontaktním nepájivém poli, je na obrázku 5.1. Jako řídicí jednotku jsem použil mikroprocesor ATmega168 od Atmelu. Důvod pro použití tohoto mikroprocesoru je jeho DIP-28 pouzdro, které je vhodné pro zasunutí do nepájivého pole. Mikroprocesor ATmega1280 zapájený v konečné verzi měřicí desky se v DIP pouzdře nevyrábí. Oba procesory mají stejnou instrukční sadu. Takže není problém přenášet mezi nimi napsaný kód. Pokud se týká funkcí, tak ATmega168 má všechny použité vlastnosti. Rozdíl je pouze v jejich počtu. Mikroprocesor je taktován externím krystalem na 20 MHz.

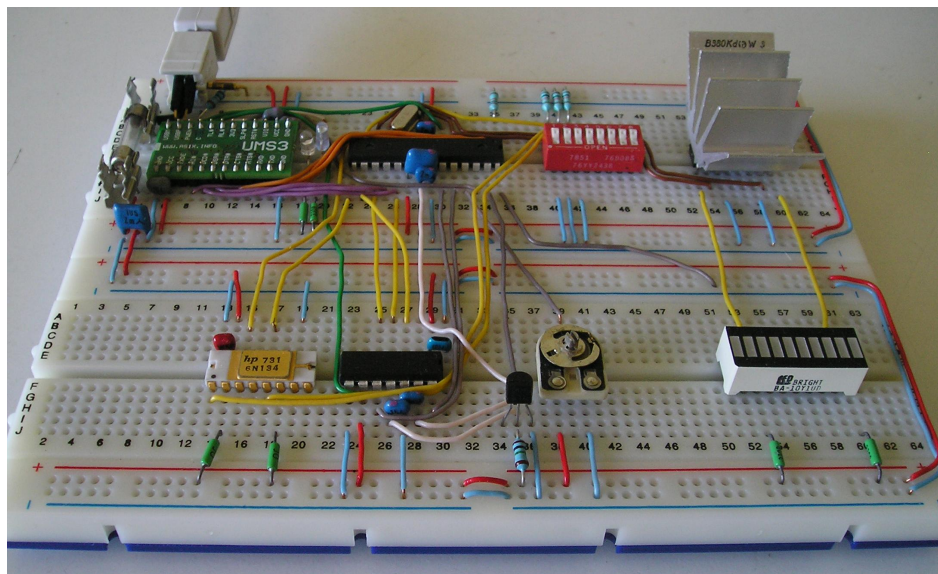
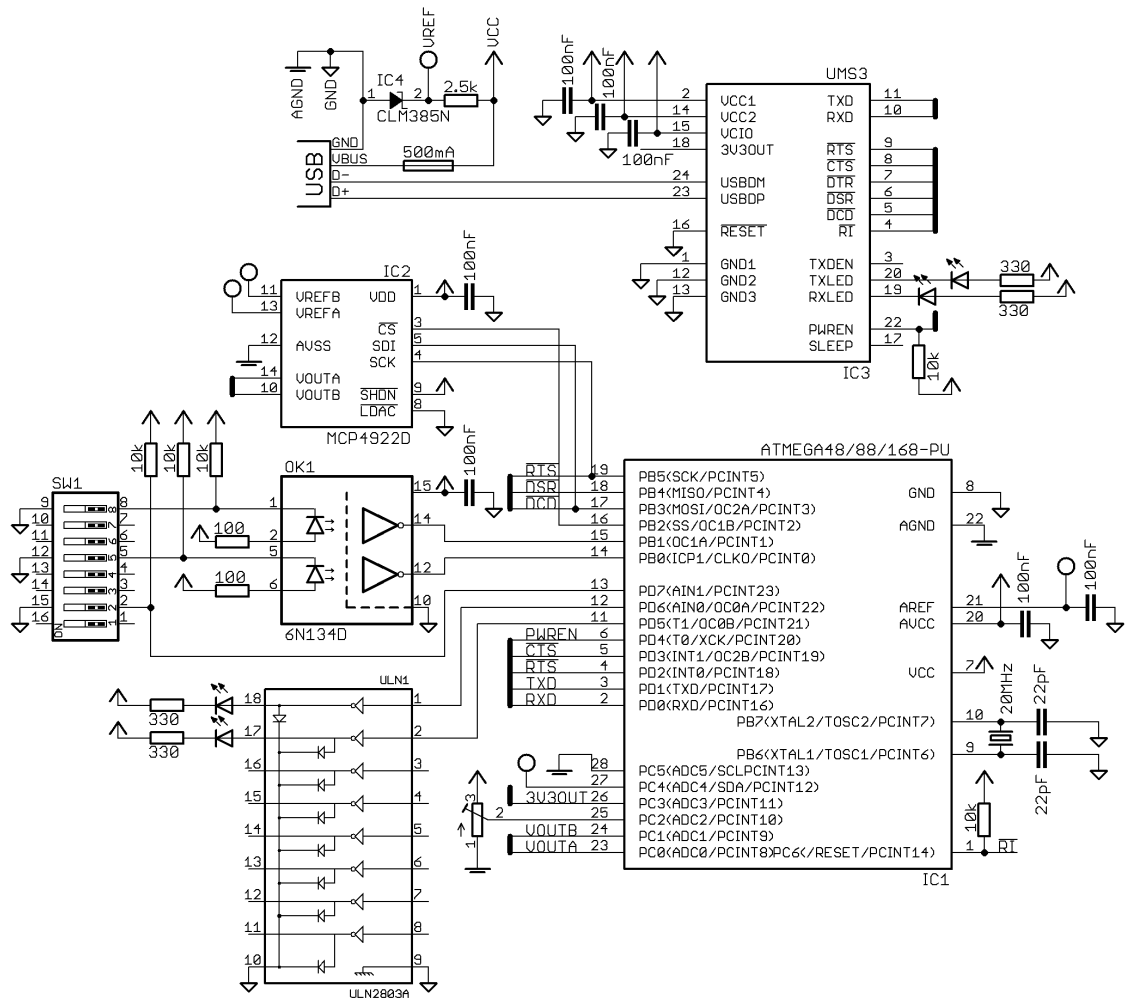
A/D převodník integrovaný v mikroprocesoru umožňuje volbu z několika napěťových referencí. Je možné použít VCC, vstup pro referenční napětí AREF nebo interní 1.1 V napětí. Vstupy jsou zapojeny k různým zdrojům napětí, aby bylo možno zkontrolovat jejich správnou funkčnost. Jsou připojeny výstupy D/A převodníku, napěťová reference, potenciometr zapojený jako dělič napětí a 3.3 V výstupní napětí modulu UMS3.

Převod USB na sériové rozhraní obstarává modul UMS3, v němž je zapájen obvod FT232R. Na příslušné vývody modulu jsou připojeny LED diody signalizující příjem a odesílání dat spolu s rezistory 330 Ω omezujícím proud diodami, aby nedošlo k jejich spálení. Sériové rozhraní UMS3 je připojeno na USART jednotku mikroprocesoru. Při komunikaci je použito hardwarové řízení toku pomocí modemových signálů RTS/CTS, aby nedošlo k přetečení vyrovnávacích FIFO pamětí na obou stranách.

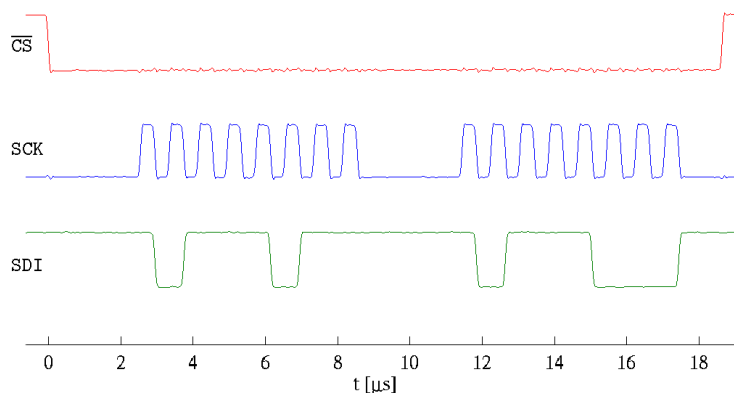
Jako zdroj referenčního napětí 2.5 V pro převodníky A/D a D/A je použita dioda LM385 s rezistorem 2.5 k Ω , který omezuje procházející proud na 1 mA.

D/A převodník MCP4922 je připojen přes SPI rozhraní k mikroprocesoru, který mu posílá řídicí sekvence. Z důvodu nedostatku nožiček mikrokontroléru ATmega168 nejsou zapojeny vstupy SHDN a LDAC. SHDN je připojen na VCC a SHDN na GND. Nicméně kód pro režim USB suspend byl otestován, když byl signál SHDN přiveden místo jednoho z digitálních vstupů. Výstupy D/A převodníku jsou připojeny na vstupy A/D převodníku, aby bylo možno kontrolovat funkčnost.

Neocenitelnou pomocí při ladění kódu pro přenos dat k D/A převodníku po SPI sběrnici byl paměťový čtyřkanálový osciloskop LeCroy z Elektronického praktika. S jeho pomocí se velmi rychle dařilo opravovat chyby v kódu, které by jinak byly mnohem hůře odhalitelné.



Obrázek 5.1: Schéma a fotka prototypu s mikroprocesorem ATmega168.



Obrázek 5.2: Osciloskopem zachycený přenos řídicí sekvence pro D/A převodník.

Změřená podoba řídicí sekvence z obrázku 4.3 je znázorněna na obrázku 5.1.

Další obvod, který se nachází na prototypu, je výkonový stupeň ULN2803A. Napájení výkonového zesílení je řešeno z USB sběrnice stejně jako napájení celé aplikace. To, že chybí výkonější externí zdroj není pro testování funkčnosti na škodu. K vstupům výkonového stupně jsou připojeny dva vývody mikroprocesoru. Jeden z nich slouží jako PWM a druhý, jako digitální výstup. Zátěž představují LED diody s rezistory omezujícími proud.

Dále deska obsahuje optovazbu 6N134, která ošetřuje dva digitální vstupy. Vstupní proud optovazby je omezen 100 Ω rezistorem. Spínání digitálních vstupů je řešeno vypínačovým polem. Spínače jsou zapínány proti zemi. Pokud jsou spínače rozepnuté, tak je signál tažen vzhůru na VCC 10 k Ω pull-up rezistorem.

Před sestavením prototypu s mikroprocesorem ATmega168 jsem postavil několik jiných obvodů, které sloužily převážně k otestování BitBang režimu čipu FT232R. Fotografie, zapojovací schémata a kontrolní aplikace těchto obvodů lze nalézt na doprovodném CD.

Při tomto testování mně napadlo, že by se BitBang režim obvodu mohl využít k programování mikrokontroléru. Běžně se procesory ATmega programují přímo v aplikaci pomocí vyvedení ISP¹ konektoru, kam se připojí externí programátor. Využití BitBang režimu by eliminovalo externí programátor, čímž by se zvýšila pohodlnost použití a flexibilita měřící desky. Taktéž by se snížily náklady na vývoj.

Nepříjemné bylo zjištění, že jsem nebyl první, kdo s touto myšlenkou přišel. Dokonce už existuje několik aplikací schopných mikrokontroléry pomocí BitBang režimu programovat. To po chvíli přemýšlení trochu zmírnilo mé rozladění, jelikož nejsem nucen do všech detailů studovat ISP programovací protokol a psát vlastní software.

Existuje patch na populární programovací nástroj Avrdude, který přidává nový typ programátoru schopného obsluhovat obvod FT232R. Aplikace patche a kompilování ze zdrojových kódů není pro běžné použití ideální a ne každý je toho schopen. Výhodou ale je, že se jedná o svobodný software s otevřeným zdrojovým kódem.

Dalším programem schopným zapsat program do FLASH paměti mikroprocesoru Atmel

¹Programování v rámci systému (In System Programming).

se jmenuje Ftisp. Jedná se o freeware využívající proprietární D2XX ovladače, které je nutné mít nainstalované, což je mnou považováno za nevýhodu. K dispozici je verze pro 32-bitové Windows, Mac OS X a Linux. Použití je velmi jednoduché. Po spuštění bez parametrů se zobrazí nápověda. Program se nachází na doprovodném CD.

Programování probíhá po modemových signálech \overline{DTR} , \overline{DSR} , \overline{DCD} a \overline{RI} . Zapojení k jednotlivým linkám ISP rozhraní na mikroprocesoru je patrné z obrázku 5.1.

6 USB měřicí deska

Schéma zapojení konečné verze měřicí desky je na obrázku 6.3. Podoba plošného spoje je na obrázku 6.6. Z důvodu přehlednosti nejsou napsány hodnoty odpovídajících veličin jednotlivých součástek přímo ve schématu, ale nacházejí se v tabulce 6.1.

Řídícím obvodem měřicí desky je mikroprocesor ATmega1280. K mikroprocesoru jsou připojeny ostatní podpůrné obvody, které zesilují nebo chrání jeho vstupy nebo výstupy, popřípadě zajišťují komunikaci po USB sběrnici.

Sluší se dodat, že původní volba řídicího mikroprocesoru padla na novou modelovou řadu firmy Atmel s názvem Xmega. Konkrétně na model ATXmega128A1. Tento mikroprocesor má mimo jiné 16 integrovaných 12-bitových A/D převodníků a 4 12-bitové D/A převodníky. Využití tohoto procesoru zabránila jeho nedostupnost na trhu v době psaní práce.

Programování mikroprocesoru je vyřešeno stejným způsobem, jako v případě prototypu na kontaktním nepájivém poli - pomocí modemových linek BitBang režimu obvodu FT232R.

6.1 Digitální výstupy

Měřicí deska obsahuje 16 digitálních výstupů. Výstupy jsou označeny na spodní straně desky jako DIG OUT-#. Na každý z výstupů mikroprocesoru je připojen darlingtonový zesilovací tranzistor. Jak je patrné ze schématu 6.3 ne všechny výstupy jsou opatřeny stejným výkonovým zesílením. Čtyři z výstupů jsou zapojeny přes výkonější pole ULN2064B, takže mohou snášet výkonové zatížení do 1.5 A. Tyto výstupy lze poznat tak, že jsou opatřeny robustnějším konektorem počítačového typu LO1. Robustnější konektory jsou na měřicí desce používány jednak, protože lépe vedou velké proudy a také proto, aby nešlo zaměnit zařízení koncipované pro větší zátěž a připojit jej na výstup, který není dostatečně dimenzován.

Ostatní výstupy jsou ošetřeny tranzistorovým polem ULN2803A, takže jsou schopny kontolovat proudovou zátěž o velikosti 500 mA. Výstupy jsou opatřeny taktéž konektory počítačového typu, ale menších rozměrů. Jsou označeny SO1 a SO3.

Digitální výstupy jsou realizovány vyvedením kolektoru výkonového tranzistoru. Zátěž je spínána proti vnější výkonové zemi, která je pro pohodlí přivedena do desky konektorem pro vnější napájecí zdroj CON1. Na desce je rozmístěno několik konektorů, přes které lze připojovat zátěž. Jejich označení je SO4, SO5 a LO4. Ze spodní strany desky v místě příslušného konektoru je označení, na který kolík je přiveden větší (+) a na který menší (-) potenciál.

6.2 PWM výstupy

PWM výstupy jsou realizovány stejně jako digitální výstupy pomocí kolektoru výkonového tranzistoru. Polovina z osmi PWM výstupů je opatřena výkonovým zesilovačem ULN2064B a druhá polovina je ošetřena obvodem ULN2803A. Z toho plynou maximální přípustné proudové zátěže 1.5 A respektive 500 mA.

Charakteristická doba reakce výstupů obvodu ULN2064B je 1.5 μ s. Z toho je možné odvodit, že nosná frekvence použitá při generování PWM pulzů by neměla přesáhnout hodnotu zhruba 100 kHz. Reakční doba obvodu ULN2803 je podstatně lepší 10 ns. To limituje frekvenci PWM taktem použitého mikroprocesoru. Ten dosahuje hodnoty 16 MHz.

Digitální i PWM výstupy jsou ošetřeny proti zkratu osazením patice na pojistky 5 \times 20 mm označené F1. Výkonově zatížitelné spoje jsou na desce plošného spoje vyvedeny ve větší šířce, aby lépe snášely proudovou zátěž.

6.3 Analogové výstupy

Analogové výstupy desky jsou realizovány pomocí D/A převodníku MCP4922. Rozsah převáděného napětí je stejný jako referenční napětí 2.5 V. Mimo to je díky zesilovači referenčního napětí $\times 2$ možné rozšířit rozsah až na 5.0 V. Převodník pracuje s rozlišením 12-bitů. Výstupy převodníku jsou vyvedeny na konektor IL1. Spolu se dvěma výstupy převodníku je na konektor ještě vyvedena napěťová reference a zem.

6.4 Digitální vstupy

Měřicí deska je osazena 16 digitálními vstupy. Digitální vstupy jsou ze spodní strany desky tištěného spoje označeny DIG IN-#. Vstupy jsou realizovány konektory typu MLW označenými jako SI1 a SI2. Použití těchto konektorů umožňuje samostatné vyvedení anody a katody z každé diody v optovazbě. Tím je umožněna velká flexibilita při připojování. Není nutné se vázat na společnou zem pro všechny vstupy.

Každý z digitálních vstupů je opatřen optovazbou a rezistorem spočítaným tak, že vstup je TTL úrovně. Odpor je jednoduše spočítán podle Ohmova zákona.

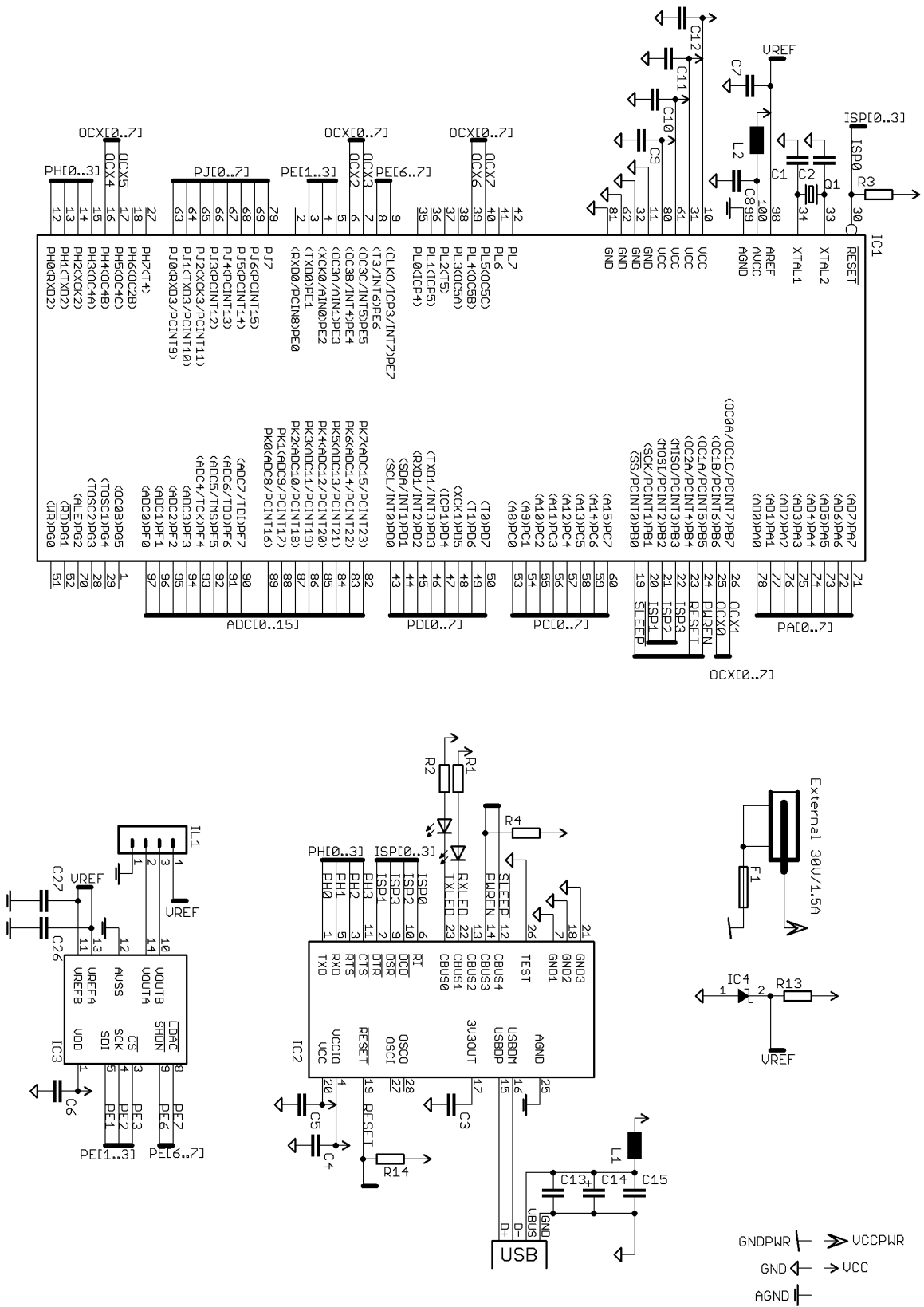
$$R_{5-12,15-22} = \frac{V_{TTL}^H - V_D}{I_F} \quad (6.1)$$

Chceme-li, aby proud vstupní diodou I_F byl 20 mA při TTL napětí logické 1 $V_{TTL}^H = 3.3$ V, dostáváme při započtení napěťového úbytku na diodě $V_D = 1.5$ V, který je pro 6N134 prakticky stejný jako pro PC849 - zhruba 90 Ω .

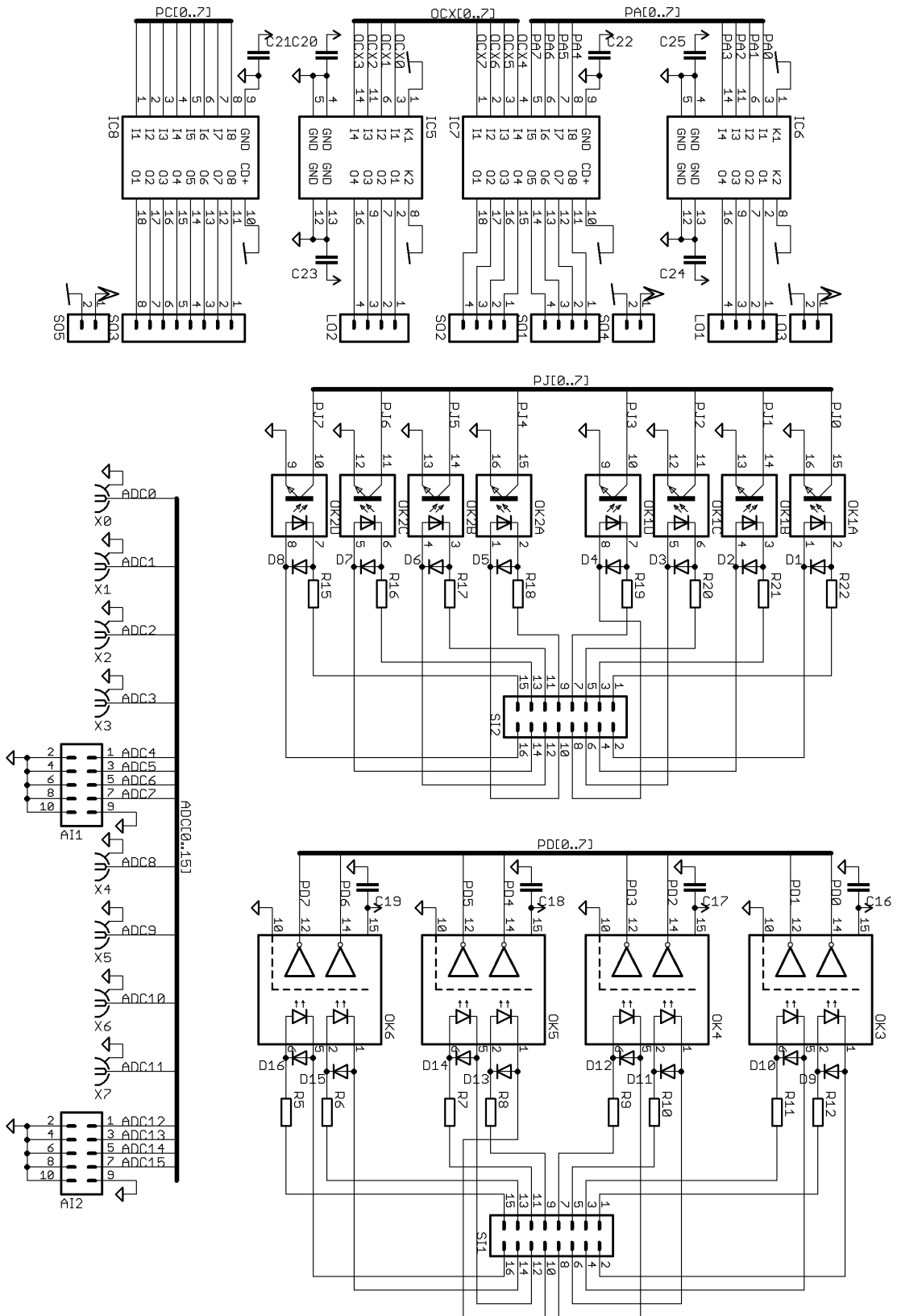
Paralelně k diodám integrovaným v optovazbách jsou připojeny diody 1N4148 chránící vstup při prohození polarity.

Digitální optovazby 6N134 připojené ke konektoru SI1 a ze spodní strany označené jako DIG IN-1 jsou na výstupu opatřeny hradlem a umožňují přenos v podstatě na limitu taktu procesoru rychlostí 10 Mbit/s. Výstup hradle je negován. To znamená, že je-li vstup na logické 1, výstup je ve stavu logické 0.

Analogové optočleny PC849 vstupu DIG IN-2, které jsou připojeny ke konektoru SI2, hradlo na výstupu nemají. Výstup je zajištěn pomocí 30 – 50 k Ω pull-up rezistoru integrovaného uvnitř mikroprocesoru ATmega1280. To znamená, že jestliže vstupem teče proud



Obrázek 6.1: Schéma konečné verze.



Označení	Pouzdro	Hodnota	Množství
AI1,AI2	MLW10	Konektor	2
C1,C2	C-0805K	12-22pF	2
C13	C-0805K	10nF	1
C14	C-2817E	470nF	1
C3-12, C15-27	C-0805K	100nF	23
CON1	PCB-2.3mm	Napájecí Konektor	1
D1-16	D-0805	Dioda 1N4148	16
F1	F-5x20mm	Pojistka 1.5A	1
IC1	TQFP-100	Atmega1280-16AU	1
IC2	SSOP-28	FT232RL	1
IC3	DIP-14	MCP4922D	1
IC4	TO-92	CLM385N	1
IC5, IC6	DIP-16	ULN2064B	2
IC7, IC8	DIP-18	ULN2803A	2
IL1, SO1, SO2	PSH02-04WG	Konektor	3
L1, L2	FB-TH 3.5mm	Feritová perlička	2
LO1, LO2	PSH04-04WG	Konektor	2
LO3	PSH04-02WG	Konektor	1
OK1, OK2	DIP-16	PC849	2
OK3-6	DIP-16	6N134D	4
Q1	HC49S	Krystal 16MHz	1
R1, R2	R-0805	330 Ω	2
R13	R-0805	2.5 k Ω	1
R3, R4, R14	R-0805	10 k Ω	3
R5-12, R15-22	R-0805	90 Ω	16
RXLED, TXLED	LED-3mm	LED	2
SI1, SI2	MLW16	Konektor	2
SO3	PSH02-08WG	Konektor	1
SO4, SO5	PSH02-02WG	Konektor	2
USB1	USB-PTH	Konektor USB	1
X0-7	SMB-M	Stíněný konektor	8

Tabulka 6.1: Seznam součástek a jejich označení.

(logická 1), je fototranzistor sepnut a vstup mikroprocesoru je na logické 0. Pokud je vstup ve stavu logické 0 (neteče proud), tak je odpor tranzistoru daleko větší než odpor 30 – 50 k Ω pull-up rezistoru a vstup mikroprocesoru je tím pádem vytažen na logickou 1. Přenosová rychlost optovazby PC849 je limitována její odezvou v délce 5 μ s.

6.5 Analogové vstupy

Analogové vstupy jsou realizovány pomocí 10-bitových A/D převodníků integrovaných v mikroprocesoru ATmega1280. Referenční napětí může být opět bráno z několika různých zdrojů v rozsahu 1.1 V až 5 V. Část vstupních konektorů je typu SMB. Tyto konektory umožňují připojení stíněných kabelů, které jsou schopny omezit rušení citlivých signálů. SMB konektory jsou připojeny na vstupy 0-3 a 8-11. Tyto vstupy je možné při diferenciálním zapojení zesílit $\times 1$, $\times 10$ nebo $\times 200$. Roli negativního terminálu hrají vstupy 1 a 9.

Ostatní analogové vstupy jsou přivedeny na konektor typu MLW, který již není stíněn. Nevyužité piny v konektoru jsou připojeny na zem.

Maximální vzorkovací frekvence při použití všech kanálů je zhruba 600 Hz. Při použití menšího počtu kanálů nebo pokud není potřeba 10-bitové rozlišení lze dosáhnout vyšších frekvencí.

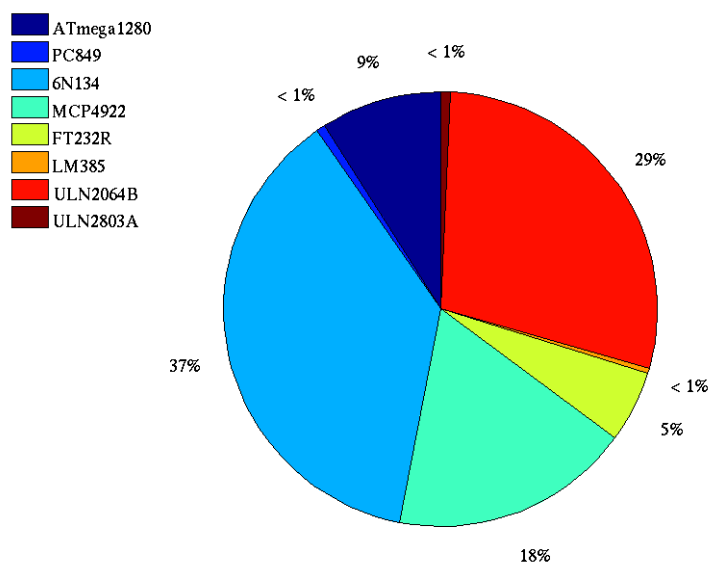
6.6 Proudová spotřeba

Logika měřicí desky je napájena z USB sběrnice. To je pohodlné, jelikož k zařízení není potřeba připojovat externí zdroj napájení. Problémem je maximální povolený odběr proudu z USB sběrnice bez speciálního vyjednávání. Maximální spotřeba každého použitého integrovaného obvodu je v tabulce 6.2. Na obrázku 6.6 je znázorněna relativní spotřeba každé součásti měřicí desky. V tabulce je uveden i zdroj, jak jsem se k informaci dopracoval. Pronásobením hodnoty z tabulky 6.2 počtem jednotlivých obvodů lze snadno získat maximální spotřebu celého zařízení. Vychází 285 mA. Tato hodnota je zapsána do interní EEPROM obvodu FT232R, aby došlo ke správnému uvolnění zdrojů operačním systémem. Je sice velmi nepravděpodobné, že by někdy zařízení dosáhlo takového odběru, ale standart USB vyžaduje, aby byla k dispozici informace o maximálním odběru každého zařízení.

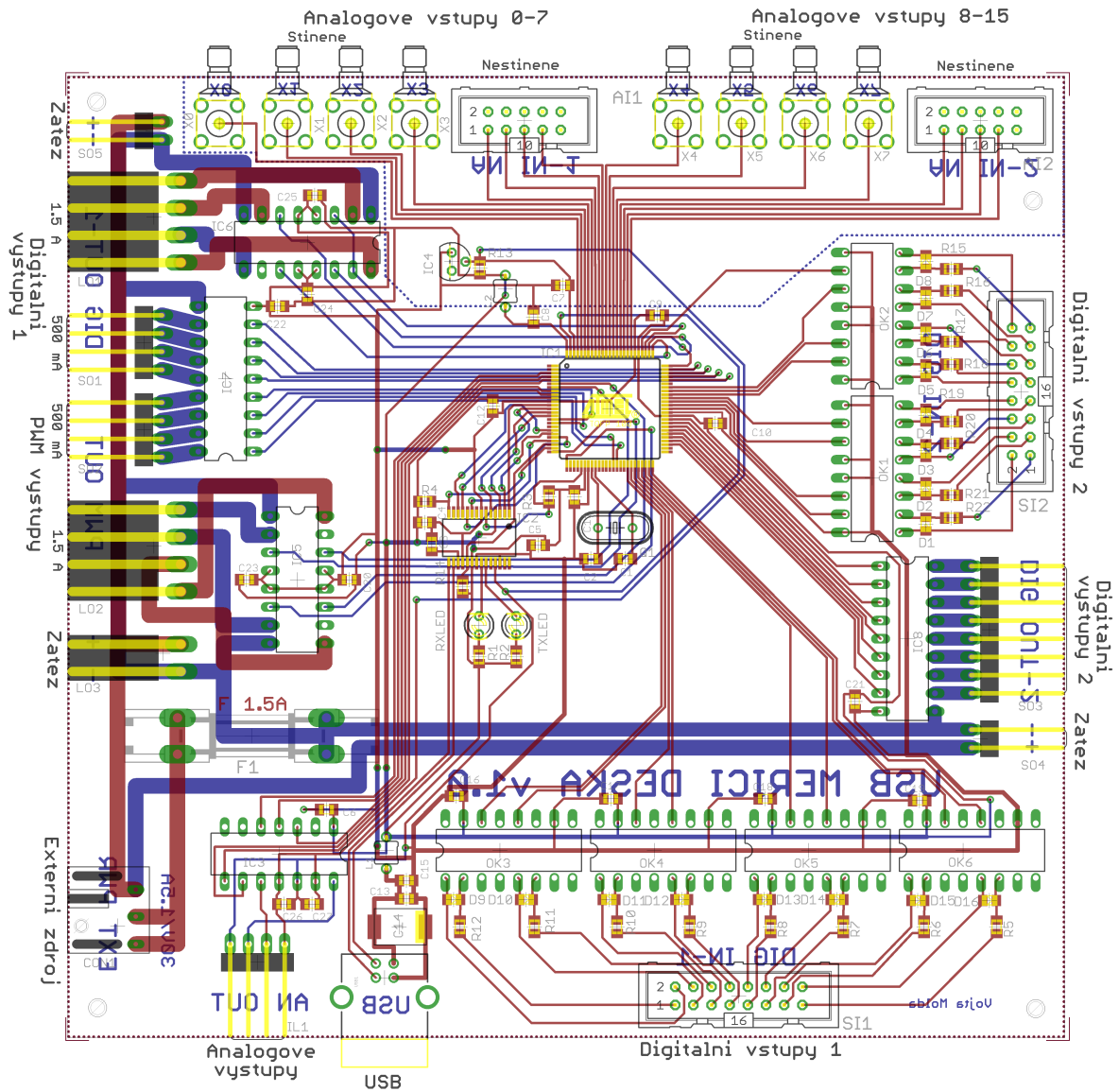
Jelikož je spotřeba zařízení poměrně vysoká není vždy jisté, že budou k dispozici dostatečné zdroje. Při vyšším počtu připojených zařízení s větší spotřebou se může stát, že systém nebude schopen desku napájet. Tento problém operační systém ohlásí, takže není nijak složité jej odhalit. Řešením je použití hubu s vlastním napájením.

Obvod	Spotřeba [mA]	Zdroj informace
Atmega1280	25	Spočítáno z [3, str 393 a 391]
6N134	26	[6, str 6]
LM385	1	Spočítáno z R_{13}
MCP4922	50	[5, str 2]
FT232R	15	[1, str 17]
ULN2064B	40	Spočítáno z [8, str 2]
ULN2803B	4	Spočítáno z [9, str 4]
PC849	1	Spočítáno z pull-up v IC1

Tabulka 6.2: Maximální proudová spotřeba použitých součástek.



Obrázek 6.2: Podíl spotřeby jednotlivých součástek.



Obrázek 6.3: Výsledný tištěný spoj. Červená barva značí přední stranu desky a modrá zadní stranu desky.

7 Software

7.1 Firmware mikroprocesoru

Firmware mikroprocesoru je napsán v jazyce C a poté přeložen pomocí svobodné sady nástrojů pro mikrokontroléry firmy Atmel, která obsahuje i kompilátor avr-gcc. Kopírování programu do FLASH paměti mikroprocesoru se děj pomocí dříve zmíněného programu Ftisp. Níže je v "pseudo" programovacím jazyce naznačeno, jak firmware mikrokontroléru pracuje. IRQ() značí obsluhu přerušení, které probíhá paralelně s nekonečnou hlavní smyčkou programu.

```
While (Do nekonečna) {
    Počkat dokud nejsou přijaty řídicí data z PC;
    Nastavit PWM výstupy podle přijatých dat;
    Nastavit digitální výstupy podle přijatých dat;
    Odeslat po SPI sběrnici řídicí příkazy pro analogové výstupy;
    Přečíst stav digitálních vstupů;
    Přečíst proměnnou obsahující stav analogových vstupů;
    Odeslat stav analogových a digitálních vstupů do PC;
}

IRQ(AD konverze skončila) {
    Uložit výsledek konverze do proměnné obsahující stav analogových vstupů;
    Posunout multiplexer na další analogový vstup;
    Začít nový AD převod;
}
```

Ačkoliv se kód může zdát poměrně přímočarý a jednoduchý díky přítomnosti přerušení tomu tak zdaleka není. Přerušení se vyskutekuje ve zdrojovém kódu firmware daleko více, ale pro názornost a jednoduchost jsou z vynechána. Díky přerušením je do běhu programu vnesena nelinearita. S tím je spojeno poměrně velké množství zádrhelů a pastí. Bližší detaily a celý zdrojový kód vyvinutého firmware je k dispozici na doprovodném CD.

Hlavní výhodou návrhu desky je možnost programovat mikroprocesor přímo v aplikaci bez nutnosti připojovat externí programátor nebo snad mikroprocesor někam vkládat. Díky této vlastnosti je širší použití na velmi vysoké úrovni. Naprogramováním vhodného firmware je možné dosáhnout velmi nízké reakční doby měřicí desky. Odezva je limitována pouze časem, po který se vykonává jedna instrukce, což jsou řádově desítky ns. Pokud by se data posílala přes USB sběrnici do PC, tam by se provedla příslušná akce a ta by se odeslala zpět do měřicí desky, tak by nebylo možné dosáhnout takto rychlé odezvy.

Vzhledem k tomu se vyvinutý firmware nijak nepokouší využívat až na designovaný limit propustnosti vstupů, rychlosti konverze A/D převodníků ani žádné další vlastnosti použité desky. To vzhledem k univerzálnosti desky ani nejde, jelikož čas procesoru je omezený a není dost dobře možné zároveň provozovat vše libovolně rychle. Cílem je spíše ukázat, jakým způsobem se firmware programuje, které techniky a triky jsou zvykem u 8-bitových mikrokontrolérů.

Uživatel se základy programování v jazyce C, který chce desku používat k nějakému účelu může poměrně malými a rychlými modifikacemi ukázkového firmwaru dosáhnout funkčnosti, kterou požaduje.

7.2 Řídící aplikace pro PC

Kontrolní aplikace pro PC je napsána ve velmi jednoduchém duchu, jak je možné zjistit z následujícího "pseudokódu".

```
While (Do nekonečna) {  
    Přečíst požadované stavy výstupů od uživatele;  
    Poslat požadované stavy výstupů měřicí desce.  
    Počkat než budou přijata data z měřicí desky.  
    Zobrazit stavy vstupů z přijatých dat.  
}
```

Vzhledem k tomu, že deska je míněna, jako co nejvíce univerzální nepokoušel jsem se napsat program, který by vyhovovala všem možným použitím desky. Takový cíl stejně není dost dobře splnitelný. Místo toho je řídicí aplikace respektive její zdrojový kód spíše demonstrací, jak používat knihovnu Libftdi a jak posílat a přijímat data od měřicí desky. Samotná struktura dat, zpracování a preferovaný formát ukládání jsou pro každého uživatele odlišné.

Při vývoji jsem se pokoušel napsat vše tak, tak aby nebyl problém překompilovat aplikaci na co největším počtu operačních systémů. Úspěšně jsem aplikaci otestoval na Linuxu (Kubuntu Jananty Jackalope), Widnows XP SP2, Windows XP SP3 a Windows Vista 32-bit. Bez úspěchu jsem byl na všech 64-bitových verzích Windows jak Vista tak XP. Problém je v nekompatibilitě Libusb. Je velmi pravděpodobné, že se v budoucnu najde někdo, kdo přeportuje Libusb i na tyto systémy. Poté bude s velmi vysokou pravděpodobností možné bez jakýchkoliv modifikací překompilovat a provozovat i řídicí aplikaci.

7.3 Použití ve Windows

Před připojením měřicí desky k počítači s OS Windows XP je vhodné nejdříve nainstalovat pořebné D2XX ovladače k obvodu FT232R. Instalace se zahájí spuštěním aplikace `cd:/drivers/windows/d2x_cdm 2.04.16 install.exe` na doprovodném CD. Po dokončení instalace ovladačů je ještě potřeba doinstalovat Libusb-Win32. To se provede spuštěním instalačního programu `libusb-win32-filter-bin-0.1.12.0.exe`, který se nachází ve stejném adresáři jako ovladač D2XX.

Po nainstalování výše popsaného softwaru se při připojení měřicí desky automaticky najdou a zavedou ovladače. Nyní je možné bez problému spustit řídicí aplikaci z kontrolního CD.

7.4 Použití v linuxových distribucích založených na Debianu

Před spuštěním nebo kompilací jakékoliv řídicí aplikace z CD je potřeba mít nainstalovány knihovny `libusb` a `libftdi`. To se provede velmi jednoduše příkazem `sudo apt-get install libftdi-dev libusb-dev`, který ošetří všechny závislosti stáhne, nainstaluje a nakonfiguruje požadované knihovny.







Pokud nebudeme na daném stroji kompilovat ze zdrojových kódů, tak není potřeba instalovat vývojové verze knihoven a vystačíme s příkazem `sudo apt-get install libftdi1 libusb-0.1-4`.



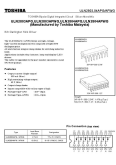



7.5 Obsah doprovodného CD

- `cd:/applications` Adresář obsahuje programy zejména pro operační systém Windows použité k vývoji, konfiguraci a testování. Mimo jiné je obsažen program pro návrh schémat a tvorbu plošných spojů Eagle, vývojové prostředí Dev-C++, sada nástrojů pro mikrokontroléry Atmel WinAVR, program k zápisu firmware do FLASH mikroprocesoru Ftisp, ...
- `cd:/datasheets` V této složce je možné nalézt manuály ve formátu PDF k všem použitým integrovaným obvodům.
- `cd:/drivers` Zde je možné nalézt proprietární ovladače k obvodu FT232R pro různé operační systémy. Mimo ovladače se zde ještě nachází instalátor Libusb-Win32
- `cd:/photos` Tady se nacházejí fotografie pořízené při stavbě prototypů na kontaktním nepájivém poli. Odpovídající schémata se stejným názvem jsou také k dispozici na CD.
- `cd:/schematics` Ve složce jsou obsaženy zapojovací schémata vyvinutých prototypů, podklady pro výrobu plošného spoje konečné verze a mou vytvořené nebo modifikované knihovny s použitými součástkami a integrovanými obvody. Vše je navrženo programem Eagle, jehož verze, která je zdarma, je k dispozici na CD ve verzích pro Linux, Windows a Mac OS.
- `cd:/sources` V tomto adresáři se nachází vyvinuté zdrojové kódy i přeložené binární aplikace pro Windows a Linux. K dispozici jsou firmware pro mikrokontrolér i řídicí aplikace. Mimo kontrolní aplikace měřicí desky je k dispozici i několik ukázkových programů k demonstraci použití Libftdi. Řídicí aplikace pro Windows jsou napsány a přeloženy pomocí vývojového studia Dev-C++. Firmware pro mikrokontroléry je možné ve Windows upravovat a překládat pomocí sady nástrojů WinAVR. Linuxová alternativa používá kvůli jednoduchosti pouze standardní Makefile v kombinaci s textovým editorem. Všechny zdrojové kódy jsou v licenci GPL.

Literatura

8.6 Použitá literatura

- [1]  **FT232R USB UART IC Datasheet**
Verze 2.01, srpen 2008
cd:/datasheets/ft232r datasheet.pdf
http://ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS_FT232R.pdf
- [2]  **UMS3 User's Guide**
Verze z 9. března 2007
cd:/datasheets/ums3 users guide.pdf
http://tools.asix.net/download/usb/ums3/ums3_en.pdf
- [3]  **ATmega640/1280/1281/2560/2561 Datasheet**
Revize L, srpen 2007
cd:/datasheets/atmega1280 datasheet.pdf
http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2549.pdf
- [4]  **ATmega48/88/168 Datasheet**
Revize P, únor 2009
cd:/datasheets/atmega168 datasheet.pdf
http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf
- [5]  **MCP4921/4922 Datasheet**
Verze B, únor 2007
cd:/datasheets/mcp4922 datasheet.pdf
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21897B.pdf>
- [6]  **Hermetically Sealed, High Speed, High CMR, Logic Gate Optocouplers Technical Data**
Verze z roku 1999
cd:/datasheets/6n134 datasheet.pdf
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/104059/HP/6N134.html>

- [7]  **PC829 Series Datasheet**
Verze ze 17. září 2000
cd:/datasheets/pc849 datasheet.pdf
<http://www.ieeta.pt/~alex/docs/DataSheets/PC849.pdf>
- [8]  **50V - 1.5A QUAD DARLINGTON SWITCHES**
Verze ze 9. září 2003
cd:/datasheets/uln2064b datasheet.pdf
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/25568/STMICROELECTRONICS/ULN2064B.html>
- [9]  **ULN2803APG 8ch Darlington Sink Driver**
Verze ze 15. února 2006
cd:/datasheets/uln2803a datasheet.pdf
http://www.datasheetpro.com/119491_view_ULN2803A_datasheet.html
- [10]  Matoušek D.: **USB prakticky s obvody FTDI - 1. díl**
BEN - technická literatura, 1. vydání, 2003
ISBN-807300103-9
- [11]  Hyde J.: **USB Design by Example: A Practical Guide to Building IO Devices**
Intel Press, 2. vydání, 2001
ISBN-097028465-9
- [12]  Axelson J.: **USB Complete: Everything You Need to Develop Custom USB Peripherals**
Lakeview Research, 3. vydání, 2005
ISBN-193144802-7
<http://books.google.com/books?id=OSnynlQrvVcC>

8.7 Zdroje obrázků

Obrázek 4.1: http://www.tme.eu/katalog_pics/a/e/d/ft232r1.jpg

Obrázek 4.2: http://www.asix.cz/img/ums3_bot.jpg

Obrázek 4.3: [5, str 19]

Obrázek 4.4: http://www.tme.eu/katalog_pics/c/d/c/atmega1280-16au.jpg

Obrázek 4.5: <http://www.coolcomponents.co.uk/catalog/images/07957-03-L.jpg>

Obrázek 4.6: <http://media.digikey.com/photos/SharpPhotos/PC844X,844X1,845,849,895.jpg>, [7, str 1]

Obrázek 4.7: [6, str 3]

Obrázek 4.6: <http://media.digikey.com/photos/SharpPhotos/PC844X,844X1,845,849,895.jpg>, [7, str 1]

Obrázek 4.8: [http://media.digikey.com/photos/ToshibaPhotos/ULN2803APG\(5,M\).JPG](http://media.digikey.com/photos/ToshibaPhotos/ULN2803APG(5,M).JPG), [9, str 1]

Obrázek 4.9: [8, str 1]

Obrázek 4.10: <http://media.digikey.com/photos/TexasInstrPhotos/MC79L12ACLPR.JPG>