

Vývojový kit pro 32-bitové mikrokontroléry ARM se zaměřením na multimediální aplikace

Development Kit for 32-bit ARM Micro-controllers with a Focus on
Multimedia Applications

Jan Přibyslavský



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan PŘIBYSLAVSKÝ

Osobní číslo: A08168

Studijní program: B 3902 Inženýrská informatika

Studijní obor: Informační a řídicí technologie

Téma práce: Vývojový kit pro 32-bitové mikrokontroléry ARM se zaměřením na multimediální aplikace

Zásady pro vypracování:

1. Provedte analýzu aktuální nabídky 32-bitových mikrokontrolérů s jádrem ARM a jejich vývojových nástrojů.
2. Vyberte vhodnou vývojovou platformu s konkrétním typem mikrokontroléru a rozšiřte ji o multimediální prvky.
3. V libovolném návrhovém prostředí nakreslete schéma zapojení a navrhnete plošný spoj. Vytvořte výkresovou dokumentaci, včetně podkladů pro výrobu a osazení plošného spoje.
4. Uvedený návrh hardwarově realizujte. Výrobu plošného spoje, případně i jeho osazení zadejte specializované firmě.
5. Vytvořte jednoduchý software, který na vývojové desce umožní demonstrovat její funkce.
6. Pro realizaci celého kitu vybavte desku potřebným příslušenstvím.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. ŠANDERA, Josef. Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 270 s. ISBN 80-730-0181-0.
2. PLÍVA, Zdeněk. EAGLE prakticky: řešení problémů při běžné práci. 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2010, 184 s. ISBN 978-807-3002-527.
3. MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy – linkery, práce s ATMELE AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky. Vyd. 1. Praha: BEN, 2003, 279 s. ISBN 80-730-0077-6.
4. LÁNÍČEK, R. Elektronika obvodů, součástky, děje. Praha, 1998, 478 s. ISBN 80-860-5625-2.
5. Přední světový distributor elektronických součástek a produktů pro oblast údržby, oprav a renovací | Farnell. Farnell [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tomáš Sysala, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

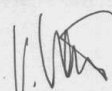
Datum zadání bakalářské práce:

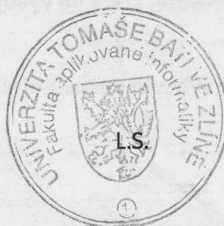
24. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

8. června 2012

Ve Zlíně dne 24. února 2012


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací vývojového kitu, jakožto nástroje pro samotný vývoj v oblasti 32-bitových mikrokontrolérů ARM. Kit obsahuje vývojovou desku a příslušenství potřebné pro její funkci. Samotná deska disponuje standardními funkcemi, což zahrnuje LED diody, uživatelem definovatelná tlačítka, vstupní a výstupní piny, sériové komunikační kanály, USB rozhraní a soket pro paměťové karty. Deska je však navíc osazená zvukovým kodekem, a barevným displejem s vlastním řadičem. Součástí práce na tomto projektu je především návrh a realizace samotné desky po stránce hardwarové, ale i vývoj jednoduchého software, který umožní demonstrovat některé základní funkce tohoto zařízení.

Klíčová slova: mikrokontrolér, mikroprocesor, vývojové nástroje, vývojová deska, ARM, embedded systémy

ABSTRACT

This bachelor thesis is concerned with the development and realisation of a development kit for the 32-bit ARM microcontrollers. The kit consists of development board and all the necessary accessories. The board itself offers standard features such as LED diodes, user buttons, input and output pins, serial lines, USB and a memory card sockets. In addition, the board is equipped with an audio codec and a color display with its own graphics controller. Part of this work is not only the design and realization of the board itself, but also development of a small software application to demonstrate some of the basic board's functions.

Keywords: microcontroller, microprocessor, development tools, development board, ARM, embedded systems

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Tomáši Sysalovi, Ph.D., za ochotu mojí práci vést a za cenné rady při jejím vypracování.

Rovněž bych rád poděkoval svému současnému zaměstnavateli, společnosti HR Carsoft s.r.o., za podporu při studiu a ochotu tolerovat moji absenci v zaměstnání, kterou si tato práce vyžádala.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDKY PRO 32-BITOVÉ MIKROKONTROLÉRY...	12
1.1 POJEM MIKROKONTROLÉR A (MIKRO)PROCESOR	12
1.2 SOUČASNÁ NABÍDKA VÝVOJOVÝCH PROSTŘEDKŮ.....	13
1.2.1 Vývojové prostředky ATMEL.....	13
1.2.2 Vývojové prostředky Code Red Technologies	14
1.2.3 Vývojové prostředky Embedded Artists.....	15
1.2.4 Vývojová prostředí	16
1.3 MOTIVACE PRO VÝVOJ VLASTNÍHO VÝVOJOVÉHO KITU.	18
1.4 VOLBA VHODNÉ ARCHITEKTURY	19
2 MIKROKONTROLÉRY S JÁDREM ARM CORTEX-M3.....	21
2.1 POPIS JÁDRA CORTEX-M3	21
2.2 VYUŽITÍ MIKROKONTROLÉRŮ S JÁDREM ARM CORTEX-M3	22
2.3 HARDWAROVÉ MOŽNOSTI MIKROKONTROLÉRU LPC1769.....	23
2.3.1 Interní komunikace	24
2.3.2 Mapování paměti	25
2.3.3 Systém řízení přerušení.....	26
2.3.4 Možnosti programování a ladění	27
2.3.5 Režimy snížené spotřeby	28
2.3.6 Komunikace s okolím	29
II PRAKTICKÁ ČÁST	310
3 HARDWARE	31
3.1 SOUČÁSTI VÝVOJOVÉHO KITU	31
3.2 VÝVOJOVÁ DESKA CM3BOARD	31
3.3 POPIS ZAPOJENÍ DESKY CM3BOARD	34
3.3.1 Napájení a systémová část	35
3.3.2 Uživatelské rozhraní	37
3.3.3 Nativní rozhraní USB	38
3.3.4 Rozhraní USB s obvodem FTDI.....	39
3.3.5 Rozhraní CAN Bus	41
3.3.6 Rozhraní RS422 a RS485	41

3.3.7	Rozhraní Ethernet	42
3.3.8	Datová úložiště	44
3.3.9	Senzory neelektrických veličin	45
3.3.10	Expanzní port	46
3.4	MULTIMEDIÁLNÍ PRVKY	47
3.4.1	Barevný AMOLED displej	47
3.4.2	Stereo audio CODEC	48
3.4.3	Zesilovač a akustické měniče pro hlasitou reprodukci zvuku	50
3.5	NÁVRH A REALIZACE PLOŠNÉHO SPOJE	51
3.5.1	Volba vhodné výrobní technologie	51
3.5.2	Použité metodiky pro návrh plošných spojů	54
3.5.3	Optimalizace pro výrobu	58
3.5.4	Výroba a osazení plošného spoje	59
3.5.5	Seznam zjištěných chyb	59
4	SOFTWARE.....	61
4.1	ANALÝZA A NÁVRH	61
4.2	HARDWAROVÁ ABSTRAKČNÍ VRSTVA	63
4.2.1	Význam hardwarové abstrakce	63
4.2.2	Knihovna CMSIS	64
4.3	OPERAČNÍ SYSTÉM REÁLNÉHO ČASU	65
4.3.1	Motivace pro zavedení RTOS	65
4.3.2	Možnosti systému FreeRTOS	66
4.4	PROGRAMOVÁNÍ A OBSLUHA MODULU AMOLED DISPLEJE	70
	ZÁVĚR	71
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	79
	SEZNAM PŘÍLOH	81

ÚVOD

Uplynula již více než jedna dekáda od okamžiku, kdy 32-bitové mikroprocesory ovládly trh s elektronikou. Najdeme je téměř všude od domácích spotřebičů, přes zábavní elektroniku, telekomunikace, dopravní prostředky až po průmyslovou automatizaci, biomedicínké inženýrství a mnoho dalších odvětví. Zkrátka se staly neodmyslitelnou součástí našich životů, ačkoliv si toho ne vždy můžeme být vědomi.

V posledních letech si stále častěji nacházejí cestu i do domácích dílen amatérských vývojářů a nadšenců pro elektroniku. Moje praxe sahá do dob, kdy to ještě nebylo zcela běžné a doménou těchto kutilů byly převážně mikrokontroléry 8-bitové. Bylo to hlavně z důvodu snadnější dostupnosti, jednoduchosti programování a mnohdy i výrazně nižší ceny jak samotných součástek, tak i jejich vývojových nástrojů. Ještě teď mám v živé paměti, jak pro mne přechod z 8-bitových na 32-bitové mikrokontroléry nebyl zrovna jednoduchým počinem, a to i v době, kdy už se z mojí záliby dávno stala profesionální praxe.

Ve svojí bakalářské práci se zabývám vývojem a realizací vývojového kitu, který využívá již zmiňovaný 32-bitový mikrokontrolér. Kit byl navržen tak, aby skloubil některé přednosti podobných projektů a byl schopen jim do určité míry i konkurovat. Rád bych, aby sloužil jako nástroj pro moji další vývojářskou činnost, ale především, aby mohl posloužit jako zdroj inspirace a informací pro kohokoliv, koho by moje práce mohla zaujmout, případně jako výukový nástroj na středních odborných či vysokých školách.

TEORETICKÁ ČÁST

1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDKY PRO 32-BITOVÉ MIKROKONTROLÉRY

1.1 Pojem mikrokontrolér a (mikro)procesor

Často se v praxi setkáváme s tím, že pojmy mikrokontrolér a mikroprocesor jsou zaměňovány. Sám občas používám termín "procesor" pro celou řadu programovatelných integrovaných obvodů, které ve skutečnosti procesory nejsou. Rád bych tedy tyto dva pojmy vymezil.

Mikroprocesor - jedná se o číslicový obvod určený ke zpracování posloupnosti instrukcí (programu). Tyto obvody můžeme členit podle jejich architektury, případně podle konkrétního typu jádra. Další přídatné obvody, jako je paměť, komunikační rozhraní atd. jsou nezdědky připojeny k procesoru externě. Dobrým příkladem mikroprocesoru je procesor v klasickém PC.

Mikrokontrolér - sdružuje mikroprocesorové jádro, paměti a další periferie do jednoho čipu. Často je také označován pojmem "jednočip". Je schopný pracovat jako samostatný funkční celek. Uplatnění nalézá nejčastěji v tzv. embedded systémech.

Jedna architektura často zapouzdřuje celou řadu mikrokontrolerů a mikroprocesorů. Konkrétní typ, kterým se budu zabývat má však všechny rysy klasického "jednočipu", proto pro něj budu používat výhradně termín mikrokontrolér.

1.2 Současná nabídka vývojových prostředků

Bývá zvykem, že každý výrobce nabízí pro své mikrokontroléry i vývojové nástroje. Existuje však i mnoho společností, které se zabývají výhradně vývojem a produkcí těchto nástrojů, přičemž s výrobcem mikrokontrolérů úzce spolupracují. Příkladem takové spolupráce může být např. výrobce polovodičů NXP Semiconductors a společnost Embedded Artists. Pro případného zájemce využití menšího množství mikrokontrolérů bývá cena a dostupnost vývojových nástrojů často rozhodujícím faktorem. V poslední době je proto moderním trendem tuto cenu držet co nejnižší a tím vzniká široká škála profesionálních i poloprofesionálních vývojových prostředků. Rád bych zde popsal ty, které mi byli inspirací pro další práci.

1.2.1 Vývojové prostředky ATMEL

Společnost Atmel je známý světový výrobce mikrokontrolérů. Tato firma dala vzniknout 8- a 32-bitové architektuře AVR (1), zaměřuje se však i na architekturu ARM.

Vývojová deska AT91SAM7S-EK (2)



Obrázek 1, zdroj www.atmel.com

Jedná se o poměrně střídmě vybavenou desku s mikrokontrolérem AT91SAM7S s jádrem ARM7TDMI. Deska je poměrně dobře zdokumentovaná a existuje pro ni celá řada demo programů a utilit.

JTAG emulátor SAM-ICE (3)



Obrázek 2, zdroj www.atmel.com

Zařízení sloužící k odladování softwaru přes rozhraní JTAG. Podporuje však jen obvody od firmy Atmel.

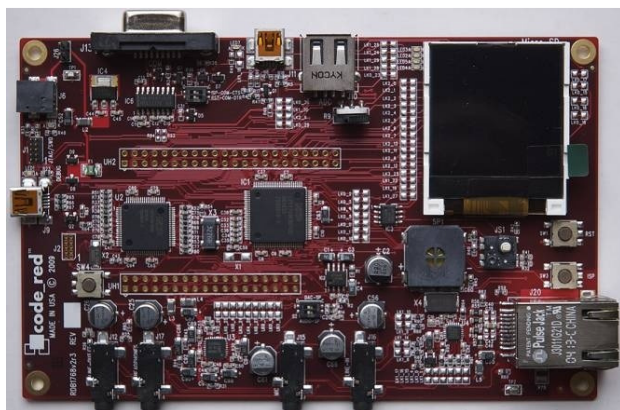
Díky svojí jednoduchosti a bohaté dokumentaci mohou být tyto vývojové nástroje vhodnou volbou pro vývojáře přecházejícího z 8-bitové architektury na 32-bitovou. Odrazující může být poněkud vyšší cena, která za oba zmiňované výrobky může být cca 6000 Kč (4) (5). Přijatelnou a cenově dostupnější alternativou by mohly být obdobná zařízení od firmy Olimex (6).

1.2.2 Vývojové prostředky Code Red Technologies

Tato na trhu relativně mladá firma disponuje nepříliš širokým, avšak velmi zajímavým portfoliem cenově dostupných vývojových prostředků.

Vývojová deska RDB1768V2 (7)

Poměrně bohatě vybavená deska, osazená mikrokontrolérem LPC1768 s jádrem ARM Cortex-M3, která má přímo v sobě zakomponovaný obvod pro podporu debuggingu. Pro odladování aplikací tedy už nepotřebuje žádné další hardwarové nástroje. Originálním způsobem je zde řešeno i nahrávání programu do paměti procesoru. Cenově vychází na 280 amerických dolarů. Za tuto cenu má ale rozhodně co nabídnout.

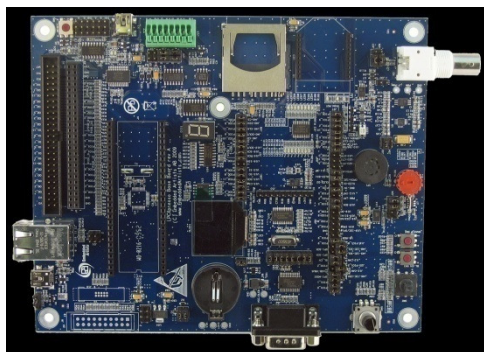


Obrázek 3, zdroj www.code-red-tech.com

1.2.3 Vývojové prostředky Embedded Artists

Poslední zmiňovanou je švédská společnost Embedded Artists nabízející kromě vývojových prostředků i tzv. OEM moduly. Produkty této firmy jsou zajímavé nejen svým originálním řešením, ale především jejich nízkou cenou.

- Vývojový kit pro LPCXpresso (8)



Obrázek 4, zdroj www.embeddedartists.com

Zkombinováním de-facto třech vývojových nástrojů do jediného kitu, který je nabízen za něco málo přes 100 Euro, se zde švédským vývojářům podařil opravdu záslužný kousek. Kit se skládá ze základní desky LPCXpresso Base board, která disponuje velkým množstvím periférií. Další součástí je odpojitelný modul, který je nabízen v několika variantách. Každá z nich je osazena jiným typem mikrokontroléru, takže má uživatel možnost si vybrat. Oddělitelnou součástí těchto modulů je i obvod pro podporu debugingu přes rozhraní USB.

1.2.4 Vývojová prostředí

Vývojové prostředí, nebo-li IDE (z angl. Integrated Development Environment) je ucelená skupina softwarových nástrojů umožňujících vývoj aplikací pro určitou platformu (nebo i více platforem). Tím je často zastřešen celý proces od editace zdrojového kódu, přes kompilaci, linkování až po nahrání samotného programu do cílového zařízení, případně jeho odladování na tomto zařízení. Nejčastějším programovacím jazykem obecně používaným ve vývoji aplikací pro mikrokontroléry (tzv. *cross-platform* vývoj - situace, kdy píšeme a kompilujeme software na jiné platformě, než pro kterou je určen) je jazyk C, avšak nezdědka se setkáme i s kombinací jazyků C a C++, zejména ve větších projektech, které si vyžadují zavedení konceptu objektového programování. Stejně tak využití jazyků C# a Java už v dnešní době není raritou.

Stejně jako u hardwarových vývojových nástrojů se i v případě vývojových prostředí nabízí široká škála produktů, které se liší jak cenou, tak nabízenými funkcemi. Dovolím si zde uvést některé z nich.

Vývojové prostředí Eclipse a GNU ARM Toolchain

Pokud nás bude zajímat možnost, jak svůj software psát zcela zadarmo, pravděpodobně se setkáme s těmito softwarovými nástroji. Prostředí Eclipse (9) je vydáváno pod svou vlastní licenci, která v určitých směrech umožňuje jeho bezplatné využívání (10). Ačkoliv je nejčastěji využíváno pro vývoj aplikací v jazyce Java, může být volbou vhodných pluginů a tzv. toolchainu (sady softwarových nástrojů pro kompilaci a linkování programu) přizpůsobeno téměř libovolnému programovacímu jazyku a cílové platformě. Jako vhodný toolchain se zde jeví např. Cygwin GNU ARM Toolchain (11) nebo YAGARTO (12). Oba tyto toolchainy jsou šířeny pod všeobecnou veřejnou licenci GNU (13) a rovněž mohou být bezplatně využívány.

Bezplatné užívání těchto nástrojů je nespornou výhodou, avšak má to i svá úskalí. Většinou zde není kladen příliš velký důraz na uživatelský komfort a nemůžeme zde očekávat ani žádnou technickou podporu. Na začátku práce s těmito nástroji je uživatel vystaven procesu konfigurace celého vývojového prostředí včetně všech potřebných doplňků a zásuvných modulů, což ne vždy bývá jednoduchý úkol (14).

Vývojová prostředí společností Keil a IAR

Profesionální vývojové nástroje těchto dvou výrobců jsou svojí vyšší cenou (15) (16) orientovány spíše na většího odběratele a jednotlivcům či malým společnostem pravděpodobně zůstanou mimo dosah. Kromě široké nabídky nejrozličnějších cílových platforem, které tyto nástroje podporují, jsou vybaveny i nadstandardními funkcemi. V ceně je většinou zahrnut i soubor knihoven, které implementují řešení nejrozličnějších problémů od obsluhy komunikačních periférií přes operační systémy reálného času až po implementace síťových či USB protokolů.

Vývojová prostředí LPCXpresso a Red Suite

Prostředí Red Suite (17), vyvinuté firmou Code Red, vychází původně z prostředí Eclipse a rovněž využívá GNU toolchain. Odpadá zde však nutnost počátečních konfigurací a uživatel může ihned po nainstalování začít psát svůj software. Rovněž je k dispozici celá řada knihoven a demo programů, které mohou posloužit jako dobrý základ pro vývoj dalších aplikací. Jak by se dalo čekat, prostředí není zadarmo. Cenově se však drží mnohem níže, než produkty společností Keil a IAR. Jakákoliv placená verze tohoto IDE podporuje i jazyk C++ a obsahuje kostry programů pro tvorbu projektů pod systémem FreeRTOS.

Odlehčená verze, nesoucí název LPCXpresso, podporuje pouze jazyk C a velikost programu do 128kB. Jedná se však o tzv. download limit, což je velikost programu, který můžeme zapisovat a odladovat přes debugger. Limit na samotnou kompilaci programu zde není. Nutno podotknout, že tato odlehčená verze je zcela zdarma a tvoří vynikající kombinaci se stejnojmennými vývojovými prostředky od firmy Embedded Artists.

Pro vývoj aplikací na vývojovém kitu, který je předmětem této práce, bylo vybráno právě prostředí LPCXpresso.

1.3 Motivace pro vývoj vlastního vývojového kitu.

Zatímco vývojová deska AT91SAM7S-EK od firmy Atmel může být vhodná pro prvotní seznámení s 32-bitovými mikrokontroléry, pravděpodobně již nebude stačit, pokud bude požadavek na využití více hardwarových možností, mezi nimiž může být např. přehrávání zvuku, zobrazování textových údajů na displeji, ukládání a načítání souborů z externích úložišť atd.

Při dřívějších experimentech s touto deskou se nabízela myšlenka zbudování vlastního přehrávače zvukových souborů, což by znamenalo výše zmiňované funkce využívat. Aby se vývoj obešel bez "bastlení" více hardwarových částí dohromady, byl vznesen požadavek na sofistikovanější vývojové nástroje. Jedním z nich je deska RDB1768V2, která však byla přes všechny její přednosti odrazující kvůli nepříliš nízké ceně. Bylo to hlavně proto, že vývojové nástroje LPCXpresso mohou za poloviční cenu nabídnout skoro to samé a ještě pár věcí navíc. Zejména rozhraní pro průmyslové sběrnice jako je CAN bus nebo RS422/485. Jedinou jejich nevýhodou je absence zvukového rozhraní.

V tomto okamžiku se již z původní myšlenky jednoduchého zvukového přehrávače začal klubat projekt, který by zahrnoval vývoj mnohem složitějšího systému. Mezi jeho funkce by nepatřilo jen přehrávání zvuku, ale rovněž i zobrazování statických, ale i animovaných grafických motivů. Nesloužil by pouze pro zábavní účely, ale díky průmyslovým komunikačním rozhraním by mohl sloužit jako pokročilá audiovizuální signalizace u nejrůznějších strojů a přístrojů, případně jako automatizovaný rozhlas pro oznamování nejrůznějších událostí. Jako dobrý příklad může být třeba zvukový systém v MHD. Díky modulu pro bezdrátovou komunikaci a senzorům neelektrických veličin by toto zařízení mohlo do jisté míry najít uplatnění i v systémech inteligentních budov, meteorologických stanicích atd...

Vše nakonec vedlo k nápadu zkombinovat přednosti systému LPCXpresso a vývojové desky RDB1768V2 a vytvoření vlastního vývojového nástroje. Samozřejmě se to neobešlo bez řady kompromisů a úskalí. Největším paradoxem bylo to, že vývoj prototypu vlastní desky rozhodně není méně nákladný, než zakoupení kteréhokoli z uvedených vývojových systémů. Nápadů však již bylo mnoho a bylo by škoda dělat krok zpátky. Začala tedy vznikat deska, která byla později pojmenována CM3board.

1.4 Volba vhodné architektury

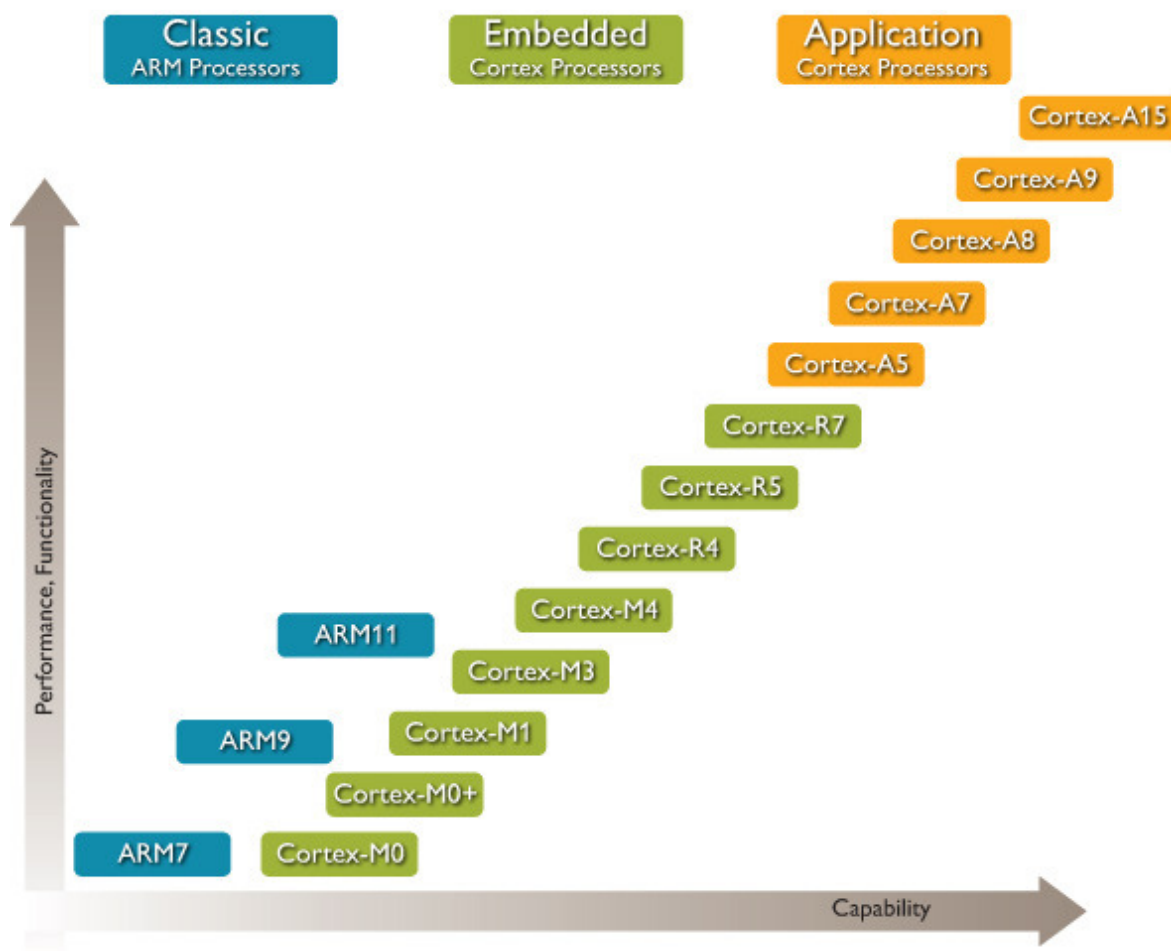
Při volbě vhodné architektury, případně konkrétního typu mikrokontroléru, bylo čerpáno především ze zkušeností s výše uvedenými vývojovými nástroji. Kandidáty zde tedy byly architektury ARM7TDMI a ARM Cortex-M3. Již od začátku bylo zřejmé, že schůdnější řešení by bylo využití druhé zmiňované, protože obě vývojové desky, ze kterých bylo čerpáno nejvíce, jsou postavené právě na ni. Přesto však bylo provedeno malé srovnání, aby nebyly opomenuty všechny hlavní aspekty obou architektur.

Přestože procesory s jádrem ARM7TDMI dnes najdeme v milionech zařízení po celém světě, je tato architektura, vyvinutá již v roce 1994, stále více na ústupu a přímo společnost ARM nedoporučuje její použití v nových projektech (18). Architektura Cortex-M3 byla vyvinuta jako její nástupce.

Nejpatrnějším rozdílem zde je, že ARM7TDMI je architektura von Neumannova, zatímco Cortex-M3 je architekturou harvardskou. Z praktického hlediska je potom Cortex-M3 při svých 1.25 DMIPS/Mhz efektivnější ve zpracování instrukcí oproti ARM7TDMI, která nabízí pouze 0.95 DMIPS/Mhz. Z hlediska spotřeby rovněž vede Cortex-M3 při svých 0.19mW/Mhz versus 0.28/Mhz u ARM7TDMI.

Architektura Cortex-M3 rovněž disponuje schopností předvídat větvení programu, dokáže rychleji reagovat na přerušení (12 cyklů vs. 24-42 u ARM7TDMI), hardwarově implementuje pokročilé rozhraní pro debugging, umožňuje procesoru využívat režimy se sníženou spotřebou a sofistikovaný systém pro uzamykání paměti.

Více o rozdílech těchto dvou architektur je uvedeno v oficiální zprávě společnosti ARM (19).



Obrázek 5 - Srovnání architektur ARM, zdroj www.arm.com (20)

Z výše uvedeného vyplývá, že **pro vývojovou desku CM3board byla vybrána architektura ARM Cortex-M3. Jako konkrétní typ mikrokontroléru byl zvolen LPC1769.** Jedná se o trochu rychlejší verzi obvodu LPC1768, který je obsažen na vývojové desce RDB1768V2 a při zvolení vhodného modulu s ním může pracovat i deska LPCXpresso Base board.

2 MIKROKONTROLÉRY S JÁDREM ARM CORTEX-M3

2.1 Popis jádra Cortex-M3

V kapitole 1.4 již byla zmínka o některých přednostech architektury ARM Cortex-M3. Jelikož se jedná o Harvardskou architekturu, je zde oddělená sběrnice pro instrukce a data, což výrazně urychluje zpracování programu, protože přístup k datům není ovlivněn načítáním instrukcí (a naopak). Jedná se však o tzv. unifikovaný paměťový systém, kde obě sběrnice sdílí stejnou fyzickou paměť (21).

Zpracování jedné instrukce spočívá ve třech krocích:

- Načtení (fetch)
- Dekódování (decode)
- Vykonání (execute)

Jádro disponuje oddělenými instrukčními kanály (tzv. pipelines), což opět výrazně urychluje zpracování programu, protože je možné provádět několik operací současně. Viz následující obrázek.

Instrukce N	Načtení	Dekódování	Vykonání			
Instrukce N+1		Načtení	Dekódování	Vykonání		
Instrukce N+2			Načtení	Dekódování	Vykonání	
Instrukce N+3				Načtení	Dekódování	Vykonání

Obrázek 6 - zpracování instrukcí procesorovým jádrem Cortex-M3, zdroj (21)

Za zmínku rovněž stojí, že mnoho instrukcí je 16-bitových a jelikož se jedná o 32-bitové jádro, je možné první krok (načtení) provést pro dvě instrukce současně. Vykonání některých instrukcí může trvat déle, než jeden strojový cyklus. V tomto případě je funkce instrukčních kanálů pozastavena na dobu nezbytně nutnou pro jejich vykonání (21).

Za součást jádra ARM Cortex-M3 je rovněž považováno jeho přidružené rozhraní pro debugging.

2.2 Využití mikrokontrolérů s jádrem ARM Cortex-M3

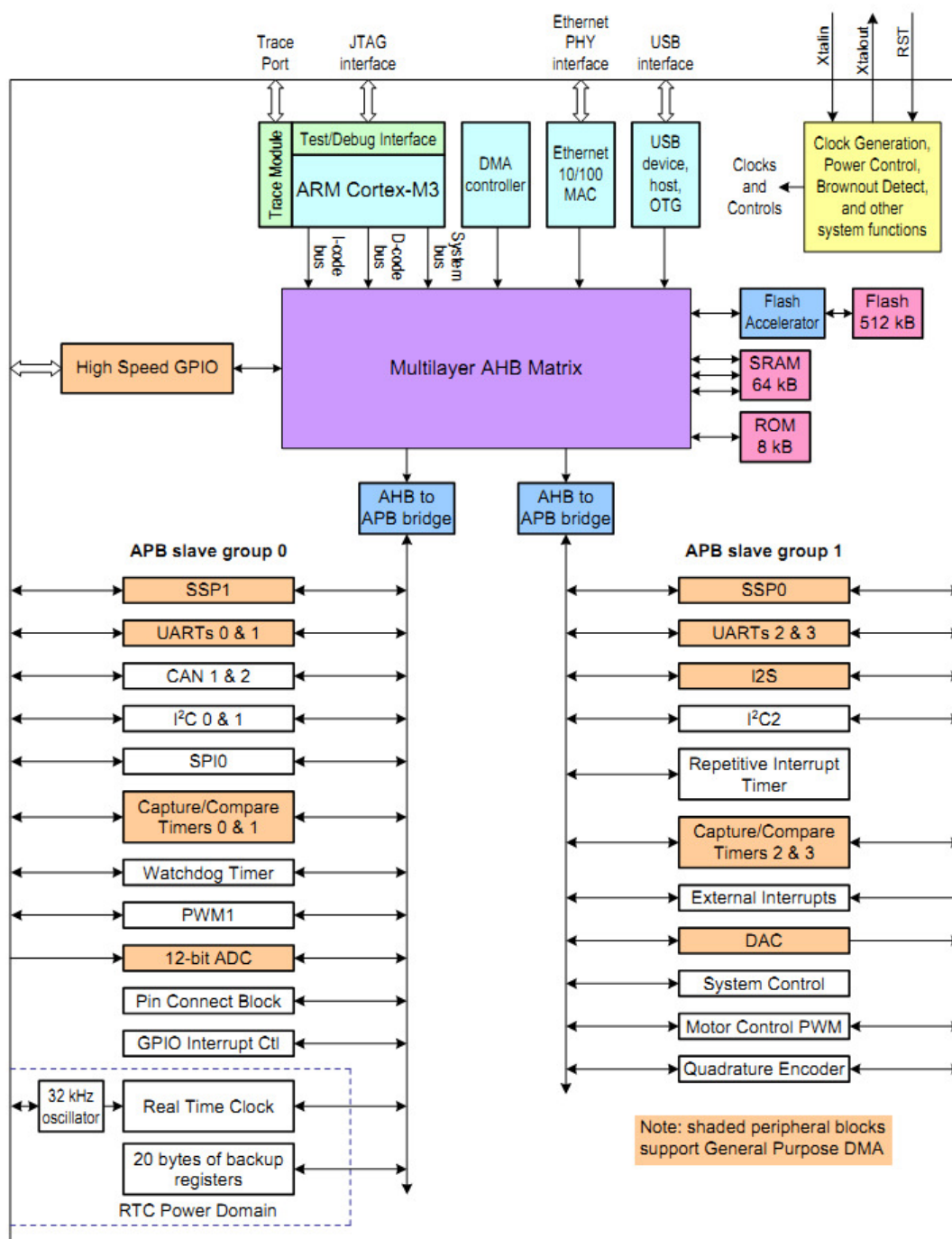
Díky svojí velmi příznivé ceně jsou mikrokontroléry s jádrem ARM Cortex-M3 často využívány v oblastech, které byly dříve dominovány obvody 8-bitovými. Vysokým výpočetním výkonem a širokou škálou svých možností totiž můžou nahradit nejen samotný 8-bitový mikrokontrolér, ale i řadu dalších obvodů, jejichž funkce lze nyní implementovat pomocí softwaru. Za zmínku stojí např. komunikace přes USB, Ethernet, zpracování digitálního signálu atd...

Nejčastější využití architektury ARM Cortex-M3 by se dalo shrnout do několika bodů:

- **Konzumní elektronika** - Architektura Cortex-M3 svým výpočetním výkonem nedosahuje tak vysoko, jako některé jí příbuzné architektury, např. Cortex-A8. Pravděpodobně ji tedy nenajdeme v konzumních produktech jako jsou smartphony, netbooky či herní konzole. Vhodným kandidátem pro její využití by však mohly být nejrůznější počítačové periferie, jako klávesnice, myši a herní zařízení. Rovněž bychom se s ní mohli setkat na poli digitálních zařízení pro záznam a reprodukci hudby, nízkorozpočtových mobilních telefonů, GPS navigací a hraček.
- **Průmysl, automatizace a řízení** - Zde bychom asi našli nejširší uplatnění této architektury. Díky velice rychlým reakčním dobám, funkcím pro využití RTOS a široké škále komunikačních rozhraní, které jsou typické pro průmyslová prostředí, je tato architektura velice silným kandidátem pro využití právě zde.
- **Měření a vzdálený monitoring** - Tento bod by se dal v mnohém sloučit s bodem předchozím, avšak je nutno podotknout, že právě aplikace jako je vzdálený monitoring si zaslouží zvláštní pozornost. Mnoho mikrokontrolérů s jádrem ARM Cortex-M3 disponuje režimy snížené spotřeby, kdy je možné precizně vybalancovat poměr spotřeby a výpočetního výkonu. Toto je klíčová vlastnost v aplikacích, kde je zařízení mimo snadný dosah a přitom je vyžadováno, aby byl jeho chod bezproblémový a co možná nejdelší při omezených možnostech napájení. Příkladem mohou být vzdálené meteostanice, méně přístupné senzory v budovách, zařízení pro sledování pohybu zvířat, zásilek atd...

2.3 Hardwarové možnosti mikrokontroléru LPC1769

Zatímco jádro ARM Cortex-M3 a jeho přidružené rozhraní pro debugging jsou produkty společnosti ARM Ltd., vše ostatní je již na výrobci polovodičů, který rozhoduje o tom, jaké části bude jeho mikrokontrolér obsahovat. Zjednodušené blokové schéma mikrokontroléru LPC1769 uvádím na obrázku níže.



Obrázek 7 - Blokové schéma mikrokontroléru LPC1769, zdroj (22)

2.3.1 Interní komunikace

Z obrázku 7 v předchozí kapitole je patrné, že jádro mikrokontroléru je se zbytkem obvodu propojeno třemi sběrnici. Systémovou sběrnici (System bus), datovou (D-code bus) a sběrnici pro načítání instrukcí (I-code bus).

Ve vnitřním zapojení LPC1769 nalezneme další dva typy hlavních sběrnic:

- Sběrnice AHB - z angl. Advanced High-performance Bus je sběrnice umožňující vysokorychlostní přímou komunikaci jádra mikrokontroléru s některými vybranými perifériemi. Tyto zahrnují DMA řadič, Ethernet MAC a USB.
- Sběrnice APB - z angl. Advanced Peripheral Bus - sběrnice sdružující ostatní periférie mikrokontroléru LPC1769. Tyto sběrnice jsou celkem dvě, kde každá spravuje svou vlastní skupinu periférií. Tím je dosaženo vyšších komunikačních rychlostí. Pro komunikaci se sběrnici AHB využívají speciální rozhraní (AHB to APB bridge).

Multilayer AHB Matrix

Tento obvod vytváří rozhraní mezi sběrnici jádra, sběrnici AHB a umožňuje komunikaci s rozhraním pro APB sběrnice. Každá vysokorychlostní periférie dostává díky tomuto obvodu svůj vlastní komunikační kanál a její komunikační pásmo tak není zatěžováno ostatními perifériemi.

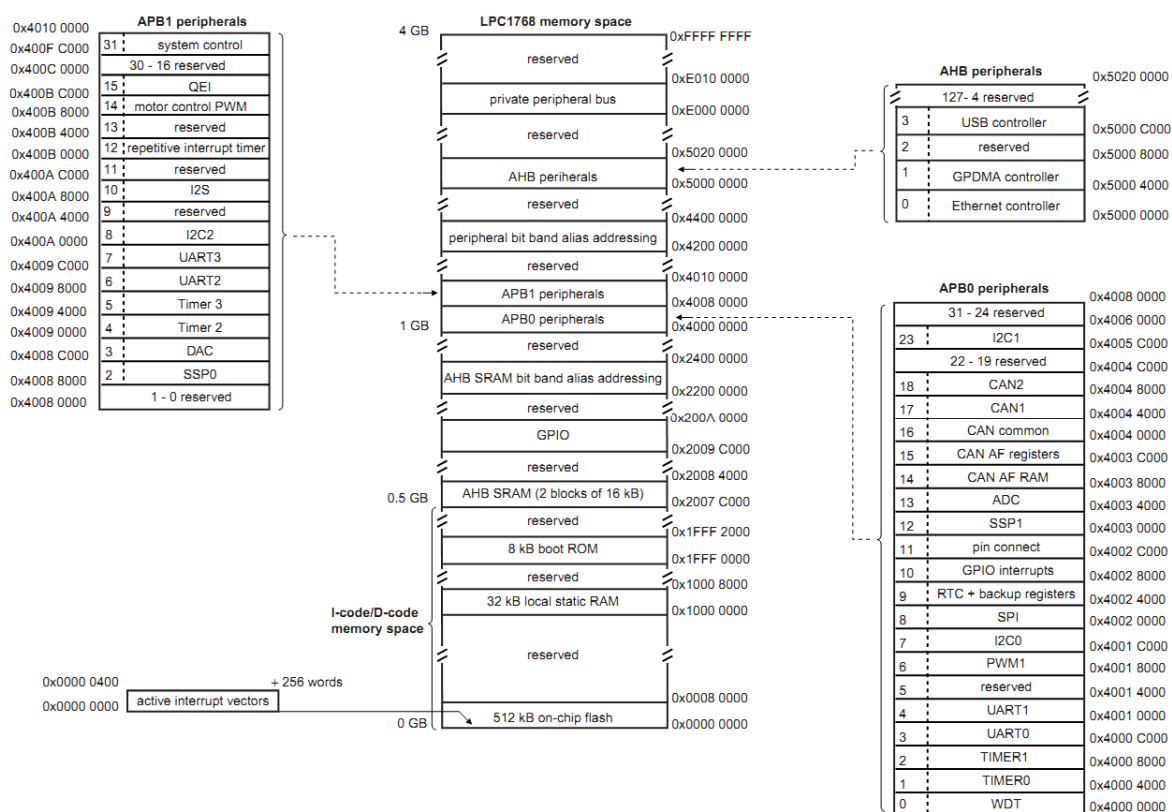
DMA kanály

DMA (z angl. Direct Memory Access) kanál je rozhraní umožňující přesuny dat z paměti do paměti nebo z periférie do paměti (a naopak) bez nutnosti zatěžovat procesor po celou dobu transakce. Místo toho, aby procesor vykonal instrukci při každém přesunu datového slova, slouží zde jen jako prostředník pro zahájení a ukončení přenosu. Mikrokontrolér LPC1769 nabízí 8 DMA kanálů pro všeobecné použití (GPDMA) avšak některé vysokorychlostní periférie disponují navíc svým vlastním (dedikovaným).

2.3.2 Mapování paměti

Mikrokontrolér LPC1769 disponuje pamětí typu Flash o velikosti 512kB pro uložení programu a pamětí typu SRAM velikosti 64kB pro ukládání dat. Celá paměť procesoru je unifikovaná a využívá společný adresový prostor. Z hlediska 32-bitové sběrnice (resp. sběrnic - I-code bus a D-code bus) je velikost adresovatelného prostoru 4GB. Jelikož obě sběrnice operují nad stejným adresovým prostorem, není velikost dvojnásobná, jak by se mohlo zdát.

Jednotlivé části paměti mají v adresovém prostoru své adresy pevně dané a nelze je měnit. Výjimkou je tabulka vektorů přerušení (na obr. níže označena jako active interrupt vectors).



Obrázek 8 - Mapování paměti mikrokontroléru LPC1769, zdroj (22)

2.3.3 Systém řízení přerušení

Jádro ARM Cortex-M3 disponuje speciálním řadičem pro řízení a obsluhu přerušení, který je označován zkratkou NVIC (z angl. Nested Vectored Interrupt Controller).

V případě mikrokontroléru LPC1769 může NVIC nabídnout tyto funkce:

- 35 maskovatelných přerušení od periférií
- 32 programovatelných úrovní priority
- Možnost přemapovat tabulku vektorů
- Podpora nemaskovatelných přerušení
- Podpora softwarových přerušení

Tabulka vektorů

Jedná se o specifickou oblast paměti, kde jsou uloženy vektory přerušení. Každý vektor obsahuje adresu obslužné funkce pro dané přerušení. Dle výrobního nastavení je u mikrokontroléru LPC1769 začátek této tabulky nastaven na adresu 0x00000000, tedy samotný začátek adresového prostoru. Je však možné tuto tabulku přemapovat na jinou adresu, ať už do paměti Flash nebo SRAM. Toho se využívá zejména v případech, kdy je začátek adresového prostoru obsazen uživatelským bootloaderem. Detailní informace o jednotlivých přerušeních, jejich vektorech a způsobu přemapování tabulky jsou uvedeny v uživatelském manuálu obvodů řady LPC17xx (22).

Nemaskovatelná přerušení

Tento typ přerušení nelze ignorovat běžným způsobem a často je generován v případech, kdy se systém dostane do nedefinovaného stavu vlivem závažné chyby. Nemaskovatelná přerušení mají své vlastní obslužné funkce, které mohou posloužit vývojáři pro bližší diagnostiku systému v případě výskytu těchto chyb. Speciálním případem nemaskovatelného přerušení je systémový reset.

2.3.4 Možnosti programování a ladění

Výrobní bootloader

Mikrokontrolér LPC1769 obsahuje výrobní bootloader, který je uložen v paměti typu ROM o velikosti 8kB a je spuštěn vždy po zapnutí nebo po resetu obvodu. Tento základní bootloader je neměnný a nabízí funkce pro další programování, vymazání či přepsání paměti programu. Může pracovat ve dvou režimech:

- In-System Programming - neboli ISP, je způsob, kdy je program zapsán do paměti Flash pomocí sériového portu (UART0) za pomoci speciálních příkazů, které bootloader zná. Tímto způsobem se programují obvody, které v sobě ještě nemají žádný uživatelský software, případně pokud je nutné celou paměť Flash přepsat či vymazat.
- In-Application Programming - režim, kdy funkce pro zápis či mazání Flash paměti volá již samotná uživatelská aplikace. Toho nejčastěji využívá sekundární bootloader, který je vyvíjen uživatelem obvodu a určuje způsob, jakým se zařízení bude dále programovat. Možnosti programování jsou zde mnohem širší než jen sériový port, avšak tento typ bootloaderu již zabírá efektivní místo v paměti programu.

Zápis programu do paměti Flash je rovněž možný pomocí odlaďovacího nástroje přes rozhraní JTAG. Zpravidla je program po částech zapisován do paměti SRAM a odtud zavoáním speciálního příkazu přeprogramován procesorem do paměti Flash. Tuto funkci zprostředkovává výrobní bootloader v režimu In-Application Programming.

Možnosti ladění programu

Jádro Cortex-M3 v sobě integruje funkce pro debugging. Ten může probíhat přes klasické JTAG rozhraní nebo přes speciální sériové rozhraní ARM Serial Wire Debug. Rozhraní umožňují přístup do všech pamětí, registrů a periférií. Hardwarově je podporováno až 8 programových breakpointů a 4 datové watchpointy.

2.3.5 Režimy snížené spotřeby

Tak jako u každého procesoru či mikrokontroléru, je i v případě LPC1769 spotřeba závislá na taktovací frekvenci. Tu je možné nastavovat pomocí speciálních registrů a fázového závěsu neboli PLL (z angl. Phase Locked Loop) aniž by bylo nutné měnit typ krystalu nebo jiného externího zdroje hodinového signálu. Rovněž je možné dle potřeby odpojovat napájení periferiím, které zrovna nejsou využívány, což umožňuje precizně vyladit spotřebu a omezit se s funkcí jen na to, co je opravdu v daném okamžiku potřeba.

Kromě výše zmíněného disponuje mikrokontrolér čtyřmi speciálními režimy, kdy je spotřeba snížena výrazně, ovšem funkčnost obvodu je v tomto případě velmi omezena (22).

- Sleep mode - V tomto režimu je odpojen hodinový signál od jádra mikrokontroléru a vykonávání instrukcí je pozastaveno. Činnost periferií je zachována a ty jsou schopné generovat přerušení. Rovněž je potlačena činnost paměti a sběrnic, které ji obsluhují. Jen malá speciální oblast paměti SRAM, kam periférie stále mohou přistupovat, si zachovává funkčnost. Tento režim je ukončen kdykoliv, dojde-li k vyvolání přerušení, které není zakázané.
- Deep sleep mode - Hlavní oscilátor je pozastaven a funkci si zachová pouze Watchdog a obvod RTC (hodiny reálného času). Stav procesoru zůstává zachován, stejně jako hodnoty registrů a paměť SRAM. Logické úrovně pinů zůstávají neměnné. Ukončení tohoto režimu může proběhnout, jen pokud nastane nezakázané přerušení, které ke své činnosti nepotřebuje hodinový signál.
- Power-down mode - tento režim je stejný, jako Deep sleep, navíc zde však dochází ke kompletnímu odpojení paměti Flash. Výhodou je ještě vyšší úspora energie, avšak probouzení z tohoto režimu trvá déle.
- Deep Power-down mode - Napájení celého čipu je odpojeno s výjimkou obvodu RTC. Probuzení je možné pouze přerušením z tohoto obvodu, případně vyvoláním resetu.

Režimy se sníženou spotřebou nacházejí uplatnění v aplikacích, kde je vyžadována pouze občasná funkčnost zařízení např. při periodickém měření veličin, odměřování času či zpracování informací na datových linkách, které nejsou trvale vytíženy.

2.3.6 Komunikace s okolím

Tak jako většina mikrokontrolérů, i LPC1769 nabízí široké možnosti komunikace s okolím. Nejzákladnější z nich jsou 32-bitové paralelní porty. Těch je na zmiňovaném obvodu celkem 5 (Port 0 - Port 4) a zabírají drtivou většinu pinů. Vzhledem k příliš nízkému počtu těchto pinů na některých pouzdrech, nejsou porty využitelné v plném rozsahu (některé bity nejsou vyvedené na fyzické piny) a téměř každý paralelní port na svých pinech umožňuje využívat funkce dalších periférií. V daném okamžiku však může mít jeden pin jen jednu funkci.

Mezi sériová rozhraní obvodu LPC1769 lze zařadit:

- Ethernet MAC s rozhraním RMII
- Nativní USB 2.0 full-speed řadič s integrovanou fyzickou vrstvou, který může pracovat v režimech Host, Device a OTG
- 4 rozhraní UART, kde jeden má podporu pro hardwarové řízení toku dat a rozhraní RS-485
- Dva nezávislé kanály pro sběrnici CAN bus
- Dva synchronní sériové porty SSP, které mohou pracovat v režimech SPI, 4-wire a Microwire
- Sběrnice SPI
- 3 nezávislé sběrnice I2C
- Obousměrná sběrnice I2S pro přenos digitálního zvuku

Kromě sériových a paralelních sběrnic může LPC1769 komunikovat s okolím i pomocí těchto periférií:

- 12-bitový ADC a 10-bitový DAC
- PWM výstup s podporou řízení třífázového motoru
- Rozhraní pro rotační enkodér

PRAKTICKÁ ČÁST

3 HARDWARE

3.1 Součásti vývojového kitu

Celý vývojový kit nesestává jen z vývojové desky, ale obsahuje řadu příslušenství, které vývojáři umožňují s deskou pracovat.

Mezi toto příslušenství patří:

- Spínaný napájecí adaptér 9V
- 3x mini USB kabel
- Modul LPC-Link pro odlaďování softwaru
- CD s demoverzí vývojového prostředí a ukázkovými programy
- Barevný OLED modul
- Přenosný kufřík
- Antistatické pouzdro pro desku CM3board

Kit standardně není opatřen XBEE modulem pro bezdrátovou komunikaci. Tuto součást je tedy nutné si opatřit samostatně.

3.2 Vývojová deska CM3board

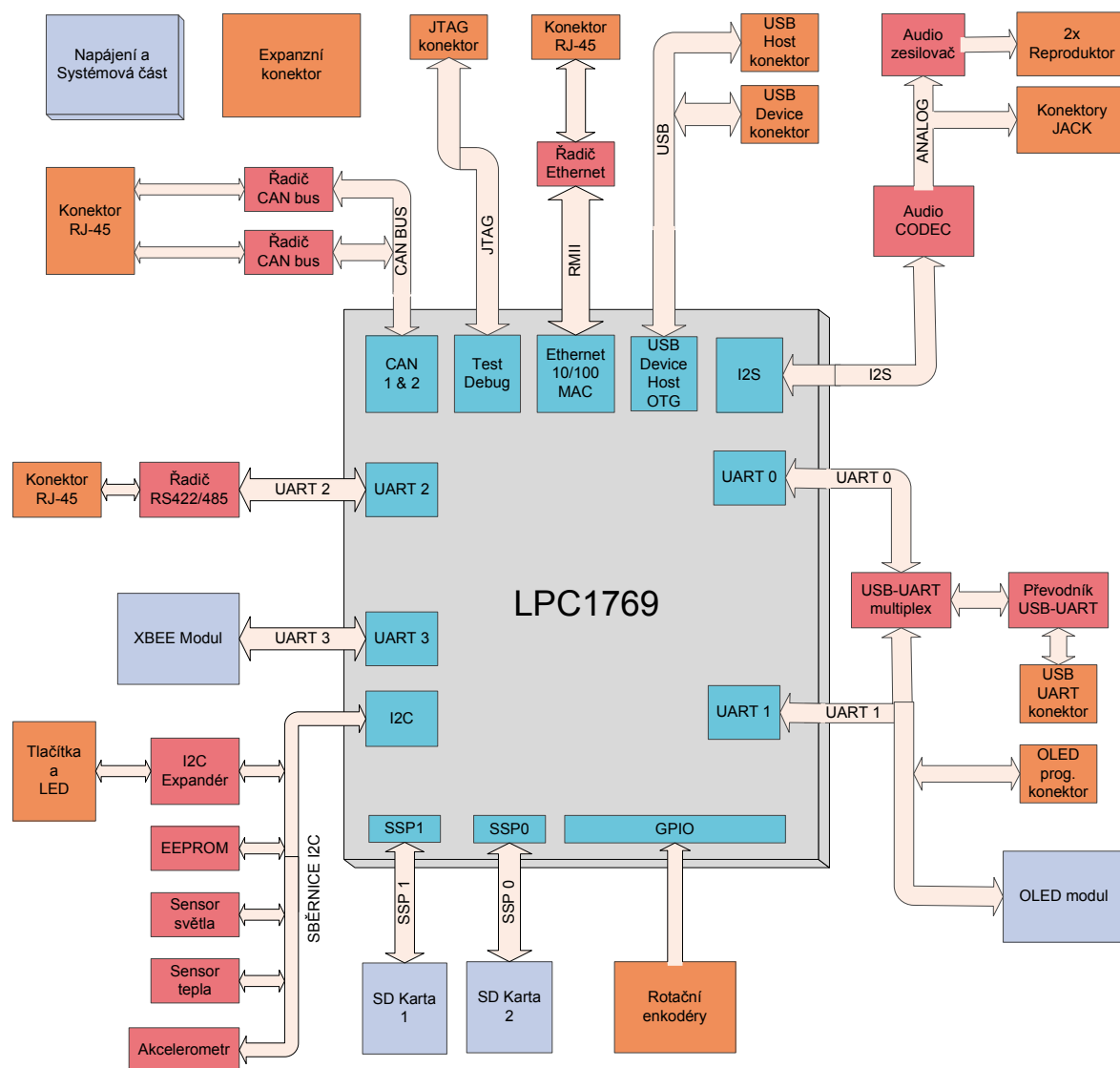
Po výběru vhodné architektury a konkrétního typu mikrokontroléru již bylo možné začít se samotným návrhem vývojové desky. Následoval výběr všech rozhraní a periférií, kterými deska bude disponovat.

Zde uvádím jejich seznam:

- Modul barevného OLED displeje s rozlišením 320x240 a vlastním inteligentním řadičem
- 24-bitový stereo audio codec s I2S rozhraním, integrovaným budičem pro sluchátka a podporou vzorkovacích frekvencí 8-96 kHz
- Integrovaný zesilovač a dva mini reproduktory pro hlasitý odposlech přímo na desce

- Nativní USB 2.0 rozhraní s podporou režimů device, host a OTG
- Převodník USB-UART nabízející virtuální sériový port
- Rozhraní Ethernet s vlastním řadičem pro fyzickou vrstvu
- Rozhraní JTAG pro testování a odlaďování aplikací
- Rozhraní CAN bus se dvěma nezávislými kanály
- Jeden kanál RS422/485
- Modul XBEE pro bezdrátovou komunikaci
- 8 uživatelských tlačítek s programovatelným LED podsvícením a vlastním I2C expandérem
- Dva rotační enkodéry
- Sériová I2C EEPROM o velikosti 8kB
- Senzory neelektrických veličin pro osvětlení, teplotu a zrychlení
- Rozhraní pro dvě SD karty na sběrnici SPI
- Expanzní konektor pro možnost připojení externího uživatelského hardwaru

Na základě výše uvedeného seznamu již mohlo být sestaveno základní blokové schéma celé desky. Zpravidla se jedná o nezbytný krok, který předchází samotnému kreslení schématu a výběru konkrétních součástek. Přesto je však i během tohoto procesu často měněno a přizpůsobováno konkrétním požadavkům a dostupným součástkám, což může mít za následek značnou odlišnost finální verze od prvotní. Finální verzi blokového schématu desky CM3board uvádím na obrázku níže.

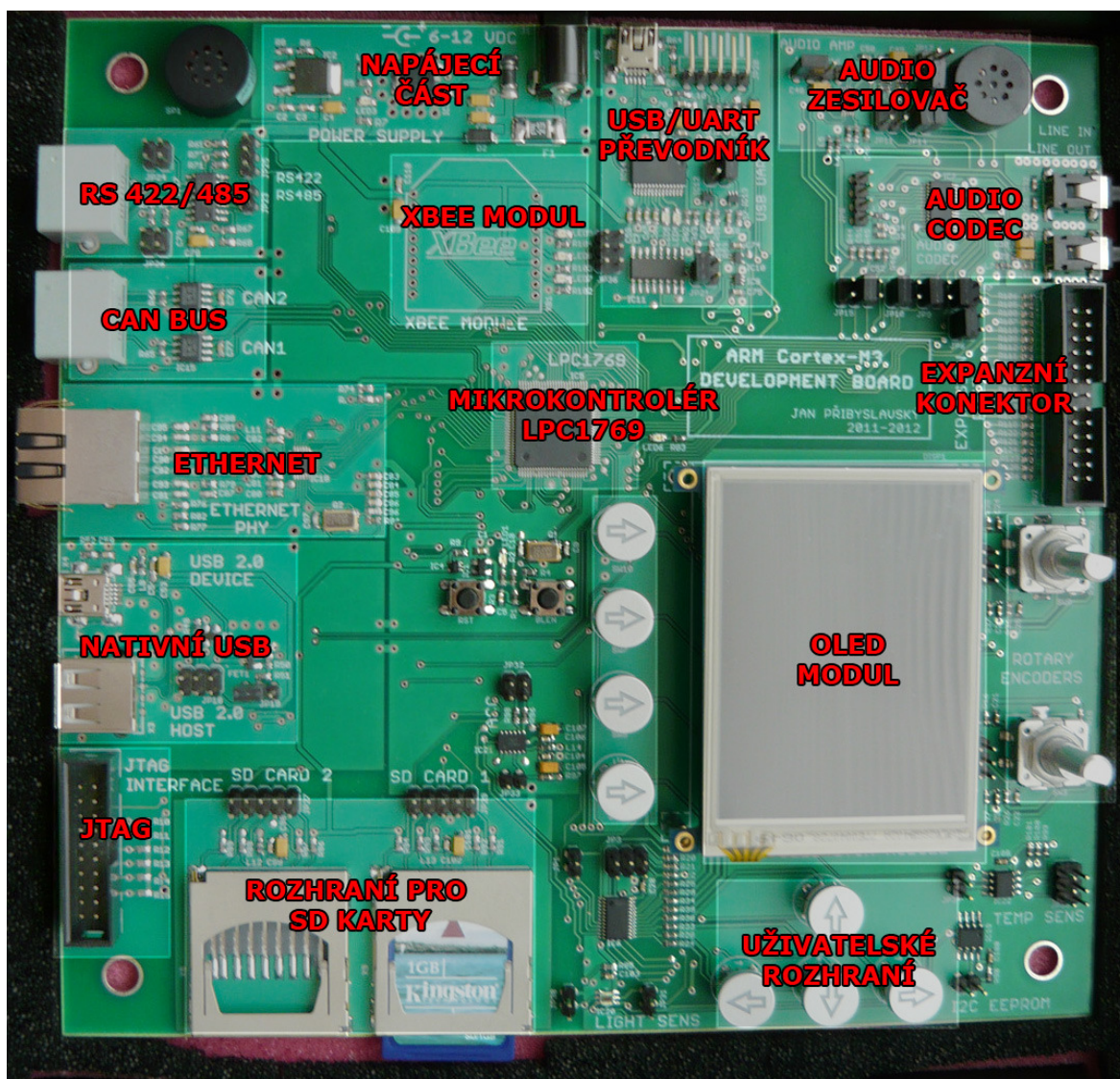


Obrázek 9 – blokové schéma desky CM3board

3.3 Popis zapojení desky CM3board

Schéma desky CM3board bylo nakresleno v aplikaci EAGLE a bylo rozděleno na 11 listů, kde každý zaujímá samostatný funkční celek. Pro přehlednost uvádím fotografii desky, kde jsou tyto části vyznačené.

Při výběru konkrétních typů součástek bylo čerpáno převážně z praktických zkušeností autora, aplikačních poznámek a datasheetů od výrobců. U integrovaných obvodů a některých pasivních prvků jsou uvedeny odkazy na tyto dokumenty, avšak u zbytku součástek, jejichž parametry nejsou příliš kritické a které jsou snadno nahraditelné za podobný typ (většina kondenzátorů a rezistorů) jsou vynechány.



3.3.1 Napájení a systémová část

Na desce CM3board jsou rozvedeny celkem 2 hlavní napájecí větve: 3.3V, 5V, a je možné ji napájet dvěma způsoby. Napájecím adaptérem přes konektor J1 nebo rozhraním USB na konektorech X4 a X5. Přítomnost napětí na pětivoltové napájecí větvi je indikováno zelenou LED2. V případě 3,3V větve je to žlutá LED3.

Za konektorem J1 je v sérii zařazená resetovatelná pojistka PTC (F1) s vypínacím proudem 1.5A. Obvod je zde rovněž chráněn usměrňovací diodou D1 proti přepólování a diodou TVS (transilem) D2 proti přepětovým špičkám. Stabilizátor IC3 (23) je zapojen za tímto ochranným obvodem a jeho výstupem je již pětivoltová napájecí větev. Aby byl tento obvod schopen vyrobit stabilních 5V, je nutné přivést na konektor J1 napětí zvýšené o úbytek na stabilizátoru (2V) a diodě D1 (1,1V), minimálně tedy 8,1V. Nominální napájecí napětí pro tento způsob uvádím 9V.

V případě napájení přes USB proudová ani přepětová ochrana zařazena není. Ve specifikaci USB je přesně stanoveno zapojení konektoru, stejně tak i maximální proud, jaký může host poskytnout, proto bylo v zájmu zjednodušení rozhodnuto o vynechání daných ochran. Napájení z USB je s pětivoltovou napájecí větví propojeno přes LC filtr, který omezuje zvlnění a vyhlazuje drobné výkyvy v napájení. V případě konektoru X4 je tento filtr tvořen kondenzátory C53, C54, C55 a tlumivkou L8, která je speciálním typem určeným právě pro aplikace v EMI filtrech. Komponenty C62, C63, C70 a L10 jsou potom obdobou tohoto filtru u konektoru X5.

O napájecí větev 3,3V se v obou případech stará stabilizátor IC2 (24). Jedná se o nastavitelný typ, jehož výstupní napětí je na danou hodnotu zafixováno rezistory R6 a R8.

Oddělovací kondenzátory

Jedná se o hojně využívaný způsob, jak potlačit nežádoucí vlivy, kterými na sebe skrze napájecí větve mohou působit jednotlivé části obvodu. Oddělovací kondenzátor je zpravidla umístěn co nejblíže napájecímu pinu součástky a tak přispívá k filtraci jakékoliv drobné změny na napájení, které tato součástka může generovat. V případě mikrokontroléru LPC1769 jsou k tomuto účelu využity kondenzátory C11-C19. Problematikou se detailněji zabývá např. aplikační poznámka od firmy Cypress Semiconductor (25).

Omezení vzájemných nežádoucích vlivů však není jen výsadou těchto kondenzátorů. Záleží na mnoha faktorech, mimo jiné i na kvalitním návrhu plošného spoje.

Generování reset signálu

Obvod LPC1769 disponuje funkcí POR (power-on reset), která zajistí reset obvodu při přivedení napětí na napájecí piny. Rovněž je k dispozici funkce Brownout detection, která zajistí generování reset signálu, případně obyčejného přerušení, v případě, že napájecí napětí poklesne pod kriticky nízkou úroveň.

Aby bylo možné generovat reset signál pro celou desku, který by využívalo více obvodů současně a mohl by být sledován či generován přímo uživatelem, byly výše uvedené funkce implementovány i externě pomocí IC1 (26). Tlačítkem RST je tedy možné systém kdykoliv uvést do resetu. Tento stav je indikován rozsvícením LED1.

Aktivace výrobního bootloaderu

Pokud je reset signál aktivní a dojde současně k aktivaci signálu BL_EN pomocí tlačítka BLEN, bude po ukončení resetu uveden mikrokontrolér do režimu výrobního bootloaderu.

Rozhraní JTAG

Rozhraní JTAG je vyvedeno na dvacetipinový konektor SV1. Příslušné signály jsou opatřeny pull-up rezistory R10-R15. Mikrokontrolér LPC1769 má pro tyto signály dedikované piny, které nemohou být využívány pro žádnou jinou funkci.

Zdroj hodinového signálu

Pro generování hodinového signálu využívá LPC1769 krystal Q1 o frekvenci 12MHz s příslušnými zátěžovými kondenzátory C9 a C10. Tento signál je dále násoben vnitřním obvodem PLL na potřebnou taktovací frekvenci jádra. Krystal pro obvod reálného času není zastoupen.

3.3.2 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní zahrnuje obvody, které umožňují uživateli interakce se zbytkem hardwaru. V případě desky CM3board to jsou dva rotační enkodéry, 8 podsvícených tlačítek s I2C expandérem a modul barevného OLED displeje. Poslední zmiňované komponentě se detailněji věnuju v kapitole 3.4.1.

Rotační enkodéry

Rotační enkodér je mechanická součástka, která generuje digitální impulsy na základě otáčení její osou. Jelikož jsou výstupní signály dva a mají vůči sobě fázový posun 90 stupňů, můžeme určit i směr, jakým je osou otáčeno. Právě díky této vlastnosti se daný typ označuje také jako kvadrurní enkodér. Tato součástka může v mnoha aplikacích nahradit potenciometr nebo otočný přepínač. Na desce CM3board jsou zastoupeny jako SW3 a SW8. Oba enkodéry disponují i spínačem, který se aktivuje při kolmém tlaku na jejich osu. Výstupy enkoderů jsou zapojeny přímo na paralelní piny obvodu LPC1769 a pro jejich obsluhu není využíváno žádné speciální rozhraní. Jako jednoduchý filtr proti zákmitům jsou ke kvadrurním výstupům QA1/2 a QB1/2 připojeny kondenzátory C22 a C23, resp. C25 a C26. Funkci pull-up rezistorů zde zastávají R16, R17 a R18, resp. R30, R31 a R32.

Podsvícená tlačítka a I2C expandér

16-bitový I2C expandér IC6 (27) je zde využitý jak pro snímání stavů tlačítek, tak pro řízení LED diod, které tvoří jejich podsvícení. Obvod má své paralelní rozhraní rozdělené do dvou 8-bitových portů, kde každý z nich realizuje právě jednu z těchto funkcí. Navíc disponuje výstupem pro generování přerušení. Ten může být využit v případě, že na nějakém z tlačítek dojde ke změně stavu. S mikrokontrolérem je dále propojen přes standardní sběrnici I2C. Jumper JP3 slouží k nastavení adresy, pod kterou je možné expandér na sběrnici oslovovat.

Všechna tlačítka i jejich LED diody mohou být uživatelem naprogramována k libovolné funkci, avšak primárně jsou SW1, SW4, SW6 a SW9 určena k navigaci a SW2, SW5, SW7 a SW10 slouží pro výběr položek na displeji.

3.3.3 Nativní rozhraní USB

Nativním rozhraním USB je zde rozuměno to, které je přímo integrovanou součástí mikrokontroléru včetně všech registrů potřebných pro jeho funkci. LPC1769 má rovněž integrovány obvody pro fyzickou vrstvu a je tedy prakticky možné vyvést z příslušných pinů diferenciální USB signály rovnou na konektor. Tyto signály jsou sdíleny pro režimy Device i Host, mezi kterými je možné přepínat pomocí speciálních pull-up/pull-down rezistorů, ale především softwarovým nastavením příslušných registrů.

Pomocí jumperu JP18 je možné přes rezistory R47 a R48 nastavit na USB signálech D+ a D- logickou nulu. Tímto je indikováno, že se USB bude využívat v režimu Host. Jumper JP18 rovněž umožňuje přivedení 5V napájecího napětí na USB Host konektor X3. Režim Device je potom aktivován přivedením logické 1 na signál D+ přes rezistor R49. Tento rezistor může být připojován a odpojován pomocí tranzistoru FET1. Jumper JP19 potom určuje, zdali je řídicím signálem tohoto tranzistoru signál USB_CONNECT z mikrokontroléru a nebo je připojen na zem a tím je jeho stav pevně daný.

Stínění konektoru X4 pro režim Device je sériově spojeno kondenzátorem C58 se zemí. Tím je umožněno uzemnění rušivých signálů, ale současně je zabráněno průchodu stejnosměrného proudu, což by v případě rozdílných potenciálů mezi zemí desky a kostrou cílového zařízení mohlo způsobit značné problémy. Samotná zem však od USB konektoru galvanicky oddělená není, což je nutné zohlednit. Napájecí napětí z tohoto konektoru, stejně tak i signály D+ a D- jsou opatřeny ochranným obvodem proti přepětí, především elektrostatickým výbojům. Kondenzátory C56 a C57 dále slouží pro kapacitní přizpůsobení diferenciální linky D+ a D-.

3.3.4 Rozhraní USB s obvodem FTDI

I když to není zrovna případ LPC1769, ne všechny mikrokontroléry disponují nativním rozhraním USB. Je však pravděpodobné, že většina těchto obvodů bude mít k dispozici alespoň obyčejnou asynchronní sériovou linku realizovanou obvodem UART. Pokud chceme pomocí tohoto rozhraní komunikovat např. s osobním počítačem, budeme potřebovat obvod, který nám přizpůsobí napěťové úrovně naší sériové linky vůči RS232 rozhraní, které jsou osobními počítači využívány. Pro tuto funkci je asi nejznámějším zástupcem integrovaný obvod MAX232. Ten používá k překonání rozdílných napěťových úrovní kapacitní nábojové pumpy.

Problémem dnešních moderních PC je fakt, že již fyzickými sériovými porty RS232 často nedisponují. Z hlediska využití širokou veřejností je to logické, jelikož toto rozhraní bylo téměř vytlačeno uživatelsky mnohem komfortnějším rozhraním USB. V průmyslové praxi se však s rozhraním RS232 stále setkáváme poměrně často. Je to mimo jiné i díky jeho jednoduchosti z pohledu hardwarové i softwarové implementace. Pokud tedy chceme s dnešním PC komunikovat přes RS232, zpravidla jej musíme vybavit přídatným hardwarem, který nám toto rozhraní fyzicky zpřístupní. Dobrou alternativou však je využití virtuálního sériového portu přes rozhraní USB. Tato metoda je hojně využívána u nejrůznějších měřicích a vývojových nástrojů. Ty se z hlediska uživatele tváří jako USB zařízení, avšak z hlediska PC aplikace a mikrokontroléru je USB zcela transparentní a komunikace probíhá přes standardní sériovou linku.

Na straně mikrokontroléru je tato funkce často implementována softwarově pomocí nativního USB rozhraní, které využívá třídu CDC a nebo hardwarově speciálním převodníkem. Tento obvod prakticky tvoří most mezi rozhraním USB a UART. Na desce CM3board je zastoupen jako IC14 pod označením FT232RL (28). Jeho USB rozhraní je vyvedeno na konektor X5, který je opatřen stejným balastem, jak konektor X4 v případě nativního USB. IC14 je dále vybaven oddělovacími kondenzátory C64, C65 a C66. Reset tohoto obvodu není spojený s hlavním reset signálem celé desky a je tedy možné, aby byl aktivní i v případě, že je deska v resetu. Tohoto se využívá např. při programování obvodu LPC1769, či displeje, přes USB.

Mohlo by se zdát, že využití tohoto obvodu je zbytečné, když vlastně mikrokontrolér LPC1769 umí USB nativně. Bylo však několik důvodů, proč byl tento obvod na desku začleněn.

- Aby bylo nativní USB rozhraní obvodu LPC1769 plně využitelné, je třeba zahrnout poměrně rozsáhle softwarové knihovny (tzv. USB stack), které zabírají nezanedbatelné množství paměti programu. V případě externího převodníku USB/UART může být USB přístupné jen pomocí UARTu, což je z hlediska softwarové implementace výrazně jednodušší.
- Externí převodník USB/UART umožňuje přímo z USB přístup do výrobního bootloaderu přes UART0. Je tedy možné i úplně prázdný obvod LPC1769 naprogramovat přes USB.
- Z důvodu absence RS232 portů na dnešních PC by bylo nutné použít externí převodník USB/UART, pokud by deska měla fyzicky vyvedené pouze porty RS232. I ty by však vyžadovaly obvody pro přizpůsobení napětíových úrovní mezi UART a RS232. Použití převodníku USB/UART přímo na desce oba tyto problémy řeší.
- Vzhledem k tomu, že modul OLED displeje rovněž používá převodník USB/UART, který však není jeho součástí a musí být připojen externě, nabízí se zde možnost, jak opět vyřešit další problém, aniž by se muselo přidávat něco navíc. Obvod IC14 tedy může posloužit i potřebám OLED displeje.

K integraci všech výše uvedených funkcí je potřeba převodník IC14 vybavit ještě několika pomocnými komponenty. Aby bylo možné využívat některé funkce současně (např. komunikace mikrokontroléru s displejem za současné komunikace přes USB) byl obvod IC14 připojen k mikrokontroléru na jeho rozhraní UART0 a UART1, mezi kterými je možné přepínat pomocí analogového multiplexeru IC11 (29). Analogový multiplexer zde plní v podstatě funkci obousměrného, elektronicky řízeného přepínače. Pomocí JP21 je možné nastavovat, zdali budou signály TX_FTDI a RX_FTDI připojeny na UART0 nebo UART1. Zpravidla mohou nastat tyto stavy:

- IC14 je připojen na UART0 - přes USB je možné programovat MCU, případně komunikovat přes virtuální sériový port. Displej komunikuje s MCU přes UART1 a nebo může být programován pomocí externího adaptéru, který je připojen na JP20.
- IC14 je připojen na UART1 - displej lze naprogramovat přes USB, UART0 je v tomto režimu nedostupný.

3.3.5 Rozhraní CAN Bus

Implementace CAN bus je na desce CM3board relativně jednoduchá, jelikož MCU dokáže většinu funkcí spojených s tímto rozhraním provádět interně pomocí dedikované periferie. Jediné, co je potřeba externě přidat, je fyzická vrstva. Ta je tvořena obvody IC15 a IC16 (30), které zpravidla převádí TTL signály CAN1/2_RX a CAN1/2_TX na signály diferenciální. Ty jsou opatřeny ukončovacími rezistory R65 a R66 a jsou vyvedeny přímo na konektor X6. Na desce CM3board je CAN bus implementován ve dvou nezávislých kanálech, kde každý může komunikovat rychlostí až 1Mbd.

3.3.6 Rozhraní RS422 a RS485

Obě rozhraní RS422 i RS485 jsou průmyslovým standardem, který rozšiřuje rozhraní RS232 pro průmyslové prostředí. V obou případech se jedná o převedení klasických signálů RS232 na signály diferenciální. Tím se výrazně zvýší robustnost komunikace, rychlost datového přenosu a maximální možná délka kabelu, která v případě těchto rozhraní může činit až 1200m. Hlavními rozdíly zmiňovaných rozhraní je to, že RS422 slouží k propojení pouze dvou komunikačních bodů (point-to-point) a RS485 může tvořit složitější topologii, kde je na jedné lince zařízení více (multipoint). Více se touto problematikou zabývá např. článek na HW-server.com (31).

Obě tato rozhraní jsou hardwarově implementována pomocí jediného obvodu IC17 (32). V jednom okamžiku však může být využíváno pouze jedno z nich. Obvod IC17 je zpravidla navržen primárně pro režim RS485 a v případě jeho využití jako RS422 jde prakticky o to samé, jen v point-to-point topologii. Diferenciální signály jsou vybaveny ukončovacími rezistory R70 a R73, které je možné pomocí JP24 a JP26 odpojovat. Pomocí stejných jumperů je rovněž možno konfigurovat zařízení pro používání jednoho nebo obou diferenciálních párů. Tyto jsou potom vyvedeny na konektor X7.

Z hlediska MCU je obvod IC17 řízen prostřednictvím UART2. Pomocí signálů RX_EN a TX_EN je možné zapínat či vypínat funkci diferenciálního přijímače, resp. vysílače v režimu full-duplex. Při vhodné konfiguraci JP23 a JP25 je možné oba tyto obvody řídit jen signálem RX_EN, avšak pouze pro režim half-duplex.

3.3.7 Rozhraní Ethernet

Rozhraní RMII

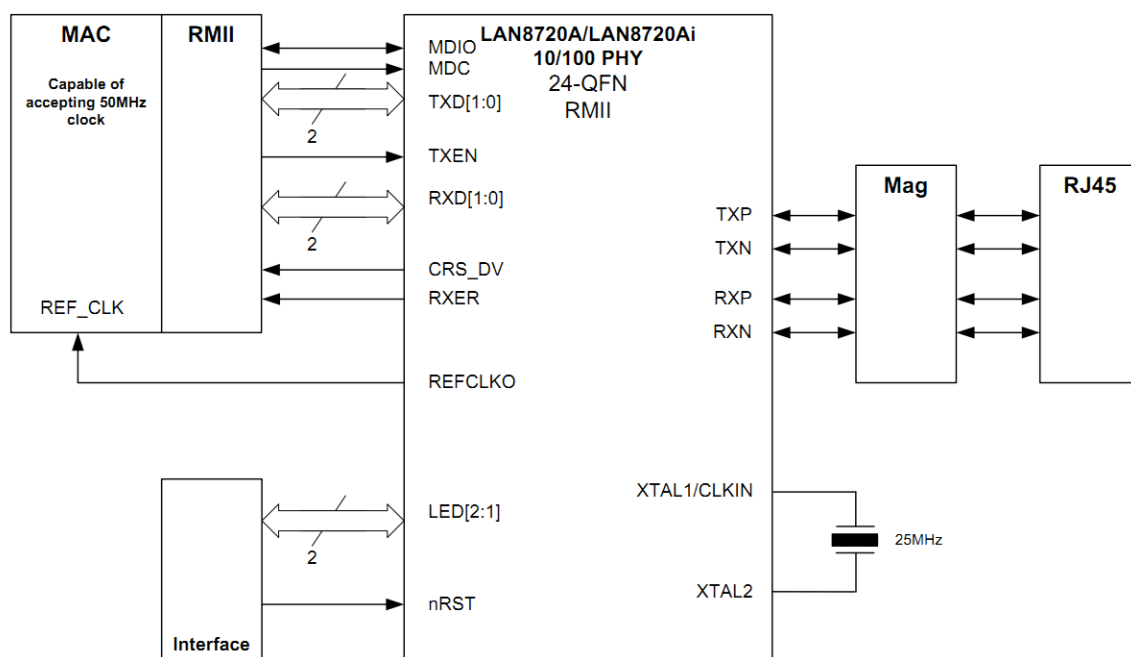
Obvod LPC1769 nedisponuje implementací fyzické vrstvy pro Ethernet, tak jako v případě nativního USB. Ten je zde vyveden rozhraním RMII (33), které je redukovanou (využívá menší počet signálových vodičů) verzí rozhraní MII (z angl. Media Independent Interface). Jedná se o rozhraní, které bylo vyvinuté právě za účelem oddělení samotného MAC zařízení od fyzické vrstvy (obvodu PHY) a to se tak na ní stává zcela nezávislé. K MCU je tedy možné připojit fyzickou vrstvu využívající libovolné médium (metalický kabel, optický kabel, bezdrátová komunikace), aniž by to mělo pro samotný MCU větší význam. Na desce CM3board je jako médium pro rozhraní Ethernet využíván klasický metalický kabel. Rozhraní RMII je de-fakto paralelním rozhraním, využívajících klasických TTL úrovní. Datová sběrnice má šířku pouze dva bity a je oddělená pro vysílání a příjem dat. Celé RMII rozhraní sestává z těchto signálů:

- REF_CLK - referenční hodinový signál, který je generován MAC zařízením (v tomto případě periferií MCU) a přijímán obvodem PHY. Dle specifikace RMII rozhraní je frekvence tohoto signálu 50MHz (33).
- CRS_DV - platnost dat při detekci nosné frekvence. Tento signál je nastaven obvodem PHY a indikuje, že tento obvod detekoval nosnou frekvenci a přijímá platná data.
- RXD0 a RXD1 - dvoubitová sběrnice určená pro příjem dat. Směr toku z PHY do MAC. Synchronní se signálem REF_CLK. Data jsou platná pouze v případě aktivního signálu CRS_DV.
- TX_EN - signál generovaný MAC zařízením, který indikuje, že toto zařízení posílá data.
- TXD0 a TXD1 - dvoubitová sběrnice pro odesílání dat. Směr toku z MAC do PHY. Pouze pokud je aktivní signál TX_EN. Synchronní s REF_CLK.
- RX_ER - signál, kterým obvod PHY dává najevo, že detekoval chybu v přijatých datech, která jsou právě prezentována na signálech RXD0/1.

Fyzická vrstva

Fyzická vrstva Ethernetu je na CM3board implementovaná obvodem IC18 (34), který slouží jako most mezi rozhraním RMII a diferenciálními signály sběrnice Ethernet. Obvod je taktován vlastním krystalem Q2 o frekvenci 25MHz a napájení má odděleno LC filtrem tvořeným tlumivkou L11, kondenzátorem C80, C81 a C82. Jeho další napájecí piny jsou rovněž opatřeny oddělovacími kondenzátory C83, C84, C85 a C86. Mezi tímto obvodem a síťovým konektorem RJ45 je nutné zařadit obvod, který zprostředkuje mimo jiné i galvanické oddělení signálové cesty (35). Tato funkce bývá často realizována impulsním transformátorem. V případě desky CM3board je však již tato komponenta zabudována ve speciálním stíněném konektoru RJ45 určeném pro Ethernet aplikace.

Na obrázku níže uvádím obecné blokové schéma propojení MAC zařízení s obvodem PHY.



Obrázek 10 - propojení MAC zařízení s obvodem PHY, zdroj (34)

3.3.8 Datová úložiště

Bývá zvykem, že některé mikrokontroléry disponují energeticky nezávislou pamětí pro uchovávání nejruznějších informací po dobu, kdy je zařízení odpojeno od napájecího napětí. Většinou se jedná o nevelké paměti, nejčastěji typu EEPROM, Flash či FRAM. Obvod LPC1769 touto pamětí vybaven není a je tedy nutné poskytnout ji externě. Za určitých podmínek by pro tento účel mohla posloužit jeho paměť programu, avšak v případě potřeby uložení většího objemu dat by toto řešení nebylo reálné.

Deska CM3board má k dispozici externí paměť typu EEPROM o velikosti 8kB na sběrnici I2C. Jedná se o obvod IC19 (36), jehož adresa na sběrnici může být nastavena jumperem JP28. Tato paměť může posloužit pro uchovávání informací o nevelkém objemu dat. Jedná se zejména o uživatelské konfigurace zařízení, logování chyb a událostí či naměřených hodnot z nějaké periferie.

Potřebujeme-li větší datové úložiště, které by dokázalo uchovávat zvukové či obrazové soubory, rozsáhlé či dlouhodobé záznamy, případně nové verze firmware pro samotný MCU, nabízí nám deska CM3board dva sloty pro SD či MMC kartu X8 a X9. Tyto karty jsou na sobě nezávislé a každá komunikuje po samostatné sběrnici SPI s možností využití DMA kanálu. Napájení slotů je odděleno LC filtry L12, C98 a C99, resp. L13, C101 a C102. Oba jsou od MCU odpojitelné přes jumpéry JP27 a JP29. Pro případ, že jsou karty vloženy v odpojených slotech, jsou na jejich datových signálech připojeny pull-up rezistory R86, R87, R88 a R89 resp. R91, R92, R93 a R94, aby byly jejich logické úrovně pevně definované.

Hardwarově není pevně definované, který typ paměťové karty je podporován. Jelikož karty MMC, SD, SDHC i nové SDXC jsou hardwarově kompatibilní, je pouze záležitostí softwaru, jaký typ karty bude zařízení podporovat. Teoretické maximum kapacity je u karet typu SDXC až 2TB.

3.3.9 Senzory neelektrických veličin

Pro potřeby měření některých neelektrických veličin je deska CM3board vybavená příslušnými senzory. Vzhledem k zaměření desky na multimediální aplikace byly vybrány senzory těch veličin, které jsou v těchto případech často měřeny, zejména na přenosných zařízeních. Na desce tedy nalezneme senzor teploty, senzor okolního světla a tříosý akcelerometr. Všechny tyto obvody využívají společné sběrnice I2C, která je dále sdílena i s expandérem pro podsvícená tlačítka.

Měření teploty

Teplotní senzor je zde zastoupen obvodem IC22 (37), který je vybaven oddělovacím kondenzátorem C108 a jeho adresa na sběrnici I2C může být nastavena pomocí JP35. Obvod měří teplotu v rozsahu -55 až $+125^{\circ}\text{C}$ a kromě kontinuálního měření může fungovat i jako termostat. Pokud teplota překročí předem naprogramovanou mez, obvod generuje přerušení na signálu TSINT. Tento signál je z hlediska MCU připojen na obyčejný vstupní pin a nemůže tedy opravdové přerušení vyvolat. V případě využití tohoto signálu je tedy nutné jeho stav sledovat softwarem. Volitelně může být signál odpojen prostřednictvím JP34.

Měření okolního osvětlení

Pro potřeby dynamického řízení jasu displeje a podsvícení tlačítek, či další funkce spojené se světlem, je na desce CM3board umístěn senzor okolního světla IC20 (38). Podobně jako teplotní senzor má i tento obvod oddělovací kondenzátor C103 a jumper pro nastavení I2C adresy JP30. Rovněž je vybaven výstupem pro generování přerušení v případě, že hladina okolního světla překročí předem naprogramovanou mez. Obvod má vnitřní filtr pro rejekci blikání na frekvencích 50 a 60Hz, které je častým fenoménem u umělých zdrojů světla. Světlo je snímáno dvěma interními fotodiodami, kde jedna zaujímá pouze infračervené spektrum a druhá infračervené i viditelné. S využitím těchto dvou komponent je potom citlivost senzoru optimalizována tak, aby co nejvěrněji napodobovala citlivost lidského oka.

Měření zrychlení

Zařízení, které využívá funkce jako detekce vibrací, volného pádu, poklepu (např. na displej), změny polohy, či mechanického šoku, bude pravděpodobně k jejich realizaci využívat akcelerometr. Na desce CM3board je tato komponenta zastoupena jako IC21 (39). Tento obvod má zvlášť analogové a digitální napájení. Analogové je zde odděleno LC filtrem tvořeným tlumivkou L14 a kondenzátory C104 a C105. Digitální napájení je pak opatřeno oddělovacími kondenzátory C106 a C107. I zde je přítomen jumper pro nastavení I2C adresy JP33.

Obvod IC21 umožňuje měření zrychlení ve třech osách a třech nastavitelných rozsazích $\pm 2g$, $\pm 4g$ a $\pm 8g$ s rozlišením 8 bitů pro každý rozsah. Stejně jako u předchozích dvou snímačů, i tento obvod dokáže generovat přerušení. Tentokrát ve dvou samostatných signálech AMINT1 a AMINT2, které jsou odpojitelné pomocí jumperu JP32.

3.3.10 Expanzní port

Expanzní port byl na desku CM3board umístěn za účelem vyvedení nejdůležitějších signálů a aby umožnil připojení externího uživatelského hardwaru. Z hlediska zaměření desky na multimediální aplikace byly na expanzním portu vyvedeny všechny signály sběrnice I2S pro možnost připojení externího audio obvodu, signály pro sériovou komunikaci s displejem, signály pro řízení integrovaného zvukového zesilovače na desce CM3board, rovněž signál reset a signály z rotačních enkodérů, které zde slouží jako GPIO. Pro tento účel může kromě resetu sloužit kterýkoliv z výše uvedených signálů, pokud se nebude jeho primární funkce využívat. Signály nejsou zavedeny přímo na piny procesoru, ale každý z nich má v sérii zapojený rezistor 270R, který slouží jako ochrana proti proudovému přetížení.

3.4 Multimediální prvky

3.4.1 Barevný AMOLED displej

Modul OLED displeje je ve schématu umístěn v sekci uživatelského rozhraní, avšak zde mu věnuji samostatnou kapitolu, jelikož se jedná o jeden z klíčových prvků desky CM3board.

Tento výrobek australské společnosti 4D systems (40) (na schématu jako DISP1) je zapouzdřeným celkem, který se může chovat zcela autonomně. Modul je tvořen samotným OLED panelem, inteligentním řadičem, pomocnými obvody, jako je např. zdroj napájení a slotem pro uSD kartu pro ukládání bitmap a animovaných sekvencí. S okolím může komunikovat pomocí TTL signálů RX a TX, podobně jako UART. Tento způsob komunikace je na CM3board upřednostňován a z MCU LPC1769 je mu primárně vyhrazen UART1. Modul může pracovat ve dvou režimech. V prvním z nich se chová jako sériový slave a vykonává příkazy, které jsou mu posílány. Ty mohou zahrnovat např. zobrazování textu či bitmap, mazání obrazovky nebo kreslení vektorové grafiky. Druhý režim umožňuje modulu pracovat zcela autonomně, kdy je přímo na jeho řadiči spuštěn program napsaný ve scriptovacím jazyce 4DGL (41). I zde je samozřejmě sériová komunikace možná. Více se o programování tohoto modulu zabývám v kapitole 4.4.

Modul OLED displeje rovněž disponuje rezistivní dotykovou plochou a příslušnými obvody pro její čtení a kalibraci. Z pohledu vývojáře je tedy možné s dotykovou plochou pracovat jako se vstupním zařízením, které přímo poskytuje souřadnice ve dvou osách.

Deska CM3board byla navržena pro konkrétní typ OLED modulu uOLED-32028-PMD3, který však byl společností 4D systems vyřazen z výroby a nahrazen novějším typem, který není pinově kompatibilní. Na desce tedy stále používám starší typ, i když už není výrobcem plně podporován.

3.4.2 Stereo audio CODEC

Audio CODEC je obvod, který umožňuje zařízení využívat zvukové funkce. Zpravidla v sobě zapouzdřuje dílčí komponenty jako AD převodník, DA převodník, zesilovače a další pomocné obvody. Tvoří tedy rozhraní mezi digitální a analogovou zvukovou částí zařízení s tím, že informace mohou proudit v obou směrech.

Pro desku CM3board byl vybrán obvod od firmy Texas Instruments TLV320AIC23B a je zastoupen jako IC7 (42). Jedná se o smíšený digitálně-analogový obvod, který má oddělenou digitální a analogovou zem. Napájení je rovněž takto rozděleno. Pro digitální část jsou napájecí piny opatřeny oddělovacími kondenzátory C41 - C44, pro analogovou C35 - C38. Analogové napájení je navíc odděleno LC filtrem L2, C39 a C40.

Obvod v sobě integruje tyto funkční bloky:

- Dvoukanálový sigma-delta DA převodník
- Dvoukanálový sigma-delta AD převodník
- Výstupní zesilovač pro přímé připojení sluchátek
- Vstupní obvody pro přímé připojení elektretového mikrofону
- Digitální rozhraní pro přenos zvuku
- Digitální rozhraní pro řízení funkcí obvodu
- Oscilátor a časování

AD a DA převodníky

Tyto obvody jsou nezbytnou součástí pro vytvoření zvukového rozhraní. V IC7 jsou integrovány celkem 4 (dva kanály pro vstup, dva pro výstup), všechny využívají sigma-delta modulaci a pracují až do vzorkovací frekvence 96kHz. Bitová hloubka všech převodníků je až 24 bitů.

Sluchátkový zesilovač

Sluchátkový zesilovač je uzpůsoben k buzení sluchátek o impedanci 16 nebo 32 ohmů. Je vybaven obvody pro ovládání hlasitosti, případně úplného umlčení (funkce mute) a rovněž dokáže potlačovat nežádoucí zvukové efekty, jako je praskání či klepání, při aplikaci

těchto funkcí. Zesilovač poskytuje na každém kanálu výkon až 40mW při použití 16 ohm sluchátek. Při výkonu 10mW vykazuje celkové harmonické zkreslení (THD) 0,1%. (42)

Na desce CM3board je sluchátkový zesilovač vyveden na výstupní konektor X1 přes oddělovací kondenzátory C29 a C30, které slouží k potlačení stejnosměrné složky signálu.

Mikrofonní vstup

Stejně jako sluchátkový zesilovač, má i mikrofonní vstup nastavitelnou hlasitost a funkci umlčení. Signál z mikrofonu je zesilován ve dvou krocích. První z nich je operační zesilovač na vstupu MICIN, který má nastavitelný zisk pomocí externího odporu připojeného do série s tímto vstupem. V případě nezapojení tohoto rezistoru je zisk nastaven na hodnotu 5. Druhý stupeň zesilování je nastavitelný digitálně a poskytuje zisk 0 nebo 20 dB. Více o nastavení zesílení je uvedeno v datasheetu obvodu (42).

Mikrofonní vstup využívá stejný AD převodník, jako jeden vstupní kanál zvukového vstupu, proto není možné tyto funkce používat současně. Je však možné signál z mikrofonu mixovat s výstupním signálem z DA převodníků.

Na desce CM3board je mikrofon připojen na konektor JP8. Jedná se však pouze o běžnou lámací lištu, na které je kromě mikrofonního vstupu a analogové země vyvedeno i napětí pro biasování elektretového mikrofonu (signál MICBIAS na obvodu IC7) a napájení 3,3V, které je dále odděleno LC filtrem L1, C33 a C34.

Digitální přenos zvuku

Obvod IC7 podporuje celkem 4 režimy pro digitální přenos zvuku. Ty jsou:

- Right-justified - bity jsou v rámci jednoho datového slova zarovnány vpravo
- Left-justified - bity jsou v rámci jednoho datového slova zarovnány vlevo
- DSP - speciální režim pro komunikaci s DSP obvody od firmy Texas Instruments
- I2S - sběrnice pro přenos digitálního zvuku vyvinutá společností NXP

O těchto režimech je možné dozvědět se více v datasheetu obvodu IC7 (42). Deska CM3board se zaměřuje především na přenos zvuku přes I2S.

Řízení funkcí obvodu

Obvod IC7 je možné ovládat pomocí zápisu či čtení do příslušných registrů. Komunikace s těmito registry může probíhat přes sběrnici I2C nebo SPI. Jelikož jsou na desce CM3board již obě sběrnice SPI zabrány na vysokorychlostní komunikaci s SD kartami, bylo rozumné využít k řízení obvodu IC7 právě sběrnici I2C, která je již sdílena s dalšími obvody, které pro svou komunikaci využívají rychlostí pomalejších. Mapu registrů, jimiž IC7 disponuje, uvádím níže.

ADDRESS	REGISTER
0000000	Left line input channel volume control
0000001	Right line input channel volume control
0000010	Left channel headphone volume control
0000011	Right channel headphone volume control
0000100	Analog audio path control
0000101	Digital audio path control
0000110	Power down control
0000111	Digital audio interface format
0001000	Sample rate control
0001001	Digital interface activation
0001111	Reset register

Obrázek 11 - mapa registrů obvodu TLV320AIC23B, zdroj (42)

3.4.3 Zesilovač a akustické měniče pro hlasitou reprodukci zvuku

Pro možnost hlasitého odposlechu je deska CM3board vybavena dvěma akustickými měniči a stereo zesilovačem, který je zastoupen jako IC8 (43). Tento obvod byl navržen pro použití v přenosných zařízeních a klade tedy důraz na nízkou spotřebu a vysokou efektivitu. Je tvořen dvěma operačními zesilovači a dokáže poskytnout výkon 2x 105mW při použití 16 ohmových reproduktorů a napájecím napětí 5V. Jelikož je na desce CM3board napájen pouze 3,3V, poskytuje maximální výkon pouze 40mW pro každý kanál. I tak se však jedná o dostatečnou hodnotu, jelikož zabudované reproduktory SP1 a SP2 mají poskytovat pouze základní a orientační odposlech.

Napájení obvodu je odděleno LC filtrem L3, L4 a C46. Obvod má rovněž samostatnou analogovou zem. Reproduktory jsou k jeho výstupům připojeny sériově přes kondenzátory C48 a C49, které zde slouží k potlačení stejnosměrné složky. Reproduktory mohou být rovněž odpojeny pomocí jumperů JP12 a JP13. Obvod může být digitálně řízen

pomocí tří signálů, se kterými MCU nakládá jako s GPIO piny. Signál SPSHTDN umožňuje vypnutí zesilovače, zatímco signály SPCLK a SPUPDN slouží k ovládání hlasitosti. Všechny tyto signály jsou řízeny pomocí jednoduchých impulzů a nevyužívají žádné speciální rozhraní.

3.5 Návrh a realizace plošného spoje

Po dokončení návrhu schématu mohl být navržen i plošný spoj (PCB). Jedná se o krok zcela nezbytný a pro celý projekt klíčový. Dobrý návrh PCB je základem spolehlivě funkčního zařízení a často se může stát, že chyby způsobené při jeho návrhu se promítnou až mnohem později, kdy je velmi obtížné, ne-li nemožné, je odstranit. V průmyslové praxi je tento problém vyřešen výrobou malých prototypových sérií, na kterých se všechny hardwarové chyby odladí, a teprve potom se spustí výroba sérií větších. Pokud se i přesto, např. po delší době, začne objevovat nějaký problém, provedou se kroky nezbytné pro jeho odstranění a v krajním případě je vydána nová revize plošného spoje.

V případě desky CM3board však tato možnost nebyla, jelikož v době psaní této práce byl kompletně vyroben jen jeden jediný kus. Vzhledem k velikosti a složitosti desky a rovněž i vzhledem ke kompromisům, ke kterým muselo být přistoupeno v zájmu volby vhodné výrobní technologie, optimalizace pro výrobu a ceny, se jednalo o poměrně velkou výzvu.

3.5.1 Volba vhodné výrobní technologie

Jednou z prvních věcí, kterou je nutné před samotným kreslením desky určit, je výrobní technologie. Z pohledu vývojáře je to souhrn pravidel, podle kterých se při návrhu desky bude řídit. Z pohledu výroby je to potom specifikace a způsob, jakým se deska bude vyrábět. Existuje nepřeberné množství způsobů a variant, jak desku vyrobit. Ze všech faktorů jsou vždy nejvíce rozhodující dva - minimální požadavky samotného obvodu a cena jeho výroby.

Požadavky na plošný spoj

Bývá nepříjemným pravidlem, že s rostoucími požadavky na plošný spoj roste i cena výroby a v praxi je často nutné přistoupit k mnoha kompromisům za účelem jejího snížení. I v případě desky CM3board bylo přijato několik kompromisů, z nichž největší je snížení počtu vrstev ze čtyř na dvě.

Deska CM3board je totiž případem, kde by bylo využití čtyř vrstev zcela na místě. Nikoliv z důvodu nedostatku prostoru pro signálové vodiče, ale kvůli důkladnému zemnění a oddělení signálových vrstev. Kromě toho, že některé obvody, zejména smíšené analog-digitální, využívají oddělené země, vyskytuje se na desce i poměrně mnoho vysokorychlostních signálů, které by za ideálních podmínek neměly být kříženy, aby se zabránilo jejich vzájemnému nežádoucímu ovlivňování indukčními a kapacitními vazbami. Mezi takovými zkříženými signály by měla být alespoň jedna vrstva se zemnicím polygonem. Bohužel na dvouvrstvé desce toho dosáhnout nelze, a proto se na některých místech tyto nežádoucí jevy vyskytují.

V případě dvouvrstvých a vícevrstvých DPS jsou rovněž kladeny požadavky na prokovení. Zatímco u vícevrstvých se opět nabízí poměrně široká škála kombinací, které vrstvy se kterými mohou být propojeny, u desek dvouvrstvých se prokovy buď dělají anebo ne. Samozřejmě z hlediska ceny i zde hraje roli, zdali je deska prokovená či nikoliv. Proces prokovení je samostatným výrobním úkonem, který si vyžaduje přípravu a další činnosti s tím spojené. Použití prokovů na desce CM3board se však jevilo jako zcela nezbytné.

Konstrukční třída

Konstrukční třída je další z faktorů, které ovlivňují způsob výroby a cenu desky. Jedná se o souhrn pravidel, které určují minimální povolené rozměry vodivých cest, izolačních mezer, okružích a otvorů na desce. Konstrukční třídy se označují římskými číslicemi a u většiny výrobců se zpravidla setkáme s rozmezím III. - VIII. Čím vyšší je číslo třídy, tím jemnější jsou minimální rozměry. Většina výrobců si až do V. konstrukční třídy neúčtuje žádné nadstandardní příplatky a tato třída již nabízí poměrně slušné limity i pro velice jemné součástky. Konkrétně je to 0,2mm šířka vodivé cesty, 0,2mm izolační mezera, 0,2mm velikost okružích a 0,4mm průměr vrtáku. Pro desku CM3board byla tedy zvolena V. konstrukční třída.

Konstrukční třída	III	IV	V	VI	VII	VIII
Min. šířka vodičů v mm	0,4	0,3	0,2	0,15	0,125	0,1
Min. šířka izolačních mezer v mm	0,4	0,3	0,2	0,15	0,125	0,1
Min. přesah plošky na poloměru v mm	0,4	0,3	0,2	0,15	0,125	0,1
Nejmenší průměr vrtáků v mm	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1

Obrázek 12 - Tabulka konstrukčních tříd, zdroj (44)

Povrchová úprava

Z hlediska povrchové úpravy se opět nabízí poměrně mnoho možností. Často je brán ohled na složitost součástek, způsob osazování ale také časovou prodlevu mezi výrobou desky a jejím osazením. V případě delších časových prodlev je rozumnou volbou zlacení, jelikož zlato je velmi odolné vůči oxidaci a zachová pájitelnost desky i po delší dobu. Zlato je na měděné části desky nanášeno chemickou nebo galvanickou cestou v tloušťkách od 0,1 do 1 mikrometru.

Pokud je deska osazována v krátké době hned po jejím vyrobení, bývá často vhodnější variantou cínování, jelikož čistý cínovaný povrch nabízí lepší pájitelnost, než zlato. V případě použití jemných součástek, jejichž rozteče vývodů jsou velmi malé, případně při použití komplikovaných BGA pouzder je prioritou, aby byl povrch co nejvíce rovný. Toho lze dosáhnout buď zlacením, nebo cínováním chemickou cestou. V případě desky, kde jsou smíšené SMD a klasické součástky je však výhodné využití technologie HAL. Jedná se o metodu, kdy je celá deska ponořena do lázně roztaveného cínu, kde dojde ke smočení všech odkrytých měděných částí. Po vytažení z lázně se přebytečný cín odstraní proudem horkého stlačeného vzduchu. Tato metoda nenabízí tak rovný povrch, jako chemické nanášení kovu, je však relativně levná a vytvoří velice solidní vrstvu cínu, což poskytne vynikající pájitelnost i pro ruční osazování. Z těchto důvodů byla metoda HAL vybrána i pro desku CM3board.

Pro lepší povrchovou odolnost, ale zejména kvůli snadnějšímu a bezpečnějšímu osazování, byla deska CM3board opatřena i nepáživou maskou z obou stran. Jedná se o krycí vrstvu, která umožní pájení jen na odkrytá místa, tedy zejména na plošky součástek a některé prokovy. Zbylá místa nejsou cínem smočitelná a je tak zabráněno nechtěným zkratům. Standardní barva nepáživé masky je zelená a ta také byla zvolena pro desku CM3board. Deska je rovněž opatřena bílým servisním potiskem ze strany součástek.

3.5.2 Použité metodiky pro návrh plošných spojů

Rozmístění součástek a mechanické aspekty plošného spoje

Dobré rozmístění součástek je jedním ze základních předpokladů kvalitního návrhu desky. Dalo by se říct, že vhodným rozmístěním si výrazně ulehčíme práci při kreslení vodivých cest. Důraz je však kladen na více hledisek:

- **Mechanické požadavky** - zde se jedná o specifikaci obrysu desky (rozměry, případně přesný tvar), pozice montážních otvorů a dalších komponent, které jsou pevně fixované. Často jde o chladiče, konektory, tlačítka, displeje a jiné součástky tohoto charakteru. Zpravidla jsou tyto požadavky dané mechanickými vlastnostmi montážního boxu, ve kterém je plošný spoj umístěn. Dalším parametrem je potom výška plošného spoje, která je rovněž limitována montážním boxem a je tedy nutné některé rozměrnější komponenty umisťovat mimo "zakázané" zóny, kde by mohlo dojít ke kolizi. V případě vývojových desek, včetně desky CM3board, jsou však tyto problémy zanedbatelné, jelikož deska není primárně určena pro montáž do boxu, ale je používána volně. Toto dává vývojáři značnou volnost z hlediska výše uvedených požadavků. Většina konektorů tedy byla umístěna po obvodu desky tak, aby k nim byl uživateli umožněn co nejpohodlnější přístup a zároveň aby nabízely dostatek místa pro příslušné obvody, ke kterým náleží. Rovněž tlačítka, displej a reproduktory byly umístěny s co největším ohledem na uživatelský komfort.
- **Snadná montáž** - zde jde především o umisťování většího množství drobných pasivních komponent tak, aby s nimi byla co nejmenší práce při ručním osazování. Tyto součástky jsou na desce řazeny do rovnoběžných řad tak, aby k nim byl snadný přístup a jejich situace na desce byla co nejpřehlednější. Rovněž je brán ohled na to, aby tyto součástky nebyly v bezprostřední blízkosti větších komponent, jejichž osazení by se tímto mohlo zkomplikovat. Výjimku z tohoto pravidla samozřejmě tvoří oddělovací kondenzátory a další podobné komponenty, které musí být co nejblíže příslušné komponentě. Z tohoto důvodu a v zájmu zachování snadného osazování byly v některých případech umístěny z druhé strany desky.
- **Zjednodušení vodivých cest** - jak už bylo řečeno, vhodným rozmístěním je možné výrazně zjednodušit spletnost vodivých cest, případně i snížit počet prokůvů. Jedná

se o poměrně specifickou dovednost, kterou lze získat až určitou praxí a zpravidla neexistuje přesně formulovaný souhrn pravidel, jak součástky na desku správně umístit. Vždy záleží na dané situaci a nezdá se, že je nutné provést i dodatečné změny ve schématu (např. přehození pinů, či změna pouzdra součástky) za účelem snadnějšího návrhu plošného spoje. Např. zapojení expanzního konektoru SV2 bylo formulováno teprve až v době, kdy byla známa jeho přesná pozice na desce, stejně tak všechny signály, které se nachází v jeho blízkosti a které jsou vhodnými kandidáty pro vyvedení na tento konektor. Dalším vhodným příkladem je samotný mikrokontrolér IC5, jakožto komponenta, která na desce tvoří nejvíce propojení s okolím. tato součástka, jejíž pozice je velmi kritická, byla právě z tohoto důvodu umístěna zhruba doprostřed desky tak, aby k ní byl snadný přístup ze všech stran. Za zmínku stojí i umístění obvodů, které sdílejí stejnou sběrnici, do vzájemné blízkosti. Příkladem na desce CM3board mohou být obvody využívající sběrnici I2C.

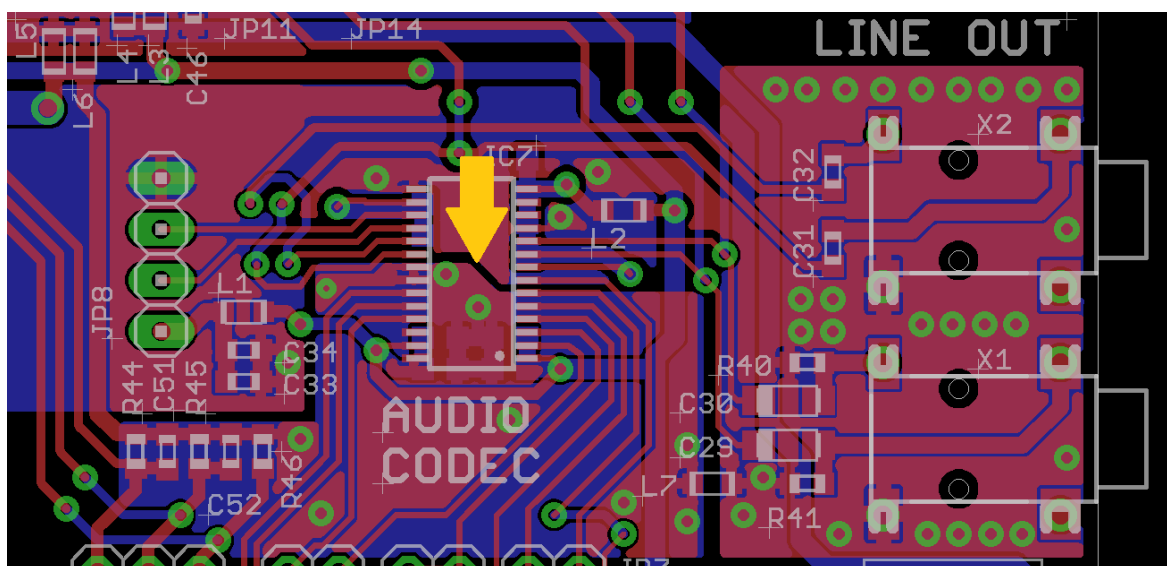
Návrh desky po částech

U větších plošných spojů, za které by se deska CM3board již dala považovat, je výhodné, ne-li nezbytné, postupovat systematicky, kdy jsou nejdříve zakresleny jednotlivé funkční bloky desky. Zde jsou pečlivě ošetřena všechna lokální úskalí a teprve následně jsou tyto části pospojovány v jednotlivý celek. Nevýhodou tohoto postupu je volné nevyužití místa, které může mezi těmito částmi vzniknout. Z toho důvodu je v této fázi vývoje již dobré znát pozici všech pevně daných komponent, aby bylo možné jednotlivé bloky co nejvíce přizpůsobit těm sousedním.

Napájení a zemní polygony

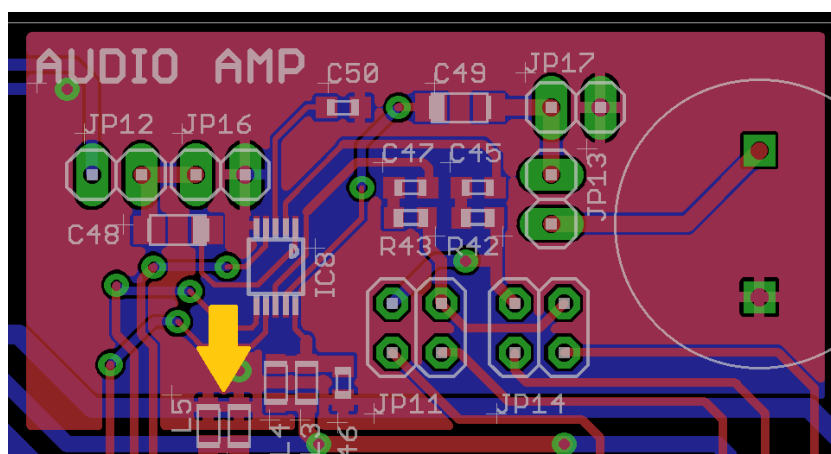
Deska CM3board obsahuje smíšené digitální i analogové signály, což klade zvýšené nároky na kvalitní zemnění, aby nedocházelo k ovlivňování citlivých analogových signálů vysokofrekvenčními digitálními. Obvody, které disponují i analogovou částí, mají často samostatné piny pro analogovou a digitální zem a napájení. Jak už bylo popsáno výše, analogové napájení je od digitálního často odděleno LC filtrem. Rovněž jednotlivé země jsou od sebe odděleny feritovými perličkami, kvůli zamezení průchodu střídavých proudů mezi nimi. Nejkritičtější obvodem je zde audio codec IC7. Tento obvod je umístěn

přesně na rozhraní digitální a analogové zemnicí plochy. Ohled byl brán na to, aby byly analogové signály rozvedeny jen v oblasti analogové země. To stejné platí i pro signály digitální. Rozhraní mezi analogovou a digitální zemí je označeno žlutou šipkou na obrázku níže.



Obrázek 13 - rozhraní mezi analogovou a digitální zemí pod IC7

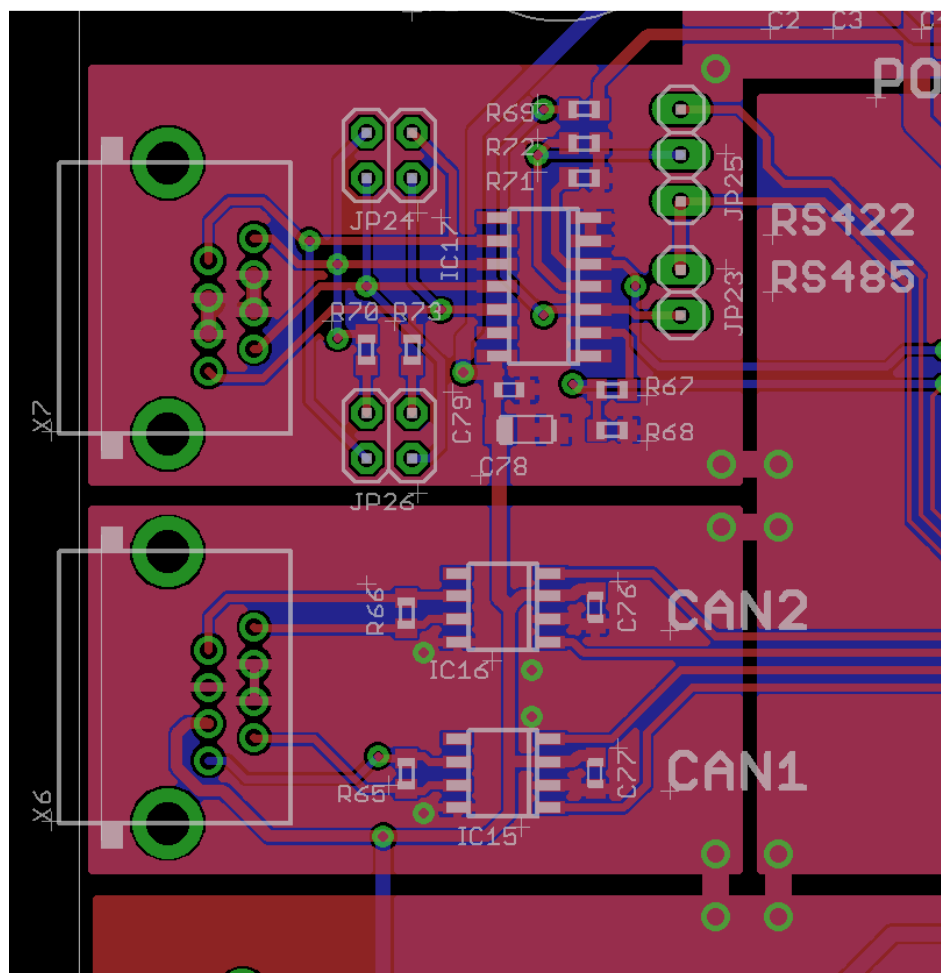
Dalším obvodem, který má vlastní analogovou zem je integrovaný zesilovač IC8. Ta je od země digitální oddělena feritovými perličkami L5 a L6. Na obrázku níže jsou označeny žlutou šipkou.



Obrázek 14 - analogová zem obvodu IC8 s vyznačenými oddělovacími feritovými perličkami

Jak už bylo řečeno výše, deska byla navrhována po částech tak, že jednotlivé funkční bloky byly nejdříve navrženy samostatně a následně pospojovány v jeden celek. Každý z těchto

bloků měl během svého vývoje i svůj vlastní zemnicí polygon. Ke sloučení těchto polygonů nakonec nedošlo. Zem byla u každého bloku propojena se blokem sousedním jen v jednom místě aby se tím omezili nežádoucí vzájemné vlivy mezi jednotlivými bloky. Na obrázku níže je znázorněno oddělení jednotlivých bloků a propojení jejich zemí.



Obrázek 15 - propojení zemí mezi jednotlivými bloky

Diferenciální signály

Na desce CM3board se vyskytují vysokorychlostní diferenciální signály, zejména sběrnice USB. Základními pravidly pro kreslení vodivých cest pro tyto signály je dodržování stejné impedance a kapacity vedení v celé jeho délce. Toto je realizováno především dodržení konstantní vzdálenosti obou diferenciálních vodičů. V blízkosti tohoto vedení by se rovněž neměly vyskytovat žádné další signály. Předpokladem je také použití co nejmenšího počtu prokovů a velice důležité je i dodržení stejné délky obou diferenciálních vodičů. Při vysokých přenosových rychlostech by mohlo v případě rozdílných délek dojít k časovému posunu mezi jednotlivými diferenciálními signály až do té míry, že by byl přenos dat

závadový. Ne vždy je možné dosáhnout úplně stejných délek a tak bývá kratší z vodičů prodloužen pomocí meandrů. Návrhový systém EAGLE, ve kterém byla deska kreslena, však nedisponuje funkcemi pro návrh vodivých cest pro diferenciální signály a tak byly tyto vodiče nakresleny jen přibližně. Jelikož je deska pouze dvouvrstvá, nebylo možné vyhnout se křížení diferenciálních signálů s jinými vodiči na opačné straně desky.

3.5.3 Optimalizace pro výrobu

Optimalizace pro výrobu zde zahrnuje několik kroků, které byly učiněny v zájmu zjednodušení výroby či montáže a také celkové snížení ceny.

- **Výběr vhodného dodavatele součástek** - v ideálním případě by měly být všechny součástky jen od jednoho dodavatele vzhledem k úsporám vzniklých při dodání zboží. To však zpravidla není možné, jelikož deska CM3board obsahuje značné množství nejrozličnějších komponent a není dodavatel, který by je měl ve svém sortimentu všechny. Celkově tak byli vybráni 4 dodavatelé, kde prioritou byla především maloobchodní cena, dostupnost součástek a dodací lhůty. Majoritní část komponent byla dodána zahraničním distributorem **Mouser** (45), který nabídl příznivé ceny a jako jediný měl ve své nabídce integrovaný obvod pro fyzickou vrstvu ethernetu LAN8720. Další nemalá část součástek byla dodána od společnosti **Farnell** (46). Menší množství komponent pak bylo dodáno i od tuzemských prodejců, zejména **GM Electronic** (47) a **PV Electronic** (48). Všechny součástky a jejich dodavatelé jsou uvedeny v rozpisce.
- **Přečíslování součástek na desce** - návrhový systém Eagle čísluje automaticky nově přidané součástky do schématu, vlivem čehož dochází k nahodilému číslování z hlediska jejich hodnot a pozic na desce. Toto je pro montáž nepříznivé, zejména pokud je deska osazována ručně. Po dokončení návrhu desky byl použit eagle script, který změnil číslování součástek tak, aby byly očíslovány ne podle pořadí přidání do schématu, ale podle jejich pozic na plošném spoji. Script přitom bere ohled i na jejich hodnoty a snaží se utvořit skupiny součástek se stejnou hodnotou, kde jejich číslování jde přímo po sobě.

3.5.4 Výroba a osazení plošného spoje

Výroba desky CM3board byla realizována společností AJ Technology, s.r.o. (49). Vzhledem k technologii SMD a poměrně velkému počtu komponentů na desce se nejevilo reálné, aby byla deska osazena mimo specializované pracoviště. Výše uvedené společnosti tak bylo zadáno i osazení.

Plošný spoj byl vyroben v rámci prototypové výroby, která se pro tento účel jevila jako cenově dostupnější. Vzhledem k minimální velikosti přířezu byly plošné spoje vyrobeny celkem dva. K osazení však došlo jen u jednoho z nich.

3.5.5 Seznam zjištěných chyb

Zde je uveden seznam chyb, které byly zjištěny a případně opraveny, před datem odevzdání této práce. Chyby jsou rozděleny do třech kategorií.

Chyby zjištěné při osazování desky

- Otvory pro piny konektoru J1 byly navrženy příliš malé. Chyba byla odstraněna dodatečným převrtáním otvorů. Při tomto kroku došlo v otvorech k rozpojení prokovů, což však v daném případě nebylo na závadu.
- Otvory pro fixační piny USB konektoru X3 nemají měděné okruží a tyto piny tedy není možné zapájet. Mechanická fixace konektoru byla vyřešena dodatečným přilepením.
- Footprint pro pojistku F1 je příliš velký. Problém byl vyřešen použitím většího množství cínu k přemostění vzduchové mezery, která touto chybou vznikla.
- Otvory pro fixační piny rotačních enkodérů SW3 a SW8 byly příliš malé. Problém byl vyřešen dodatečným dopilováním těchto pinů.
- Všechny obvody v pouzdře SOT353 byly nesprávně dodány v jiném pouzdře vlivem chyby v rozpisce. Problém byl vyřešen dokoupením správných součástek.
- Na osazovacím výkrese desky nebyla vyznačená polarita akustických měničů SP1 a SP2.

Chyby zjištěné při oživování desky

- Napájení OLED modulu bylo přivedeno na 3,3V místo na 5V. Toto způsobovalo jeho nestabilní chod. Problém byl vyřešen přerušením jeho napájecí cesty a přemostěním drátovou propojkou.
- Diferenciální pár signálů nativního USB měl překřížené vodiče D+ a D-. Problém byl odstraněn jejich přerušením a vytvořením překříženého mostu pomocí drátových propojek.
- Zvedací rezistor na lince D- od převodníku USB/UART byl nadbytečný, jelikož je už ten samý integrován přímo v převodníku. Jeho přítomnost způsobovala nefunkčnost tohoto USB. Rezistor byl dodatečně odstraněn.

Chyby zjištěné při vývoji software

- Na sběrnici I2C byly vynechány zvedací rezistory. Problém byl vyřešen jejich dodatečným přidáním z druhé strany desky u obvodu IC6.
- Všechna podsvícená tlačítka byla osazena s nesprávnou polaritou diody. U tlačítek SW1, SW4, SW6 a SW9 byl tento problém vyřešen dodatečným přeosazením.

4 SOFTWARE

Pro demonstrační účely byl na desce CM3board vytvořen jednoduchý software. Při jeho vývoji bylo přihlédnuto především na časový rámec a na využití alespoň některých multimediálních prvků. Vznikla tak aplikace, která umožní prohlížení statických obrázků, které jsou uloženy na SD kartě OLED modulu.

4.1 Analýza a návrh

I relativně jednoduchá aplikace si žádá plánování předem, než dojde k samotnému psaní kódu. Tento krok byl v případě vývoje demonstrační aplikace zcela nevyhnutelný už jen proto, že vývoj probíhal na dvou platformách (samotná deska CM3board a OLED modul) a bylo využito značného množství knihoven, včetně operačního systému FreeRTOS.

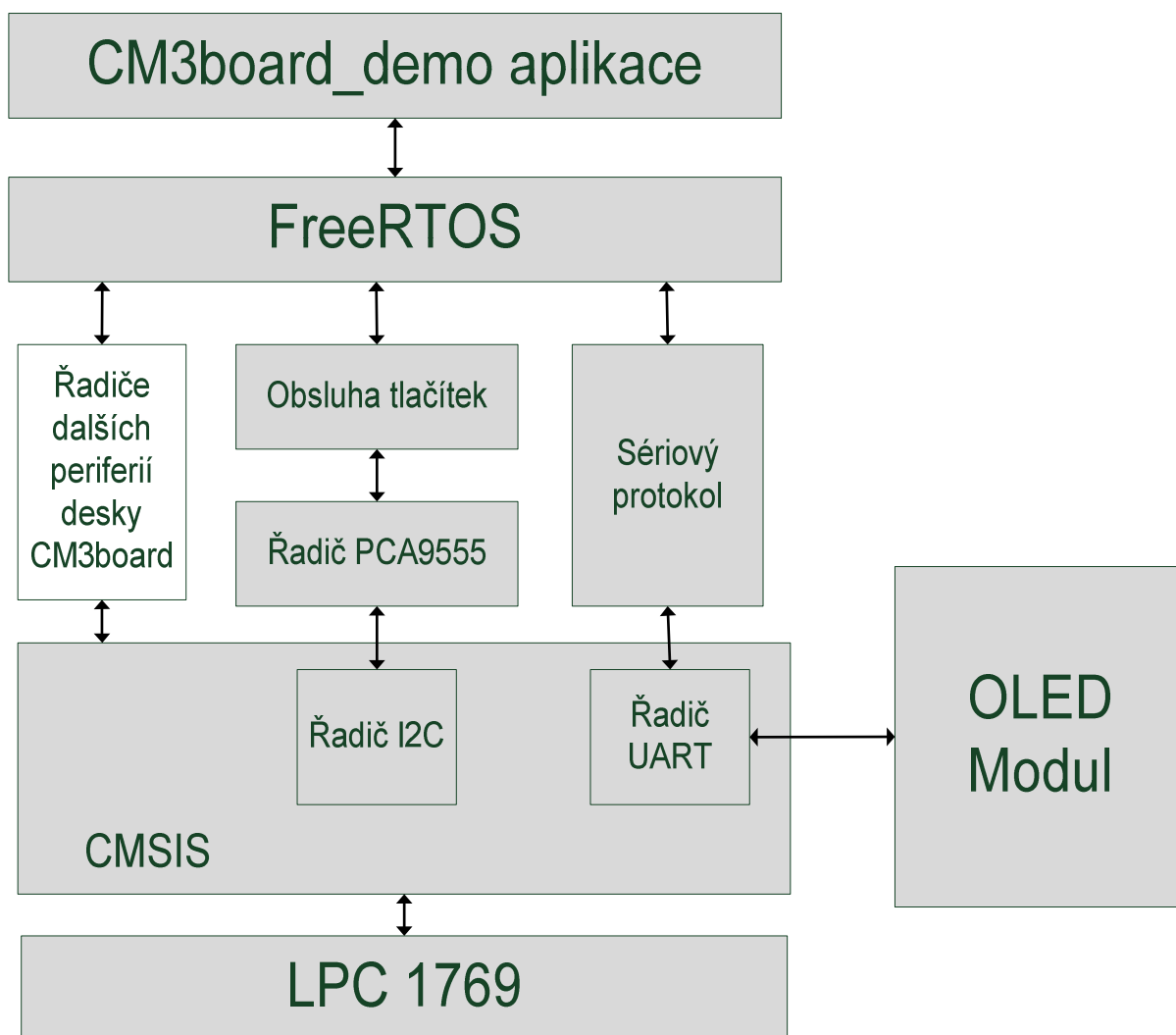
Jednotlivé úkony spojené s vývojem této aplikace by se daly shrnout v několika bodech:

- Vývoj aplikace pro OLED modul, která bude zajišťovat načítání a zobrazování grafiky včetně sériové komunikace s deskou CM3board.
- Vývoj řadiče pro obvod PCA9555 na desce CM3board.
- Vytvoření knihovny pro obsluhu tlačítek, která bude řadič pro PCA9555 využívat.
- Jednoduchý protokol pro komunikaci mezi OLED modulem a deskou CM3board.
- Vytvoření aplikační vrstvy v systému FreeRTOS.

Kromě těchto bodů je v aplikaci využito i dalších softwarových elementů:

- Knihovny systému FreeRTOS.
- Knihovna CMSIS.
- Řadiče periférií obvodu LPC1769.

Blokově byla aplikace rozvržena takto:



Obrázek 16 - Blokové rozvržení demonstrační aplikace na CM3board

Nad systémem FreeRTOS vznikla jednoduchá aplikační vrstva, která využívá dvou nezávislých tasků. Jeden z nich má za úkol snímat stavy tlačítek, zatímco druhý řeší sériovou komunikaci. V zájmu zachování jednoduchosti využívají tasky metodu polling namísto přerušení.



Obrázek 17 - Demonstrační aplikace na desce CM3board

4.2 Hardwarová abstrakční vrstva

4.2.1 Význam hardwarové abstrakce

Účelem hardwarové abstrakce je co možná největší oddělení softwarového vývojáře od hardwarových aspektů zařízení a zajistit co největší přenositelnost softwaru mezi různými platformami. V případě vývoje aplikací pro PC je úroveň abstrakce mnohdy značná a na vývojáře nejsou kladeny tak vysoké požadavky znalostí hardwaru.

V případě embedded systémů je však častým pravidlem, že je software tvořen přímo "na železe" (z angl. bare-metal programming), kde má vývojář přístup až k samotným registrům procesoru. Nejnižší vrstvy softwaru, které mohou toto zprostředkovat, jsou často dodávány přímo výrobcem daného obvodu, čímž je vývojáři ušetřeno mnoho práce. Jednotlivé subsystémy procesoru a jejich příslušné registry jsou zapouzdřeny do

samostatných softwarových celků, které nabízejí vlastní API. Jednou z těchto součástí je i knihovna CMSIS.

4.2.2 Knihovna CMSIS

Z angl. Cortex Microcontroller Software Interface Standard, je soubor knihoven vytvořený za účelem hardwarové abstrakce na mikrokontrolérech s jádrem Cortex-M. Jedná se o knihovny, které jsou nezávislé na výrobci obvodu a nabízí rozhraní pro komunikaci s jeho jádrem i přidruženými perifériemi. Účelem je rovněž snížení nákladů ve vývoji softwaru při přechodu mezi různými výrobci či platformami v rámci jádra Cortex-M. (50)

Možnosti knihovny CMSIS by se tedy daly shrnout v několika bodech:

- Hardwarová abstrakce registrů - jednotné definice všech jejich názvů
- Sjednocené názvy systémových výjimek (obsluhy přerušení, NMI, atd..)
- Sjednocené metody pro organizaci hlavičkových souborů
- Společné metody pro inicializaci systému
- Společné metody pro nastavení taktovací frekvence

Více o možnostech a použití knihovny CMSIS je uvedeno na stránkách společnosti Keil (51).

Knihovnu CMSIS je vždy nutné alespoň minimálně přizpůsobit danému vývojovému prostředí aby došlo ke zdárnému přeložení a slinkování. Na desce CM3board je proto využita knihovna CMSIS z demo projektů vývojového prostředí LPCXpresso a desky base Board, kde je již tento krok proveden.

Jedná se konkrétně o dva samostatné projekty:

- **Lib_CMSISv1p30_LPC17xx** - hardwarová abstrakce registrů jádra pro řadu obvodů LPC17xx
- **Lib_MCU** - řadiče jednotlivých periférií obvodů LPC17xx

4.3 Operační systém reálného času

Se stále rostoucím výkonem dnešních mikroprocesorů rostou i požadavky na jejich využití. Zatímco v 70. a 80. letech minulého století byly na tehdejších počítačích nejběžnějšími programovacími jazyky assembly, dnes se běžně setkáváme s využitím vyšších jazyků, kde není výjimkou i koncept objektového programování či softwarové platformy jako např. v případech .NET a Java.

Nejsou to však jen programovací jazyky, které určují směr vývoje v tomto odvětví. Stále častější nutnost řešení aplikací v reálném čase dala vzniku speciálním operačním systémům pro tento účel. Jsou to systémy RTOS, které dnes v průmyslové praxi nachází nezastupitelné místo. Na rozdíl od klasických operačních systémů, které známe z osobních počítačů, se však jedná o velmi specializované systémy, jejichž přítomnost na daném zařízení nemusí být uživateli zřejmá. Nalezneme je téměř všude, od spotřební elektroniky jako jsou hračky, bílé zboží, příslušenství k PC a síťové prvky až po systémy v průmyslové automatizaci, automobilovém průmyslu, biomedicínském inženýrství či kosmonautice.

Dnešní trh nabízí celou řadu těchto systémů pro komerční i nekomerční využití, z nichž některé jsou k dispozici zcela zdarma jako open-source. Jedním z této kategorie je i systém FreeRTOS, kterému bude v několika následujících odstavcích věnována pozornost.

4.3.1 Motivace pro zavedení RTOS

Vždy je otázkou, zda využít RTOS či nikoliv. Obecně platí, že menší projekty se bez něj obejdou, zatímco u větších může být účinným nástrojem, jak do projektu vnést určitou míru organizace. Kde však je hranice mezi velkým a malým projektem, to je vždy na posouzení konkrétní aplikace vzhledem k architektuře, požadavkům na real-time odezvu a podobných úskalí.

V případě demonstrační aplikace na desce CM3board je téměř jasné, že by se díky své jednoduchosti obešla i bez něj, avšak právě kvůli jejím demonstračním účelům byl systém RTOS do projektu začleněn.

V aplikaci nabízí hned několik výhod:

- **Abstrakce časování** - asi nejužitečnější přínos v této demonstrační aplikaci. Časování není řešeno pomocí hardwarových časovačů nebo zpožďovacích smyček, ale je využíváno API RTOSu, kde je možné některé tasky zablokovat na přesně určenou dobu a mezitím se věnovat jiným věcem.
- **Zvýšená modularita** - tasky jsou většinou samostatné softwarové elementy a je možné s nimi nakládat odděleně. V případě pečlivě definovaných rozhraní samostatných tasků jsou i lepší možnosti pro týmový vývoj.
- **Snadnější testování** - z výše uvedeného vyplývá, že je možno task do určité míry testovat a odlaďovat v izolaci od okolí.
- **Využití mrtvého času procesoru** - v případě multitaskového systému má vývojář mnohem větší kontrolu nad časem procesoru a může s ním tak přesněji nakládat. Procesor zpravidla vykonává činnost, jen pokud se nějaká nabízí. V mrtvém čase pak nemusí trávit plný výkon vykonáváním nekonečných smyček, ale může např. uvést celý obvod do režimu snížené spotřeby, případně provádět nějaké činnosti na pozadí.

4.3.2 Možnosti systému FreeRTOS

Systém FreeRTOS je psaný téměř výhradně v jazyce C a jeho zdrojové soubory je bez problému možné začlenit i do C++ projektu. FreeRTOS je šířen pod GPL licencí a je možné jej využívat zcela zdarma, včetně všech jeho zdrojových kódů. Systém je portován na četné množství architektur, jejichž výčet je možné nalézt na oficiálním webu tohoto systému (52).

Algoritmy preemptivního multitaskingu využívané systémem FreeRTOS

- **Round robin** - Jedná se o jeden z nejjednodušších preemptivních algoritmů. Každý task má plánovačem přidělen přesně daný a stejně velký časový úsek. Plánovač potom mezi těmito tasky rovnoměrně přepíná. Výhodou je, že nemůže dojít k vyhladovění žádného z tasků. Nevýhodou je potom absence priorit.
- **Priority scheduling** - Každý task má svoji prioritu a na základě toho plánovač rozhoduje, který proces bude v daném okamžiku běžet. Čas procesoru je vždy

předán tasku s nejvyšší prioritou, který je ve stavu ready. Výhodou je velmi rychlá odezva na časově kritické úlohy. Nevýhodou potom možnost hladovění tasků s nízkou prioritou. Systém FreeRTOS využívá primárně tuto strategii, může však pracovat i v režimu round-robin.

Správa tasků

Systém FreeRTOS nabízí několik API funkcí pro správu tasků pod tímto systémem. Zde se jedná o jeho nejzákladnější funkce. Task je možné kdykoliv vytvořit pomocí funkce `xTaskCreate()` a zrušit funkcí `xTaskDelete()`. Každý vytvořený task musí být implementován jako nekonečná smyčka, podobně jako funkce `main()`. Je možné rovněž používat funkce, které task na určitou dobu zablokují, např. `vTaskDelay()`. Systém FreeRTOS implementuje vždy alespoň jeden task, tzv. idle task, který má nejnižší prioritu a běží vždy, když žádný jiný task není ve stavu ready. Správou tasků se více zabývá první kapitola knihy (53) nebo manuál na oficiálním webu FreeRTOS (54).

Fronty a komunikace mezi tasky

Fronty jsou obecně využívány ke komunikaci mezi tasky. Jedná se o samostatné objekty, které v sobě zapouzdřují buffer typu FIFO. Stejně jako v případě tasků, i fronty mají své API, které umožňuje jejich vytváření, mazání, ale i uložení a vyzvednutí dat. Fronty v sobě drží konečný počet pevně daných prvků, jejichž vlastnosti jsou specifikovány při vytváření fronty. Tasky disponují funkcemi, které jim umožňují čekat v blokováném stavu, dokud do fronty nepříjdou data, případně dokud se ve frontě neuvolní místo pro jejich zapsání. V knize (53) se problematikou front zabývá kapitola 2.

Semafore a správa přerušení

Semafore slouží rovněž ke vzájemné komunikaci mezi tasky a slouží především k jejich synchronizaci. Rozlišujeme semafore binární a čítací. Semafor se dá pojmut jako fronta, která obsahuje pouze jeden prvek v případě binárního, případně více prvků v případě čítacího. Na rozdíl od klasické fronty však nezáleží na obsahu položek, ale pouze na tom, jestli ve "frontě" (přesněji v semaforu) jsou či nikoliv. Stejně jako fronty, i semafore jsou objekty samy o sobě a FreeRTOS disponuje API funkcemi pro jejich vytváření, mazání a

řízení. Mezi velmi častá využití semaforu patří synchronizace tasku s přerušením. ISR daného přerušení má za úkol pouze nastavit příslušný semafor, na který čeká task (interrupt handler), který je čekáním většinu času blokován, ale v systému má velmi vysokou prioritu. V momentě, kdy je semafor nastaven, tento task se spustí a vykoná příslušnou obsluhu přerušení. Více o semaforech a přerušeních opět v knize (53) v kapitole 3.

Mutexy a správa sdílených prostředků

Mutex (z angl. mutual exclusion) je speciálním typem binárního semaforu, který slouží ke správě sdílených systémových prostředků. Pokud více tasků sdílí nějaký systémový prostředek (např. oblast paměti) je nutné zajistit, aby k tomuto prostředku měl vždy v rámci jednoho uceleného úkonu přístup výhradně jen jeden task.

Kromě mutexů může FreeRTOS využívat i jiných metod, jak zajistit přístup jen jednoho tasku k danému prostředku. FreeRTOS API disponuje funkcemi pro dočasné zastavení plánovače případně funkcemi pro vstup do kritické sekce. Pokud je plánovač pozastaven, případně pokud se program zrovna nachází v kritické sekci, nemůže dojít k přepnutí mezi tasky. Více se problematikou mutexů zabývá kapitola 4 v knize (53).

Správa paměti

Při práci se systémem FreeRTOS je možné využívat standardní funkce pro dynamické alokování paměti jakou jsou malloc() a free(). Tyto však nejsou vždy úplně vhodné, kvůli její relativně velké implementaci, přičemž na menších systémech nemusí být dostupné vůbec. Problém může být i v tom, že tyto funkce způsobují fragmentaci paměti a nejsou deterministické. Rovněž není zaručeno jejich bezpečné použití ve vícetaskových aplikacích. Systém FreeRTOS implementuje 3 způsoby, jak tyto problémy více či méně obejít. Každý z těchto způsobů je implementován samostatným souborem. Jsou to:

- Heap_1.c - je dostupná funkce malloc() (zde jako pvPortMalloc()) pro dynamické alokování paměti. Funkce pvPortMalloc() vždy přiděluje pevné bloky paměti, které již nemohou být uvolněny. Funkce free() zde implementovaná není. Jedná se o minimalistickou implementaci pro malé systémy, které nevyužívají mazání tasků (a dalších objektů jako front a semaforů) za běhu programu. Funkce pvPortMalloc() je deterministická a vždy potřebuje stejný čas pro alokování jednoho bloku.

- Heap_2.c - zde se jedná o podobný případ jako Heap_1.c, avšak je zde implementovaná možnost uvolnění paměti pomocí funkce `vPortFree()`. Paměť je opět alokována v pevně daných blocích a tím je v drtivé většině případů zabráněno její fragmentaci. Funkce v tomto souboru však již nejsou zcela deterministické.
- Heap_3.c - funkce z tohoto souboru pouze zapouzdřují standardní funkce `malloc()` a `free()` tak, aby byly bezpečné z hlediska vícetaskového systému. Toho je dosaženo pozastavením plánovače na potřebnou dobu vždy, když je některá z těchto funkcí volána. Tyto funkce nejsou deterministické a mohou způsobovat fragmentaci paměti.

Specifické funkce na platformě ARM Cortex-M3

Většina mikroprocesorů s jádrem Cortex-M3 nabízí tzv. MPU (z angl. Memory Protection Unit), což je periférie umožňující rozdělení paměti do samostatných regionů, kde je každý region spravován samostatně s vlastními přístupovými právy. Např. mikroprocesor LPC1769 od firmy NXP umožňuje rozdělení své paměti na 8 těchto regionů. Více o MPU a obvodu LPC1769 je uvedeno v jeho manuálu (55).

Systém FreeRTOS disponuje funkcemi pro práci s MPU na platformě Cortex-M3. Jedná se především o funkci `vTaskAllocateMPURegions()`, která umožní alokovat samostatný region v paměti. Pomocí funkce `vTaskCreateRestricted()` je potom vytvořen task, který tuto oblast paměti využívá. Více o těchto funkcích je popsáno v online manuálu na oficiálních stránkách systému FreeRTOS (56).

Implementace systému FreeRTOS

Jak už bylo zmíněno výše, systém FreeRTOS je téměř výhradně implementovaný v jazyce C pro snadnou přenositelnost mezi platformami. V současné době existuje 31 oficiálních portů. Kernel tohoto systému si zakládá na jednoduchosti a je tvořen jen třemi soubory se zdrojovým kódem. Systém však postrádá pokročilé funkce, které jsou běžné ve větších operačních systémech, jako např. ovladače pro jednotlivá zařízení, pokročilá správa paměti

či síťová podpora. Pro tyto účely však často výrobci samotných mikroprocesorů nabízí své vlastní knihovny, které je možné do projektu začlenit.

4.4 Programování a obsluha modulu AMOLED displeje

OLED modul uOLED-32028-PMD3 využívá svůj vlastní skriptovací jazyk 4DGL, který byl vyvinut společností 4D Systems. Svou syntaxí se do určité míry podobá jazyku C, avšak je velmi zjednodušený. Společnost nabízí i své vlastní vývojové nástroje pro tento jazyk. jedná se především o vývojové prostředí Workshop, které zprostředkovává funkce od editace přes kompilaci až po nahrání samotného firmwaru. Dalším nástrojem je potom Graphics Composer, což je aplikace sloužící k vytváření grafických motivů pro OLED modul. Grafické podklady pro tyto motivy jsou uloženy na micro SD kartě přímo v OLED modulu a pomocí scriptů v jazyce 4DGL s nimi může být pracováno. Tak je tomu i v případě demonstrační aplikace pro desku CM3board.

Sériová komunikace

Skriptovací jazyk 4DGL nabízí základní funkce pro sériovou komunikaci. Jedná se o funkce `serin()` a `serout()`. Pracovat je možné pouze s jednotlivými bajty a není možné využívat přerušení. Z toho důvodu byl protokol pro sériovou komunikaci vytvořen velmi jednoduše, kde je jedním datovým rámcem právě jen jeden bajt. Tato sériová komunikace nevyužívá žádných metod pro verifikaci dat.

Význam bajtů od desky CM3board do OLED modulu:

- 01 - Stisknutí tlačítka šipka vlevo
- 02 - Stisknutí tlačítka šipka nahoru
- 03 - Stisknutí tlačítka šipka dolů
- 05 - Stisknutí tlačítka šipka vpravo

Význam bajtů od OLED modulu do desky CM3board

- 20 - aktivován režim celé obrazovky
- 21 - deaktivován režim celé obrazovky

ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl řešen vývoj a realizace vývojového kitu pro 32-bitové mikrokontroléry ARM se zaměřením na multimediální aplikace. Z hardwarového hlediska byla vyřešena všechna hlavní úskalí, která práci na tomto projektu doprovázela.

Byl proveden průzkum trhu současné nabídky vývojových nástrojů, který měl vliv na následný výběr architektury a konkrétního typu mikrokontroléru. Byla navržena vývojová deska, která z velké části vychází z vývojové platformy LPCXpresso a je kompatibilní s jejími vývojovými nástroji, jenž umožňují vývoj menších projektů zcela zdarma. Deska byla navíc vybavena multimediálními prvky jako je zvukové rozhraní a barevný OLED displej, jehož funkčnost byla v rámci této bakalářské práce demonstrována pomocí jednoduché softwarové aplikace. Na prototypu desky byla nalezena a opravena řada chyb, které při návrhu vznikly. V daném časovém rámci však nebylo možné vyvinout demonstrační či testovací software pro všechny periferie desky.

Nabízí se zde tedy možnost dalšího podrobného testování softwaru na částech desky, které zatím z tohoto hlediska testovány nebyly. Na základě zjištěných nedostatků by mohla být vypracována nová revize zapojení a plošného spoje. Tento krok by otevřel cestu případné sériové produkci desky.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

This bachelor thesis was dealing with development and realisation of development kit for 32-bit ARM microcontrollers with a focus on multimedia applications. From the hardware point of view, all the major issues have been resolved within the scope of this bachelor thesis.

A market research of the current products was carried out and this had impact on choosing the right architecture and the concrete chip. Based on the LPCXpresso development platform, a development board, which is compatible with these tools, was designed. The possibility of writing small software project completely free of charge was preserved. In addition, the board was equipped with multimedia components such as audio interface and color OLED display. Functions of the latter were demonstrated by a small software application. A number of bugs and glitches was found and fixed on the board prototype. However, it was not possible to write a test or demo software for all the board peripherals in the given time frame.

There is still an opportunity to undertake further testing of software on parts, where it has not been tested yet. Based on the found issues, there would be a need for a new revision of the schematics and the board. This could eventually make the project ready for a serial production.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. AVR 8- and 32-bit Microcontrollers. *Atmel Corporation*. [Online] 2012. <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/default.aspx>.
2. SAM7S-EK. *Atmel Corporation*. [Online] © 2012. <http://www.atmel.com/tools/SAM7S-EK.aspx>.
3. Atmel SAM-ICE. *Atmel Corporation*. [Online] © 2012. <http://www.atmel.com/tools/ATMELSAM-ICE.aspx>.
4. AT91SAM7S-EK - ATMEL - DEVELOPMENT KIT, SMART ARM, 32 | Farnell. *Farnell / Electronic Component Distributors / Suppliers / Electronics, Electrical Parts, Electrical Components and Wholesale Electronics*. [Online] © 2012. <http://cz.farnell.com/atmel/at91sam7s-ek/development-kit-smart-arm-32-bit/dp/1095463?ref=lookahead>.
5. AT91SAM-ICE - ATMEL - ICE, FOR AT91 ARM CORES | Farnell. *Farnell / Electronic Component Distributors / Suppliers / Electronics, Electrical Parts, Electrical Components and Wholesale Electronics*. [Online] © 2012. <http://cz.farnell.com/atmel/at91sam-ice/ice-for-at91-arm-cores/dp/1095464?ref=lookahead>.
6. OLIMEX LTD ARDUINO MAPLE PINGUINO ARM AVR MAXQ MSP430 PIC LOW COST DEVELOPMENT BOARDS. *OLIMEX LTD*. [Online] Copyright(C) 1999-2012. <http://www.olimex.com/>.
7. LPC1768 Development Kit. *Code_red*. [Online] © 2008-2012. <http://code-red-tech.com/lpc1768-development-kit.php>.
8. LPCXpresso Base Board | Embedded Artists AB. *Embedded Systems Development - made Easy | Embedded Artists AB*. [Online] 2012. http://www.embeddedartists.com/products/lpcxpresso/xpr_base.php.
9. Eclipse - The Eclipse Foundation open source community website. [Online] The Eclipse Foundation, Copyright © 2012. <http://www.eclipse.org/>.
10. Eclipse Public License - Version 1.0. *Eclipse - The Eclipse Foundation open source community website*. [Online] Copyright © 2012. <http://www.eclipse.org/legal/epl-v10.html>.

11. **Collins, Rick.** GNU ARM toolchain for CygWin, Linux and MacOS. *GNU ARM toolchain for CygWin, Linux and MacOS*. [Online] 2006-08-03. <http://www.gnuarm.com/>.
12. YAGARTO - Yet another GNU ARM toolchain. *YAGARTO - Yet another GNU ARM toolchain*. [Online] 31. 12 2011. <http://www.yagarto.de/>.
13. The GNU General Public License v3.0 - GNU Project - Free Software Foundation (FSF). *The GNU Operating System*. [Online] 3. 6 2007. <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>.
14. **Lynch, James P.** ARM Cross Development with Eclipse. *SparkFun Electronics*. [Online] 2012. http://www.sparkfun.com/tutorial/ARM/ARM_Cross_Development_with_Eclipse.pdf.
15. Embedded Workbench for ARM. *LPC Tools - Development Tools for NXP Microcontrollers*. [Online] Copyright 2011. <http://www.lpc tools.com/ewarm.aspx>.
16. MDK-ARM. *LPC Tools - Development Tools for NXP Microcontrollers*. [Online] Copyright 2011. <http://www.lpc tools.com/mdk-arm.aspx>.
17. Red Suite 4 - High quality, low cost development tools for ARM-based Microcontrollers. *code_red*. [Online] © 2008-2012. <http://code-red-tech.com/red-suite-4.php>.
18. ARM7 Processor Family - ARM. *ARM - The Architecture For The Digital World*. [Online] Copyright 2012. <http://arm.com/products/processors/classic/arm7/index.php>.
19. **Sadasivan, Shyam.** An introduction to the ARM Cortex-M3 Processor. *ARM - The Architecture For The Digital World*. [Online] 10 2006. <http://www.arm.com/files/pdf/IntroToCortex-M3.pdf>.
20. ARM - The Architecture For The Digital World. *ARM - The Architecture For The Digital World*. [Online] ARM Ltd., Copyright 2012. <http://arm.com/>.
21. **Yiu, Joseph.** *The Definitive Guide to the ARM Cortex-M3*. místo neznámé : Elsevier Inc., 2007. str. 103. ISBN: 978-0-7506-8534-4.
22. **NXP Semiconductors.** LPC17xx User manual - Rev. 2. [Online] 19. 8 2010. http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10360.pdf.

23. Semiconductor and Integrated Circuit Devices. *Semiconductor and Integrated Circuit Devices*. [Online] © 1999-2012. http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC78M00-D.PDF.
24. Fairchild Semiconductor | Power Management & Mobile IP Solutions. *Fairchild Semiconductor | Power Management & Mobile IP Solutions*. [Online] © 2011 . <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM317M.pdf>.
25. AN1032 - Using Decoupling Capacitors - Cypress Semiconductor. *Cypress Semiconductor*. [Online] © 2012. <http://www.cypress.com/?docID=31807>.
26. Semiconductor and Integrated Circuit Devices. *Semiconductor and Integrated Circuit Devices*. [Online] 27. 03 2012. http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/CAT811-D.PDF.
27. Home :: NXP Semiconductors. *Home :: NXP Semiconductors*. [Online] ©2006-2012. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCA9555.pdf.
28. FT232R. *FTDI Chip Home Page*. [Online] 2012. <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232R.htm>.
29. *Home :: NXP Semiconductors*. [Online] ©2006-2012. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/74HC_HCT4052.pdf.
30. Home :: NXP Semiconductors. *Home :: NXP Semiconductors*. [Online] ©2006-2012. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCA82C250.pdf.
31. RS 485 & RS 422 | HW-server.com. *HW-server.com | Vše o elektronice a programování*. [Online] 03. May 2003. <http://hw-server.com/rs-485-rs-422>.
32. Exar Corporation. *Exar Corporation*. [Online] © 2000-2012. <http://www.exar.com/connectivity/transceiver/rs485/sp491/>.
33. RMII Specification. *National Semiconductor | High-performance Analog*. [Online] 2012. http://www.national.com/assets/en/other/rmii_1_2.pdf.
34. SMSC. *SMSC*. [Online] ©2012 . http://www.smsc.com/media/Downloads_Public/Data_Sheets/8720a.pdf.
35. Ceetus. *Ceetus*. [Online] © 2009. <http://www.ceetus.com.cn/paper/Function%20of%20Ethernet%20Magnetics.pdf>.

36. Microchip Technology Inc. *Microchip Technology Inc.* [Online] ©Copyright 1998-2012 . <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21710c.pdf>.
37. STMicroelectronics. *STMicroelectronics.* [Online] ©2012 . http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00153589.pdf.
38. Avago Technologies Semiconductors Analog, Mixed-signal and Optoelectronic Components and Subsystems. *Avago Technologies Semiconductors Analog, Mixed-signal and Optoelectronic Components and Subsystems.* [Online] Copyright 2005-2012. <http://www.avagotech.com/docs/AV02-2315EN>.
39. *Welcome to Freescale - Freescale Semiconductor.* [Online] 2004 - 2012. http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7456L.pdf.
40. 4D Systems, Research and Development. *4D Systems, Research and Development.* [Online] 4D Systems Pty Ltd, Copyright © 2007.
41. 4DGL programmers reference manual. *4D Systems, Research and Development.* [Online] 4D Systems Pty Ltd, 20. 03 2010. <http://www.4dsystems.com.au/downloads/4DGL-Docs/4DGL-Programmers-Reference-Manual-rev2.pdf>.
42. Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments. *Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments.* [Online] Texas Instruments Incorporated, © Copyright 1995- 2012 . <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv320aic23b.pdf>.
43. Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments. *Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments.* [Online] © Copyright 1995- 2012. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4811.pdf>.
44. Gatema - Technické podmínky. *Gatema.* [Online] © 2012. <http://pcb.gatema.cz/technicke-podminky/>.
45. Mouser Electronics - Elektronické součástky Distributor. *Mouser Electronics - Elektronické součástky Distributor.* [Online] 2012. [Citace: 1. 6 2012.] <http://cz.mouser.com/>.

46. Farnell / Electronic Component Distributors / Suppliers / Electronics, Electrical Parts, Electrical Components and Wholesale Electronics. [Online] 2012. [Citace: 1. 6 2012.] <http://farnell.com/>.
47. *GM electronic - Největší obchod s elektronikou.* [Online] 2012. [Citace: 1. 6 2012.] <http://www.gme.cz/>.
48. *PV Electronic.* [Online] 2012. [Citace: 1. 6 2012.] <http://www.pvelectronic.eu/>.
49. AJ Technology s.r.o. - Návrh, výroba, osazování desek plošných spojů. [Online] 2012. [Citace: 2. 6 2012.] <http://ajtechnology.cz/index.html>.
50. CMSIS - Cortex Microcontroller Software Interface Standard - ARM. *ARM - The Architecture For The Digital World.* [Online] 2012. [Citace: 1. 6 2012.] <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-microcontroller-software-interface-standard.php>.
51. Keil Embedded Development Tools for ARM, Cortex-M, Cortex-R4, 8051, C166, and 251 processor families. *MDK-ARM Primer: CMSIS Overview.* [Online] 2012. [Citace: 1. 6 2012.] http://www.keil.com/support/man/docs/gsac/gsac_cmsisoverview.htm.
52. Microcontrollers and compiler tool chains supported by FreeRTOS. *FreeRTOS-A Free professional grade RTOS supporting 31 architectures.* [Online] 20. 3 2012. [Citace: 1. 5 2012.] http://www.freertos.org/RTOS_ports.html.
53. **Barry, Richard.** *Using the FreeRTOS Real Time Kernel - NXP LPC17xx Edition.* 2010. 978-1-4457-4664-7.
54. Tasks and Co-routines. *FreeRTOS-A Free professional grade RTOS supporting 31 architectures.* [Online] 20. 3 2012. [Citace: 1. 5 2012.] <http://www.freertos.org/taskandcr.html>.
55. LPC17xx user manual. *NXP Semiconductors.* [Online] 19. 8 2010. [Citace: 1. 5 2012.] http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10360.pdf.
56. FreeRTOS-MPU Specific Functions. *FreeRTOS - A FREE Open Source RTOS.* [Online] 29. 4 2012. [Citace: 1. 5 2012.] <http://www.freertos.org/FreeRTOS-MPU-specific.html>.

57. **Jensen, E.Douglas.** Hard and Soft Real-Time | Real-Time for the Real World. *E.Douglas Jensen's Real-Time for the Real World*. [Online] 14. 1 2010. [Citace: 1. 5 2012.] <http://www.real-time.org/real-time/hard-and-soft-real-time.html>.
58. RTOS - Realtime Operating System for Embedded Systems - SafeRTOS, OpenRTO. [Online] WA&S Ltd, 2012. [Citace: 1. 5 2012.] <http://www.openrtos.com/>.
59. SafeRTOS. *FreeRTOS - Free professional grade RTOS supporting 31 microcontroller architectures*. [Online] 29. 4 2012. [Citace: 1. 5 2012.] http://www.freertos.org/FreeRTOS-Plus/Safety_Critical_Certified/SafeRTOS.shtml.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ADC	Analog-Digital Converter
AHB	Advanced High-performance Bus
AMOLED	Active Matrix Organic Light Emitting Diode
APB	Advanced Peripheral Bus
API	Application Programming Interface
ARM	Advanced RISC Machine
BGA	Ball Grid Array
CAN	Controller Area Network
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard
DAC	Digital-Analog Converter
DMA	Direct Memory Access
DMIPS	Dhrystone Million Instructions Per Second
DPS	Deska Plošného Spoje
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EMI	Electromagnetic Interference
FIFO	First-In First-Out
GNU	GNU's Not Unix
GPDMA	General Purpose Direct Memory Access
GPIO	General Purpose Input Output
GPL	General Public Licence
HAL	Hot Air Leveling
I2C	Inter-Integrated Circuit
I2S	Integrated Interchip Sound
IDE	Integrated Development Enviroment
ISP	In-System Programming
ISR	Interrupt Service Routine
JTAG	Joint Test Action Group
LED	Light Emitting Diode
MAC	Media Access Control
MCU	Microcontroller Unit
MII	Media Independent Interface
NVIC	Nested Vectored Interrupt Controller
OEM	Original Equipment Manufacturer
OLED	Organic Light Emitting Diode
OTG	On-The Go
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PLL	Phase Locked Loop
PWM	Pulse-Width Modulation
RMII	Reduced Media Independent Interface
ROM	Read Only Memory
RTC	Real Time Clock
RTOS	Real-Time Operating System
SMD	Surface Mount Device

SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
SSP	Synchronous Serial Port
THD	Total Harmonic Distortion
TTL	Transistor-Transistor Logic
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
YAGARTO	Yet Another GNU ARM Toolchain

SEZNAM PŘÍLOH

Všechny přílohy k této bakalářské práci jsou umístěny v elektronické podobě na doprovodném CD.