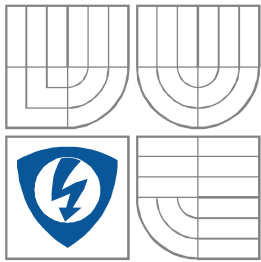


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

KOMUNIKAČNÍ A ŘÍDICÍ KARTA
K ELEKTRONOVÉMU MIKROSKOPU
COMMUNICATION AND CONTROL CARD FOR ELECTRON MICROSCOPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

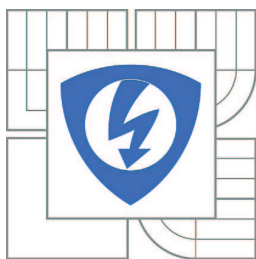
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN ROBOTKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ MACHO, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Jan Robotka

ID: 72909

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Komunikační a řídicí karta k elektronovému mikroskopu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s mikrokontroléry firmy Texas Instruments s jádrem ARM Cortex-M3.
2. Navrhněte koncepci karty s mikrokontrolérem firmy Texas Instruments s jádrem ARM Cortex-M3, která by sloužila jako řídicí a komunikační karta k elektronovému mikroskopu.
3. Vyberte vhodné A/D a D/A převodníky pro řídicí kartu a optické oddělovací členy pro binární vstupy a výstupy.
4. Řešte komunikaci řídicí karty po sběrnici Ethernet.
5. Navrhněte obvodové řešení řídicí karty, proveďte výpočet hodnot jednotlivých součástí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout novou komunikační a řídicí kartu pro elektronový mikroskop, případně pro další zařízení firmy Delong Instruments a.s., která se zabývá jejich vývojem a výrobou. Tato karta by měla nahradit stávající komunikační kartu, jejíž výpočetní výkon již začíná být nedostačující. Současně nahradí i řídicí a měřicí kartu s A/D a D/A převodníky. Bude tedy umožňovat nejen komunikaci s nadřazeným počítačem a ostatní elektronikou, ale i řízení dalších subsystémů elektronového mikroskopu, zjišťování jeho provozních stavů a měření vnitřních fyzikálních veličiny.

V úvodu práce byly nejprve stanoveny požadavky karty, na jejichž základě byla navržena základní koncepce včetně jednoduchého blokového schématu. Důležité bylo vybrat vhodný mikrokontrolér, který bude celou kartu řídit a je tedy její nejdůležitější částí. Důraz byl kladen především na dostatečný výpočetní výkon, velkou modularitu z hlediska jeho periférií, vidinu inovace a podpory do budoucna a samozřejmě cenu. Dále bylo požadováno, aby v sobě zahrnoval rozhraní Ethernet, pomocí kterého bude karta komunikovat s nadřazeným počítačem. Vybrán byl mikrokontrolér s jádrem ARM Cortex-M3, jehož vlastnostem je věnována samostatná kapitola. Další část práce se zabývá hlavním komunikačním rozhraním karty, kterým je již zmíněné rozhraní Ethernet. Po obecném popisu je toto rozhraní stručně prostudováno v souvislosti s vybraným mikrokontrolérem a dále je řešena otázka vyšších vrstev komunikace, kterou představují protokoly rodiny TCP/IP. Nedílnou součástí práce byl výběr důležitých komponent, kterými jsou zejména A/D a D/A převodníky. Jejich parametry budou mít velký vliv na konečné vlastnosti karty. V závěrečné, stěžejní fázi bylo navrženo obvodové schéma, které je v práci detailně popsáno a vysvětleno. Toto schéma je hlavním výsledkem celé práce a je hlavním podkladem pro následnou realizaci navržené karty.

Navržená karta bude schopná zpracovat a řídit 16 diferenciálních analogových vstupních signálů, 16 diferenciálních analogových výstupních signálů, 8 digitálních vstupů, 8 jednoduchých digitálních výstupů a 4 digitální výstupy spínané přes optické oddělovače. Bude komunikovat s nadřazeným počítačem přes rozhraní Ethernet rychlostí až 100 Mbit/s, s ostatní elektronikou přes sériovou linku UART s využitím optických kabelů a s dalšími zařízeními přes rozhraní RS-485 a RS-232.

Klíčová slova

Řízení, komunikace, elektronový mikroskop, ARM, Cortex-M3, Ethernet.

Abstract

The main aim of this thesis is to design a communication and control card for an electron microscope, eventually for other equipments of the company Delong Instruments a.s., which is dealing with its development and production. This card should replace existing communication card because of its low computational performance. Also, it should replace control and measure card manned with A/D and D/A converters. Thus, the new card will be providing not only the communication with a superior PC and other electronic systems, but also the control of other subsystems of the electron microscope, the determining of processional states and the measuring of internal physical quantities.

At the beginning the requirements were determined and the main concept was made with the inclusion of the simple block diagram. It was very important to choose a suitable microcontroller, which will be an intelligence of the whole card and so it will be the most important component. The accent was set mainly on the sufficient computational performance, high modularity of its periphery, good vision of the future innovation and support and, of course, the price. The next requirement was the implementation of the Ethernet, which will be used for the communication between the card and the superior PC. The microcontroller which was chosen have the core architecture ARM Cortex-M3 and it is described in separate chapter. The next part of this thesis is dealing with the main communication standard of the card, which is the Ethernet. After the general description, the Ethernet was mainly discussed in context of the chosen microcontroller. The possibilities of the application of higher layer TCP/IP protocols were also discussed. Implied part of the thesis was the selection of other important components, especially A/D and D/A converters. Its characteristics will have a big effect on the characteristics of the card. In the last and the most important phase the electrical scheme was designed and it was described in detail. This scheme is the main result of this thesis and it is the main document for the future realization.

Designed card will be able to process and control 16 differential analogue input signals, 16 differential analogue output signals, 8 digital inputs, 8 simple digital outputs and 4 digital outputs triggered by optocouplers. It will be able to communicate with the superior PC over the Ethernet with the maximum bit rate of 100 Mbit/s, with other electronic cards over the serial line UART through the optical fibers and with other internal and external equipments over the RS-485 and RS-232.

Keywords

Control, communication, electron microscope, ARM, Cortex-M3, Ethernet.

Bibliografická citace:

ROBOTKA, J. *Komunikační a řídicí karta k elektronovému mikroskopu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 47s. Vedoucí diplomové práce byl Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Komunikační a řídicí karta k elektronovému mikroskopu* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat RNDr. Petrovi Vašinovi a Ing. Martinovi Tmeji za pomoc při řešení odborných a technických problémů. Dále děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Machovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 23. května 2011

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Návrh koncepce karty.....	12
2.1	Požadavky na navrhovanou elektronickou kartu a její základní koncepce.....	12
2.2	Shrnutí požadavků na navrhovanou kartu.....	14
2.3	Výběr vhodného mikrokontroléru.....	14
2.4	Připojení karty k mikroskopu.....	14
3	Mikrokontrolér LM3S6965.....	16
3.1	Základní přehled.....	16
3.2	Procesorové jádro ARM Cortex-M3.....	17
3.3	Řízení systému mikrokontroléru.....	17
3.4	Periférie.....	18
3.4.1	Vstupně-výstupní porty (GPIO).....	18
3.4.2	Čítače/časovače.....	19
3.4.3	Přerušování.....	19
3.4.4	Asynchronní sériová linka (UART).....	20
3.4.5	Sběrnice I2C.....	21
3.4.6	Synchronní sériové rozhraní (SSI).....	21
4	Komunikační rozhraní Ethernet.....	22
4.1	Popis rozhraní Ethernet.....	22
4.2	Implementace rozhraní Ethernet v mikrokontroléru LM3S6965.....	22
4.3	lwIP A μ IP – open source TCP/IP stack.....	23
4.4	Software pro komunikaci po sběrnici Ethernet na straně nadřazeného PC.....	23
5	Výběr převodníků a optických oddělovacích členů.....	24
5.1	A/D převodníky.....	24
5.2	D/A převodníky.....	25
5.3	Optické oddělovací členy.....	26
6	Návrh obvodového schématu.....	28
6.1	Zpracování analogových výstupních signálů.....	28
6.2	Zpracování analogových vstupních signálů.....	30
6.3	Digitální výstupy.....	32
6.4	Digitální vstupy.....	33
6.5	Zapojení optočlenů.....	33
6.6	Oddělovací obvody sběrnice Ethernet.....	34

6.7	Komunikační rozhraní RS-485	34
6.8	Komunikační rozhraní RS-232	35
6.9	Připojení konektorů pro optické komunikační rozhraní.....	36
6.10	Non-volatilní paměť typu FRAM	37
6.11	Zapojení podpůrných obvodů mikrokontroléru	38
6.12	Napájení karty	39
6.13	Přepět'ová ochrana vstupů a výstupů	40
6.14	Připojení signálů k hlavnímu konektoru	41
6.15	Programování mikrokontroléru.....	42
7	Závěr.....	43
	Literatura.....	45
	Seznam příloh	47

1 ÚVOD

Téma této diplomové práce vychází z projektu firmy Delong Instruments a.s., která se zabývá vývojem a výrobou zařízení v oblasti elektronové a rentgenové mikroskopie. Firma se rozhodla inovovat stávající elektroniku svých zařízení z důvodu nedostačující rychlosti zpracovávání informací. Jedná se o řídicí a komunikační elektroniku, která je v současné době řízena 8bitovými mikrokontroléry, jejichž výpočetní výkon již nedostačuje a neumožňuje tak včasnou obsluhu a reakci na všechny požadavky okolních subsystémů.

Páteřní komunikací u většiny zařízení je rozhraní Ethernet mezi komunikační kartou a nadřazeným počítačem. Kromě komunikační karty je s počítačem přes rozhraní Ethernet propojena i videokarta. Ta ale pouze odesílá zpracovaný obraz. Veškeré informace od řídicí aplikace jsou tedy přijaty právě komunikační kartou. Většina z těchto informací je ale určena pro další subsystémy v zařízení. Těmi jsou například řídicí a měřicí karta s A/D a D/A převodníky, vysokonapěťové zdroje, řízené zdroje proudu pro žhavení katody, oktupólová karta pro vychylování elektronového svazku a podobně. Komunikační karta tedy musí uvedené informace zpracovat a ty, které jsou určené pro ostatní subsystémy, dále odeslat. Spojení mezi komunikační kartou a ostatními subsystémy je řešeno pomocí sériové linky UART s využitím optických kabelů. Současně s předáváním řídicích informací musí komunikační karta od těchto zařízení sbírat naměřená data a potvrzující zprávy, které po zpracování předává zpět řídicí aplikaci v PC. S narůstajícími požadavky na vlastnosti a parametry jednotlivých zařízení firmy narůstá i počet informací, které je potřeba mezi těmito zařízeními a řídicí aplikací přenést. Tím vznikají i požadavky na vyšší výpočetní výkon, který by zajistil spolehlivé zpracování a předání všech těchto informací. Dalším důvodem pro inovaci je absence rozhraní Ethernet v současném mikrokontroléru komunikační karty. To je řešeno pomocí modulu pro Ethernet eZ80F91 od firmy Zilog, který je ke komunikační kartě připojen přes 2 konektory, čímž se celé toto zařízení stává nekompaktní. Tyto problémy by měly být vyřešeny návrhem nové komunikační karty, která bude řízena mikrokontrolérem s vyšším výpočetním výkonem a s přímou implementací rozhraní Ethernet.

Vedením firmy bylo dále rozhodnuto, že kromě již uvedených požadavků na novou kartu dojde také ke sloučení komunikační karty s řídicí a měřicí kartou obsahující A/D a D/A převodníky, která ovládá různé součásti v zařízeních a současně měří potřebné fyzikální veličiny. Cílem práce je tedy navrhnout novou řídicí a komunikační kartu určenou především k elektronovému mikroskopu, ale i k jiným zařízením firmy. Ta bude mít na starosti jak komunikaci mezi nadřazeným počítačem a ostatními subsystémy zařízení, tak řízení a měření potřebných parametrů v mikroskopu. V rámci práce má být v souvislosti s konkrétními požadavky na novou kartu, uvedenými v následující kapitole, vhodně navržena její koncepce, vybrány

vhodné součástky a navrženo obvodové schéma. Součástí má být i rozbor řešení komunikace přes rozhraní Ethernet. Cílem práce ovšem není realizace navržené karty. Firma za tímto účelem zaměstnává odborníky, kteří se zabývají návrhem desek plošných spojů. Konkrétní výroba potom bude na základě podkladů svěřena profesionální externí firmě.

Úvodní část práce se zabývá samotnou koncepcí navrhované karty. Jsou stanoveny požadavky na její funkce a sestaveno základní blokové schéma. Důležitou součástí je výběr vhodného mikrokontroléru, který bude „mozkem“ celé karty. V této části je také řešena otázka připojení jejích vstupů a výstupů k ostatním subsystémům mikroskopu pomocí hlavního 96pinového konektoru. Po návrhu koncepce karty jsou shrnuty základní parametry a vlastnosti vybraného mikrokontroléru. Pozornost je zaměřena především na ty periférie, které budou pro realizaci požadovaných funkcí karty využity. Následující část práce řeší otázku rozhraní Ethernet. Po obecném shrnutí je nastíněna jeho implementace v mikrokontroléru a dále diskutován jednoduchý open source TCP/IP stack, který by mohl být pro komunikaci po tomto rozhraní využit. V kapitole zabývající se výběrem převodníků a optočlenů byly prostudovány nabídky několika výrobců. Ohled byl brán nejen na parametry součástek, ale i na cenu a jejich dostupnost. Stěžejní a zároveň závěrečnou kapitolou práce je návrh obvodového schématu. Popsány jsou všechny jeho části včetně řešení ochrany před nebezpečným přepětím.

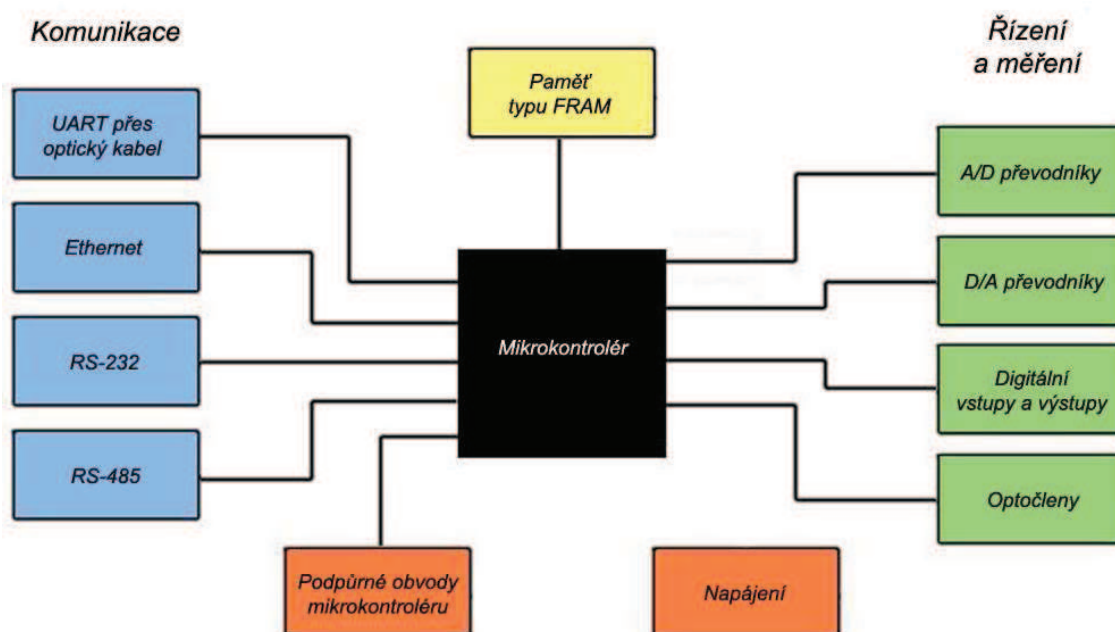
2 NÁVRH KONCEPCE KARTY

2.1 Požadavky na navrhovanou elektronickou kartu a její základní koncepce

Nová řídicí a komunikační karta pro elektronový mikroskop musí být navržena tak, aby byla schopná řešit následující 4 základní funkce:

1. Komunikace s nadřazeným počítačem přes rozhraní Ethernet
2. Komunikace s ostatními kartami a prvky v zařízení
3. Řízení součástí mikroskopu pomocí DA převodníků, binárních výstupů a optických spínačů
4. Měření fyzikálních veličin a stavů v mikroskopu pomocí AD převodníků a binárních vstupů

Na základě těchto požadavků bylo sestaveno základní blokové schéma karty, které je zobrazeno na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Základní blokové schéma karty.

Pro komunikaci s nadřazeným počítačem bude karta vybavena rozhraním Ethernet, které již bude implementováno v samotném mikrokontroléru. Vlastní komunikace potom bude probíhat přes protokol TCP/IP.

S ostatními kartami v mikroskopu bude komunikace probíhat po sériové lince UART s využitím optického kabelu. Hlavním důvodem je již současné provedení elektroniky mikroskopu, neboť karty již tímto způsobem komunikují a jsou tedy vybaveny optickými konektory. Dalšími důvody jsou omezení rušení a rychlost. Karty budou propojeny paralelně a vyslaná zpráva se tak k nim dostane téměř ve stejnou dobu.

Mimo tato dvě rozhraní bude karta vybavena i rozhraními RS-232 a RS-485 pro případné připojení dalších prvků v mikroskopu i mimo něj.

Non-volatilní paměť typu FRAM bude sloužit k ukládání akronymů. To znamená, že bude obsahovat seznam, ve kterém bude pro daný vstup či výstup, digitální či analogový, uveden jeho akronym, neboli slovo, podle kterého bude snadné rozpoznat, co daný vstup či výstup ve skutečnosti ovládá nebo měří. Přejde-li potom například zpráva pro začátek žhavení katody elektronového mikroskopu elektrickým proudem o dané hodnotě, mikrokontrolér z tabulky akronymů vyhledá, který převodník a na jakou hodnotu má nastavit. Nově navrhovaná karta bude v budoucnosti součástí různých zařízení, která se budou skládat z jiných součástí. Aby se nemusel pro každé zařízení měnit program mikrokontroléru, pouze se nahraje do paměti FRAM tabulka požadovaných akronymů. Minimální velikost paměti FRAM byla s ohledem na velikost ukládaných dat odhadnuta na 512 Kbit.

Jednotlivá zařízení v mikroskopu, která je potřeba nějakým způsobem řídit, jsou většinou navrženy tak, aby je bylo možné řídit buď binárně, nebo nízkým analogovým napětím. Karta tedy pro jejich řízení v prvním případě využije binární výstupy, ve druhém případě digitálně-analogové převodníky, jejichž výstupy budou upraveny na diferenciální, aby se v kabelech rozvádějících tyto signály eliminovalo rušení z okolí. Diferenciální budou také analogové vstupy ze zařízení měřících různé fyzikální veličiny v mikroskopu. Tyto vstupy budou upraveny, přivedeny k analogově-digitálním převodníkům, zpracovány v mikrokontroléru a v případě potřeby přeposlány do nadřazeného počítače. Požadovaná přesnost převodníků je dána požadavkem, aby při vstupním/výstupním analogovém signálu o rozsahu 20 V (od -10 do 10 V) bylo možné rozlišit napětí o hodnotě alespoň 1 mV. Výpočet minimálního rozlišení převodníků v počtech bitů je následující:

$$1 \text{ mV} = \frac{20 \text{ V}}{2^x} \quad (2.1)$$

$$\log_2 \frac{20}{1 \cdot 10^{-3}} \doteq 14,3 \Rightarrow 15 \text{ bitů} \quad (2.2)$$

Minimální rozlišení převodníků tedy musí být alespoň 15 bitů. Takové se standardně nevyrobí, a proto budou použity 16bitové varianty. Komunikace mezi mikrokontrolérem a převodníky bude probíhat přes rozhraní SPI nebo I2C (podle typu vybraných převodníků).

Posledními řídicími prvky budou optické spínače, které budou řídit zařízení na diametrálně odlišných napěťových úrovních, než bude samotná karta. Požadovány jsou alespoň 4 tyto spínače.

2.2 Shrnutí požadavků na navrhovanou kartu

Následující tabulka stručně shrnuje požadavky na navrhovanou kartu:

<i>Popis</i>	<i>Množství / Hodnota / Poznámka</i>
Analogové diferenciální vstupy, rozsah -10 až 10 V	16 kanálů
Analogové diferenciální výstupy, rozsah -10 až 10 V	16 kanálů
Přesnost A/D a D/A převodníků	16 bitů
Digitální vstupy	8 kanálů
Digitální výstupy	8 kanálů
Optické spínače	4 kanály
Paměť typu FRAM	512 Kbit
Rozhraní RS-232 a RS-485	
Rozhraní Ethernet	100 Mbit/s
Optické konektory pro připojení optických kabelů	2 plně duplexní kanály

Tabulka 2.1: Požadavky na navrhovanou kartu.

2.3 Výběr vhodného mikrokontroléru

Při výběru mikrokontroléru byl brán ohled především na dostatečný výpočetní výkon, rychlost odezvy na přerušení, velkou modularitu periférií, vidinu inovace a podpory do budoucna a samozřejmě cenu. Dále bylo požadováno, aby měl mikrokontrolér implementováno rozhraní Ethernet. Nejlepší volbou se jevily mikrokontroléry od firmy Luminary Micro (dnes již patřící pod firmu Texas Instruments) s poměrně novým procesorovým jádrem ARM Cortex-M3, které splňuje všechny zmíněné požadavky. Výrobce jako první uvedl mikrokontroléry s kombinací tohoto jádra a rozhraní Ethernet. Dnes již nabízí široké spektrum mikrokontrolérů s tímto jádrem a je tedy možnost výběru podle počtu potřebných periférií. Výrobce k mikrokontrolérům dodává kvalitně zpracované knihovny, které usnadňují jejich programování. Velkou výhodou je i možnost zakoupení vývojového kitu, který obsahuje mikrokontrolér LM3S6965. Tento mikrokontrolér by svými parametry mohl být dobrým kandidátem pro řízení navrhované karty a bude v textu dále popsán.

2.4 Připojení karty k mikroskopu

Karta je koncipována tak, aby byla co nejvíce univerzální a bylo ji možné použít pro různá zařízení. Téměř všechna zařízení firmy používají pro připojení jednotlivých elektronických karet stejný hlavní konektor, pomocí kterého se signály z karet dále rozvádí na daná místa v zařízení. Tento konektor má celkem 96 pinů a bude osazen i na

nově navrhované řídicí a komunikační kartě. V tabulce 3.1 jsou nastíněny počty pinů, které na tomto konektoru zaujmou jednotlivé prvky, které bude karta obsahovat.

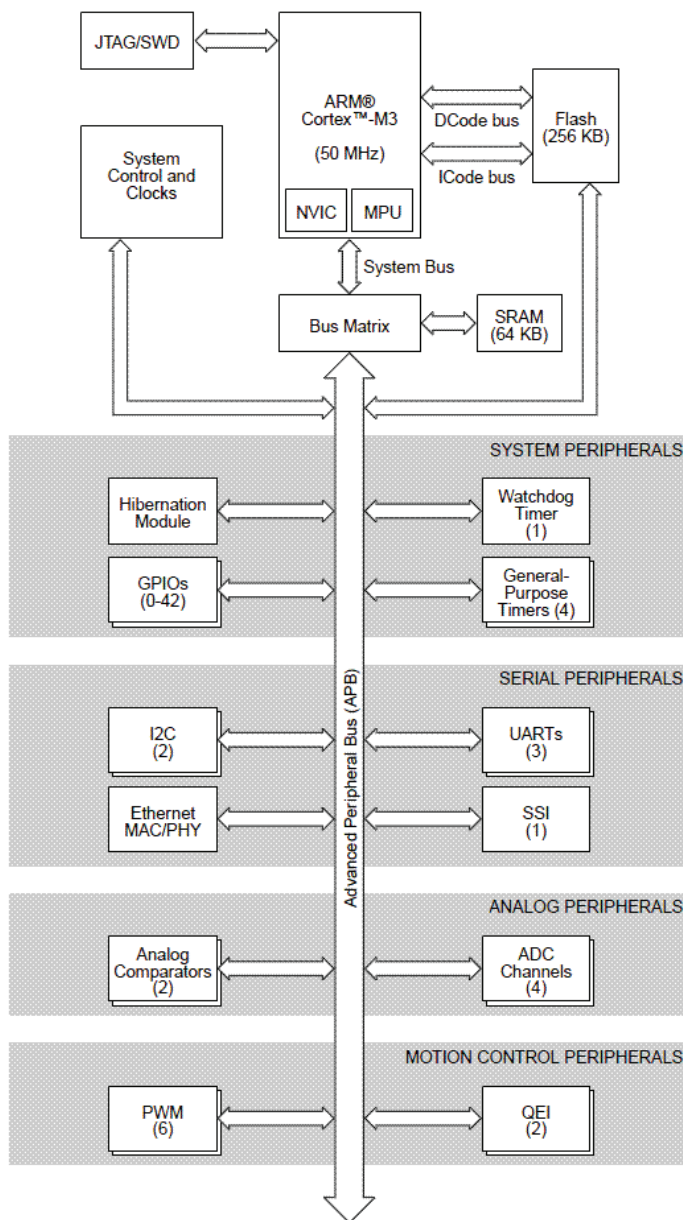
<i>Popis</i>	<i>počet pinů</i>
Napájení digitálních částí +5 V	1
Napájení analogových částí ±19 V	2
Napájení +24 V pro výstupy z optických spínačů	1
Země (GND, GNA)	8
D/A převodníky - diferenciální výstupy (16x2 piny)	32
A/D převodníky - diferenciální vstupy (16x2 piny)	32
Binární výstupy	8
Binární vstupy	8
Optické spínače	4
Celkem	96

Tabulka 2.2: Rozložení jednotlivých prvků na 96pinovém hlavním konektoru

3 MIKROKONTROLÉR LM3S6965

3.1 Základní přehled

Základním prvkem mikrokontroléru LM3S6965 je procesorové jádro ARM Cortex-M3, ke kterému výrobce přidal další periférie. Blokové schéma mikrokontroléru je zobrazeno na obrázku 2.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma mikrokontroléru LM3S6965 [1]

Maximální frekvence mikrokontroléru je 50 MHz, obsahuje paměť typu Flash o velikosti 256 kB a paměť typu SRAM o velikosti 64 kB. Dále modul hybernace, 42 I/O pinů, 4 moduly časovače a časovač „Watchdog“.

Pro komunikaci s externími zařízeními je vybaven třemi moduly sériové asynchronní linky (UART), dvěma moduly pro komunikaci po sběrnici I2C, jedním modulem synchronního sériového rozhraní (SSI), který může pracovat i v režimu standardu SPI vyvinutého firmou Motorola, a modulem Ethernetu, který v sobě kombinuje kontrolu přístupu k médium (MAC) a fyzickou vrstvu (PHY).

Pro zpracování analogových signálů mikrokontrolér obsahuje 2 nezávislé komparátory a čtyři kanály analogově-digitálního převodníku. Pro získávání údajů o mechanických pozicích nebo rychlostech (např. u motorů) je možné využít 2 moduly QEI (Quadrature Encoder Interface), ke kterým je možné přímo připojit například inkrementální čidla. Pro řízení motorů je možné využít 6 modulů generátoru signálu PWM.

3.2 Procesorové jádro ARM Cortex-M3

Jedná se o poměrně nové procesorové jádro od firmy ARM, které vychází z 32bitové harvardské architektury ARM7. Používá novou instrukční sadu Thumb-2, díky níž jádro nabízí vyšší výpočetní výkon při stejné frekvenci hodin.

Jádro obsahuje deterministický plánovač přerušení, který standardně zajistí začátek obsluhy přerušení během 12 hodinových cyklů, nebo během 6 hodinových cyklů při metodě „tail-chaining“, kdy jsou přerušení obsluhována bezprostředně po sobě bez nutnosti ukládání a načítání dat ze stacku. Je možné vyhodnocovat až 240 různých externích přerušení.

Součástí jádra je jednotka MPU (Memory Protection Unit), která řídí přístup k paměti, a také prvky umožňující jeho ladění (debug). V jádru jsou implementovány 3 módy režimu spánku s možností změny časování, což ještě více ušetří dodávanou energii.

Velkou výhodou procesorového jádra ARM Cortex-M3 je jeho cena, která je téměř srovnatelná s 8 a 16-bitovými jádry. Pro jeho vlastnosti se objevují i názory, že by se toto jádro mohlo stát rozšířeným standardem v oblasti 32-bitových mikrokontrolerů, podobně jako se stalo jádro 8051 standardem v oblasti 8-bitových mikrokontrolerů. Již dnes jej do svého portfolia zahrnuje stále více výrobců mikrokontrolerů.

3.3 Řízení systému mikrokontroléru

Základní řízení mikrokontroléru určuje jeho celkové chování. Řídí jeho časování, nastavení periférií, konfiguraci, reset a poskytuje informace o zařízení a jeho současném stavu.

Mikrokontrolér může mít 5 různých zdrojů časování: externí nebo hlavní oscilátor (0 až 50 MHz), interní oscilátor (15 MHz, $\pm 50\%$), interní oscilátor dělený čtyřmi nebo fázový závěs (PLL), jehož zdrojem může být některý z prvních čtyř oscilátorů.

Většina periférií pracuje s jedním zdrojem hodin. Pouze bloky A/D převodníku a zdroje signálu PWM mají své vlastní zdroje hodin. Aby mohl být použit A/D převodník, musí být použit oscilátor fázový závěs.

Mikrokontrolér umožňuje provoz ve třech různých režimech: režim běhu, režim spánku a tzv. režim hlubokého spánku. V režimu běhu mikrokontrolér aktuálně zpracovává kód programu, v režimu spánku mikrokontrolér přestane zpracovávat kód programu, ale jeho časování zůstává beze změny, a v režimu hlubokého spánku mikrokontrolér přestane zpracovávat kód programu a změní se i jeho časování v závislosti na jeho časování v režimu běhu.

Existuje několik událostí, které mohou zapříčinit reset mikrokontroléru: pokles vstupního napětí pod danou mez, externí reset, softwarový požadavek na reset a watchdog timeout. Některé z těchto událostí mohou být konfigurovány.

Každá z periférií mikrokontroléru může být samostatně povolena nebo zakázána. Je možné také nastavit, které periférie zůstanou povoleny v režimu spánku nebo v režimu hlubokého spánku. Je potřeba ale vzít v úvahu, že ve druhém zmíněném režimu může dojít ke změně časování a některé periférie, které vyžadují přesně nastavené časování (např. UART), nebudou pracovat správně.

Mikrokontrolér také umožňuje vygenerovat systémové (procesorové) přerušení, na které je možné následně pomocí obslužné rutiny příslušně reagovat. Toto přerušení mohou vyvolat některé události, které jsou specifikovány v dokumentaci k mikrokontroléru.

3.4 Periférie

V této kapitole budou uvedeny základní parametry periférií. Protože celkový výčet všech periférií by byl příliš velký, zaměřil jsem se především na ty periférie, které budou řídicí a komunikační kartou pro elektronový mikroskop využity.

3.4.1 Vstupně-výstupní porty (GPIO)

Mikrokontrolér má k dispozici celkem 42 vstupně-výstupních pinů – 4 porty (A až D) po 8 pinech, 2 porty (E, F) po 4 pinech, 1 port (G) po 2 pinech. Každý pin má následující možnosti nastavení:

- Může být konfigurován jako vstupní nebo výstupní (po resetu defaultně vstupní)
- Vstupní mód – může generovat přerušení na úroveň (high/low), na jednu hranu (nástupnou/sestupnou), nebo na obě hrany

- Výstupní mód – výstupní proud konfigurovatelný (2 mA, 4 mA nebo 8 mA; po resetu defaultně 2 mA), při 8 mA je možnost nastavit slew rate
- Volitelně weak pull-up nebo pull-down rezistory (po resetu pull-up)
- Možnost nastavení jako open-drain (po resetu nastaveno push/pull)
- Možnost nastavení buď jako IO pin, nebo jako pin některé z periférií (po resetu IO pin); ne všechny piny mohou být propojeny na nějakou periférii

3.4.2 Čítače/časovače

Mikrokontrolér má celkem 4 moduly časovače. Každý modul časovače obsahuje dva 16-bitové čítače/časovače (TimerA a TimerB), které mohou pracovat nezávisle buď jako časovače, nebo jako čítače událostí. Může být také nastaven režim, ve kterém se tyto dva čítače/časovače chovají jako jeden 32-bitový časovač nebo jako 32-bitový zdroj reálného času (RTC).

Jestliže je zvolen režim 16-bitového nebo 32-bitového časovače, může být tento časovač dále nastaven jako jednorázový nebo kontinuální. Jednorázový časovač začne časovat od nastavené hodnoty a pokud dosáhne nuly, tak skončí. Na druhou stranu kontinuální časovač pokud dosáhne nuly, začne znovu časovat od nastavené hodnoty označované jako „reload value“. Jestliže je modul časovače použit jako zdroj reálného času, musí být jeho časování řízeno oscilátorem s frekvencí 32,768 kHz, neboť vnitřní obvody jsou nastaveny tak, aby dělením této hodnoty byla získána perioda 1 sekunda.

V 16-bitovém režimu může být modul použit kromě časovače také jako čítač nebo generátor pulzně-šířkově modulovaného signálu (PWM). Čítačem může být čítán buď počet událostí, nebo doba trvání mezi nimi. Možnost čítání je nastavitelné na nástupnou hranu, na sestupnou hranu nebo na obě hrany.

Modul časovače může být samozřejmě propojen se zdroji přerušení. V tomto případě může být vygenerováno přerušení například při výskytu určitého počtu událostí, při přetečení časovače, při shodě hodnoty zdroje reálného času s jinou nastavenou hodnotou, apod.

3.4.3 Přerušení

Řadič přerušení mikrokontroléru poskytuje celkem 32 zdrojů přerušení s osmi úrovněmi priorit. Každý ze zdrojů přerušení může být maskován, nebo je možné globálně maskovat všechna přerušení.

Řadič přerušení je úzce spjat s jádrem mikrokontroléru. Potřebuje-li program reagovat na nějaké přerušení, řadič přerušení okamžitě předá jádru mikrokontroléru adresu, na které je uložena obslužná rutina daného přerušení. Tím odpadá použití globální obslužné rutiny přerušení, ve které by se teprve tato funkce dotazovala řadiče, který zdroj přerušení vyvolal. Dojde tak ke zkrácení času obsloužení daného přerušení.

Systém priorit umožňuje upřednostnit obsluhu některých přerušení před ostatními. Pro nastavení priority jsou v mikrokontroléru použity 3 bity, tedy možnost nastavení až

osmi úrovní priorit. Je možné také nastavit tzv. subpriority. To znamená, že celkový počet bitů (3) bude rozdělen na N bitů pro přednostní prioritu a M bitů pro subpriority. Nastanou-li v tomto případě ve stejném čase dvě přerušení se stejnou přednostní prioritou, ale s různou subprioritou, je obsluženo nejprve přerušení s vyšší subprioritou a hned po jeho skončení (bez nutnosti načítání a ukládání stavu procesoru do paměti) přerušení s nižší subprioritou. Tímto způsobem dochází k dalšímu zkrácení obsluhy daných přerušení.

Většinou zdrojů přerušení lze nastavit prioritu, přičemž výchozí a zároveň nejvyšší prioritou je hodnota 0. Existují však výjimky, které mají ještě vyšší prioritu (záporné číslo). Jsou to zdroje přerušení Reset (-3), nemaskovatelné přerušení (-2) a závažná chyba (-1). Žádný zdroj, kterému lze přiřadit prioritu, tak nemůže mít vyšší prioritu než tyto tři zmíněné zdroje.

Obslužné rutiny mohou být k daným přerušením přiřazeny buď staticky, to znamená při kompilaci, nebo dynamicky, tedy při běhu programu. Při statickém přiřazení se daná funkce zapíše přímo do tabulky obslužných rutin přerušení, při dynamickém přiřazení se použije funkce **IntRegister()** (viz příloha 2, knihovni funkce přerušení). V obou případech musí být povoleno přerušení od daného zdroje pomocí funkce **IntEnable()**.

Zdroj přerušení by neměl být povolen předtím, než mu bude přiřazena jeho obslužná rutina. V tabulce obslužných rutin je totiž pro všechny zdroje přednastavena funkce, která provádí nekonečnou smyčku. Pokud by daný zdroj byl povolen a vznikl požadavek na obslužení jeho přerušení, byla by tato funkce zavolána, procesor by uváznuv v nekonečné smyčce a musel by být resetován.

3.4.4 Asynchronní sériová linka (UART)

Mikrokontrolér obsahuje celkem 3 nezávislé programovatelné moduly asynchronní sériové linky (UART). Ty mají následující parametry:

- dva (16x8)bitové zásobníky FIFO - jeden pro příjem a jeden pro vysílání
- generátor přenosové rychlosti s maximální rychlostí 3,125 Mbps
- možnost nastavení, po jakém objemu přijatých/odeslaných dat vznikne přerušení
- automatické generování start bitu, stop bitu a paritního bitu
- programovatelné sériové rozhraní:
 - 5, 6, 7 nebo 8 datových bitů
 - sudá, lichá nebo žádná parita, dále tzv. parita „stick“ (stále log. 0 nebo log. 1)
 - 1 nebo 2 stop bity
 - nastavitelná přenosová rychlost
- IrDA serial-IR (SIR) enkodér/dekodér

3.4.5 Sběrnice I2C

Sběrnice I2C poskytuje obousměrnou komunikaci po dvoudrátovém vedení. Jeden drát slouží pro přenos dat (SDA) a druhý pro synchronizaci hodinového signálu (SCL). Zařízení na sběrnici se dělí na Master (inicializující komunikaci) a Slave. Mikrokontrolér poskytuje dvě komunikační rychlosti – 100 kbps (standard) a 400 kbps (fast). Sběrnice I2C se používá zejména pro externí zařízení, jako jsou externí paměti, displeje, převodníky a podobně.

Mikrokontrolér LM3S6965 obsahuje dva nezávislé I2C moduly. Každý z těchto modulů se dále dělí na modul Master a modul Slave. Mikrokontrolér tedy umožňuje chování jako Master, jako Slave nebo jako oba dohromady. Oba moduly Master i Slave mohou generovat přerušení. Modul Master vygeneruje přerušení, jestliže byla dokončena operace čtení nebo zápisu, nebo byla-li tato operace přerušena kvůli chybě. Modul Slave naopak vygeneruje přerušení, jestliže od něj master požaduje příjem nebo odeslání dat.

3.4.6 Synchronní sériové rozhraní (SSI)

Modul SSI poskytuje možnost synchronní sériové komunikace s periferními zařízeními, která jsou k mikrokontroléru připojena. Velikost rámce dat je volitelná od 4 do 16 bitů a do vstupního i výstupního zásobníku FIFO je možné uložit až osm 16-bitových hodnot. Modul SSI může být nastaven buď v režimu Master, nebo v režimu Slave. Je možné také nastavit velikost přenosové rychlosti. Její maximální hodnota závisí na vstupním časování modulu a na maximální přenosové rychlosti, kterou podporují připojená zařízení. Pro zařízení, které obsahují řadič DMA, poskytuje modul rozhraní DMA k usnadnění přenosu dat do paměti zařízení.

4 KOMUNIKAČNÍ ROZHRAŇÍ ETHERNET

4.1 Popis rozhraní Ethernet

Ethernet je v současné době jedno z nejrozšířenějších komunikačních rozhraní. Hlavní příčinou je jeho široké využití pro komunikaci v sítích LAN, kde poskytuje poměrně dobré komunikační parametry. Díky jeho rozšíření jsou komponenty potřebné pro jeho nasazení vyráběny ve velkých sériích, což má za následek nižší náklady na jejich výrobu a tedy i nižší prodejní cenu. Nejen z tohoto důvodu se rozhraní Ethernet využívá čím dál častěji i v průmyslu a v dalších odvětvích.

Jako přenosové médium se dnes nejčastěji používá kroucený pár nebo optické vlákno a přenosové rychlosti jsou obvykle 10, 100 a 1000 Mbps. Pro připojení koncových zařízení se nejčastěji používá fyzická topologie hvězda s využitím prepínacího prvku switch. Ten se stará o směrování zpráv k jednotlivým zařízením na základě fyzických (MAC) adres. Na rozdíl od dříve používaného rozbočovače hub, switch směruje zprávy pouze k zařízením, pro které jsou určeny.

Rozhraní Ethernet definuje 2 základní vrstvy z ISO/OSI modelu – fyzickou a linkovou (spojovou). Fyzická vrstva (PHY) definuje fyzikální a elektrické vlastnosti rozhraní – typ a parametry použitého média, rozložení pinů u konektorů, napěťové úrovně, apod. Linková vrstva (MAC) má na starosti fyzické adresování zařízení, tvorbu zpráv neboli rámcování („framing“), detekci chyb vzniklých při přenosu a specifikuje také použitou MAC techniku (přístup k médiu).

V současné době se nejčastěji používá formát rámce verze Ethernet II, který je zobrazen na Obrázku 4.1. Rámec je uvozen preambulí střídajících se jedniček a nul (zakončeno dvěma jedničkami), následují MAC adresy cíle a zdroje, typ použitého vyššího protokolu (IPv4, ARP,...), data a kontrolní sekvence (FCS).



Obrázek 4.1: Formát rámce typu Ethernet II

4.2 Implementace rozhraní Ethernet v mikrokotroléru

LM3S6965

Mikrokotrolér LM3S6965 v sobě integruje jak fyzickou vrstvu (PHY) tak vrstvu linkovou (MAC). Implementace odpovídá standardu IEEE 802.3 a plně podporuje alternativy Ethernetu 10BASE-T (10 Mbit/s, kroucený pár) a tzv. Fast Ethernet 100BASE-TX (100 Mbit/s, kroucený pár). Modul Ethernetu má široké možnosti

nastavení – nastavitelná MAC adresa, výběr aktivity LED diod u konektoru, možnost přepnutí do promiskuitního módu, nastavení automatického vyhodnocení kontrolního součtu, uživatelsky nastavitelná přerušení, atd. Pro jednoduché nastavení a použití se využívají knihovní funkce.

4.3 lwIP A μ IP – open source TCP/IP stack

lwIP (lightweight IP) je zjednodušená implementace TCP/IP stacku navržená pro použití v jednoduchých aplikacích, speciálně v embedded systémech, které jsou řízeny jednoduchými mikrokontroléry. Byla původně vyvinuta Adamem Dunkelsem ze Švédského institutu počítačových věd (SICS) a dnes je podporována širokou skupinou dalších institucí. Zdrojový kód lwIP je napsán v jazyce C a implementuje běžně používané protokoly (IP, ICMP, TCP, UDP, ARP,...).

μ IP (micro IP) je ještě jednodušší forma TCP/IP stacku než lwIP a implementuje pouze nejzákladnější protokoly pro komunikaci přes TCP/IP. μ IP je určeno pro zařízení s minimální velikostí paměti RAM (pouze několik kB a méně), tedy většinou pro velmi jednoduché 8bitové platformy.

Mikrokontrolér LM3S6965 obsahuje statickou paměť RAM (SRAM) o velikosti 64 kB, což je dostatečná velikost pro použití lwIP. Pro komunikaci navrhované karty s PC bude tedy pravděpodobně využít tento open source TCP/IP stack.

4.4 Software pro komunikaci po sběrnici Ethernet na straně nadřazeného PC

Pro potřeby testování komunikace přes rozhraní Ethernet s využitím TCP/IP mezi mikrokontrolérem a PC byly nastudovány základní potřebné komponenty jazyka C# v programovém prostředí Microsoft Visual Studio 2008.

Byla použita třída **TcpClient**, která reprezentuje připojení přes TCP protokol a poskytuje jednoduché metody pro jeho nastavení a práci s ním. Po vytvoření instance třídy TcpClient se tento klient připojí k druhému zařízení pomocí metody **Connect(IPAddress, PortNumber)**. Po připojení se zavolá funkce **GetStream()** vracející třídu NetworkStream, což je třída poskytující metody pro odesílání a přijímání dat. V tuto chvíli je již možné posílat a přijímat data pomocí metod **Write(Buffer, Offset, Size)** a **Read(Buffer, Offset, Size)**, což jsou metody zmíněné třídy NetworkStream. Na konci přenosu by mělo být spojení ukončeno metodou **Close()** příslušné třídy TcpClient. Tato metoda ukončí i příslušný stream.

Jedná se pouze o velmi zjednodušený popis základních komponent, neboť tato problematika není předmětem této práce. Více informací lze nalézt v dokumentaci k vývojovému prostředí a jazyku C#.

5 VÝBĚR PŘEVODNÍKŮ A OPTICKÝCH ODDĚLOVACÍCH ČLENŮ

5.1 A/D převodníky

Pro potřeby měření analogových signálů z různých zdrojů elektronového mikroskopu bude řídicí karta vybavena analogově-digitální převodníky. Aby byla dosažena požadovaná přesnost, budou použity převodníky s rozlišením nejméně 16 bitů. Jak již bylo uvedeno v tabulce 3.1, je požadováno alespoň 16 analogových vstupních kanálů, přičemž všechny jsou diferenciální, aby byl při vedení těchto signálů v mikroskopu pomocí kabelů minimalizován vliv rušení. Na hlavním připojovacím konektoru tedy tyto analogové vstupy zaberou 32 pinů.

Při výběru A/D převodníků jsem se zaměřil především na 3 výrobce, kteří patří mezi přední dodavatele těchto komponent – Analog Devices, Texas Instruments a Maxim. Rozhodujícími parametry byly rozlišení, počet kanálů, rychlost, komunikační rozhraní, napěťová úroveň napájení, interní/externí reference a v neposlední řadě cena. Rozlišení bylo stanoveno v části práce, zabývající se koncepcí karty, na 16 bitů. V úvahu byly brány pouze převodníky s minimálně osmi kanály, aby nebylo potřeba osazovat více než dva kusy. Při posuzování komunikačního rozhraní byla dána přednost standardním rozhraním SPI a I2C, dostatečná rychlost byla stanovena na několik desítek tisíc vzorků za sekundu a napájecí napětí by mělo být v mezích 0 – 5 V. Také byly upřednostněny převodníky s interní referencí, aby nemusela být dále řešena dostatečně přesná externí reference. Na základě ceny bude následně vybrán konečný dodavatel.

V tabulce 5.1 jsou uvedeny možné varianty, ze kterých jsem dále vybíral. Je uvedena pouze cena, kterou výrobce uvádí na svém webu. Jedná se spíše o cenu orientační, protože dodavatelé do jednotlivých zemí mají samozřejmě ceny jiné.

výrobce	typ	bitů	kanálů	rozhraní	rychlost	napájení	pouzdro	int/ext ref.	cena (výrobce)
Analog Devices	AD7699	16	8	Ser, SPI	500kSPS	4,5 - 5,5V	CSP	int/ext	\$7,99
Analog Devices	AD7689	16	8	Ser, SPI	250kSPS	2,7 - 5,5V	CSP	int/ext	\$5,99
Analog Devices	AD7708	16	10	Ser, SPI	1,365kSPS	2,7 - 5,25V	SOIC, SOP	ext	\$4,03
Texas Instruments	ADS8345 ADS8344	16	8	SPI	100kSPS	2,7 - 5,25V	20SSOP/QSO P	ext	\$8,00
Texas Instruments	ADS1178	16	8	SPI	52kSPS	1,65 - 1,95V	64HTQFP	ext	\$8,00
Texas Instruments	ADS1158	16	16	SPI	125kSPS	2,5 - 3,5V	48VQFN	ext	\$5,95
Maxim	MAX1168	16	8	SPI	200kSPS	2,7 - 5,25V	QSOP/24	int/ext	\$9,60

Tabulka 5.1: Navrhované varianty A/D převodníků.

Z navrhovaných variant byl vybrán A/D převodník od firmy Analog Devices s označením AD7699, který splňuje všechny požadované parametry včetně interní reference. I jeho rychlost je velice dobrá. Převodník sice umožňuje nastavení vstupů i jako diferenciální, nicméně diferenciální analogové kanály z mikroskopu budou upraveny na jednoduché pomocí operačních zesilovačů a následně přivedeny k převodníku. Prvním důvodem je ochrana převodníku před napětovými impulsy. Lepší je ztratit poměrně levný operační zesilovač, než převodník. Druhým důvodem je to, že v tomto případě nám budou k požadovaným 16 vstupním kanálům postačovat pouze 2 převodníky. V případě diferenciálních vstupů vedoucích přímo do převodníku bychom museli použít převodníky 4, protože při této konfiguraci je možné k jednomu převodníku přivést pouze 4 diferenciální kanály.

Před definitivním rozhodnutím zvolit daný typ převodníku bylo nutné zjistit jeho dostupnost. Mezi distributory dodávající produkty firmy Analog Devices do České republiky patří i firmy Amtek a Farnell. První jmenovaná firma nabízí A/D převodník AD7699 za cenu přibližně 220 Kč bez DPH, avšak je nutné odebrat najednou minimální množství 31 kusů. To je poměrně mnoho vzhledem k tomu, že musí nejprve vzniknout prototyp karty, který bude následně otestován a bude vyhodnoceno, zda její parametry vyhovují. Firma Farnell oproti tomu nabízí tento typ převodníku za cenu přibližně dvakrát tak vysokou, avšak je možné jej odebrat po jednotlivých kusech. Z tohoto důvodu bude jako dodavatel zpočátku zvolena firma Farnell a v případě potřeby vyrábět tuto novou kartu ve větším množství bude dodavatel zaměněn za firmu Amtek.

5.2 D/A převodníky

Mnoho jednotlivých částí v mikroskopu se řídí pomocí napětí, obvykle v rozsahu od -10 do 10 V. Z tohoto důvodu je nutné novou řídicí kartu osadit i digitálně-analogovými převodníky, jejichž signály z výstupů budou upraveny pomocí operačních zesilovačů na požadovaný rozsah. Rozlišení D/A převodníků je požadováno stejné jako u A/D převodníků, tedy 16 bitů, a počet kanálů nejméně 16.

Rozhodujícími parametry při výběru byly rozlišení, počet kanálů, rychlost, komunikační rozhraní, napětová úroveň napájení, interní/externí reference a cena, tedy stejné parametry jako u A/D převodníků. Tabulka 5.2 uvádí navrhované varianty.

výrobce	typ	bitů	kanálů	komun. rozhraní	rychlost	napájení	pouzdro	int/ext ref.	cena (web výrobce)
Analog Devices	AD5668	16	8	Ser, SPI	95kSPS	2,7 - 5,5V	CSP, SOP	int/ext	\$11,39
Analog Devices	AD5669R	16	8	I2C/Ser 2-wire, Ser	166kSPS	2,7 - 5,5V	CSP, SOP	int/ext	\$12,30
Analog Devices	AD5678	16	8	Ser, SPI	95kSPS	2,7 - 5,5V	CSP, SOP	int/ext	\$10,99
Texas Instruments	DAC8538	16	8	SPI	200kSPS	2,7 - 5,5V	16TSSOP	int/ext	\$10,95
Texas Instruments	DAC8718	16	8	SPI	66,6kSPS	2,7 - 5,5V	48VQFN 64TQFP	ext	\$16,45
Maxim	Nenabízí D/A převodníky požadovaných parametrů.								

Tabulka 5.2: Navrhované varianty D/A převodníků.

Z těchto převodníků byly dále uvažovány dva. Prvním je převodník AD5668 od firmy Analog Devices, který je takřka totožný s převodníkem AD5678, avšak má asi 6 krát menší spotřebu energie. Druhým je převodník DAC8538 od firmy Texas Instruments. Tento převodník sice nabízí vyšší rychlost, nicméně i rychlost převodníku AD5668, která je 95 kSPS (kilo samples per second), je pro potřeby firmy Delong Instruments plně dostačující. Firma navíc nemá příliš dobré zkušenosti s dodávkou součástek od firmy Texas Instruments, která často svým distributorům neposkytla zboží včas. Z tohoto důvodu jsem se tedy rozhodl pro převodník AD5668 od firmy Analog Devices. Výrobce navíc nabízí i variantu, kdy je výstup tohoto převodníku po resetu automaticky nastaven na střední hodnotu. Toho bude možné využít i v navrhované kartě, neboť jak již bylo řečeno, výstup z karty bude v rozsahu -10 až 10 V a po resetu je požadována hodnota 0 V. Absence této funkce ovšem není limitující, protože nastavení výstupu po resetu na střední hodnotu lze řešit i programově. Převodník je opět dostupný jak u firmy Amtek, tak u firmy Farnell v různých pouzdrech.

5.3 Optické oddělovací členy

Optické oddělovací členy, zkráceně optočleny, se používají ke galvanickému oddělení dvou elektrických obvodů. První obvod řídí spínání druhého obvodu, jehož napěťové úrovně se od prvního obvodu mohou lišit v řádech stovek voltů. Optočlen představuje spojení dvou polovodičových součástek do jednoho pouzdra – LED diody (obyčejné nebo infra) a spínaného prvku citlivého na dopad záření, což nejčastěji bývá fototranzistor, fototyristor nebo fototriak.

Komunikační a řídicí karta k elektronovému mikroskopu bude využívat optočleny například k řízení elektromagnetického ventilu regulujícího tlak v komoře mikroskopu nebo k řízení (spínání) externího zařízení, u kterého je vhodné galvanické oddělení, aby nedocházelo k přenosu šumu a nebezpečně velkých napětí do elektroniky mikroskopu.

Při výběru optočlenů byla uvažována firma Clare, což je výrobce polovodičových součástek, od kterého firma Delong Instruments optočleny dlouhodobě nakupuje a má s jeho produkty dobré zkušenosti. Optočleny od firmy Clare se využívají i v jiných zařízeních firmy Delong Instruments, a proto, pokud vyhoví požadovaným parametrům, nemá smysl objednávat jiné optočleny od jiné firmy, především z důvodu množstevních slev. V úvahu také byly brány pouze optočleny v pouzdrech SMD, neboť celá elektronická karta bude obsahovat spoustu součástek a je potřeba dodržet její limitované rozměry.

Ve firmě nejvíce používaný typ optočlenu CPC1004N má velikost spínaného proudu 300 mA a napětí U_{CE} 100 V. Jeho spínací a rozpínací doba se pohybuje v řádech jednotek milisekund, což je pro naše použití zcela dostatečné. Tento typ je používán zejména z důvodu poměrně nízké ceny, protože oproti ostatním typům je určen pro spínání pouze stejnosměrných proudů. V některých případech je ovšem možné, že bude

nutné spínat vyšší proud než 300 mA. V takových případech bude nutné kartu osadit optočleny s vyšší hodnotou tohoto parametru, nicméně nebude nutné měnit tisk plošného spoje. Naopak napětí U_{CE} 100 V se prakticky ještě nevyužilo, a tak je možné vzít v úvahu i optočleny s nižší hodnotou U_{CE} . Tabulka 5.3 uvádí kromě zmíněného typu i další varianty, které by mohly být podle potřeb konkrétního zařízení využity. Důležitým parametrem je samozřejmě i cena. V současné době je maloobchodní cena optočlenu CPC1004N asi 25 Kč, což je v porovnání s ostatními firmami poměrně dobrá cena optočlenu s těmito parametry, pokud vezmeme v úvahu to, že firma Delong Instrument provozuje kusovou výrobu a nebere tedy součástky v tak velkých množstvích, jako firmy se sériovou výrobou.

výrobce	typ	max. U_{CE} [V]	max. I_C [mA]	izolační napětí [V]	řídící proud [mA]	t-on [ms]	t-off [ms]	pouzdro
CLARE	CPC1002N	60	700	1500	2	5	2	4-pin SOP
CLARE	CPC1004N	100	300	1500	2	3	1	4-pin SOP
CLARE	CPC1014N	60	400	1500	2	2	1	4-pin SOP
CLARE	CPC1018N	60	600	1500	1	3	2	4-pin SOP
CLARE	CPC1019N	60	750	1500	1	3	3	4-pin SOP
CLARE	CPC1020N	30	1200	1500	2	3	3	4-pin SOP

Tabulka 5.3: Navrhované varianty optočlenů.

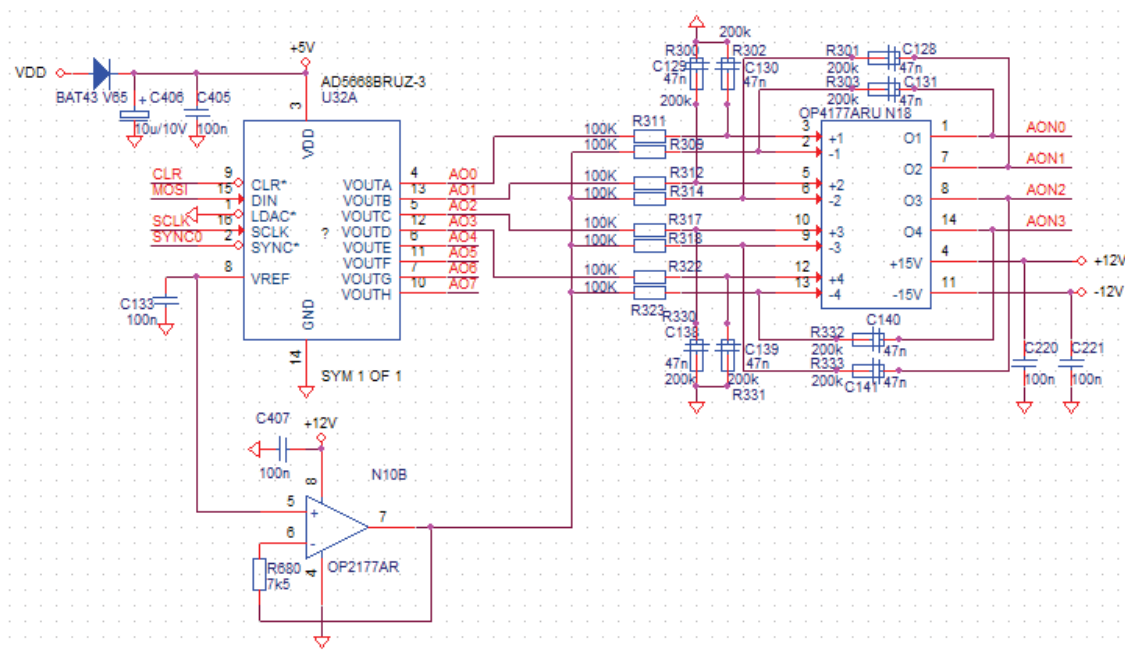
6 NÁVRH OBVODOVÉHO SCHÉMATU

V následující kapitole bude podrobně rozebrán návrh obvodového schématu navrhované karty. Jednotlivé podkapitoly se vždy týkají určitých částí obvodu, které spolu souvisejí.

6.1 Zpracování analogových výstupních signálů

Základním prvkem realizace analogových výstupů karty je digitálně-analogový převodník AD5668 od firmy Analog Devices. Jedná se o 16bitový převodník řízený přes rozhraní SPI. Jeho provedení BRUZ-3 v 16pinovém pouzdře TSSOP obsahuje interní referenci 2,5 V, která spolu s pevně nastaveným zesílením na hodnotu 2 zajišťuje rozsah výstupů od 0 do 5V. Výstupy budou dále upraveny z rozsahu 0 až 5 V na rozsah -10 až 10 V, kdy střední hodnota 2,5 V bude po úpravě odpovídat hodnotě 0 V. Aby tedy bylo po resetu zajištěno nastavení všech analogových výstupů karty na 0 V, bude využito další funkce, kterou provedení BRUZ-3 nabízí, a to automatické nastavení všech výstupů po resetu na střední hodnotu 2,5 V. Po resetu je převodník nastaven pro použití externí referenze, a proto je nutné ji programově přepnout na interní. V tomto případě potom pin VREF slouží jako výstupní s uvedenou hodnotou výstupu 2,5 V.

Jestliže se jako reference převodníku AD5668 používá reference interní, je výrobcem podle [7] doporučeno zapojit mezi výstupní pin VREF a zem kondenzátor o hodnotě 100 nF, což zajistí větší stabilitu referenčního napětí.

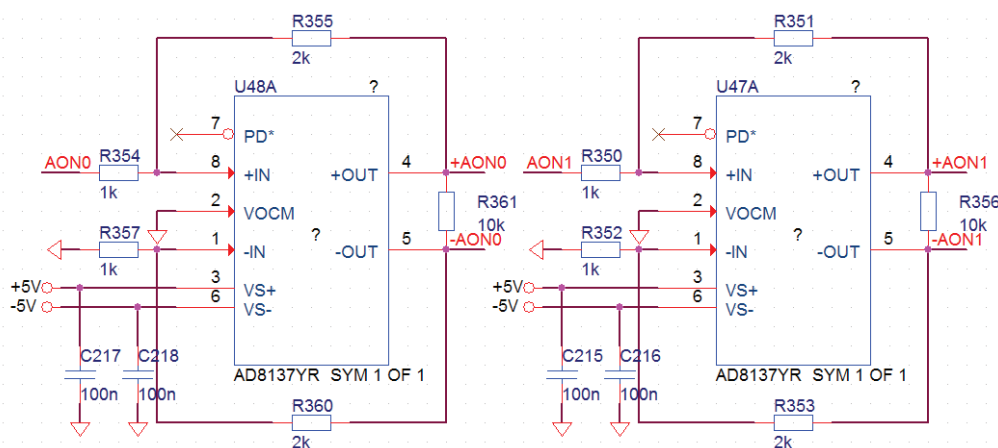


Obrázek 6.1: Úprava analogových výstupů pomocí diferenciálního zapojení OZ

K převodníku je dále připojen signál CLR, který slouží k resetování všech výstupů na přednastavenou hodnotu a dále signály SCLK, SYNC0 a MOSI zajišťující komunikaci přes rozhraní SPI. Pin LDAC umožňující aktualizaci všech výstupů ve stejnou dobu je připojen přímo na zem, takže tato funkce nebude využita a po zapsání nové hodnoty do registru výstupu bude příslušný výstup okamžitě aktualizován na novou hodnotu. Dioda V65 připojená mezi napětí VDD a napájení převodníku slouží pro jeho správnou inicializaci. V případě, kdy by byla na vodiči SYNC0 logická hodnota 1 dříve, než napětí +5V na VDD, mohlo by dojít k zablokování převodníku.

Výstupní signál je nejprve upraven z rozsahu 0 až 5 V na rozsah -5 až 5 V pomocí operačního zesilovače v diferenciálním zapojení. Zapojení je znázorněno na obrázku 6.1, kde symbol $\text{---} \parallel \text{---}$ označuje paralelní zapojení odporu a kondenzátoru. Porovnává se výstup z převodníku (0 až 5 V) s referencí 2,5 V, která je vedena přes sledovač, aby ji bylo možné zatížit. Tímto způsobem vznikne výstup v rozsahu -2,5 až 2,5 V, který je zároveň pomocí nastaveného zesílení 2 krát zesílen na rozsah -5 až 5 V. Současně je také signál filtrován dolní propustí pomocí kondenzátorů připojených paralelně k odporům ve zpětných vazbách. Protože frekvence změny výstupních napětí bude maximálně pár desítek Hz, byla zvolena hodnota časové konstanty filtru přibližně 10 ms, což odpovídá frekvenci 100 Hz: $\tau = RC = 200 \cdot 10^3 \cdot 47 \cdot 10^{-9} = 9,4 \text{ ms}$.

Aby byl výstupní analogový signál diferenciální, je pro další úpravu signálů použit operační zesilovač AD8137 s diferenciálními výstupy. Vstupní signál o rozsahu -5 až 5 V je 2 krát zesílen na výstupní signál o rozsahu -10 až 10V, který je již diferenciální. Signál přivedený na pin VOVM určuje napětíovou hladinu, kolem které jsou diferenciální výstupy +OUT a -OUT symetrické. V našem případě je to 0 V, takže každý z diferenciálních výstupů může nabývat hodnot od -5 do 5 V vůči zemnímu potenciálu. Mezi nimi tedy můžeme získat požadovaný rozsah -10 až 10 V. Hodnoty odporů určujících zesílení byly zvoleny na základě doporučení výrobce pro dané zesílení (tabulka 7 v [9]) a mezi diferenciálními výstupy byl navíc zapojen odpor o hodnotě 10 k Ω , který byl určen z grafů na obrázcích 23 a 26 v dokumentaci výrobce [9].



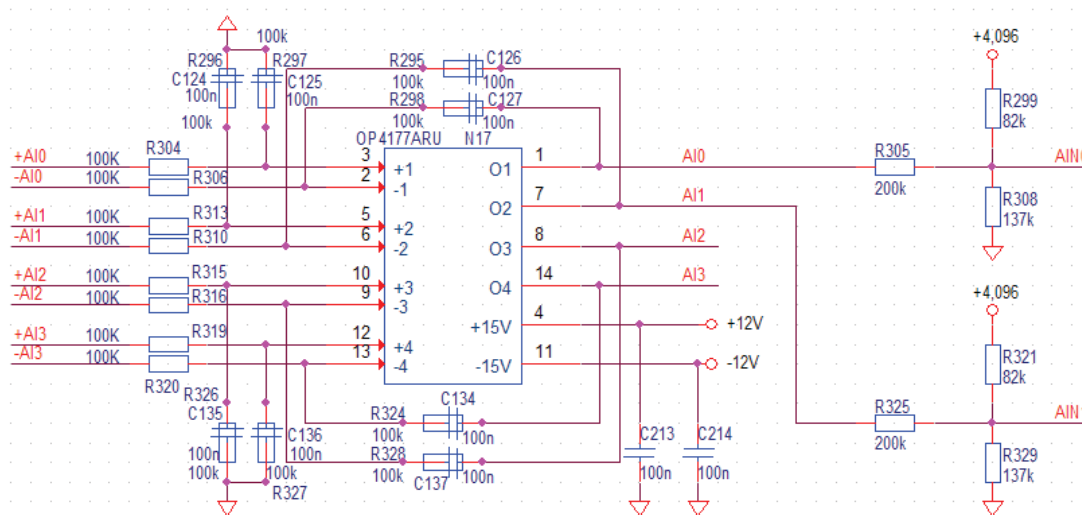
Obrázek 6.2: Úprava analogového výstupu jednoduchého na diferenciální.

Zesilovač je typu rail-to-rail, a proto bude pro jeho napájení postačovat napětí ± 5 V. Pin PD* („power down“) slouží k uvedení OZ do stavu nízké spotřeby a pokud není tato funkce využita, má být podle výrobce ponechán nezapojen. Pro potlačení rušení by bylo vhodnější signál filtrovat až těsně před jeho převedením na diferenciální, tedy až pomocí tohoto operačního zesilovače s diferenciálními výstupy. Protože jsou ale doporučené hodnoty odporů ve zpětných vazbách poměrně malé (2 k Ω), musely by být paralelně připojené kondenzátory naopak poměrně velké, abychom dosáhli požadované časové konstanty. Proto byl signál filtrován již na předchozím operačním zesilovači a vzdálenost na DPS mezi uvedenými operačními zesilovači by měla být co nejkratší, aby se na vyfiltrovaný signál nenaindukovalo rušení. Současně by měly být diferenciální výstupy vedeny co nejblíže sobě až k místu výstupního konektoru.

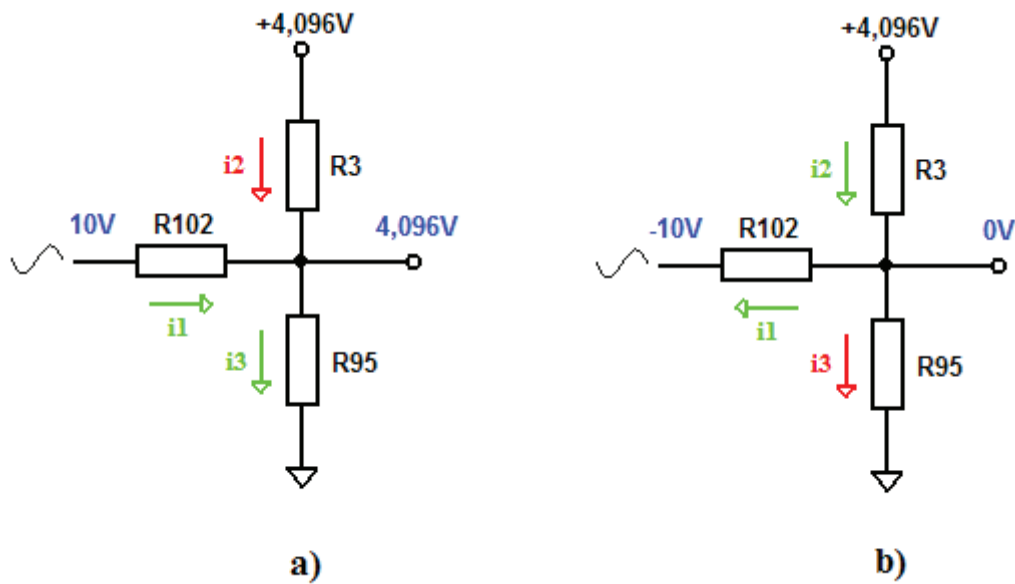
6.2 Zpracování analogových vstupních signálů

Analogové vstupy jsou opět uvažovány jako diferenciální. Jsou zpracovány pomocí operačního zesilovače v diferenciálním zapojení, tentokrát ovšem bez zesílení. Výstupní signál z OZ má rozsah -10 až 10 V a je filtrován pomocí dolní propusti s časovou konstantou $\tau = 10$ ms.

V dalším kroku je nutné signál upravit na rozsah vhodný pro zpracování analogově-digitálním převodníkem AD7699. Ten má interní referenci $+4,096$ V, která je pro další použití přístupná na pinu REF. Přes sledovač napětí ji přivedeme k odporovému děliči, který byl navržen tak, aby upravit signál na požadovaný rozsah. Zapojení je zobrazeno na obrázcích 6.3 a 6.5.



Obrázek 6.3: Úprava diferenciálního analogového signálu na jednoduchý s následnou změnou rozsahu napětí.



Obrázek 6.4: Návrh odporového děliče pro úpravu rozsahu analogových vstupů

Při návrhu odporového děliče z obrázku 6.3 byla nejprve zvolena hodnota předřadného odporu R102 na 200 kΩ, což je přiměřená hodnota tak, aby děličem tekla pouze malý proud. Při hodnotě vstupního napětí 10 V požadujeme výstupní napětí o velikosti 4,096 V, tak jak je znázorněno na obrázku 6.4a. Pomocí Ohmova zákona můžeme spočítat proud i_1 tekoucí odporem R102:

$$i_1 = \frac{10 \text{ V} - 4,096 \text{ V}}{200 \text{ k}\Omega} = 2,952 \cdot 10^{-5} \text{ A} \quad (6.1)$$

Na odporu R3 není žádný úbytek napětí, a tedy jím neteče žádný proud. Z toho plyne, že všechny proud i_1 teče i odporem R95. Pomocí Ohmova zákona tedy můžeme spočítat jeho hodnotu:

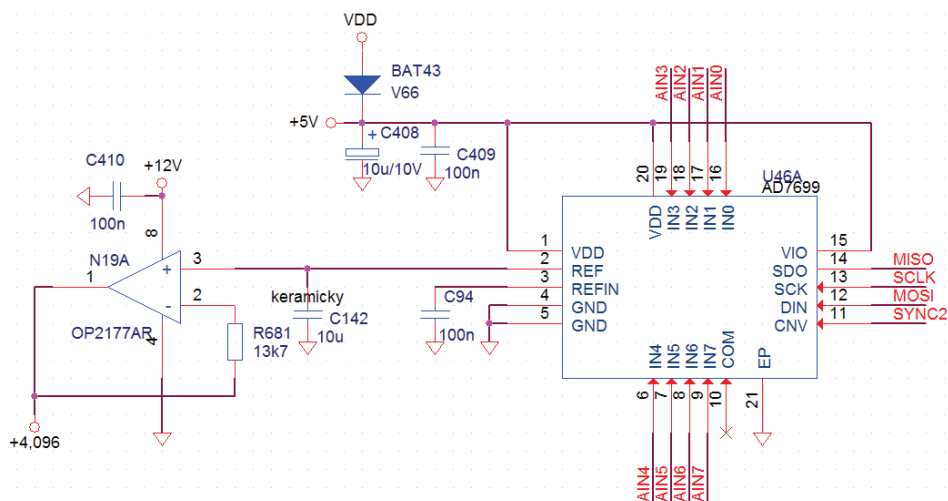
$$R_{95} = \frac{4,096 \text{ V}}{i_3} = \frac{4,096 \text{ V}}{i_1} = \frac{4,096 \text{ V}}{2,952 \cdot 10^{-5} \text{ A}} \doteq 138,8 \text{ k}\Omega \quad (6.2)$$

Při hodnotě vstupního napětí -10 V požadujeme výstupní napětí o velikosti 0 V, tak jak je znázorněno na obrázku 6.4b. V tomto případě $i_1 = i_2$ a obdobným způsobem určíme hodnotu odporu R3:

$$i_1 = i_2 = \frac{10 \text{ V}}{200 \text{ k}\Omega} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ A} \quad (6.3)$$

$$R_3 = \frac{4,096 \text{ V}}{i_2} = \frac{4,096 \text{ V}}{5 \cdot 10^{-5} \text{ A}} \doteq 81,9 \text{ k}\Omega \quad (6.4)$$

Protože spočítané odpory nejsou standardně dostupné, byly tyto hodnoty upraveny na $R_{95} = 137 \text{ k}\Omega$ a $R_3 = 82 \text{ k}\Omega$. Po téhle úpravě bude při vstupním napětí 10 V hodnota výstupního napětí asi 4,065 V a při vstupním napětí -10 V výstupní napětí asi -0,3 mV, což jsou přípustné hodnoty.

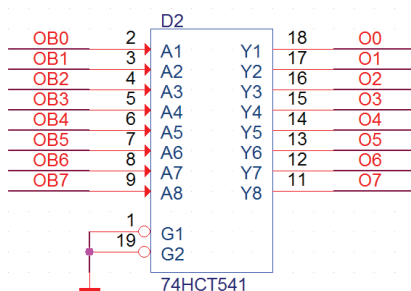


Obrázek 6.5: Zapojení analogově-digitálního převodníku

Samotné zapojení analogově-digitálního převodníku je zobrazeno na obrázku 6.5. AD-převodník, stejně jako DA-převodník, komunikuje s mikrokontrolérem přes rozhraní SPI. Navíc ovšem obsahuje i datový kanál směřující od převodníku k mikrokontroléru (pin SDO). Pomocí něho posílá informace o naměřených hodnotách. Pomocí pinu COM lze volit napětěvou úroveň, vůči které jsou měřeny hodnoty vstupních signálů, v našem případě 0 V. Piny REF a REFIN jsou podle doporučení výrobce vazebně spojeny se zemí přes keramické kondenzátory 10 µF a 100 nF a spodní plocha převodníku s označením EP („Exposed Paddle“), která není vnitřně připojena, má být připojena k zemní ploše pro zlepšení spolehlivosti pájených spojů.

6.3 Digitální výstupy

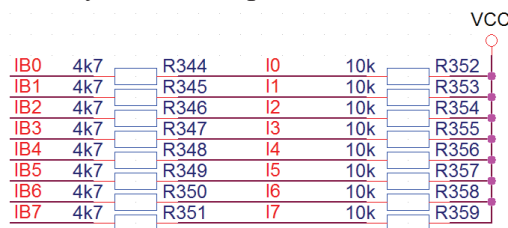
Jako digitální výstupy byly použity přímo vstupně-výstupní piny mikrokontroléru. Jejich napětěová úroveň pro logickou hodnotu 1 je ovšem pouze 3,3 V, takže pro její zvýšení bylo nutné použít budič sběrnice. Jako vhodný a dostupný byl vybrán integrovaný obvod 74HCT541, který je určen pro 8 vstupů a dokáže vybudit vstupy již od napětěové úrovně 2 V na hodnotu 5 V. Zapojení je znázorněno na obrázku 6.6. Piny G1 a G2 slouží pro aktivaci obvodu a je nutné na ně přivést logickou úroveň 0, aby byly vstupy přenášeny na výstupy. Piny pro napájení (VCC a GND) jsou skryty.



Obrázek 6.6: Budič sběrnice pro posílení napětěové úrovně digitálních výstupů

6.4 Digitální vstupy

Jako digitální vstupy byly opět přímo použity vstupně-výstupní piny mikrokontroléru – vodiče IB#. Odtud jsou vedeny přes rezistory o velikostech 4k7, které slouží k ochraně omezením proudu pro případ, kdyby byl některý z pinů nastaven jako *push-pull* a uveden do stavu logické 0. V takovém případě by při hodnotě logické 1 na příslušném vodiči I# vzniknul na rezistoru úbytek napětí 5 V. Hodnota rezistoru byla zvolena tak, aby jím při této situaci tekla proud asi 1 mA. Vodiče I#, které jsou již přímo vedeny k hlavnímu vstupně-výstupnímu konektoru karty, jsou navíc připojeny přes pull-up rezistory k napětí VCC, aby byla na digitálních vstupech zajištěna definovaná logická úroveň i v případě, kdy na ně není přes hlavní konektor přiveden žádný signál.



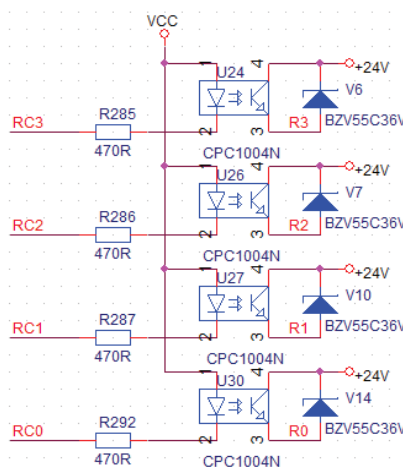
Obrázek 6.7: Zapojení digitálních vstupů

6.5 Zapojení optočlenů

Použité optočleny CPC1004N jsou spínány vstupním proudem v rozmezí 2 až 50 mA. Hodnota rezistorů zařazených do série se spínací diodou optočlenu byla určena na 470 Ω. V tomto případě bude velikost spínacího proudu následující:

$$I = \frac{U_{VCC} - U_d}{R} = \frac{5 - 1,3}{470} \doteq 8 \text{ mA} \quad (6.5)$$

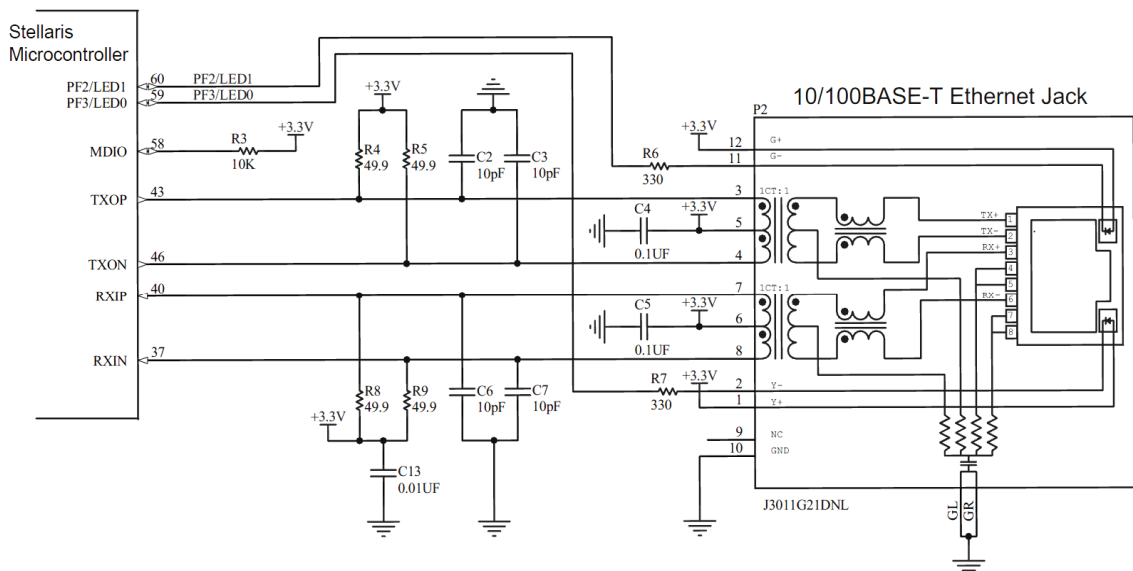
,kde U_d je úbytek napětí na diodě optočlenu, který dán výrobcem podle [9]. Zenerova dioda zapojená na výstupu slouží jako ochrana optočlenu proti napěťovým špicím u indukovaných zátěží.



Obrázek 6.8: Zapojení optočlenů

6.6 Oddělovací obvody sběrnice Ethernet

Návrh oddělovacích obvodů sběrnice Ethernet a jejich připojení k mikrokontroléru je popsáno v jeho dokumentaci [1]. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 4.2. V tomto případě byl použit konektor s označením J3011G21DNL, který v sobě již zahrnuje galvanické oddělení v podobě miniaturních transformátorů. Diferenciální signálový vstup a výstup se připojí k pinům určeným k tomuto účelu (TXOP, TXON, RXIP, RXIN), přičemž se použijí pull-up/pull-down rezistory a filtrující kondenzátory. Piny pro funkci LED diod se připojí přes 330Ω rezistory k pinům 2 a 3 vstupně-výstupního portu F (PF2, PF3) a pin MDIO (Management Data Input/Output) se připojí přes 10kΩ pull-up rezistor k napětí VDD +3,3 V.



Obrázek 6.9: Oddělovací obvody sběrnice Ethernet a jejich připojení k mikrokontroléru [1]

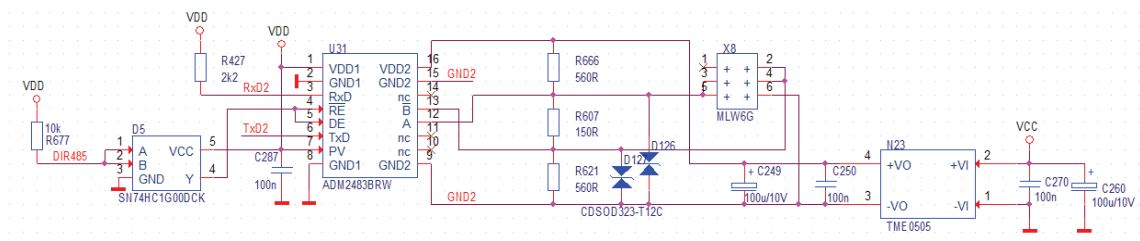
6.7 Komunikační rozhraní RS-485

Základem realizace komunikace přes rozhraní RS-485 je integrovaný obvod ADM2483, který v sobě integruje jak vysílač, tak přijímač. Datové signály jsou mezi vstupy a výstupy obvodu elektricky izolovány a duplex je poloviční. Není tedy možné současně vysílat a přijímat data. Současná zařízení firmy umožňující komunikaci přes RS-485 komunikují pouze přes poloviční duplex, a proto bylo zbytečné navrhovat tuto komunikaci s plným duplexem. V některé z dalších verzí nové karty je ale možné, že se tato část obvodu obmění a integrovaný obvod ADM2483 bude nahrazen například obvodem MAX13433, který již nabízí plně duplexní komunikaci.

Levá část obvodu, připojená k mikrokontroléru, je napájena napětím VDD o hodnotě +3,3 V. Piny /RE („receiver enable“) a DE („driver enable“) slouží k aktivaci a deaktivaci přijímače a vysílače. Mají opačnou logiku, takže je můžeme připojit k jednomu vodiči DIR485, čímž dosáhneme toho, že v danou chvíli bude aktivní pouze vysílač nebo přijímač. Protože jsou ovšem po resetu mikrokontroléru na jeho digitálních výstupech logické hodnoty 1, je vodič DIR485 připojen přes invertor, aby byl ve výchozím nastavení povolen přijímač. Povolení vysílače by totiž zablokovalo linku. Pin PV („power valid“) je určen k potvrzení dostatečně velké úrovně napájení na napájecím pinu VDD. Je zaveden z toho důvodu, že po přivedení napájení k obvodu je vnitřní náběh tohoto napětí poměrně pomalý ($>100 \mu\text{s/V}$). To může způsobit šum na výstupních datových vodičích A a B [14]. V případě navrhované karty se ale nepočítá s průběžným vypínáním obvodu za účelem úspory energie, a proto byl pin PV připojen přímo k napětí VDD.

Pravá část obvodu je napájena z izolovaného zdroje stejnosměrného napětí TME0505 s výstupním napětím +5 V. Celé rozhraní RS-485 je tedy izolováno od potenciálů karty a je tedy možné komunikovat se zařízeními na diametrálně jiných napěťových úrovních. Maximální izolační napětí je asi 560 V [14], kdy limitním prvkem je obvod ADM2483. Zdroj TME0505 má izolační napětí až 1000 V [15].

Mezi neinvertující a invertující výstupy A a /B byl zapojen rezistor sloužící jako terminátor vedení. Jeho hodnota by měla být alespoň 120Ω . Další dva rezistory o hodnotách 560Ω definují klidové stavy linek. Obě linky jsou navíc jištěny proti přepětí pomocí obousměrných transilů CDSOD323, které se vyznačují velmi nízkou kapacitou (typicky 3 pF) a je tedy možné je použít i pro rychlé datové linky.



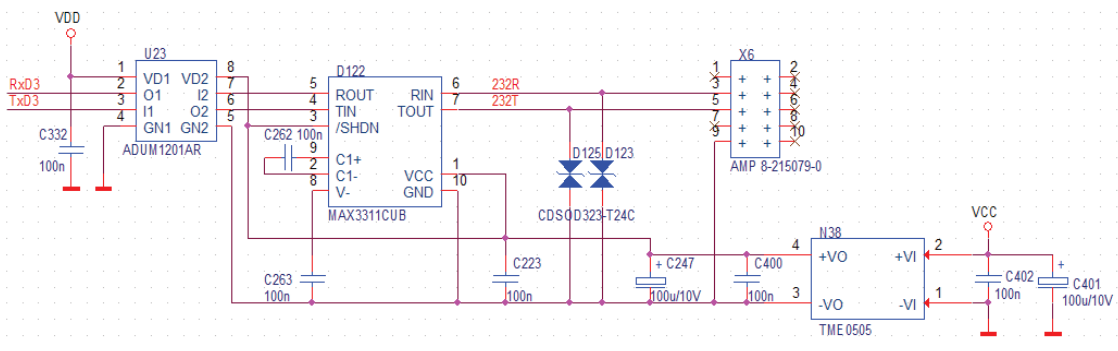
Obrázek 6.10: Zapojení rozhraní RS-485

6.8 Komunikační rozhraní RS-232

Komunikaci přes rozhraní RS-232 realizuje obvod MAX3311, který převádí napěťové úrovně s využitím nábojových pump. Je napájen ze stejného izolovaného zdroje, jako předchozí obvod pro RS-485. Obvod musí být doplněn několika kondenzátory o hodnotě 100 nF pro zajištění správné činnosti. Vysílací a přijímací

signály na straně mikrokontroléru jsou impedančně odděleny obvodem ADUM1201. I přes rozhraní RS-232 je tedy možné komunikovat se zařízeními na diametrálně jiných napěťových úrovních. Zapojení je opět chráněno proti přepětí zvenku pomocí transilů CDSOD323.

Protože mikrokontroléry s jádrem ARM Cortex-M3 od firmy Texas Instruments obsahují maximálně 3 moduly pro sériovou linku UART a všechny 3 již byly využity (2 pro optické komunikační rozhraní a jeden pro rozhraní RS-485), jsou vodiče RxD3 a TxD3 připojeny k obyčejným vstupně-výstupním pinům mikrokontroléru a funkce sériové linky UART bude pro rozhraní RS-232 implementována programově s využitím některého z interních časovačů.



Obrázek 6.11: Zapojení rozhraní RS-232

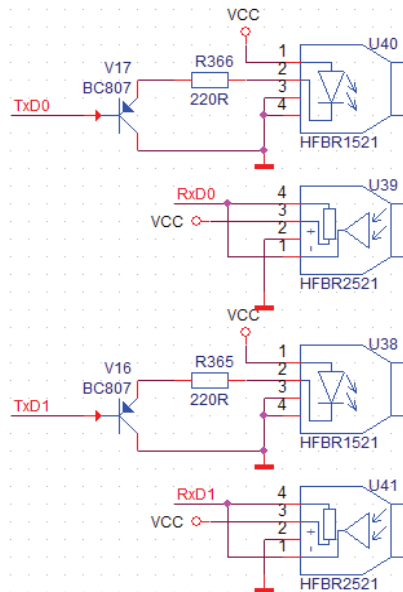
6.9 Připojení konektorů pro optické komunikační rozhraní

Jak je znázorněno na obrázku 6.12, karta bude obsahovat 2 plně duplexní optické kanály. Vysílač je spínán jednoduchým bipolárním tranzistorem BC807 typu PNP, který je vhodný pro spínání nízkovýkonových prvků a především je zhotoven v malém SMD pouzdru SOT-23. Po přivedení logické hodnoty 1 na TxD# je tranzistor sepnut a diodou začne procházet elektrický proud. Hodnota sériově zapojeného odporu byla zvolena tak, aby diodou při sepnutí procházel proud přibližně 20 mA:

$$R = \frac{U_{VCC} - U_d}{I} = \frac{5 - 0,6}{20 \cdot 10^{-3}} = 220 \Omega \quad (6.6)$$

, kde U_d je přibližný úbytek napětí na diodě.

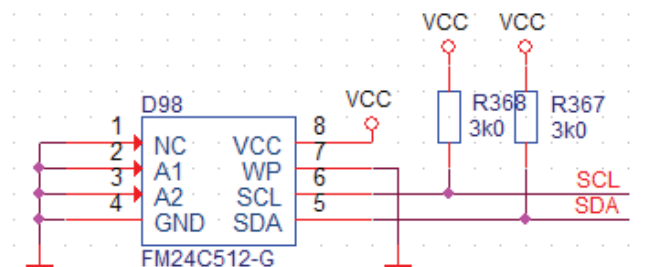
U zapojení přijímače jsou při logické hodnotě 0 z optického kabelu sepnuty piny 1 a 2 a přijímací vodič RxD# je tak uzemněn. Při logické hodnotě 1 jsou piny 1 a 2 rozepnuty a na přijímací vodič je přes vnitřní odpor 1 k Ω přivedeno napětí VCC.



Obrázek 6.12: Zapojení konektorů pro optické komunikační rozhraní

6.10 Non-volatile paměť typu FRAM

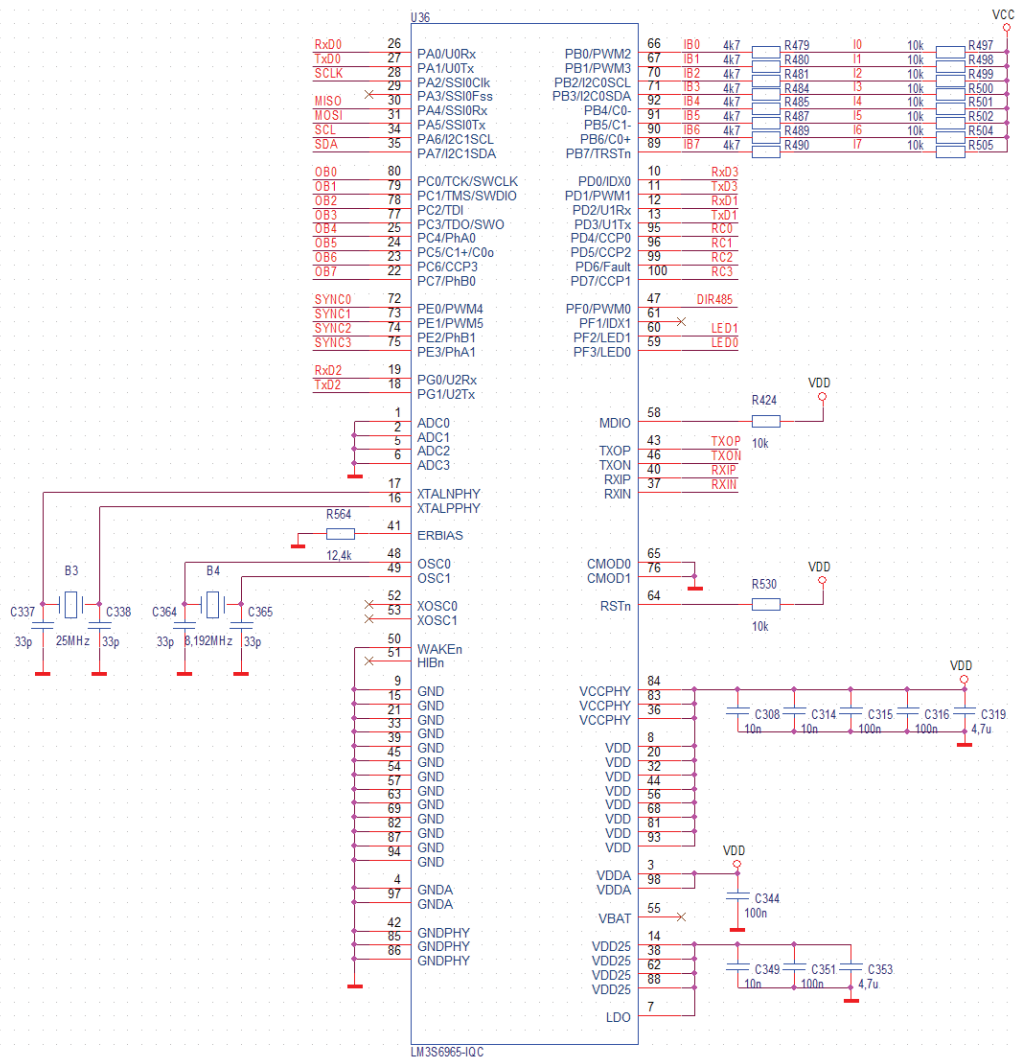
Na obrázku 6.12 je znázorněno zapojení paměti typu FRAM, která bude sloužit k ukládání akronymů, jak bylo popsáno v kapitole o návrhu koncepce karty. Komunikace s mikrokontrolérem probíhá přes rozhraní I²C, u kterého musí být oba vodiče, SDA i SCL, připojeny přes pull-up rezistory ke kladnému napětí, což zajistí vysokou logickou úroveň v klidovém stavu. Minimální hodnota napájení obvodu je +4,5 V, a proto bylo použito napětí VCC o hodnotě +5 V. Minimální hodnota napětí vysoké logické úrovně musí být alespoň 0,7*VCC, což je 3,5 V. Vodiče SDA i SCL tedy musí být přes pull-up rezistory připojeny taktéž k napětí VCC +5 V, protože napětí VDD +3,3 V nepostačí. Piny A1 a A2 slouží pro nastavení adresy obvodu. V tomto případě je použitý pouze jeden podobný obvod připojený k rozhraní I²C, a proto je možné oba piny uzemnit.



Obrázek 6.13: Zapojení non-volatile paměti typu FRAM

6.11 Zapojení podpůrných obvodů mikrokontroléru

Pro správné zapojení mikrokontroléru LM3S6965 se kromě jeho dokumentace vycházelo také z elektrického zapojení vývojového kitu pro tento mikrokontrolér. Dodržena byla především filtrace napájecího napětí, kde byly kromě standardních kondenzátorů 4,7 μF , který filtruje pomalé děje, a 100 nF, které filtrují rychlejší děje,



Obrázek 6.14: Zapojení podpůrných obvodů mikrokontroléru LM3S6965

použity i kondenzátory o hodnotě 10 nF pro filtraci velmi rychlých dějů, které je vhodné připojit k rychlým obvodům, jako je tento.

K mikrokontroléru jsou dále připojeny 2 krystaly. První s frekvencí 8,192 MHz je využit hlavním oscilátorem, který je zdrojem systémového hodinového signálu. Uvedená hodnota 8,192 MHz je maximální možná, kterou může krystal pro hlavní oscilátor mít. Druhý krystal s frekvencí 25 MHz je používán speciálním vnitřním oscilátorem, který je určen pro řízení rozhraní Ethernet.

U navrhované karty nebude třeba příliš šetřit energií, a proto ani nebude využita funkce pro uvedení mikrokontroléru do režimu spánku. Piny XOSC1 a XOSC2 pro připojení krystalu hibernačního modulu s frekvencí 32,768 kHz a ani piny WAKEn a /HIBn tedy nebudou využity.

K pinu ERBIAS má být podle dokumentace k mikrokontroléru [1] připojen rezistor s hodnotou 12,4 k Ω a přesností 1%, který je použit pro fyzickou vrstvu rozhraní Ethernet. Další dva piny, CMOD0 a CMOD1, musí být podle dokumentace uzemněny.

Mikrokontrolér sice obsahuje analogově-digitální převodník, ten ale nebude pro svoji malou přesnost využit. Vstupní analogové piny převodníku tedy byly také připojeny k zemnímu potenciálu. Zbývající vstupně-výstupní piny a piny určené k napájení byly zapojeny podle své funkce. Některé nebyly využity.

6.12 Napájení karty

Obvody na kartě jsou napájeny z několika různých zdrojů napětí. Prvním je symetrické napětí ± 19 V, které je ke kartě přivedeno z hlavního konektoru. Aby mohlo být toto napětí dále použito, je nutné jej pomocí dvou stabilizátorů napětí LM7812 a LM7912 upravit na hodnotu ± 12 V. Toto napětí se potom používá pro napájení analogových částí, zejména operačních zesilovačů OP2177 a OP4177. Každý ze stabilizátorů může dodat proud až 1 A, což je pro uvedené potřeby plně dostačující. Symetrické napětí ± 19 V je na vstupu chráněno diodami proti přepólování.

Napětí ± 12 V je dále upraveno na napětí ± 5 V. To je potřeba pro napájení převodníků a operačních zesilovačů AD8137 s diferenciálními výstupy. Použito je obdenných stabilizátorů, které opět poskytují proud až 1 A, avšak musíme odečíst velikost proudu spotřebovaného pro napájení operačních zesilovačů OP2177 a OP4177. I v tomto případě je ale poskytován proud plně dostačující.

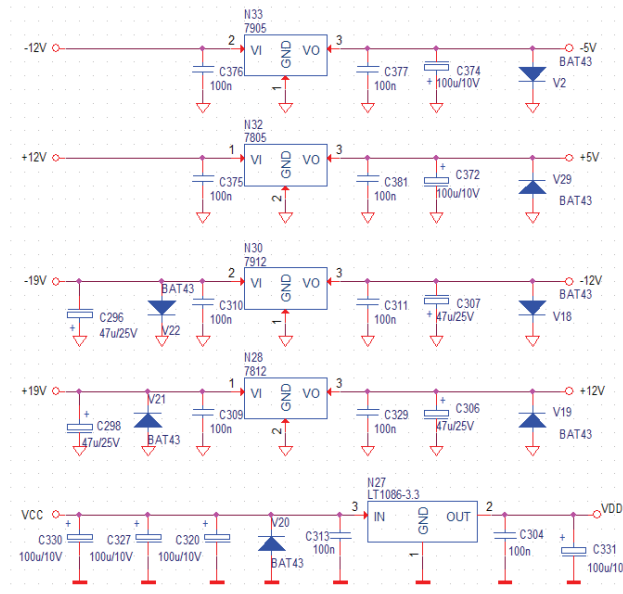
U obou symetrických výstupních napětí ± 12 V a ± 5 V jsou na výstupy připojeny pomocné diody. Na nich je úbytek napětí asi 0,3 V, což po zapnutí napájení zajistí náběh výstupních napětí na správné hodnoty. Někdy se totiž u symetrických napájení stává, že po náběhu jednoho napájení (+ nebo -) je to druhé zablokováno a napětí na něm nedosáhne požadované hodnoty. Toho se lze právě pomocí diod vyvarovat.

Dalším napětím, které je přivedeno přes hlavní konektor, je napětí VCC o hodnotě +5 V. Toto napětí je použito pro napájení digitálních obvodů a proto je nutné jej důkladně filtrovat. Z tohoto zdroje je opět možné odebrat proud přibližně až 1 A.

U některých obvodů postačuje napájení o hodnotě +3,3 V, jiné, jako je mikrokontrolér LM3S6965, jej naopak přímo vyžadují. Proto je napětí VCC pomocí stabilizátoru LT1086-3,3 dále upraveno na napětí VDD o hodnotě +3,3 V.

Posledním napětím, které vstupuje do karty přes hlavní konektor, je napětí +24 V, které je použito pro napájení výstupů z optočlenů.

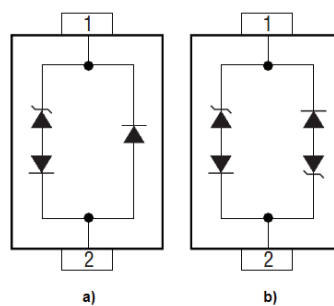
Karta má oddělenou analogovou a digitální zem. Ty jsou navzájem propojeny v místě vstupu napájení do karty, tedy u hlavního konektoru.



Obrázek 6.15: Obvody pro napájení jednotlivých součástí karty

6.13 Přepět'ová ochrana vstupů a výstupů

V přístrojích, jako jsou elektronové mikroskopy, které pracují s napětím až v řádech kV, dochází občas ke zkratům, které způsobují nebezpečné přepětí na různých vodičích elektroniky. Aby při těchto jevech nedocházelo ke zbytečnému zničení elektronických zařízení mikroskopu, je nutné pokud možno všechny vstupy a výstupy těchto zařízení ochránit proti přepětí. K tomu se používají tzv. transily.



Obrázek 6.16: Transil – a) jednosměrný b) obousměrný

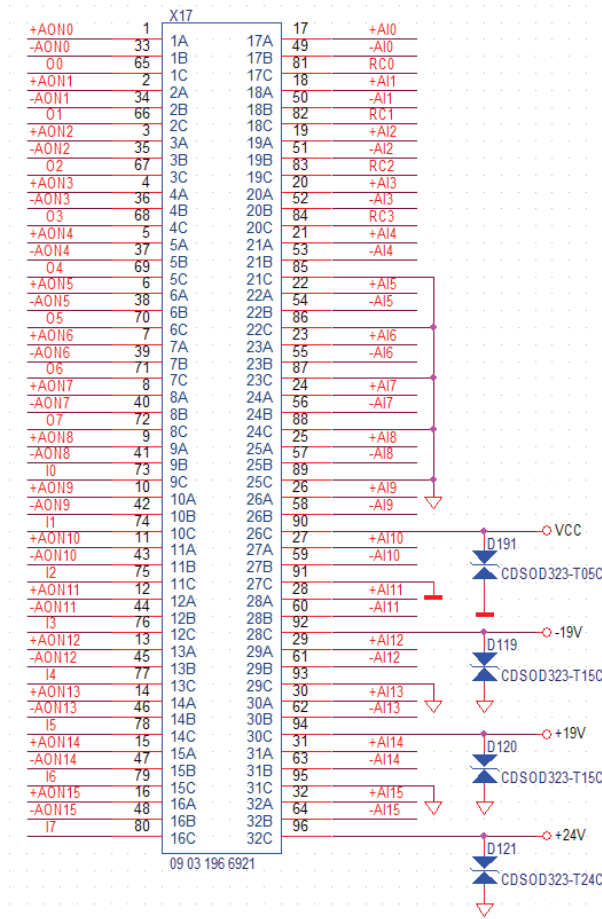
Transily jsou součástky, které se při překročení definované úrovně přepětí zkratují. Ochrání tak připojené obvody před přepětím. Konstruují se buď jednosměrné, nebo obousměrné. Jedsměrný transil chrání proti přepětí jedné polaroty. Při opačné polaritě se chová jako dioda. Obousměrný transil se chová podobně jako dvě antisériově

zapojené Zenerovy diody a chrání tak proti přepětí v obou směrech. Oproti Zenerovým diodám je ale konstruován na velké impulzní proudy.

Na navrhované kartě byly všechny analogové a digitální vstupy a výstupy a také všechna vstupní napájení ochráněna proti přepětí pomocí transilů CDSOD323-TxxC. Jak již bylo napsáno výše, tyto transily jsou obousměrné a vyznačují se velmi malou parazitní kapacitou. Lze tedy jimi chránit i rychlé datové linky.

6.14 Připojení signálů k hlavnímu konektoru

Poslední kapitola návrhu obvodového schématu pouze znázorňuje připojení jednotlivých signálů k hlavnímu konektoru karty. Jedná se o 96pinový konektor, přičemž jeho uspořádání je 3 řady po 32 pinech. První dvě kompletní řady jsou obsazeny diferenciálními analogovými vstupy a výstupy. Na třetí řadu pinů jsou připojeny digitální vstupy a výstupy, výstupy z optočlenů, vstupní napájení a země.



Obrázek 6.17: Připojení signálů k hlavnímu konektoru

6.15 Programování mikrokontroléru

Mikrokontrolér LM3S6965 má v sobě naimplementován tzv. „serial flash loader“ (SFL), což je krátká část kódu umožňující programování programu do paměti flash bez nutnosti použití speciálního programátoru. Jedna z možností je využití sériového rozhraní UART. To je převedeno například na rozhraní RS-232 a připojeno do počítače. Speciální aplikace v počítači se přes tuto sériovou linku spojí se zmíněným SFL a ten zajistí přenos kódu programu z počítače do paměti flash.

Tohoto způsobu programování bude využito i u navržené karty, přičemž bude k programování použito optického kabelu.

7 ZÁVĚR

Zpracovaná diplomová práce měla za cíl navrhnout novou řídicí a komunikační kartu pro elektronový mikroskop a další zařízení, které firma Delong Instruments a.s. vyvíjí. Tato karta by měla nahradit stávající komunikační kartu, která již svým výpočetním výkonem nebyla schopna uspokojit všechny požadavky, které na ni byly kladeny. Měla by současně nahradit i řídicí a měřicí kartu s A/D a D/A převodníky. Bude tedy umožňovat i řízení a měření ostatních subsystémů v mikroskopu pomocí vlastních digitálních a analogových vstupů a výstupů. To by nemělo zvětšit její výpočetní zatížení, protože není příliš velký rozdíl v tom, jestli karta přepošle informaci přes sériovou linku do jiné karty, nebo přímo přes rohraní SPI nastaví D/A převodník na požadovanou hodnotu. Podobné je to i při získávání hodnot z A/D převodníku, pouze jde komunikace opačným směrem.

Při řešení problému byly nejprve stanoveny požadavky, které by měla nová karta splňovat, a následně byl navržen její základní koncept včetně jednoduchého blokového schématu. Jako řídicí prvek celé karty byl vybrán mikrokontrolér s jádrem ARM Cortex-M3 od firmy Texas Instruments, který by měl poskytnout dostatečný výpočetní výkon a zároveň je v něm implementována jak fyzická, tak linková vrstva rozhraní Ethernet s rychlostí až 100 Mbit/s. V rámci práce byla také nastíněna problematika komunikace přes toto rozhraní včetně uvedení možností pro realizaci vyšších vrstev, které jsou představovány TCP/IP stackem. Dále byly vybrány vhodné součástky, které byly následně použity při návrhu obvodového schématu karty.

Hlavním výsledkem práce je tedy navržené obvodové schéma nové řídicí a komunikační karty pro elektronový mikroskop, případně pro další zařízení. V práci byl detailně popsán návrh jeho jednotlivých částí a celé schéma je přiloženo v příloze. Navržená karta bude schopna zpracovat až 16 různých signálů z analogových vstupů a to rychlostí až 62,5 tisíc vzorků za sekundu na jeden signál. Všechny tyto vstupy jsou v diferenciálním provedení z důvodu omezení rušení a měly by umožnit rozlišit změnu vstupního signálu přibližně o 0,3 mV na rozsahu od -10 do 10 V. Jedná se však o teoreticky spočítanou hodnotu, ke které je nutné započítat nejistoty daného převodníku, jako jsou chyba integrální linearity, chyba diferenciální linearity, chyba zesílení, chyba offsetu a podobně. Ty se pochybují v řádech jednotek LSB, kdy LSB odpovídá právě hodnotě přibližně 0,3 mV. Výsledná přesnost měření tedy bude okolo 1 mV. Dále karta bude umožňovat nastavování až 16 různých analogových výstupů maximální rychlostí přibližně 50 tisíc vzorků za sekundu na jeden výstupní signál. Všechny analogové výstupy jsou opět v diferenciálním provedení a přesnost nastavení výstupů bude o trochu horší než v případě měření analogových vstupů. Konkrétně v řádech jednotek milivoltů. Součástí karty je dále 8 binárních vstupů, 8 jednoduchých binárních výstupů a 4 binární výstupy spínané přes optické oddělovače. Tyto vstupy a výstupy slouží k určování vnitřních stavů v mikroskopu a k ovládání různých součástí mikroskopu,

jako jsou ventily, vakuové pumpy, ovládání chlazení a podobně. Po komunikační stránce bude karta schopná komunikovat s nadřazeným počítačem po rozhraní Ethernet s přenosovou rychlostí až 100 Mbit/s, s ostatními elektronickými kartami v mikroskopu přes rozhraní UART s využitím optických kabelů a předpokládanou rychlostí 230,4 kbit/s a také s dalšími interními nebo externími zařízeními připojenými přes rozhraní RS-232 nebo RS-485 se stejnou předpokládanou rychlostí 230,4 kbit/s. Aby nebylo nutné měnit program mikrokontroléru u každého zařízení, kde bude navržená karta použita, obsahuje karta non-volatilní paměť typu FRAM, která bude sloužit k ukládání tabulky akronymů, neboli slov, která budou přiřazena k jednotlivým vstupům a výstupům karty. Po přijetí zprávy s akronymem bude na základě této tabulky nastaven příslušný výstup na danou hodnotu, případně změřena hodnota příslušného vstupu.

V současné době, kdy vzniká tato práce, není možné přesně zhodnotit přínos navržené karty pro firmu a praxi, protože, jak již bylo řečeno v úvodu, od návrhu obvodového schématu karty až po její realizaci a provedení prvních testů je ještě poměrně dlouhá cesta. Momentálně není úplně jasné, zda ještě neproběhnou nějaké úpravy v obvodovém schématu, protože se uvažuje o vytvoření další samostatné elektronické karty, připojené k právě navržené řídicí a komunikační kartě, která by obsahovala různá komunikační rozhraní od RS-232 a RS-485 až po CAN a MODBUS. K této kartě by se připojovala různá zařízení, především třetích stran, která by některé z těchto rozhraní podporovala.

Po vyřešení této situace a odsouhlasení výsledného schématu by měly být podklady předány odborníkům firmy, kteří mají na starosti návrh desek plošných spojů. Výsledná deska by potom byla realizována profesionální externí firmou.

Na úplný závěr bych rád uvedl následující příklad, který byl v rámci tohoto projektu řešen a na kterém bylo ilustrováno, proč bylo potřeba tuto novou kartu navrhnout. Obsluha mikroskopu chtěla pomocí otočného ovládacího prvku umístěného na konzoli připojené k počítači posunout obrazem, který je zobrazován na obrazovce. V tomto případě je nutné informace o poloze otočného prvku průběžně přenášet do počítače a následně do komunikační karty. Ta musí informace zpracovat a přes optický kabel předat dále oktupólové kartě, která zajistí vychýlení elektronového svazku. Nově získaný obraz je vyhodnocen videokartou a i když je do počítače odeslán samostatným kanálem rozhraní Ethernet, obsluha na něj musí nějakou chvíli čekat. Je to způsobeno tím, že režie komunikace v mikroskopu je již poměrně značná a přes komunikační kartu je přenášeno velké množství informací, které není schopna zpracovat v rozumně krátkém čase.

LITERATURA

- [1] *Stellaris® LM3S6965 Microcontroller Datasheet*. Texas Instruments, 2010. Dostupné z: <<http://www.ti.com/litv/pdf/spms144c>>.
- [2] *Cortex-M3 Technical Reference Manual*. ARM, 2006. Dostupné z: <<http://www.ti.com/litv/pdf/spmu049>>.
- [3] *Stellaris® Peripheral Driver Library*. Texas Instruments, 2010. Dostupné z: <<http://www.ti.com/litv/pdf/spmu019c>>.
- [4] DUNAYTSEV, R.: *IEEE 802 Model and Ethernet LANs*. Slajdy k předmětu Computer Networking I na Tampere University of technology ve Finsku, 2010.
- [5] DUNKELS, A.: *Full TCP/IP for 8-Bit Architectures*. Swedish Institute of Computer Science, 2003.
- [6] PUNČOCHÁŘ, J.: *Operační zesilovače v elektrotechnice*. BEN – technická literatura, Praha 2010.
- [7] *AD7699*. Rev. 0. Analog Devices, 2008. Dostupné z: <<http://www.analog.com>>
- [8] *AD5628/AD5648/AD566*. Rev. E. Analog Devices, 2010. Dostupné z: <<http://www.analog.com>>
- [9] *CPC1004N*. R06. Clare, 2010. Dostupné z: <<http://www.clare.com>>
- [10] *AD8137*. Rev. D. Analog Devices, 2010. Dostupné z: <<http://www.analog.com>>
- [11] *OP1177/OP2177/OP4177*. Rev. B. Analog Devices, 2009. Dostupné z: <<http://www.analog.com>>
- [12] *CD54/74HCT541*. Texas Instruments, 2004. Dostupné z: <<http://www.ti.com>>
- [13] *BZV55C36*. R0. Central Semiconductor Corp., 2001. Dostupné z: <<http://www.alldatasheet.com>>
- [14] *ADM2483*. Analog Devices, 2005. Dostupné z: <<http://www.analog.com>>
- [15] *DC/DC Converters*. Traco Electronic AG, 2010. Dostupné z: <<http://www.tracopower.com>>

- [16] *CDSOD323-TxxC*. Rev. 08/09. Bourns, 2009. Dostupné z:
<<http://www.bourns.com>>
- [17] *MAX3311/MAX3313*. Rev. 0. Maxim, 2001. Dostupné z:
<<http://www.maxim-ic.com>>
- [18] *ADuM1200/ADuM1201*. Rev. H. Analog Devices, 2009. Dostupné z:
<<http://www.analog.com>>
- [19] *BC807/BC808*. Fairchild Semiconductor, 2002. Dostupné z:
<<http://www.fairchildsemi.com>>
- [20] *The Versatile Fiber Optic Connection*. Agilent Technologies, 2001.
Dostupné z: <<http://www.alldatasheet.com>>
- [21] *FM24C512*. Rev. 3.2. RAMTRON, 2011. Dostupné z:
<<http://www.ramtron.com>>
- [22] *L78xx – L78xxC, L78xxAB – L78xxAC*. Rev. 23. STMicroelectronics,
2010. Dostupné z: <<http://www.st.com>>
- [23] *MC7900 Series*. On Semiconductor, 2010. Dostupné z:
<<http://www.onsemi.com>>
- [24] *LT1086 Series*. Linear Technology, REV F, rok vydání neuveden.
Dostupné z: <<http://www.linear.com>>
- [25] *TMMBAT42, TMMBAT43*. Rev 4/98. STMicroelectronics, 1998. Dostupné
z: <<http://www.st.com>>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Knihovni funkce pro programování mikrokontrolerů s jádrem ARM Cortex-M3 od firmy Texas Instruments

Příloha 2. Schéma řídicí a komunikační karty k elektronovému mikroskopu

Příloha 3. CD - elektronická verze diplomové práce

- schéma řídicí a komunikační karty k elektronovému mikroskopu

Příloha 1

Knihovní funkce pro programování mikrokontrolerů s jádrem ARM Cortex-M3 od firmy Texas Instruments

Řízení systému mikrokontroléru (*sysctl.c, sysctl.h*):

- Informace o zařízení jsou poskytovány pomocí funkcí **SysCtlSRAMSizeGet()**, **SysCtlFlashSizeGet()**, **SysCtlPeripheralPresent ()** a **SysCtlPinPresent ()**
- Nastavení časování mikrokontroléru umožňují funkce **SysCtlClockSet()** a **SysCtlPWMClockSet()**, informace o časování potom poskytují funkce **SysCtlClockGet()** a **SysCtlPWMClockGet()**.
- Nastavení periférií:
 - SysCtlPeripheralReset()** – reset dané periférie
 - SysCtlPeripheralEnable()** – povolení dané periférie
 - SysCtlPeripheralDisable()** – zakázání dané periférie
 - SysCtlPeripheralSleepEnable()** – povolení periférie v režimu spánku
 - SysCtlPeripheralSleepDisable()** – zakázání periférie v režimu spánku
 - SysCtlPeripheralDeepSleepEnable()** – povolení v režimu hlubokého spánku
 - SysCtlPeripheralDeepSleepDisable()** – zakázání v režimu hlubokého spánku
 - SysCtlPeripheralClockGating()** – povolení změny časování v režimech spánku
- Nastavení systémového přerušení:
 - SysCtlIntRegister()** – přiřadí k systémovému přerušení jeho obslužnou rutinu
 - SysCtlIntUnregister()** – odebere systémovému přerušení jeho obslužnou rutinu
 - SysCtlIntEnable()** – povolí události, které mohou zapříčinit systémové přerušení
 - SysCtlIntDisable()** – zakáže události, které mohou zapříčinit sys. přerušení
 - SysCtlIntClear()** – vynuluje příznak sys. přerušení události, která ho způsobila
 - SysCtlIntStatus()** – vrátí status jednotlivých příznaků sys. přerušení od událostí
- K uvedení do režimů spánku slouží funkce **SysCtlSleep()** a **SysCtlDeepSleep()**.
- Reset:
 - SysCtlResetCauseGet()** – zjištění příčiny resetu
 - SysCtlResetCauseClear()** – vynulování příznaků resetu
 - SysCtlReset()** – softwarový reset mikrokontroléru

Vstupně-výstupní porty (*gpio.c, gpio.h*):

- Konfigurace portů a pinů:
 - GPIODirModeSet()** – nastaví mód daných pinů (vstupní/výstupní/HW řízené)
 - GPIOPadConfigSet()** – omezení proudu, typ pinů (push-pull/open-drain/analog)
 - GPIODirModeGet()** – zjistí mód pinů (vstupní/výstupní/HW řízené)
 - GPIOPadConfigGet()** – zjistí omezení proudu a typ pinů (push-pull/...)
 - GPIOPinTypeGPIOInput()** – nastaví dané piny pro použití jako log. vstupy
 - GPIOPinTypeGPIOOutput()** – nastaví dané piny pro použití jako log. výstupy
 - GPIOPinTypeGPIOOutputOD()** – pro použití jako log. výstupy open-drain
 - GPIOPinTypeI2C()** – nastaví dané piny pro použití pro sběrnici I2C
 - GPIOPinTypeTimer()** – nastaví dané piny pro použití pro moduly časovače
 - GPIOPinTypeUART()** – nastaví dané piny pro použití pro sériovou linku
- Nastavení a čtení logické úrovně pinů:
 - GPIOPinRead()** – zjistí logickou úroveň daných pinů
 - GPIOPinWrite()** – nastaví logickou úroveň daným pinům
- Práce s přerušením:
 - GPIOIntTypeSet()** – nastaví typ přerušení pro dané piny (typ hrany/typ úrovně)
 - GPIOIntTypeGet()** – zjistí typ přerušení pro dané piny (typ hrany/typ úrovně)
 - GPIOPinIntEnable()** – povolí přerušení od daných pinů
 - GPIOPinIntDisable()** – zakáže přerušení od daných pinů
 - GPIOPinIntStatus()** – zjistí stavy příznaků přerušení daného portu
 - GPIOPinIntClear()** – vynuluje příznaky přerušení daných pinů
 - GPIOPortIntRegister()** – přiřadí k přerušení od portu jeho obslužnou rutinu
 - GPIOPortIntUnregister()** – odebere přerušení od portu jeho obslužnou rutinu

Čítače a časovače (*timer.c, timer.h*):

- Základní funkcí pro práci s modulem časovače je **TimerConfigure()**, která slouží k nastavení režimu, v jakém bude tento modul pracovat (16/32-bitový režim, čítač/časovač/RTC/PWM, časovač jednorázový/kontinuální, atd.)
- Řízení modulu časovače:
 - TimerEnable()** – povolí příslušné časovače daného modulu
 - TimerDisable()** – zakáže příslušné časovače daného modulu
 - TimerControlLevel()** – nastaví úroveň PWM signálu (active low/active high)
 - TimerControlEvent()** – nastaví typ hrany pro čítání události (pos/neg/both)
 - TimerControlStall()** – nastaví, zda bude daný časovač zastaven v debug-módu

TimerRTCEnable() – je-li časovač v režimu RTC, tato funkce spustí časování
TimerRTCDisable() – je-li časovač v režimu RTC, tato funkce zastaví časování
TimerQuiesce() – resetuje celý modul časovače, zároveň ho zakáže

- Nastavení a čtení registrů modulu časovače:

TimerLoadSet() – nastaví počáteční hodnotu („reload value“) danému časovači
TimerLoadGet() – vrátí počáteční hodnotu („reload value“) daného časovače
TimerPrescaleSet() – tzv. „prescaler“ (0-255) rozšíří rozsah 16-bit. časovače
TimerPrescaleGet() – vrátí nastavenou hodnotu „prescaleru“
TimerMatchSet() – udává střídu PWM nebo počet událostí spouštějící přerušení
TimerMatchGet() – vrátí tzv. „match“ hodnotu (viz předchozí funkce)
TimerPrescaleMatchSet() – nastaví tzv. „match“ hodnotu pro „prescaler“
TimerPrescaleMatchGet() – vrátí aktuální „match“ hodnotu pro „prescaler“
TimerValueGet() – vrátí aktuální hodnotu daného časovače/čítače

- Nastavení přerušení modulu časovače:

TimerIntRegister() – přiřadí k danému přerušení jeho obslužnou rutinu
TimerIntUnregister() – odebere od daného přerušení jeho obslužnou rutinu
TimerIntEnable() – povolí uvedená přerušení daného modulu časovače
TimerIntDisable() – zakáže uvedená přerušení daného modulu časovače
TimerIntStatus() – vrátí status příznaků přerušení daného modulu časovače
TimerIntClear() – vynuluje udané příznaky přerušení daného modulu časovače

Přerušení (*interrupt.c, interrupt.h*):

- Přiřazení a odebrání obslužné rutiny přerušení:

IntRegister() – přiřadí danému zdroji přerušení jeho obslužnou rutinu
IntUnregister() – odebere danému zdroji přerušení jeho obslužnou rutinu

- Povolení a zakázání přerušení:

IntEnable() – povolí přerušení od daného zdroje
IntDisable() – zakáže přerušení od daného zdroje
IntMasterEnable() – globální povolení přerušení
IntMasterDisable() – globální zakázání přerušení

- Nastavení priorit:

IntPrioritySet() – nastaví prioritu danému zdroji přerušení (0 až 7)
IntPriorityGet() – vrátí prioritu přerušení daného zdroje přerušení
IntPriorityGroupingSet() – nastaví počet bitů pro prioritu/subprioritu
IntPriorityGroupingGet() – vrátí počet bitů pro prioritu, ostatní pro subprioritu

UART (*uart.c, uart.h*):

- Konfigurace a nastavení UART:
 - UARTConfigSetExpClk()** – nastaví přenos. rychlost, počet dat. /stop bitů, paritu
 - UARTConfigGetExpClk()** – vrátí aktuální nastavení daného modulu UART
 - UARTEnable()** – povolení vysílání a přijímání daného modulu UART
 - UARTDisable()** – zakázání vysílání a přijímání daného modulu UART
 - UARTParityModeSet()** – nastavení typu parity daného modulu UART
 - UARTParityModeGet()** – vrátí používaný typ parity daného modulu UART
 - UARTFIFOLevelSet()** – nastaví, po kolika bytech bude vygenerováno přerušení
 - UARTFIFOLevelGet()** – zjistí, po kolika bytech bude vygenerováno přerušení
- Příjem a odesílání dat:
 - UARTCharPut()** – daný modul odešle uvedený znak; pokud je FIFO plný, čeká
 - UARTCharPutNonBlocking()** – odešle znak, pokud je FIFO plný, vrátí *false*
 - UARTCharGet()** – daný modul přečte znak; pokud je FIFO prázdný, čeká
 - UARTCharGetNonBlocking()** – přečte znak; pokud je FIFO prázdný, vrátí -1
 - UARTCharsAvail()** – zjistí přítomnost dat v přijímacím zásobníku FIFO
 - UARTSpaceAvail()** - zjistí, zda je v odesílacím zásobníku FIFO nějaké místo
- Nastavení přerušení:
 - UARTIntEnable()** – povolení uvedených přerušení daného modulu UART
 - UARTIntDisable()** – zakázání uvedených přerušení daného modulu UART
 - UARTIntClear()** – vynulování příznaků přerušení daného modulu UART
 - UARTIntRegister()** – přiřadí k přerušení daného modulu jeho obslužnou rutinu
 - UARTIntUnregister()** – odebere od přerušení jeho obslužnou rutinu
 - UARTIntStatus()** – vrátí status příznaků přerušení daného modulu UART

Při nastavování parametrů asynchronní sériové linky (UART) je potřeba zadat, jaké bude vnější časování jejích modulů. To bude stejné jako časování procesoru a je možné jej získat pomocí funkce **SysCtlClockGet()**.

I²C (*i2c.c, i2c.h*):

- Režim Master:
 - I2CMasterEnable()** – povolení modulu Master daného modulu I2C
 - I2CMasterDisable()** – zakázání modulu Master daného modulu I2C
 - I2CMasterInitExpClk()** – inicializace modulu Master (povolení, rychlost)
 - I2CMasterSlaveAddrSet()** – nastaví adresu zařízení Slave, nastavení zápis/čtení
 - I2CMasterBusBusy()** – zjistí, je-li sběrnice volná (nepřístupuje k ní jiný Master)
 - I2CMasterDataPut()** – uloží data k odeslání do dat. registru modulu Master

I2CMasterDataGet() – načte přijatá data z datového registru modulu Master

I2CMasterControl() – inicializuje komunikaci na sběrnici

I2CMasterBusy() – zjistí, zda je Master zaneprázdněn

I2CMasterErr() – zjistí, zda nedošlo k chybě při přenosu

- Obsluha režimu Master:

Pomocí funkce **I2CMasterControl()** s parametrem pro zahájení komunikace (START) je možné zahájit komunikaci buď pro přenos pouze jednoho Bytu dat, nebo pro přenos více Bytů. U obou případů ještě volíme, zda jde o čtení nebo o zápis.

Při přenášení pouze jednoho Bytu dat se pomocí funkce **I2CMasterBusy()** ve smyčce dotazujeme, zda již byla transakce dokončena. Jestliže ano, můžeme funkcí **I2CMasterErr()** zjistit, jestli proběhl přenos v pořádku. Nevrátí-li žádnou chybu, byla data v případě zápisu úspěšně odeslána, v případě čtení jsou data připravena pro načtení pomocí funkce **I2CMasterDataGet()**.

Pokud přenášíme více Bytů dat, postupujeme stejně jako v prvním případě a na konci přenosu opět zavoláme funkci **I2CMasterControl()**, tentokrát s parametrem pro pokračování transakce (CONT). To provádíme tak dlouho, dokud neodešleme všechny požadované Byty. Při posledním odesílaném Bytu předáme funkci **I2CMasterControl()** příslušný parametr s klíčovým slovem FINISH. Jestliže při přenosu detekujeme nějakou chybu, musíme komunikaci ukončit opět funkcí **I2CMasterControl()** s parametrem pro ukončení komunikace (ERROR_STOP).

Celý proces je možné místo smyčky vyřešit pomocí přerušení, které se vyskytne tehdy, když přestane být master zaneprázdněn.

- Režim Slave:

I2CSlaveEnable() - povolení modulu Slave daného modulu I2C

I2CSlaveDisable() - zakázání modulu Slave daného modulu I2C

I2CSlaveInit() – inicializace modulu Slave (povolení, nastavení vlastní adresy)

I2CSlaveStatus() – zjistí, je-li požadavek nějakou obsluhu (příjem/odeslání dat)

I2CSlaveDataPut() – uloží znak k odeslání do datového registru modulu Slave

I2CSlaveDataGet() – načte přijatý znak z datového registru modulu Slave

- Obsluha režimu Slave:

Obsluha režimu Slave je velice jednoduchá. Ve smyčce je možné pomocí funkce **I2CSlaveStatus()** zjišťovat, zda master požaduje nějakou obsluhu (příjem nebo odeslání dat). Pokud ano, stačí zavolat příslušnou funkci **I2CSlaveDataGet()** nebo **I2CSlaveDataPut()**.

Místo smyčky je také možné využít přerušení modulu slave, které se vyskytne tehdy, jestliže od něj master požaduje příjem nebo odeslání dat.

- Práce s přerušením:
 - I2CIntRegister()** – přiřadí k přerušení od daného modulu jeho obslužnou rutinu
 - I2CIntUnregister()** – odebere přerušení daného modulu jeho obslužnou rutinu
 - I2CMasterIntEnable()** – povolení přerušení od modulu Master
 - I2CMasterIntDisable()** – zakázání přerušení od modulu Master
 - I2CMasterIntClear()** – vynulování příznaku přerušení modulu Master
 - I2CMasterIntStatus()** – vrátí status příznaku přerušení modulu Master
 - I2CSlaveIntEnable()** – povolení přerušení od modulu Slave
 - I2CSlaveIntEnableEx()** – povolení individuálních přerušení (start, stop, data)
 - I2CSlaveIntDisable()** – zakázání přerušení od modulu Slave
 - I2CSlaveIntDisableEx()** – zakázání individuálních přerušení (start, stop, data)
 - I2CSlaveIntClear()** – vynulování příznaku přerušení modulu Slave
 - I2CSlaveIntClearEx()** – vynulování příznaků individuálních přerušení
 - I2CSlaveIntStatus()** – vrátí status příznaku přerušení modulu Slave
 - I2CSlaveIntStatusEx()** – vrátí status příznaků individuálních přerušení

SSI (*ssi.c, ssi.h*):

- Konfigurace modulu SSI:
 - SSIConfigSetExpClk()** – nastaví mód, přenosovou rychlost a velikost dat. rámce
 - SSIEnable()** – povolí modul SSI (musí být nejprve nakonfigurován)
 - SSIDisable()** – zakáže modul SSI
 - SSIDMAEnable()** – povolí operaci přes rozhraní DMA
 - SSIDMADisable()** – zakáže operaci přes rozhraní DMA
- Příjem a odesílání dat:
 - SSIDataPut()** – odešle data, pokud je výstupní FIFO plný, čeká
 - SSIDataPutNonBlocking()** - odešle data, pokud je výstupní FIFO plný, vrátí 0
 - SSIDataGet()** – přečte data, pokud je vstupní FIFO prázdný, čeká
 - SSIDataGetNonBlocking()** – přečte data, pokud je vst. FIFO prázdný, vrátí 0
- Práce s přerušením:
 - SSIIntEnable()** – povolení uvedených přerušení modulu SSI
 - SSIIntDisable()** – zakázání uvedených přerušení modulu SSI
 - SSIIntClear()** – vynulování uvedených příznaků přerušení modulu SSI
 - SSIIntRegister()** – přiřadí k přerušení modulu SSI jeho obslužnou rutinu
 - SSIIntUnregister()** – odebere od přerušení modulu SSI jeho obslužnou rutinu
 - SSIIntStatus()** - vrátí status příznaků přerušení modulu SSI

Ethernet (*ethernet.c*, *ethernet.h*):

- Konfigurace modulu Ethernet:
 - EthernetInitExpClk()** – nastaví modul v závislosti na syst. parametrech (CLK)
 - EthernetConfigSet()** – uživatelské nastavení (promisk. mód, duplex, crc, atd.)
 - EthernetConfigGet()** – získá aktuální uživatelské nastavení
 - EthernetMACAddrSet()** – nastaví MAC adresu
 - EthernetMACAddrGet()** – získá aktuálně nastavenou MAC adresu
 - EthernetEnable()** – povolení modulu Ethernet
 - EthernetDisable()** – zakázání modulu Ethernet
- Příjem a odesílání dat:
 - EthernetPacketPut()** – odešle paket; je-li FIFO plný, čeká
 - EthernetPacketGet()** – přečte paket; je-li FIFO prázdný, čeká
 - EthernetPacketPutNonBlocking()** – odešle paket; je-li FIFO plný, skončí
 - EthernetPacketGetNonBlocking()** – přečte paket; je-li FIFO prázdný, skončí
 - EthernetSpaceAvail()** – zkontroluje, je-li volné místo ve FIFO
 - EthernetPacketAvail()** – zkontroluje, je-li k dispozici ve FIFO nějaký paket
- Práce s přerušením:
 - EthernetIntRegister()** – přiřadí k přerušení jeho obslužnou rutinu
 - EthernetIntUnregister()** – odebere přerušení jeho obslužnou rutinu
 - EthernetIntEnable()** – povolení uvedených přerušení modulu Ethernet
 - EthernetIntDisable()** – zakázání uvedených přerušení modulu Ethernet
 - EthernetIntStatus()** – vrátí status příznaků přerušení modulu Ethernet
 - EthernetIntClear()** – vynulování daných příznaků přerušení modulu Ethernet