VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH ANALOGOVÉHO SLOUPCOVÉHO UKAZATELE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE LUKÁŠ JANÍK
AUTHOR

BRNO 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH ANALOGOVÉHO SLOUPCOVÉHO UKAZATELE

DESIGN OF AN ANALOGUE BAR GRAPH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE LUKÁŠ JANÍK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. VIERA BIOLKOVÁ
SUPERVISOR

BRNO 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student:	Lukáš Janík	***ID:***	147650
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Návrh analogového sloupcového ukazatele

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Shromážděte požadavky na provedení a funkční vlastnosti analogového sloupcového ukazatele. Prostudujte dostupnou součástkovou základnu pro uvedený účel se současným uvážením možností napájení. Navrhněte schéma zapojení včetně zdůvodnění volby hodnot všech součástek. Zařízení realizujte.

Zařízení oživte do zcela funkčního stavu. Měřením ověřte funkčnost na všech rozsazích, otestujte všechny funkce a ověřte délku provozu na akumulátor. Sestavte uživatelský návod a stanovte požadavky na nastavení, kontrolu a údržbu zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WEBSTER, J. G. Bioinstrumentation. New York: J. Wiley & Sons, 2004.

[2] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektronice. Praha: BEN, 1999.

Termín zadání:	10.2.2014	***Termín odevzdání:***	30.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Viera Biolková
Konzultanti bakalářské práce: Dr. Ing. Vlastimil Vondra

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem bateriově napájeného analogového sloupcového ukazatele (bargrafu) pro signalizaci pomalých signálů. Bargraf bude nasazen v mezinárodním centru klinického výzkumu (ICRC) Fakultní nemocnice u sv. Anny a je určen k experimentálnímu měření rychlosti proudění vzduchu a tlaku v dýchacích cestách, jako součást systému řízeného dýchání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bargraf, Zpracování signálu

ABSTRACT

This thesis deals with the design of battery powered analogue bar graph for slow signals signalization. This device will serve in International Clinical Research Center of St. Anne's University Hospital in Brno and is determinated for experimental measurements of airflow and pressure in respiratory system, as a part of controlled breathing system

KEYWORDS

Bargraph, Signal processing

JANÍK, Lukáš *Návrh analogového sloupcového ukazatele*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2014. 58 s. Vedoucí práce byl Ing. Viera Biolková,

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh analogového sloupcového ukazatele“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, paní Ing. Vieře Biolkové, za umožnění práce na projektu, a odbornému konzultantovi, Dr. Ing. Vlastimilu Vondrovi, za metodické vedení, cenné rady a trpělivost při práci na projektu.

Brno ....

(podpis autora)

OBSAH

1 Úvod **10**

2 Řešení studentské práce **11**

2.1 Požadavky na zařízení 11
2.2 Rozbor řešení a volba konceptu 12
2.3 Návrh zapojení 14
2.3.1 Výběr mikrokontroléru 15
2.3.2 Vstupní obvody 17
2.3.3 Obvody napájení 19
2.3.4 Obvody zobrazovače 20
2.3.5 Obvody mikrokontroléru 22
2.3.6 Ovládací prvky 23
2.4 Návrh desky plošných spojů 24
2.5 Úpravy krabičky 24
2.6 Návrh Software 24
2.6.1 I^2C sběrnice 25
2.6.2 MCP23017 25
2.6.3 Inicializace 26
2.6.4 Přepočet naměřené hodnoty 26
2.7 Obnovovací frekvence bargrafu 27

3 Výsledky měření **30**

3.1 Úvod 30
3.2 Měření převodní charakteristiky 30
3.2.1 Postup měření 30
3.2.2 Naměřené hodnoty 31
3.3 Měření výdrže baterie 32
3.4 Použité měřicí přístroje 33

4 Uživatelská příručka **34**

4.1 Ovládací prvky 34
4.2 Zapnutí přístroje 34
4.3 Volba rozsahu 35
4.4 Volba polarity 35
4.5 Volba typu zobrazení 35
4.6 Nabíjení přístroje 35
4.7 Údržba přístroje 36

4.8 Specifikace bargrafu 36

5 Závěr **37**

Literatura **38**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **39**

Seznam příloh **41**

A Podklady pro výrobu **42**

A.1 Výkresy 42

A.2 Vývojový diagram 44

A.3 Mapování portů 45

A.4 Schéma zapojení a vzory pro DPS 45

A.4.1 Původní verze 45

A.4.2 Nová verze 49

A.5 Seznam součástek 52

B Zdrojový kód **53**

C Naměřené hodnoty **54**

D Foto realizace **55**

D.1 Osazené DPS 55

D.2 Hotové zařízení 57

SEZNAM OBRÁZKŮ

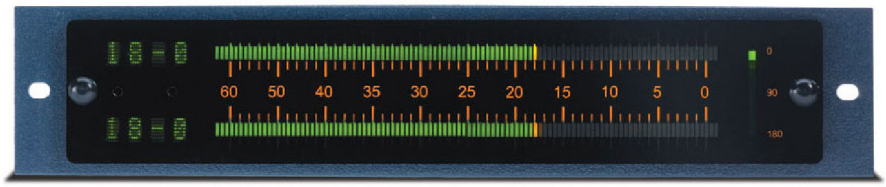
1.1 Bargraf jako VU metr
zdroj: http://www.tslproducts.com/wp-content/uploads/2013/05/bbg-1.jpg . . . 10
2.1 Různé způsoby zobrazení stejné hodnoty. a) symetricky bod, sloupec b) asymetricky bod, sloupec . . . 11
2.2 Bargraf realizovaný pomocí OZ . . . 12
2.3 Blokové schéma obvodu LM3914 . . . 13
2.4 Blokové schéma bargrafu . . . 15
2.5 ATmega8 v pouzdře PDIP28 a TQFP32 . . . 17
2.6 Obvod kontroly vybití baterie . . . 19
2.7 Zapojení jednoho řádku zobrazovače . . . 21
2.8 Zapojení regulace jasu . . . 22
2.9 SLA+W byte . . . 25
2.10 Časový diagram komunikace s jedním expandérem . . . 28
2.11 Vztah mezi obnovovací frekvencí bargrafu a vstupním signálem . . . 29
3.1 Schéma zapojení pro měření převodní charakteristiky . . . 31
3.2 Převodní charakteristika pro unipolární signál . . . 32
3.3 Převodní charakteristika pro bipolární signál . . . 32
4.1 Ovládací a signalizační prvky bargrafu . . . 34
A.1 Tvar DPS včetně osazení LED modulů . . . 42
A.2 Horní pohled na přístrojovou krabici . . . 43
A.3 Vývojový diagram programu . . . 44
A.4 Mapování portů expandérů a MCU na zobrazovač . . . 45
D.1 zobrazovací deska (strana bottom) . . . 55
D.2 řídící deska (strana top) . . . 55
D.3 řídící deska (strana bottom) . . . 56
D.4 Pohled zepředu . . . 57
D.5 Detail horního panelu . . . 58

SEZNAM TABULEK

2.1 Porovnání navrhovaných řešení 14
2.2 Základní srovnání procesorů AVR Tiny a AVR Mega 15
2.3 Napěťové kroky a odpovídající maximální strmosti dle rozsahu 29
3.1 Specifikace generátoru HP33120A 33
3.2 Specifikace multimetru UT39C 33
4.1 Specifikace bargrafu 36
A.1 Seznam součástek 52
C.1 Tabulka naměřených hodnot pro převodní charakteristiku 54

1 ÚVOD

Sloupcový ukazatel (anglicky bar graph, dále bargraf) je zařízení, sloužící k indikaci úrovně měřené veličiny pomocí výšky sloupce, tento sloupec je obvykle tvořen několika LED diodami, umístěnými nad sebou, nebo vedle sebe. S bargrafy se typicky setkáváme v audio zařízeních, kde slouží jako VU metr (indikují vybuzení výstupních kanálů).



Obr. 1.1: Bargraf jako VU metr
zdroj: http://www.tslproducts.com/wp-content/uploads/2013/05/bbg-1.jpg

Tato práce se zabývá návrhem bateriově napájeného bargrafu pro zobrazení pomalých průběhů. Toto zařízení bude nasazeno v mezinárodním centru klinického výzkumu (ICRC) Fakultní nemocnice u sv. Anny a je určeno k experimentálnímu měření proudu vzduchu a tlaku v dýchacích cestách, jako součást systému řízeného dýchání. Signály, zpracovávané bargrafem, budou generovány snímačem tlaku, případně generátorem, a nejsou součástí návrhu.

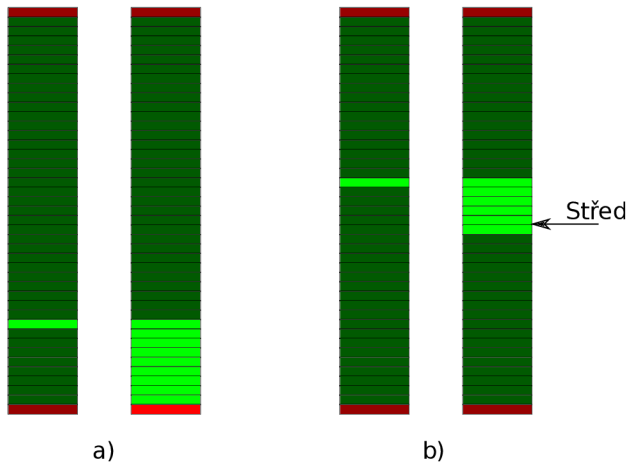
V současné době jsou tato měření realizována pomocí dvou přístrojů - sloupcového ukazatele, jenž generuje a zobrazuje signál pro řízeného dýchání, a ručkového ukazatele, signalizujícího měřenou veličinu. Navrhované zařízení zjednoduší a zefektivní současný postup měření. Při návrhu bude kladen důraz na zřetelnost signalizace, jednoduchost obsluhy a robustnost zařízení. Zařízení nesmí ovlivňovat měřený obvod (musí mít vysokou vstupní impedanci)

2 ŘEŠENÍ STUDENTSKÉ PRÁCE

2.1 Požadavky na zařízení

Při návrhu bargrafu nás bude zajímat zejména rozsah vstupního napětí, způsob prezentace měřené úrovně napětí a množství zobrazovacích prvků (řádků). Navrhované zařízení bude napájeno z šestičlánkové baterie typu NiMh o celkové kapacitě 3700mAh a jmenovitém výstupním napětí 7,2V. Bude zpracovávat napětí se symetrickou a asymetrickou polarizací o velikosti 0-1V, 0-10V, ±1V, ±10V a bude zabudováno v předem určené přístrojové krabici. V krabici je předem vytvořen otvor na 40 řádkových LED modulů od firmy Kingbright (4 obdélníkové LED diody vedle sebe, ve společném pouzdře). Další úpravy krabice budou řešeny v rámci této práce. Zařízení musí být kompatibilní se současnými napájecími adaptéry.

Na rozdíl od VU metru, zobrazujícího měřenou veličinu zintegrovanou s určitou časovou konstantou, bude navrhovaný bargraf zobrazovat vždy aktuální hodnotu a to buď rozsvícením příslušného řádku (zobrazení typu bod), případně rozsvícením sloupce, s vrcholem v odpovídajícím řádku a počátkem v počátku stupnice při asymetrickém signálu, nebo s počátkem v polovině stupnice při symetrickém signálu (zobrazení typu sloupec). Rozdíl mezi typy zobrazení je patrný z obrázku 2.1.



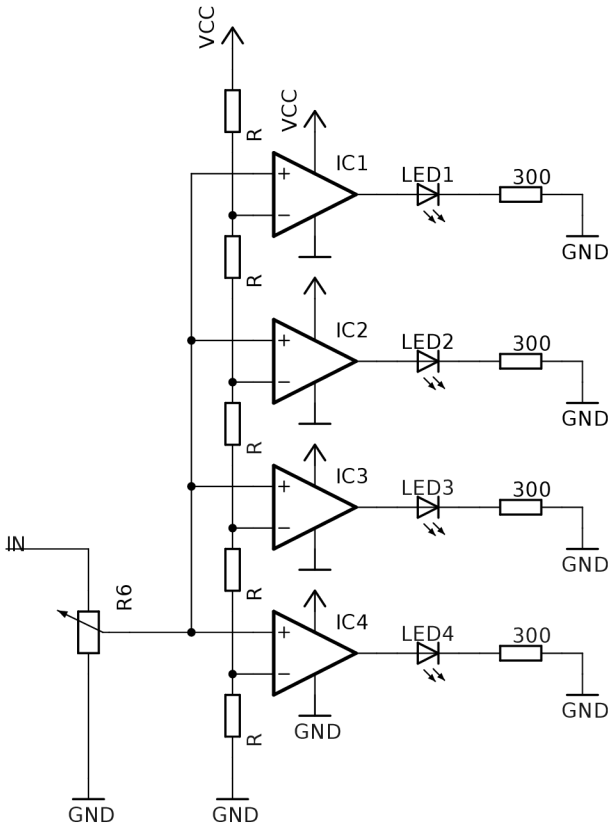
Obr. 2.1: Různé způsoby zobrazení stejné hodnoty. a) symetricky bod, sloupec b) asymetricky bod, sloupec

Pomocí ovládacích prvků na zařízení, by obsluha měla být schopna vypnout a zapnout zařízení, zvolit si rozsah (1V / 10V), zvolit typ zobrazení (bod / sloupec) a polaritu vstupního signálu (symetrický / nesymetrický).

2.2 Rozbor řešení a volba konceptu

Vzhledem k rozměrům zobrazovacího LED sloupce a krabičky (cca 20cm x 8cm), bude třeba rozdělit návrh na 2 DPS, přičemž první DPS bude obsahovat zobrazovací jednotku a druhá DPS řídicí obvody. Při návrhu bargrafu lze vycházet z několika řešení, v následujícím textu se zmíním o třech základních.

Prvním z možných řešení je pole operačních zesilovačů (komparátorů) - obr. 2.2



Obr. 2.2: Bargraf realizovaný pomocí OZ

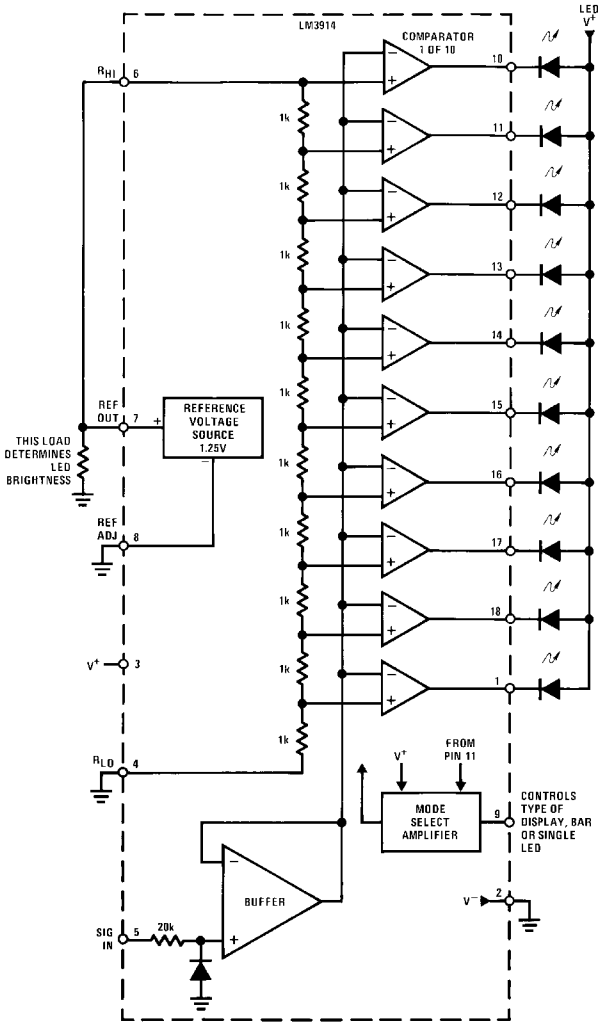
Úroveň vstupního napětí je upravena potenciometrem R6, zeslabený signál je přiváděn na neinvertující vstupy operačních zesilovačů. Na invertující vstupy dílčích OZ je přivedeno rozhodovací napětí. Úroveň rozhodovacího napětí je obvykle determinována odporovým děličem, tento dělič rozdělí napájecí (referenční) napětí na N rozhodovacích napětí, N značí počet operačních zesilovačů. Pokud mají všechny rezistory děliče stejný odpor R, napětí bude rovnoměrně rozděleno. Rozhodovací napětí na m-tém OZ od spodu lze potom vyjádřit dle vztahu (2.2)

$$U_2 = U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \; [V] \tag{2.1}$$

$$U_R = U_{CC} * \frac{m * R}{(N - m - 1) * R} \, [V] \tag{2.2}$$

V tomto provedení je třeba tolik OZ, kolik je zobrazovacích řádků. Použitím výše uvedeného schématu dosáhneme zobrazení typu sloupec, realizace takového zapojení by byla vhodná zejména při použití malého počtu řádků (max 10), s množstvím operačních zesilovačů rostou nároky na složitost DPS. Pro použití v navrhovaném zařízení by bylo třeba obvodově zajistit rozsvícení pouze jedné led diody při použití zobrazení typu bod a zhasnutí dolních diod při zobrazování signálu se zápornou hodnotou napětí na symetrickém rozsahu.

Druhou variantou je použití specializovaného integrovaného obvodu (např. LM3914 firmy Texas Instruments). Tento monolitický integrovaný obvod je přímo určen k lineárnímu převodu hodnoty napětí na sloupec, z blokového schématu na obr. 2.3 je zřejmé, že principiálně vychází z prvního zapojení.



Obr. 2.3: Blokové schéma obvodu LM3914

Navíc umožňuje volbu mezi zobrazením bod / sloupec, má integrovanou napěťovou referenci, nastavitelný výstupní proud a lze řetězit a dosáhnout tak zobrazení až na 100 řádků. Toto řešení díky integraci na jeden čip značně usnadňuje návrh desky, stejně jako první varianta však neumožňuje zobrazení sloupce při symetrickém napájení (sloupec, vycházející ze středu bargrafu).

Třetí varianta používá pro výsledné zpracování mikrokontrolér (MCU). Tento mikrokontrolér je klíčový pro celé zařízení a stará se o zpracování dat z řídících prvků, vzorkování vstupního signálu, přepočet hodnoty tohoto signálu na sloupec dle vybraných parametrů (sym/nesym, bod/sloupec, ...), rozsvícení příslušných řádků zobrazovače a případnou změnu jasu zobrazovače. Použití mikrokontroléru redukuje celkový počet součástek a přesunuje značnou část návrhu do SW (softwarové) oblasti, díky tomu jsme schopni přidat další užitečné funkce, například test zobrazovače po zapnutí zařízení případně měnit základní funkce bargrafu bez zásahu do zapojení. Jedná se zejména o kalibraci a způsob prezentování naměřených hodnot. Zavedením digitálního prvku dojde zcela jistě ke zpoždění, způsobenému digitalizací a výpočty. Vzhledem k vysoké taktovací frekvenci dnešních MCU (1MHz a výše), pomalému průběhu měřených signálů (do 3Hz) a velké setrvačnosti lidského oka (video standard PAL má snímkovou frekvenci 25fps), nebude toto zpoždění nijak ovlivňovat měření a nebude okem postřehnutelné.

Tab. 2.1: Porovnání navrhovaných řešení

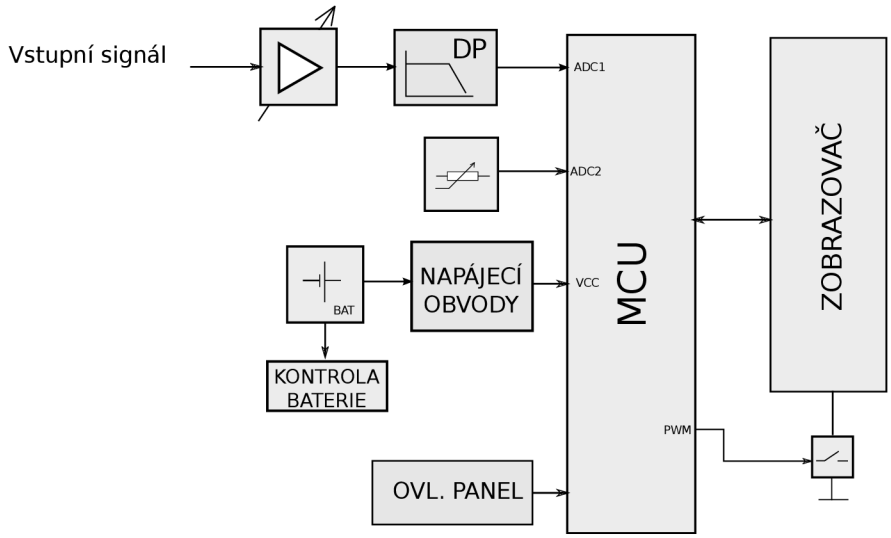
Provedení	*Zpoždění*	*Množství součástek*	*Modifikovatelnost*
Pole OZ	řádově ns	velké	úpravou HW
Integrované	řádově ns	střední	úpravou HW
s MCU	řádově ms	malé	softwarová

Bez ohledu na zvolenou variantu, vzhledem k poměrně nízkému napájecímu napětí (7,2 - 6V), nelze přímo zpracovávat signály na rozsahu 10V, proto by měly vstupní obvody snížit amplitudu měřeného napětí a přizpůsobit je pro další zpracování.

Jako výchozí variantu jsem pro poměrně velký počet zobrazovacích jednotek, komplexnost a budoucí modifikovatelnost bez zásahu do hardwaru, zvolil třetí variantu. Tato varianta nám rovněž umožní například změnu přenosové charakteristiky na logaritmickou, bez zásahu do hardwaru zařízení.

2.3 Návrh zapojení

Blokové schéma navrhovaného bargrafu je na obr.2.4.



Obr. 2.4: Blokové schéma bargrafu

Vstupní signál je přiveden přes nastavitelný zesilovač a dolní propust do AD převodníku mikrokontroléru. Na druhý AD převodník je připojen potenciometr pro volbu jasu, potenciometrem budeme volit napětí od 0V do referenčního napětí mikrokontroléru. Naměřená hodnota bude softwarově zpracována a převedena na PWM výstup. Kontrola baterie bude fungovat nezávisle na mikrokontroléru.

2.3.1 Výběr mikrokontroléru

Na trhu je v současné době na výběr z mnoha mikrokontrolérů, nejznámější jsou pravděpodobně platformy PIC výrobce Microchip Technology a AVR konkurenční firmy Atmel. Díky několika zkušenostem s procesory od firmy Atmel a možnosti programovat tyto procesory bez dalších nákladů na programátor (vlastním AVR Dragon) a vývojové prostředí, jsem se dále soustředil na platformu AVR, konkrétně řadu AVR Tiny a AVR Mega.

Tab. 2.2: Základní srovnání procesorů AVR Tiny a AVR Mega

Procesor	Pam. flash	Poč. výv.	Frekvence	Periferie
AVR Tiny	0.5-8KB	6-32	až 20MHz	omezená sada
AVR Mega	4-256KB	28-100	až 20MHz	plná sada

Procesory řady AVR Tiny jsou určeny pro nenáročné aplikace, kde je kladen důraz na jednoduchost a velikost, disponují oproti AVR Mega menším paměťovým prostorem, jsou ochuzeny o některé instrukce (násobení) a periferie. Oproti tomu

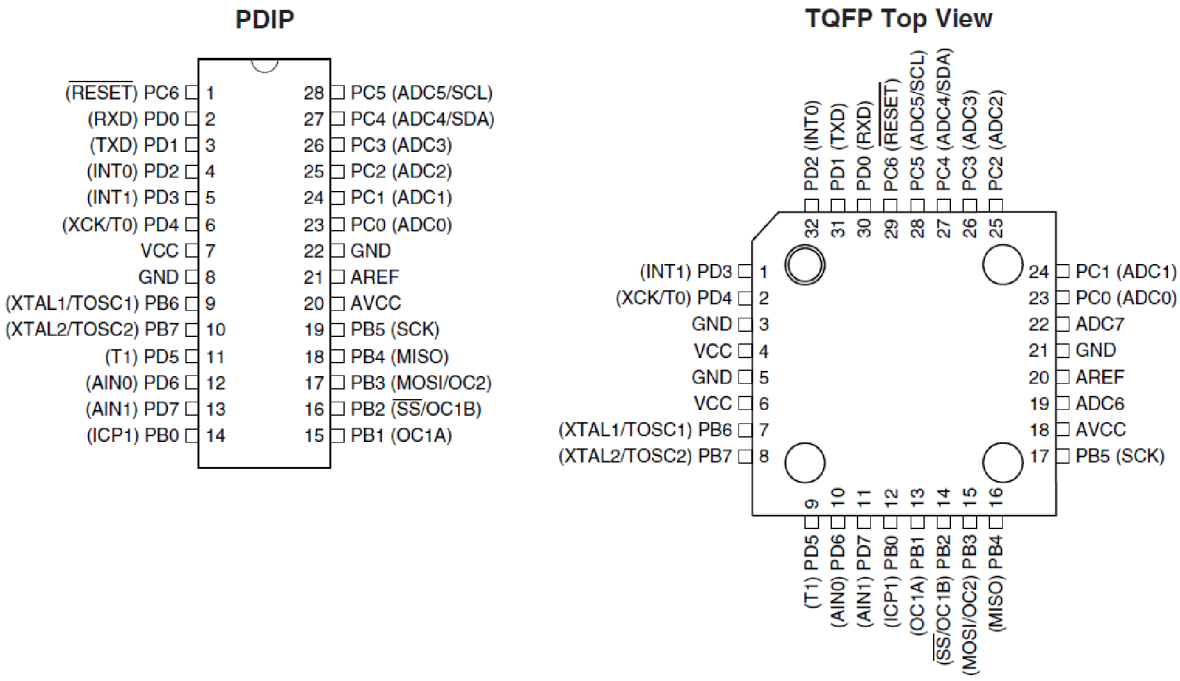
AVR Mega je vybavena větší pamětí a širším spektrem periferií, je připravena pracovat ve složitějších zařízeních a s obsáhlejším kódem. Oba zmiňované procesory mají 10 bitové ADC, což odpovídá napětí 4,88mV na jeden bit, při referenci 5V. To je pro naše zařízení zcela dostačující, s touto citlivostí bychom teoreticky na 40 sloupců rozdělili rozsah 0-195mV.

Před výběrem konkrétního čipu je třeba se zamyslet nad koncepcí zobrazovací části - potřebujeme nezávisle obsluhovat 40 zobrazovacích jednotek. Toho můžeme dosáhnout několika způsoby:

- MCU s velkým počtem výstupních portů
- MCU s menším počtem portů, multiplex např. 4 segmentů po 10 diodách
- MCU s menším počtem portů, přes sériovou sběrnici připojen obvod s velkým počtem výstupních portů (port expandér, posuvný registr)

První případ se jeví z pohledu odezvy jako nejlepší, data jsou po digitalizaci a přepočtu okamžitě odeslána k zobrazení. Nevýhodou je však vyšší cena čipu a velké množství vodivých cest na DPS, soustředěných do jednoho místa. Tento nedostatek je částečně vykompenzován druhým řešením, kdy z MCU vede pouze 10 datových a 4 adresní cesty (tj. méně než polovina původního), obnovovací frekvence celého zobrazovače však klesne na 1/4 původní, v jednu dobu bude svítit pouze jeden segment. Dále se budeme zabývat třetí variantou, protože přináší přijatelnou obnovovací frekvenci a zároveň nejmenší nároky na počet pinů procesoru.

Všechny požadavky na přesnost a počet AD převodníků, množství IO portů a spotřebu splňuje procesor Atmel ATmega8. Tento procesor disponuje 8KB programové paměti typu flash, 512B EEPROM a 1KB SRAM. Vyniká velkým množstvím periferií při zachování nízké spotřeby (cca 1.6mA). Nás zajímá zejména 10b ADC, připojený k 8 kanálovému multiplexoru, přítomnost rozhraní SPI a TWI a 3 PWM kanály. Je k dispozici ve vývodovém (PDIP 28) i SMD (TQFP 32, MLF) provedení. Každý pin procesoru má většinou několik funkcí - IO pin, případně speciální funkce (ADC, PWM, ...).



Obr. 2.5: ATmega8 v pouzdře PDIP28 a TQFP32

V naší aplikaci si neklademe požadavky na vysokou přesnost měření, nejnižší potřebný kvantovací krok ADC je při měření na rozsahu 1V s asymetrickou polarizací, zde požadujeme inkrementaci stupnice o 1, pokud se vstupní napětí zvýší o 1/40 V, což činí 25mV. Kvantovací krok AD převodníku mikrokontroléru určíme dle vztahu (2.4), dosazením za ADC=1 a V_{REF}=5V:

$$ADC = \frac{V_{IN} * 1024}{V_{REF}} \tag{2.3}$$

$$V_{IN} = \frac{ADC * V_{REF}}{1024} = \frac{5}{1024} = 4,883mV \tag{2.4}$$

2.3.2 Vstupní obvody

Přiváděný signál má špičkovou hodnotu 10V, tato hodnota převyšuje napájecí napětí, není proto možné vstupní signál zpracovávat přímo. Tento problém lze jednoduše vyřešit použitím děliče s vhodným dělícím poměrem. Zvolením dělicího poměru 1:10 elegantně sjednotíme signál z obou rozsahů. Je třeba mít na paměti, že rezistory, tvořící vstupní dělič, jsou paralelně připojeny k měřenému zařízení. Proto odpor sériové kombinace těchto rezistorů je přímo roven vstupnímu odporu našeho zařízení a je proto žádoucí, aby tato hodnota byla co nejvyšší (není třeba přizpůsobovat k vedení). Hodnotu většího z rezistorů jsem zvolil 1MΩ. Dosadíme-li do vztahu pro

odporový dělič za $U_2 = \frac{U_1}{10}$, vypočítáme hodnotu rezistoru R_2 dle vztahu (2.7).

$$U_2 = U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow \frac{U_1}{10} = U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{2.5}$$

$$R_1 + R_2 = 10R_2 \tag{2.6}$$

$$R_2 = \frac{R_1}{9} = \frac{1 * 10^6}{9} = 111,\overline{11}k\Omega \tag{2.7}$$

Na nižším rozsahu budeme měřit přímo, zatímco při měření na vyšším rozsahu vydělíme signál v poměru 1:10. Ze signálu 0-10V, případně ±10V po průchodu děličem tedy dostaneme signál o napětí 0-1V, resp. ±1V. Změnu rozsahů zajistíme přepínačem, nebo pomocí relé typu SPDT. Klasické relé by způsobovalo značný nárůst spotřeby, bylo by vhodné použít bistabilní relé - toto relé má oba dva překlápěné stavy stabilní, odebírá proud pouze při přepínání. Pokud bude použito relé, bude řízeno mikrokontrolérem, a to buď automaticky, nebo na podnět z ovládacího tlačítka. V návrhu DPS budou obě tyto varianty, osazena bude však pouze jedna. Nyní jsme schopni vybrat mezi přímým připojením vstupního signálu (rozsah ±1V), a připojením signálu zeslabeného 10x (rozsah ±10V).

AD převodníkem kontroléru jsme schopni změřit pouze signál s kladnou polaritou. Z tohoto důvodu bude vhodné ke vstupnímu napětí přičíst stejnosměrné (ofsetové) napětí o takové velikosti, aby při maximální záporné hodnotě vstupního napětí bylo výsledné napětí větší nebo rovno nule. Toto ofsetové napětí by přitom mělo být co nejpřesnější (přesnost vyšší, než napěťový krok na nejmenším rozsahu, tedy 25mV) a časově stálé, aby nedocházelo k „plavání“ výsledného součtu. Jako přesný a časově stálý zdroj napětí lze použít reference, stabilita jejich výstupního napětí je obvykle závislá na zatížení, z tohoto důvodu je vhodné za referenci zapojit operační zesilovač jako sledovač napětí.

Za děličem bude dvojice rychlých diod, zapojených do série mezi zem, vstupní signál a napájení. Tyto diody zajistí ochranu před přepětím. Za přepěťovou ochranu bude zařazen dolnopropustní RC filtr. Tento filtr má za úkol odfiltrovat nežádoucí vyšší frekvence namodulované na vstupní signál. Zvolením rezistoru $R = 100k\Omega$ a mezní frekvence filtru $f_m = 30Hz$ lze úpravou základního vztahu pro výpočet mezní frekvence RC filtru vypočítat hodnotu potřebného kapacitoru C ze vztahu (2.9).

$$f_m = \frac{1}{R * C}\ [Hz] \tag{2.8}$$

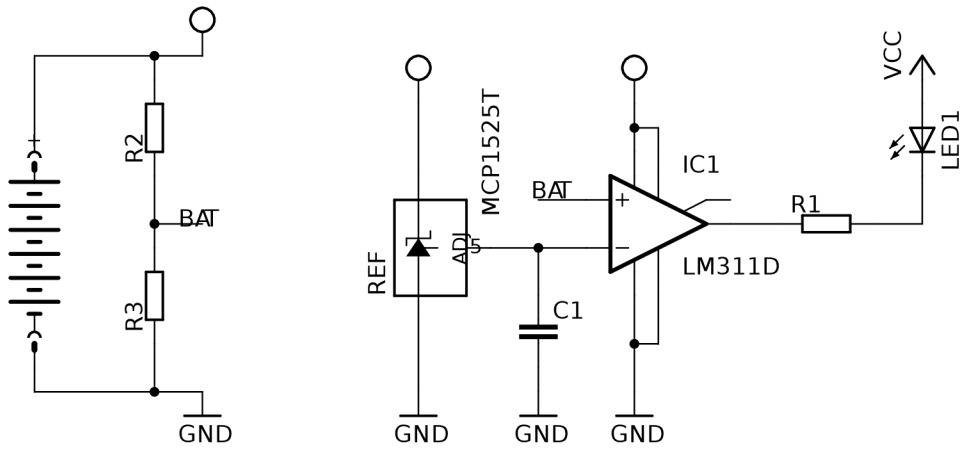
$$C = \frac{1}{f_m * R} = \frac{1}{30 * 100 * 10^3} = 333nF \tag{2.9}$$

Frekvence 30Hz je dostačující pro potlačení síťového kmitočtu 50Hz (asi o 20dB).

2.3.3 Obvody napájení

Bargraf bude napájen z 6 článkové Ni-Mh baterie o celkovém jmenovitém napětí 7,2V. Napětí jednoho vybitého článku činí 1,0V, celá baterie bude mít tedy ve vybitém stavu napětí 6V. Použitý mikrokontrolér pracuje s napájecím napětím 5V, proto bude třeba napětí z baterie snížit vhodným měničem. Tento měnič bude zatížen pouze mikrokontrolérem, operačními zesilovači a expandéry. Odhadovaný celkový odběr této větve je do 20mA (mikrokontrolér dle výrobce cca 5mA, expandéry celkem 2mA, stavová dioda 10mA), použitím lineárního měniče by tedy nemělo docházet k velkým ztrátám. Abychom z baterie dostali co nejvíce energie, musíme využít celého rozsahu napětí, tedy od 7,2V v plně nabitém stavu, do 6V ve vybitém stavu. Budeme tedy hledat tzv. LDO stabilizátor (stabilizátor s malým úbytkem), z tohoto důvodu není možné použít oblíbený stabilizátor řady 78xx (7805) s minimálním úbytkem 2V. V návrhu je použit stabilizátor LF50CDT od firmy ST Microelectronics, jeho minimální úbytek napětí činí 450mV. Stabilizátor má dle doporuční výrobce připojenou kapacitu o velikosti 100nF na vstupních svorkách a $10\mu F$ na výstupních svorkách. Za stabilizátorem je LED dioda zelené barvy, signalizující, že je zařízení zapnuto. Předřadným odporem velikosti 470Ω je nastaven proud diodou na 6mA.

Pro lepší údržbu bude zařízení opatřeno signalizací vybité baterie blikající LED diodou. Tato signalizace lze realizovat buď pomocí mikrokontroléru, využitím jeho komparátoru, případně AD převodníku, nebo externím komparátorem a samo-blikající LED diodou (odpadá návrh blikače). Dále se budeme zabývat druhou variantou, kontrola baterie bude naprosto nezávislá na ostatních obvodech. Zapojení je na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Obvod kontroly vybití baterie

Komparátorem IC1 (LM311 od firmy Texas Instruments) porovnáváme napětí

na 2,5V referenci REF (MCP125TT od firmy Microchip), vyfiltrované kapacitorem C1 (dle výrobce $1\mu F - 10\mu F$) a napětí odvozené z děliče na baterii. Chceme, aby dioda začala blikat při napětí cca 6V, při tomto napětí tedy musí být na výstupu děliče stejné napětí, jako na referenci, tj. 2.5V. Dělicí poměr je roven

$$D = \frac{6}{2,5} = 2,4 \tag{2.10}$$

Dosazením do vztahu pro odporový dělič (2.2) za $\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{2,4}$ a zvolením odporu horního rezistoru $R_1 = 12k$, dostaneme vztah (2.12).

$$U_2 = U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow \frac{1}{2,4} = \frac{R_2}{12 * 10^3 + R_2} \tag{2.11}$$

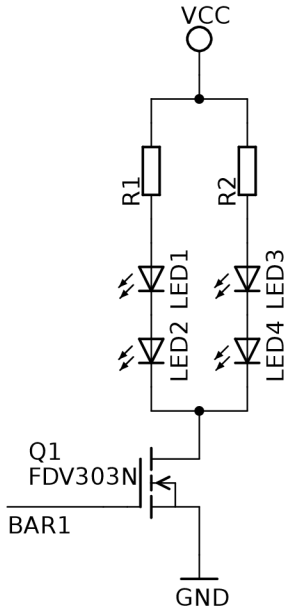
$$R_2 = \frac{\frac{1}{2,4} * 12 * 10^3}{1 - \frac{1}{2,4}} = 8571,4\Omega \tag{2.12}$$

Výběrem rezistoru z řady E24 8,2$k\Omega$ se změní dělicí poměr na 2,47, dioda tedy začne blikat na napětí cca 6.15V, což je přijatelné, dioda začne signalizovat vybitou baterii o 0,15V dříve.

Zařízení bude opatřeno souosým nabíjecím konektorem, zapínání a vypínání zařízení bude realizováno přepínačem typu SPDT. Přepínačem se bude přepínat výstup baterie, ten se spojí buď s napájením zařízení, nebo s nabíjecím konektorem. Nemůže tedy dojít k poškození zařízení vlivem připojení vysokého nabíjecího napětí.

2.3.4 Obvody zobrazovače

Jedním z požadavků zadávajícího bylo použití již zakoupených LED modulů od firmy Kingbright o rozměrech 5x22mm a svítivosti 5-10mcd při jmenovitém proudu 10mA. Diody v prvním a posledním řádku ukazatele budou mít červenou barvu ($U_P = 2V$), signalizující maximální a minimální úroveň. Ostatní moduly budou zelené barvy ($U_P = 2,2V$). Diody v rámci jednoho řádku budou řazeny sérioparalelně po dvou.



Obr. 2.7: Zapojení jednoho řádku zobrazovače

Rozsvěcovány budou unipolárním tranzistorem typu MOSFET-N. Kvůli velkému počtu těchto tranzistorů (1 na řádek, celkem tedy 40), je třeba zvolit kompromis mezi cenou a odporem v sepnutém stavu (R_{DSon}). Vyhovující je např. tranzistor FDV303N od výrobce Fairchild Semiconductor s $R_{DSon} = 450m\Omega$ při $U_{GS} = 4,5V$. Dle vztahu (2.13) jsme schopni vypočítat ztrátový výkon na spínacím tranzistoru na jeden řádek zobrazovače.

$$P_{ZTR} = R * I^2 = R_{DSon} * I_{LED}^2 = 0,45 * (10 * 10^{-3})^2 = 45\mu W \tag{2.13}$$

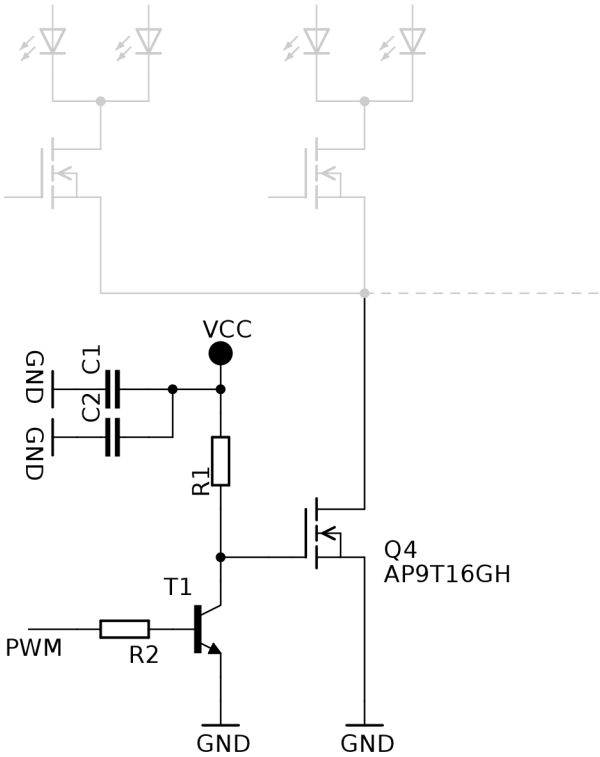
S takto nízkým ztrátovým výkonem jsme s přehledem schopni použít pouzdro SOT-23. Díky nízkému prahovému napětí jsme schopni budit tento tranzistor přímo z výstupu expandéru.Rezistory R1 a R2 nastavují proud diodami. Pro nominální proud 10mA bude jejich hodnota rovna:

$$R = \frac{U_{NAP} - 2 * U_D}{I_D} = \frac{7,2 - (2 * 2,2)}{10 * 10^{-3}} = 280 \approx 300\Omega \tag{2.14}$$

Základní princip zobrazení je probrán výše, v kap. 2.3.1. Rozhodl jsem se pro použití dvou 16 bitových I^2C expandérů MCP23017 od firmy Microchip, zbývajících 8 bitů bude zobrazováno přímo z mikrokontroléru. Na rozdíl od varianty s přímým multiplexováním 4 segmentů po 10 řádcích, zůstává při použití expandérů zobrazena jedna hodnota a to až do přepsání jinou hodnotou, nebude tedy docházet k blikání obrazu.

Regulace jasu bude jako doplněk realizována PWM modulací. Spojíme-li hradla „source“ všech řádkových tranzistorů a tyto přivedeme do „drainu“ výkonového tranzistoru, buzeného signálem s pulzně šířkovou modulací, měli bychom měnit střední

hodnotu proudu rozsvícenými diodami a tedy i svítivost a celkovou spotřebu zařízení. Mějme na paměti, že tímto tranzistorem poteče součtový proud všech zobrazovačů (špičkově cca 0,8A), pokud by tranzistor měl velký odpor v sepnutém stavu, vznikal by na něm velký ztrátový výkon. Zároveň by se v důsledku velkého úbytku napětí U_{DS} snižovalo napětí U_{GS} řádkových tranzistorů, čímž by docházelo k uzavírání hradel a zvyšování R_{DSon}. Pro tento účel jsem vybral unipolární tranzistor typu MOSFET-N AP9T16GH od firmy Advanced Power Electronics Corp. Tento tranzistor má odpor v sepnutém stavu $R_{DSon} = 25m\Omega$ při $U_{GS} = 4,5V$ a $I_D = 6A$.



Obr. 2.8: Zapojení regulace jasu

Kvůli zvýšení budícího napětí a rychlejším časům spínání bude tento tranzistor buzen bipolárním tranzistorem, např. běžně dostupným BC817. Rezistor R1 na obr. 2.8 musí být dostatečně malý, aby nezpomaloval nabíjení vstupní kapacity výkonového tranzistoru (časová konstanta RC), přitom nesmí příliš zvyšovat spotřebu celého zařízení. Hodnota 4700Ω, bude přijatelným kompromisem, spotřeba cca 1mA a RC konstanta nabíjení vstupní kapacity tranzistoru $1.9\mu s$.

2.3.5 Obvody mikrokontroléru

Mikrokontrolér bude napájen přímo z lineárního stabilizátoru, jak je zmíněno v kap. 2.3.3. Napájecí piny budou blokovány keramickými kondenzátory o kapacitě $100nF$ a

$2,2\mu F$. Pro lepší využití dynamického rozsahu AD převodníku jsem zvolil referenční napětí 2,5V. Kvůli úspoře reference, bude 2,5V reference ještě rozpůlená odporovým děličem na 1,25V a toto napětí bude sloužit jako offset pro vstupní signál (bude na něj připojena zem vstupního signálu).

Expandéry budou připojeny na piny 27(SDA - data) a 28 (SCL - hodiny). Na datovou i hodinovou linku budou připojeny pull-up odpory o velikosti $4,7k\Omega$. Po realizaci a oživení zařízení budou změřeny nástupné hrany a tyto rezistory mohou být nahrazeny většími.

Vyfiltrovaný signál, upravený vstupními obvody, bude připojen na pin 23 (ADC0). Piny 15-17 a Reset budou vyvedeny na 2x3 pinový programovací konektor ISP (In Service Programming), tento konektor je pro AVR standardizován a je vyveden i na programátoru AVR Dragon. Při programování tedy stačí propojit zařízení s programátorem 6 pinovým dvouřadým propojovacím kabelem o rozteči 2,54mm. Pin 18 (AVCC) je dle datasheetu připojen k napájení a je u procesoru blokován 100nF keramickým kapacitorem. Port D je vyveden na hřebínkovou lištu a bude řídit spodních 8 řádků zobrazovače.

Expandéry mají hardwarově nastavenou adresu 000 a 001, výstupní 16b porty jsou vyvedeny na hřebínkové lišty. Pin $\overline{RESET}$ je připojen k napájecímu napětí.

2.3.6 Ovládací prvky

Zařízení bude uživatelem obsluhováno pomocí čtyř přepínačů a jednoho potenciometru. Prvním přepínačem bude obsluha volit mezi zapnuto/vypnuto (ve vypnuté poloze je baterie připojena na nabíjecí konektor). Druhý přepínač volí měřící rozsah (1V/10V), přepíná mezi přímým připojením signálu, nebo připojením přes dělič. Další dva přepínače budou přepínat mezi napětím 5V a 0V na vstupní port MCU. Mikrokontrolér bude tato napětí vyhodnocovat a podle nich nastavovat příslušný zobrazovací režim. Na výstupu přepínačů je RC filtr sloužící k vyfiltrování přepínacích špiček, po uvolnění přepínače se bude kapacitor nabíjet s časovou konstantou $R*C = 10*10^3*100*10^{-9} = 100\mu s$. Na DPS bude připraven jeden takto vyfiltrovaný, neosazený port navíc. Tento port bude sloužit k ovládání rozsahů v případě osazení relé. Potenciometr o rezistivitě $10k\Omega$ je zapojen do série s rezistorem $10k\Omega$ mezi 5V a zem. Jezdec je přímo připojen na pin ADC1 mikrokontroléru. Potenciometrem jsme tedy schopni plynule nastavovat napětí $0 - 2,5V$, podle změřeného napětí se bude softwarově nastavovat příslušná hodnota jasu (střídy PWM tranzistoru).

2.4 Návrh desky plošných spojů

Zapojení bude rozděleno na dvě desky plošných spojů, desky budou signálově propojeny hřebínkovými lištami - dvě 16 pinové lišty, každá vedoucí z 1 expandéru, jedna 8 pinová lišta pro spodní segment, vedoucí přímo z MCU a jedna 8 pinová lišta pro přivedení napájení (4 piny vedoucí na kladný pól baterie a 4 piny vedoucí do pinu drain PWM tranzistoru). Tvar desek bude vyfrézován tak, aby s 1mm tolerancí padnul do připravené přístrojové krabice. V desce bude vyvrtáno 6 otvorů pro uchycení. Tvar desky, včetně umístění LED modulů, je zakreslen v příloze A.1.

Všechny součástky, vyjma LED modulů, budou v SMD provedení. Budou použity rezistory a keramické kapacitory v pouzdře 1206. Horní deska (zobrazovací) ponese 40 LED modulů, předřadné rezistory a řádkové tranzistory. Spodní deska (řídící) bude obsahovat zbývající obvody včetně výkonového tranzistoru řízeného PWM signálem. Všechny integrované obvody (MCU, OZ, expandéry) budou blokovány dvojicí keramických kapacitorů o velikosti $100nF$ a $2,2\mu F$. Na výstupu stabilizátoru je připojen elektrolytický kondenzátor o velikosti $10\mu F$. Baterie bude připojena přes kabelovou propojku, ovládací prvky a veškeré ostatní propojení bude realizováno pomocí konektorů na DPS.

Vstupní obvody budou umístěny co nejdále od napájecích obvodů a výkonového PWM tranzistoru. Port expandéry budou umístěny v blízkosti hřebínkových lišt, jež budou propojovat jejich výstup s druhou DPS.

2.5 Úpravy krabičky

V přístrojové krabičce je od výroby připraven otvor pro umístění patky pro stativ a otvor pro LED moduly. V zadní části krabice bude uprostřed vyvrtán kruhový otvor $\phi 7mm$ pro umístění nabíjecího konektoru. Horní panel zařízení bude sloužit pro připojení signálu a ovládání zařízení. Budou zde 4 otvory $\phi 6mm$ pro páčkové přepínače, dva otvory $\phi 7mm$ pro pouzdra LED diod. Konektor BNC pro připojení vstupního signálu bude proveden otvorem $\phi 10mm$. V otvoru pro BNC konektor je třeba vytvořit zářez pro patku, zabraňující protáčení konektoru.

2.6 Návrh Software

Program je sepsán v jazyce c a využívá knihovnu AVR-libc. Zdrojový kód je rozčleněn dle zaměření do souborů. Vývojový diagram je obsažen v příloze A.3. Kompletní aktuální zdrojový kód, ve všech předchozích verzích, je k dispozici na [7]

2.6.1 I^{2}C sběrnice

Sběrnice I^{2}C je sériová sběrnice vyvinutá firmou Phillips. Sběrnice využívá pouze dva vodiče - SDA (Serial DAta line) a SCL (Serial CLock), komunikace je tedy synchronní, poloduplexní. Původní sběrnice pracovala s hodinovou frekvencí 100kHz, v současné době dosahuje rychlostí až 5MHz. Sběrnice umožňuje připojení až 128 zařízení pomocí sedmibitového adresního slova s příznakem zápisu, též označovaného jako SLA+W (SLave Address + write). Sběrnice má hardwarově definovaný klidový stav v log. „1“ pomocí pull-up rezistorů. Jejich hodnota je blíže určena celkovou kapacitou sběrnice. Maximální celková kapacita sběrnice je definována na $400pF$ a značně omezuje maximální délku sběrnice (I^{2}C se obvykle používá pro komunikaci v rámci jedné DPS). Signály na datové lince se vyhodnocují při náběžné hraně hodinového signálu, dokud je SCL v log. „1“, musí datový signál zůstat stabilní, vyjma START a STOP událostí.

Komunikaci začíná zařízení typu master a to odesláním START bitu, tj. stav, kdy master uzemní pin SDA ve chvíli, kdy je SCL v log. „1“. Následuje odeslání SLA+W bytu.

7	6	5	4	3	2	1	0
A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	W

Obr. 2.9: SLA+W byte

LSB určuje, zda master bude číst (1), nebo zapisovat (0), bity 1 - 7 patří adrese cílového zařízení. Tato adresa bývá obvykle tvořena částí, určenou výrobcem (pouze pro čtení), a částí, modifikovatelnou uživatelem. Po odeslání se čeká na jednobitové potvrzení ACK (ACKnowledge) od slave zařízení. Následují 8b data, vždy potvrzená ACK příznakem. Komunikace je ukončena příznakem STOP, nebo dalším příznakem START.

2.6.2 MCP23017

Obvod MCP23017 od firmy Microchip je 16 bitový port expandér s přístupem pomocí I^2C, nebo SPI (MCP23S17) sběrnice. Expandér obsahuje dvě banky (A,B) osmibitových obousměrných registrů. Obvod podporuje bytový i sekvenční mód, v sekvenčním módu probíhá po přenosu každého bytu inkrementace adresního ukazatele. Expandér obsahuje 22 osmibitových kontrolních registrů na adrese 0x00 - 0x1A. Nastavením bitu BANK v registru IOCON do log. „0“ (výchozí hodnota) se registry řadí za sebe dle funkce pro obě banky (IODIRA,IODIRB,IPOLA,IPOLB,...).

V opačném případě by se za sebe řadily nejprve registry z jedné banky (IODIRA, IPOLA, ..., IODIRB, IPOLB, ...).

Inicializace expandéru proběhne nastavením směru portů na výstup, toho docílíme nastavením registrů *IODIRA*, *IODIRB* do log. „0“ (implicitně v „1“). Při dalším běhu programu zapisujeme pouze do výstupních registrů *GPIOA* a *GPIOB*. Užitím sekvenčního režimu zápisu ve spojení s *IOCON.BANK=0* dosáhneme značného snížení režie. Obsluha jednoho expandéru tedy probíhá v následujících krocích[1]:

1. START příznak (1), $30\mu s$
2. Odeslání SLA+W (8), ACK (1), $264\mu s$
3. Odeslání adresy registru GPIOA (8), ACK (1), $264\mu s$
4. Odeslání dat pro GPIOA (8), ACK (1), $264\mu s$
5. Odeslání dat pro GPIOB (8), ACK (1), $264\mu s$ (proběhla automatická inkrementace adresy)
6. STOP příznak (1), $30\mu s$

Celkový předpokládaný čas přenosu: $1,116ms$

2.6.3 Inicializace

Po spuštění programu proběhne úvodní inicializace. Inicializace proběhne v několika krocích, hlavičky inicializačních funkcí se nachází v souboru init.h. Volání funkce *io_init();* inicializuje registry DDR (Data Direction Register). Funkce *adc_init();* inicializuje AD převodník do kontinuálního režimu (free running) s předděličkou $\frac{Xtal}{8} = 125kHz$ a externí referencí. Výsledek bude zapisován v osmibitové podobě do registru *ADCH*. Funkce *pwm_init();* inicializuje časovač T1 do módu fast PWM s inverzí (kvůli bipolárnímu budiči). Následuje volání funkce *i2c_init();* , ta inicializuje I^2C sběrnici s hodinovou frekvencí cca 34kHz. Po zinicializování I^2C sběrnice jsou zinicializovány registry expandérů, porty jsou nastaveny na výstup, je zvolen režim sekvenčního přístupu k registrům a banky registrů jsou nastaveny na nulu.

Konečnou fází inicializace je volání funkce *demo();* tato funkce trvá cca 3s a postupně po segmentech rozsvítí všechny LED diody. Tímto je ověřena funkčnost I^2C sběrnice a stav LED modulů. Po provedení funkce je zařízení připraveno k používání a na výstupu zobrazuje měřenou úroveň.

2.6.4 Přepočet naměřené hodnoty

Registr ADCH se periodicky s frekvencí 125kHz přepisuje aktuální naměřenou hodnotou napětí. Tuto hodnotu je třeba převést na 40b sloupec v binární podobě. Tento

[1] v závorce jsou uvedeny počty odeslaných bitů, na konci jsou vypočteny předpokládané doby trvání přenosu s uvažovanou frekvencí linky 34kHz

sloupec bude následně rozdělen a příslušné části odeslány na výstup PORTD a expandéry. Samotný převod lze řešit dvěma způsoby - matematickým přepočtem, kdy se hodnota ADC matematicky převede na počet řádků bargrafu a následně se bitovými operacemi „vysune“ sloupec, nebo vyhledáváním v tabulce. V druhém případě je v paměti vytvořena tabulka s 2^8prvků. Každý prvek tabulky je indexován hodnotou N a nese v sobě informaci o počtu rozsvícených řádků bargrafu, pro hodnotu ADCH=N. Převod tak probíhá daleko rychleji než v prvním případě, kdy je zapotřebí provedení několika násobení, jedná se pouze o čtení z paměti. Kalibrace by se v prvním zmíněném řešení řešila úpravou výpočetního koeficientu, v druhém případě by se musela přepsat a znovu nahrát celá tabulka. V návrhu je pro vyšší rychlost zpracování použita druhá varianta.

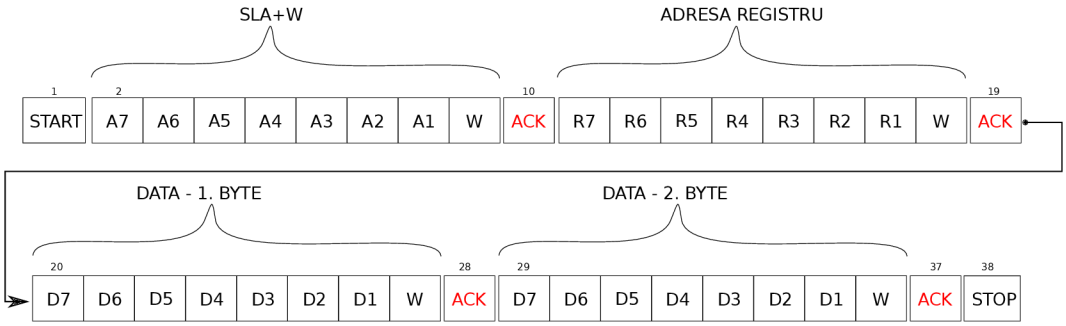
Sloupec se bude vykreslovat do pomocné proměnné *bar* typu uint64_t (64b). Další zpracování se liší dle způsobu zobrazení měřené veličiny:

1. *asymetricky* polarizovaný signál, zobrazení bodu - proměnná *bar* nabývá hodnoty 1 a je rotována doleva o počet bitů vyčtený z tabulky, snížený o 1
2. *asymetricky* polarizovaný signál, zobrazení sloupce - proměnná *bar* nabývá hodnoty -1 (tj. binárně samé jedničky) a je rotována doleva o počet bitů, vyčtený z tabulky. Výsledek je negován.
3. *symetricky* polarizovaný signál, zobrazení bodu - obdobně jako v prvním případě, počet rotací je vyčten z tabulky pro symetrický signál
4. *symetricky* polarizovaný signál, zobrazení sloupce - proměnná *bar* nabývá hodnoty -1, rotuje se vlevo o počet kroků dle tabulky pro symetrický signál, pokud platí, že $ADCH > 127$, výsledek se neguje a odmaskuje se spodních 19b. Pokud je $ADCH <= 127$, rotuje se vlevo o počet kroků z tabulky a odmaskuje se horních 20b.

Proměnná *bar* nyní reprezentuje stupnici v binární podobě (1= svítí, 0=nesvítí), LSB odpovídá spodnímu řádku zobrazovače. Spodních 8 řádků zobrazovače je obsluhováno přímo z MCU, zapojení je ovšem v opačném pořadí. Spodních 8 bitů proměnné *bar* zrcadlíme funkcí *revbits(arg);* (zaměníme prvky 0 a 7, 1 a 6 apod.) a zapíšeme na port D. Proměnnou *bar* rotujeme o 8b doprava a nynějších spodních 8b odešleme do banky B expandéru 1, obdobně postupujeme dokud neodešleme všech 40 bitů, řídíme se přitom mapováním portů, uvedeným v příloze A.4.

2.7 Obnovovací frekvence bargrafu

Nejpomalejší článek bargrafu je sběrnice I^2C. Tato sběrnice pracuje na frekvenci cca 34kHz, což je asi 25x méně, než hodinová frekvence MCU. Bude tedy hrát značnou roli ve výpočtu obnovovací frekvence zobrazovače. Časový diagram I^2C komunikace



Obr. 2.10: Časový diagram komunikace s jedním expandérem

je na obr. 2.10.

Přibližnou délku komunikace s jedním expandérem lze tedy vypočítat dle vztahu 2.15. Zde n je počet přenášených symbolů a T_s symbolová perioda.

$$t_e = n * T_s \tag{2.15}$$

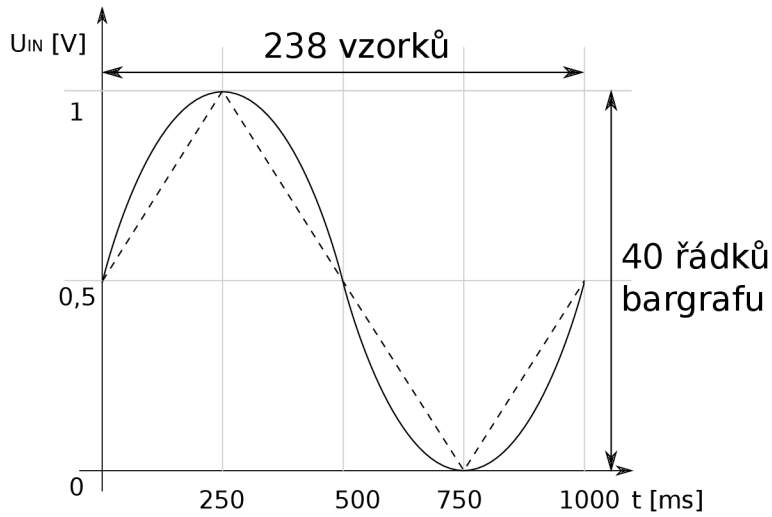
Pokud dosadíme za $T_s = \frac{1}{f_{I2C}}$, $n = 38$, dostaneme dobu, potřebnou k přenosu dat na jeden expandér.

$$t_e = 38 * \frac{1}{43000} = 1.118ms \tag{2.16}$$

Doba jednoho měřícího cyklu je rovna součtu doby, potřebné k získání a prezentaci dat, a doby potřebné k jejich odeslání na expandéry. Doba přípravy dat byla změřena simulátorem dle počtu provedených instrukcí a činí $t_p = 1.97ms$. Obnovovací frekvence je číselně rovna obrácené hodnotě doby trvání jednoho cyklu.

$$f_s = \frac{1}{t_{celková}} = \frac{1}{2 * t_e + t_p} = \frac{1}{2 * 1.118 * 10^{-3} + 1.97 * 10^{-3}} = 237,75Hz \tag{2.17}$$

Vztah mezi obnovovací frekvencí bargrafu a frekvencí vstupního signálu je lépe zřejmý z obrázku 2.11.



Obr. 2.11: Vztah mezi obnovovací frekvencí bargrafu a vstupním signálem

Zde je testovací vstupní signál o frekvenci 1Hz a napětí špička-špička 1V. Během jedné periody vstupního signálu tedy proběhne 80 změn na zobrazovači. Aby bylo zobrazení plynulé (nedocházelo k přeskakování řádků), je třeba, aby byl vstupní signál alespoň 80x pomalejší, než je obnovovací frekvence bargrafu, tedy $f_{max} = \frac{237,75}{80} = 2,97Hz$. Tento předpoklad platí pro lineární nárůst signálu, v obecné situaci záleží na napěťové strmosti vstupního signálu $\frac{dU}{dt}$. Maximální strmost napětí pro plynulé zobrazení závisí na maximálním skoku napětí, kdy se ještě zvýší či sníží sloupec o 1, značeném U_k a době trvání jednoho měřícího cyklu $T_C = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{237,75} = 4,206ms$. Poté se maximální strmost napětí určí dle vztahu 2.18.

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_{kmax}}{T_c} \tag{2.18}$$

Tab. 2.3: Napěťové kroky a odpovídající maximální strmosti dle rozsahu

	Krok		**Strmost**	
Rozsah	1V	10V	1V	10V
Sym.	0,053V	0,53V	12,6V/s	126,0V/s
Asym.	0,027V	0,27V	6,41V/s	64,19V/s

3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

3.1 Úvod

Pro ověření funkčnosti a zjištění technických parametrů v praxi, bylo zařízení podrobeno několika měřením. Nároky jsou kladeny zejména na dobu provozu na jedno nabití baterie a na linearitu převodu měřeného napětí na sloupec.

Po připojení na generátor zařízení správně zobrazuje měřenou veličinu a to ve všech kombinacích rozsahu, polarizace vstupního signálu a způsobu zobrazení. Signalizace vybité baterie začne svítit při napětí baterie cca 6,2V, zařízení funguje do napětí cca. 4,2V.

3.2 Měření převodní charakteristiky

Převodní charakteristika dvojbranu je grafické znázornění závislosti výstupní veličiny na vstupní. V praxi (audio zařízení) se často používá logaritmické měřítko, pro naše potřeby však vyhovuje lineární závislost, ta lze matematicky popsat vztahem 3.1

$$y = k * x + q \tag{3.1}$$

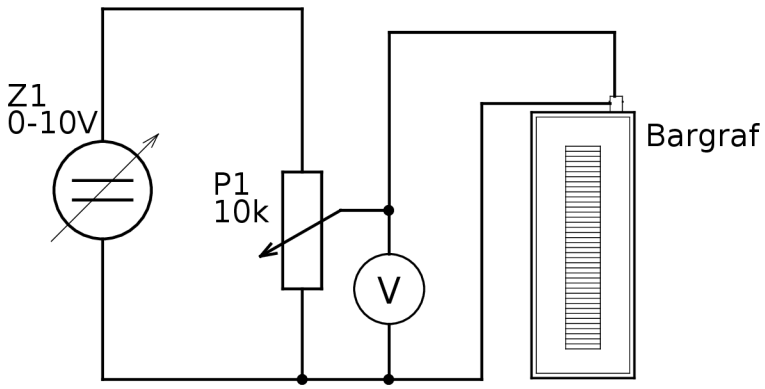
$$A(t) = k * U(t) \tag{3.2}$$

a jejím grafem je přímka. Zde konstanta k udává strmost přímky a je číselně rovna tangentě úhlu, který přímka svírá s osou x, konstanta q určuje svislý posuv od osy x. Dosazením konkrétních veličin dostaneme vztah 3.2. Zde je vstupní veličinou napětí $U(t)$[1] a výstupní veličinou počet sloupců (výška sloupce) $A(t)$. Vertikální posun je nulový (přímka prochází počátkem).

3.2.1 Postup měření

Zařízení je zapojeno dle obr.3.1

[1]Korektnější by byl zápis U(n) a A(n), ve skutečnosti se jedná o hodnotu v daném vzorku. Pro jednoduchost jsem zvolil současný zápis.

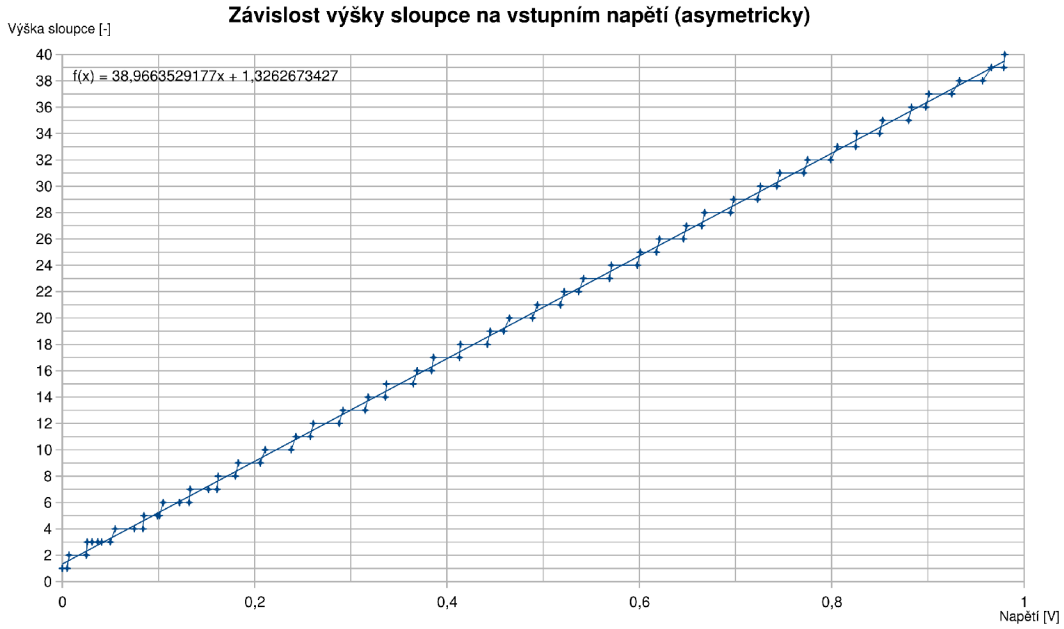


Obr. 3.1: Schéma zapojení pro měření převodní charakteristiky

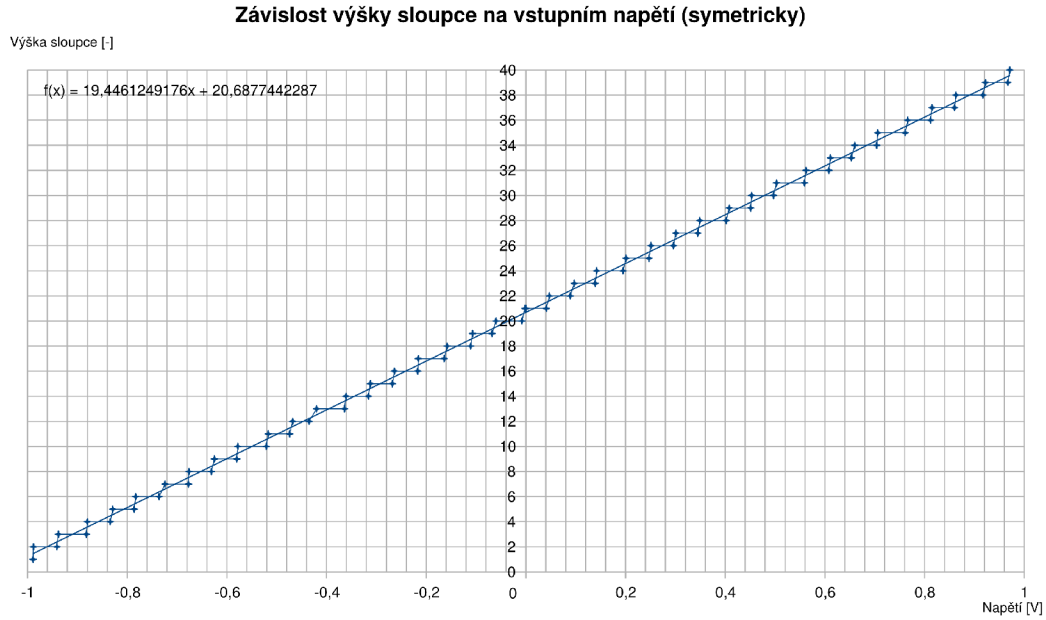
Vstup zařízení je připojen na odporový dělič tvořený potenciometrem P1. Paralelně ke vstupu zařízení je připojen digitální multimetr UT39C. Regulovatelným zdrojem Z1 hrubě nastavujeme vstupní napětí, to jemně doladíme potenciometrem P1, na bargrafu odečítáme pořadí rozsvíceného sloupce. Napětí odečítáme co nejblíže přechodu mezi dvěma stavy sloupce. Měření proběhlo při zobrazení typu bod; převodní charakteristiku pro druhý typ zobrazení není třeba měřit, neboť se jedná pouze o jiný způsob reprezentace dat (vnitřní naměřená hodnota je stejná).

3.2.2 Naměřené hodnoty

Převodní charakteristika přístroje byla měřena pro symetrický i asymetrický vstupní signál. Tabulky naměřených hodnot jsou v příloze v tab.C.1



Obr. 3.2: Převodní charakteristika pro unipolární signál



Obr. 3.3: Převodní charakteristika pro bipolární signál

3.3 Měření výdrže baterie

Zařízení je vybaveno šestičlánkovou baterií typu Ni-Mh o celkové kapacitě 3700mAh a jmenovitém napětí 7.2V. Na signálový vstup byl připojen generátor harmonického

signálu o frekvenci 1Hz a amplitudě 1V. Pozoroval se stav, kdy začne červená signalizační LED blikat. Tento stav nastal přibližně po 48 hodinách. Zařízení bylo schopno následně pracovat ještě cca. 3 hodiny, poté začaly segmenty zobrazovače postupně "vynechávat".

3.4 Použité měřicí přístroje

Tab. 3.1: Specifikace generátoru HP33120A

programovatelný funkční generátor HP33120A	
Výrobce	Hewlett Packard
Výstupní frekvence (sinus)	$100\mu Hz - 15MHz$
Výstupní napětí	50 mVpp – 10 Vpp (±1% pro f<100kHz)
Výstupní odpor	50Ω

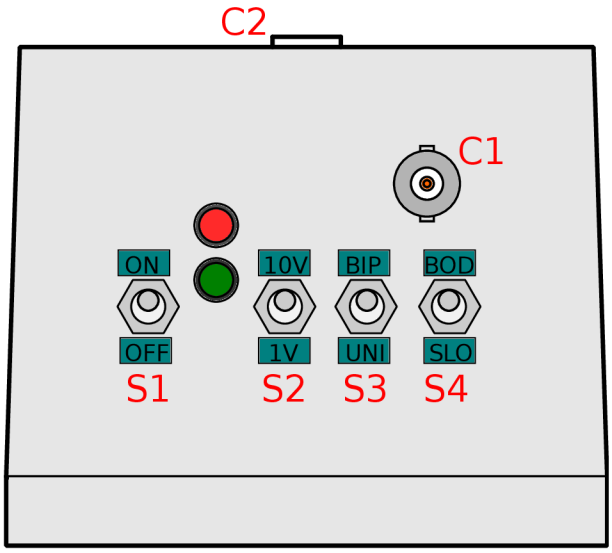
Tab. 3.2: Specifikace multimetru UT39C

digitální multimetr UT39C	
Výrobce	Uni-Trend Group Limited
Rozsahy SS napětí	200mV/2V/20V/200V/1000V (0.5%+1)
Rozsahy SS proud	2mA/200mA/20A (0.8%+1)

4 UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA

Tato příručka udává základní parametry bargrafu a předepisuje požadavky na jeho obsluhu a údržbu.

Bargraf je určen k experimentálnímu měření proudu vzduchu a tlaku v dýchacích cestách, jako součást systému řízeného dýchání. Bargraf graficky zobrazuje aktuální hodnotu vstupního napětí jako výšku sloupce, dle zvoleného rozsahu a je cejchován pro bipolární i unipolární vstupní signál o špičkové hodnotě 1V nebo 10V.



Obr. 4.1: Ovládací a signalizační prvky bargrafu

4.1 Ovládací prvky

Na horním panelu přístroje jsou umístěny přepínače pro zapnutí přístroje [S1], volbu měřicího rozsahu (1V / 10V) [S2], polaritu signálu (symetrický / nesymetrický) [S3] a druh zobrazení (bod / sloupec) [S4] - viz. obr.4.1. V pravé horní části přístroje je umístěn vysokoimpedanční vstup s BNC konektorem [C1]. Nabíjecí konektor [C2] je na zadní části přístroje. Přístroj je na spodní části vybaven šroubením pro upevnění ke stativu.

Zelená LED signalizuje zapnutí přístroje. Červená blikající LED signalizuje vybitou baterii.

4.2 Zapnutí přístroje

Přepněte přepínač [S1] do polohy *ON*, proběhne krátký test, při kterém se postupně rozsvítí všechny řádky zobrazovače. Po skončení testu je přístroj připraven k použití.

4.3 Volba rozsahu

POZOR!: Nevíte-li, jakou úroveň má přiváděný signál, použijte vždy nejprve nejvyšší rozsah přístroje (10V)! Přivedením napětí vyššího, než je nominální napětí měřicího rozsahu může dojít k nevratnému poškození přístroje!

Přístroj pracuje na rozsahu 1V se vstupním napětím 0-1V (*UNI*), případně s napětím -1V až +1V s přepínačem symetrie [S3] v poloze *BIP*, na rozsahu 10V jsou odpovídající kombinace 0-10V a -10V až +10V (*BIP*). Volbu rozsahu provedeme přepnutím přepínače [S2] do příslušné polohy.

4.4 Volba polarity

Přístroj je schopen zpracovávat unipolární i bipolární signál o maximální velikosti dané zvoleným rozsahem. Pro měření unipolárního signálu (0-1V příp. 0-10V) přepněte přepínač [3] do polohy *UNI*. Nejnižší řádek zobrazovače nyní signalizuje nulové vstupní napětí, nejvyšší řádek signalizuje maximální úroveň rozsahu, tedy +10V příp. +1V. Pro měření bipolárního signálu (±1V příp. ±10V) přepněte přepínač [3] do polohy *BIP*. Nejnižší řádek zobrazovače signalizuje minimální úroveň rozsahu (-10V příp. -1V), uprostřed se nachází nula a nejvyšší pozice signalizuje maximum (+10V, příp. +1V).

4.5 Volba typu zobrazení

Při zobrazení typu bod svítí vždy právě jeden zobrazovací řádek, symbolizující vrchol sloupce. Tento typ zobrazení vyberete přepnutím přepínače [4] do polohy *BOD*. Při přepnutí přepínače do polohy *SLO* bude svítit celý zobrazovaný sloupec. Je třeba mít na paměti, že navzdory vyšší přehlednosti dojde v tomto režimu k výraznému snížení životnosti baterie.

4.6 Nabíjení přístroje

Zapojte nabíjecí konektor do zdířky v zadní části přístroje [*C2*] a přepněte přepínač napájení [1] do polohy *OFF*. Tímto dojde k odpojení přístroje od napájení a připojení nabíječe k baterii přístroje. Doba nabíjení vybité baterie je přibližně 10 hodin.

Pro dosažení dlouhé životnosti je třeba zabránit nadměrnému vybíjení baterie přístroje. Začne-li červená LED signalizovat vybitou baterii, je třeba přístroj připojit k napájecímu adaptéru.

4.7 Údržba přístroje

Povrch přístroje se ošetřuje vlhkým hadříkem. Přístroj nevyžaduje žádnou další zválštní údržbu ani kalibraci.

4.8 Specifikace bargrafu

Tab. 4.1: Specifikace bargrafu

Parametr	**Hodnota**
Max. vstupní napětí	±1V(±10V)
Vstupní odpor	~1.1MΩ
Kapacita a výdrž baterie	3700mAh, výdrž 48h[a]
Obnovovací kmitočet	cca. 230Hz
max. frekvence signálu	3Hz[b]

[a] Platí pro zobrazení „bod“, pro zobrazení „sloupec“ bude výdrž baterie nižší

[b] Platí pro signál trojúhelníkového průběhu, pro obecný signál se může lišit (záleží na strmosti)

5 ZÁVĚR

Navržené desky plošných spojů byly osazeny a oživeny. Funkčnost zařízení byla ověřena a je v souladu se zadáním. Z naměřených hodnot je zřejmé, že převodní charakteristika přístroje je lineární. Uvažovaná regulace jasu pomocí změny střídy PWM tranzistoru není funkční. Při snížení střídy PWM tranzistoru se dle předpokladu sníží jas aktuálně rozsvícených LED modulů, ostatní moduly se však naopak začnou rozsvěcovat. Jedná se o chybu v návrhu a dala by se eliminovat úpravou zapojení.

Do této práce jsem zahrnul výsledky návrhu nové verze bargrafu. Jak již bylo uvažováno v semestrálním projektu, v nové verzi byly nahrazeny původní expandéry dvěma 16 bitovými LED drivery PCA9635 firmy NXP, ty podporují softwarové řízení jasu pro dílčí řádky bargrafu. Byl odstraněn výkonový tranzistor MOSFET a jeho budič, původně navrhovaný pro regulaci jasu. Taktovací frekvence procesoru byla zvýšena na 8MHz. Návrh řídící DPS byl kompletně přepracován, snažil jsem se efektivněji využít obou vrstev, volné plochy jsou vylity polygonem a předpokládá se použití 90° konektorů, tím dojde ke snížení profilu osazené DPS cca o 5mm. Prozatím byly vyrobeny dva kusy nové verze DPS, ty jsou teprve částečně osazeny.

Videozáznam prvního spuštění bargrafu je dostupný na [8]. Návrh zapojení a DPS byl vypracován v programu Altium Designer, všechny ostatní podklady byly vytvořeny pomocí volně šířitelného softwaru avr-gcc, Lyx, Inkscape, Blender, vim a Freecad.

LITERATURA

[1] PUNČOCHÁŘ, J. *Operační zesilovače v elektronice.* 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-059-8.

[2] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika* 5. vyd., V [nakl.] Idea servis 3., rozš. vyd. Praha: Idea servis, 2002, 327 s. ISBN 80-859-7042-2.

[3] Atmel AVR 8- and 32-bit Microcontrollers Devices. [online]. 2013 [cit.2013-12-07]. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/default.aspx >

[4] TEXAS INSTRUMENTS. *LM3914 Dot/Bar Display Driver* [online]. Dallas, 2013 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z URL: <www.ti.com/lit/gpn/lm3914 >

[5] ATMEL CORPORATION. *ATmega8A datasheet* [online]. 2013 [cit. 2013-11-29]. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/images/atmel-8159-8-bit-avr-microcontroller-atmega8a_datasheet.pdf>

[6] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MCP23017/MCP23S17: 16-Bit I/O Expander with Serial Interface* [online]. U.S.A., 2007 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21952b.pdf >

[7] Github: Degress/bargraph. [online]. [cit. 2013-12-18]. Dostupné z URL: <https://github.com/Degress/bargraph>

[8] Bargraf - zkouška - YouTube. *YouTube* [online].[cit. 2013-12-18]. Dostupné z: URL: <http://www.youtube.com/watch?v=fN_0bb_oWzo>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

VU	jednotka hlasitosti – Volume Unit
DPS	Deska Plošných Spojů
OZ	operační Zesilovač
MCU	mikrokontrolér, jednočipový počítač – Micro Controller Unit
HW	"železo", fyzické vybavení - na rozdíl od software (programové vybavení) – Hardware
SPDT	přepínač s jedním kontaktem na vstupu, přepínaným mezi dvěma výstupními – Single Pole Double Throw
PAL	video standard pro kódování analogového televizního vysílání – Phase Alternating Line
fps	počet snímků za jednu sekundu – Frames Per Second
AVR	rodina osmibitových mikroprocesorů od firmy Atmel
EEPROM	elektronicky mazatelná paměť určená pouze pro čtení – Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory
PWM	pulzní šířková modulace - Pulse Width Modulation
ADC	převodník z analogového signálu na digitální - Analog to Digital Converter
SRAM	statická paměť s náhodným přístupem – Static Random Access Memory
I^2C	datová sběrnice vyvinutá firmou Philips – Inter - Integrated Circuit
TWI	jiné označení I^2C sběrnice, používané firmou Atmel (výrazy TWI a I^2C jsou ekvivalentní) – Two Wire Interface
PDIP	součástkové pouzdro s vývody, montuje se skrze desku plošných spojů, nebo do soketu – Plastic Dual Inline Package
TQFP	součástkové pouzdro pro povrchovou montáž (SMD) – Thin Quad Flat Package
LDO	stabilizátor s malým úbytkem napětí – Low Drop Out

SOT	tranzistorové pouzdro pro povrchovou montáž– Small Outline Transistor
LSB	nejméně významný bit – Least Significant Bit
MSB	nejvýznamnější bit – Most Significant Bit
U_P	prahové napětí diody
R_{DSon}	odpor kanálu unipolárního tranzistoru v sepnutém stavu
P_{ZTR}	ztátový výkon - výkon, který se přemění na teplo

SEZNAM PŘÍLOH

A Podklady pro výrobu **42**
A.1 Výkresy 42
A.2 Vývojový diagram 44
A.3 Mapování portů 45
A.4 Schéma zapojení a vzory pro DPS 45
A.4.1 Původní verze 45
A.4.2 Nová verze 49
A.5 Seznam součástek 52

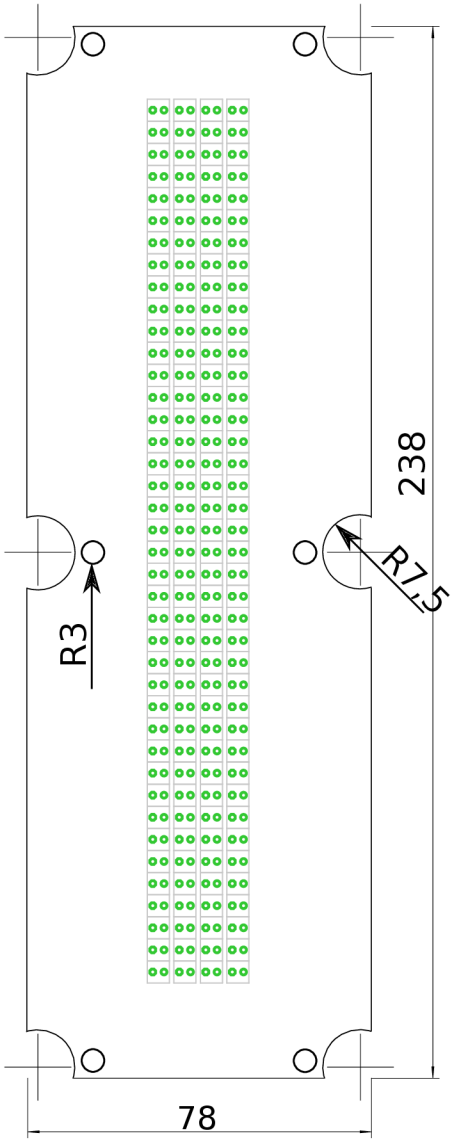
B Zdrojový kód **53**

C Naměřené hodnoty **54**

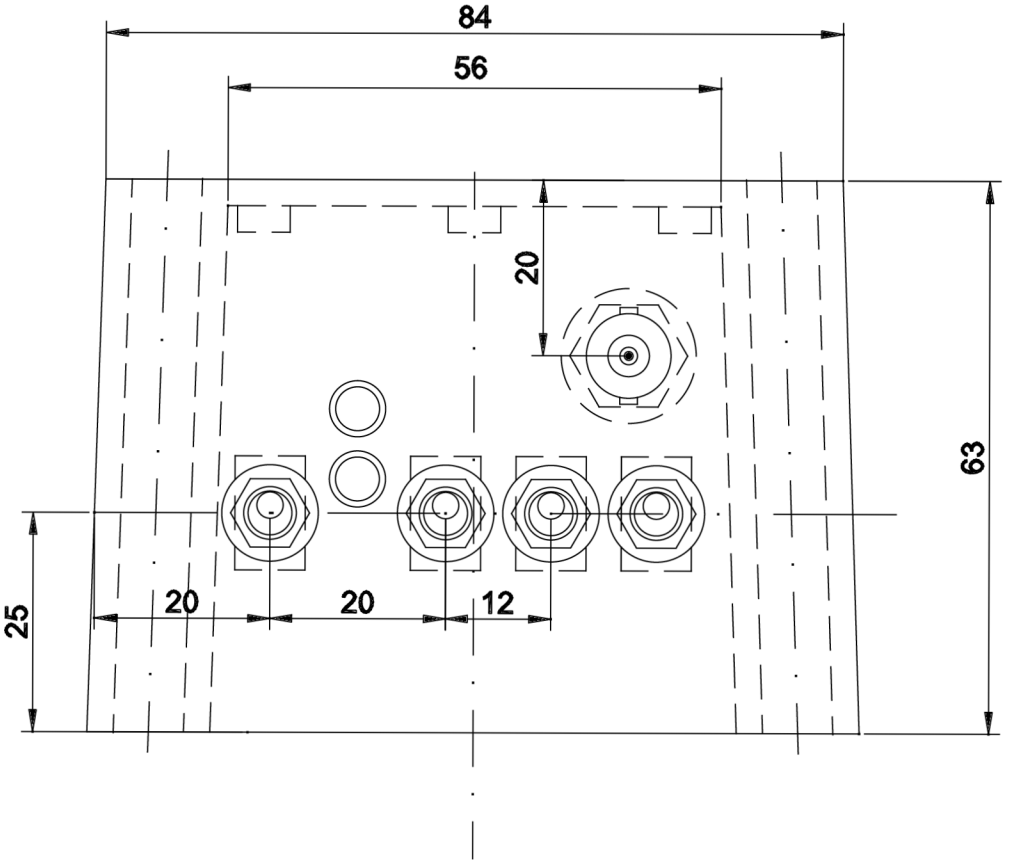
D Foto realizace **55**
D.1 Osazené DPS 55
D.2 Hotové zařízení 57

A PODKLADY PRO VÝROBU

A.1 Výkresy

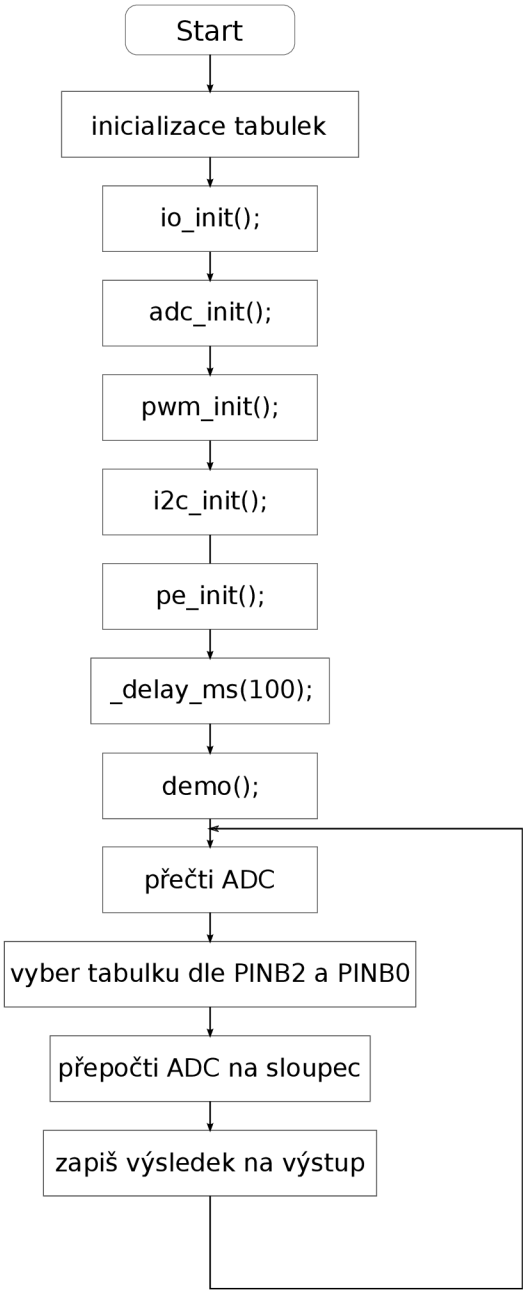


Obr. A.1: Tvar DPS včetně osazení LED modulů



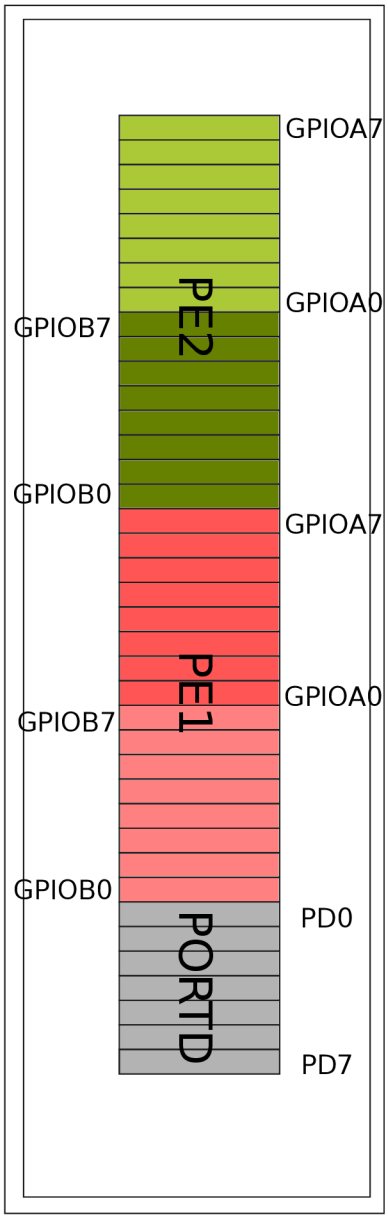
Obr. A.2: Horní pohled na přístrojovou krabici

A.2 Vývojový diagram



Obr. A.3: Vývojový diagram programu

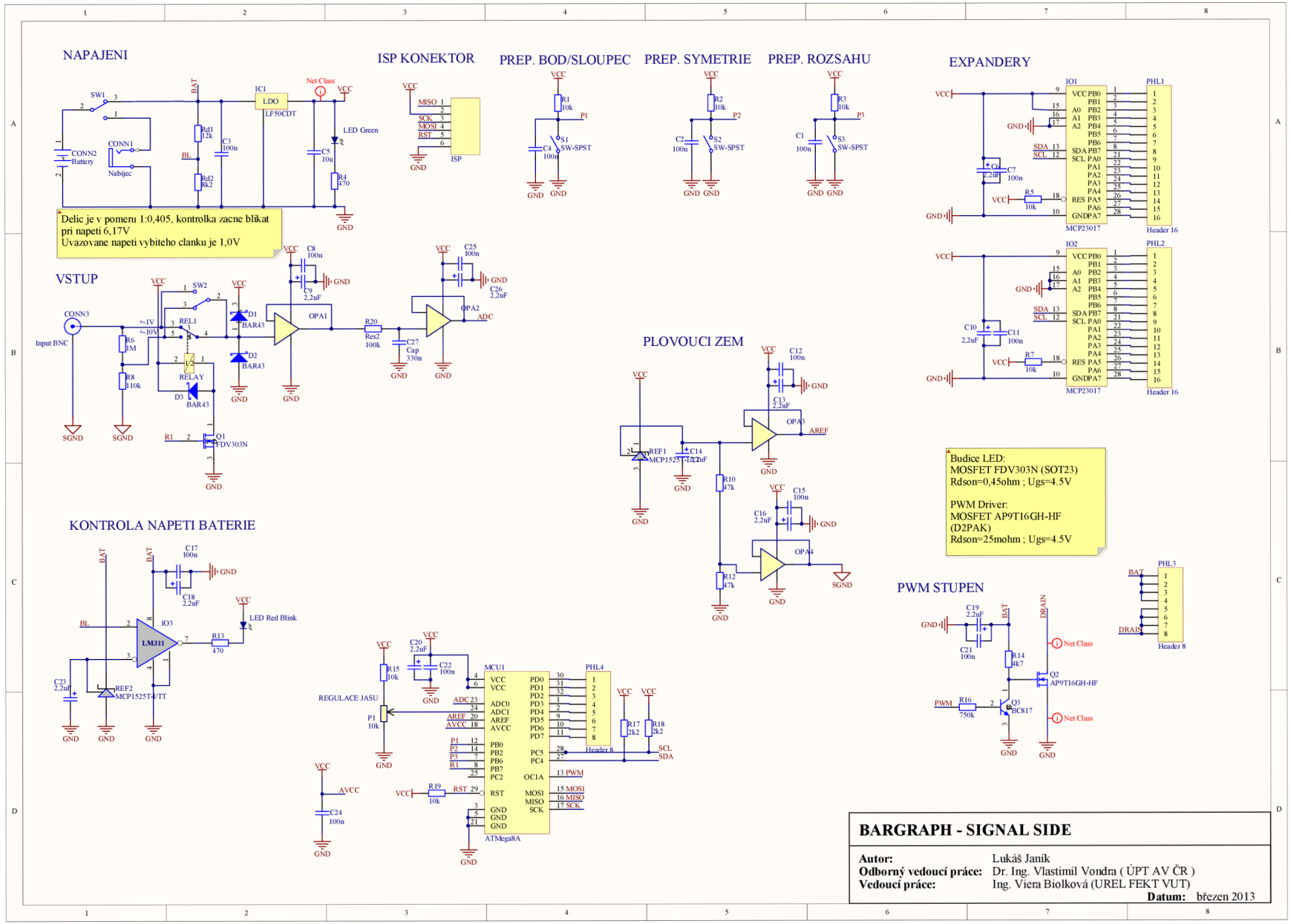
A.3 Mapování portů

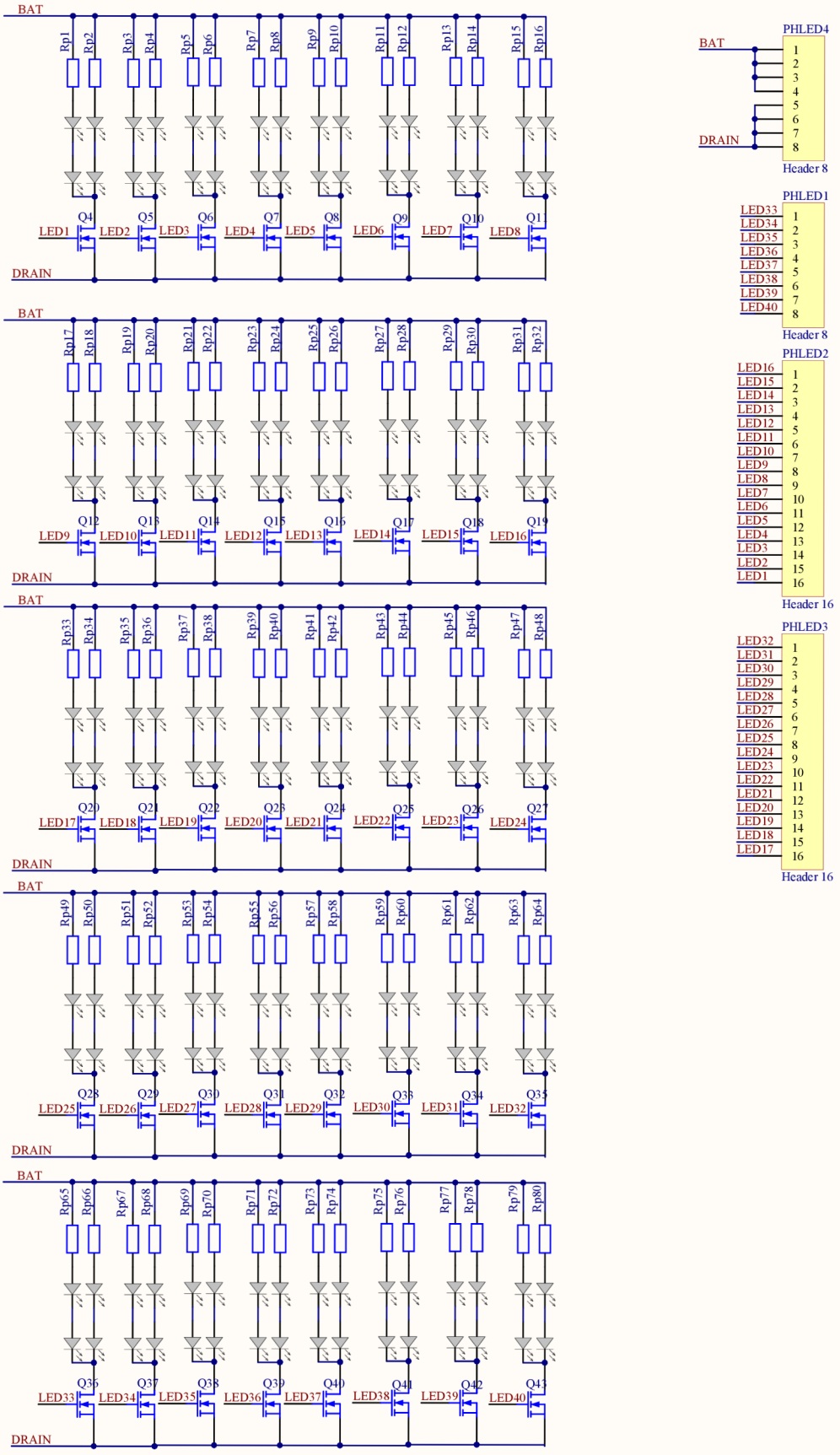


Obr. A.4: Mapování portů expandérů a MCU na zobrazovač

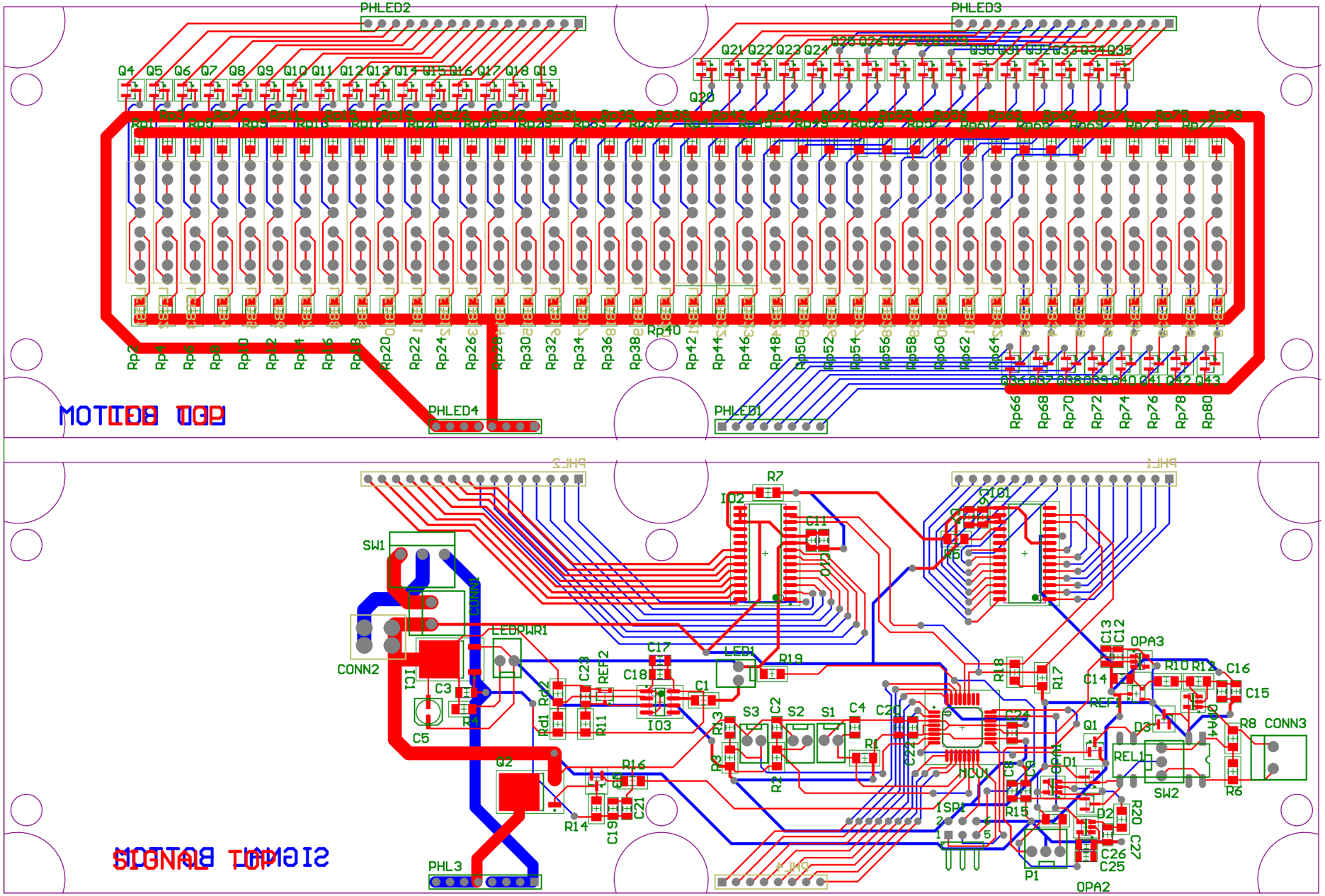
A.4 Schéma zapojení a vzory pro DPS

A.4.1 Původní verze

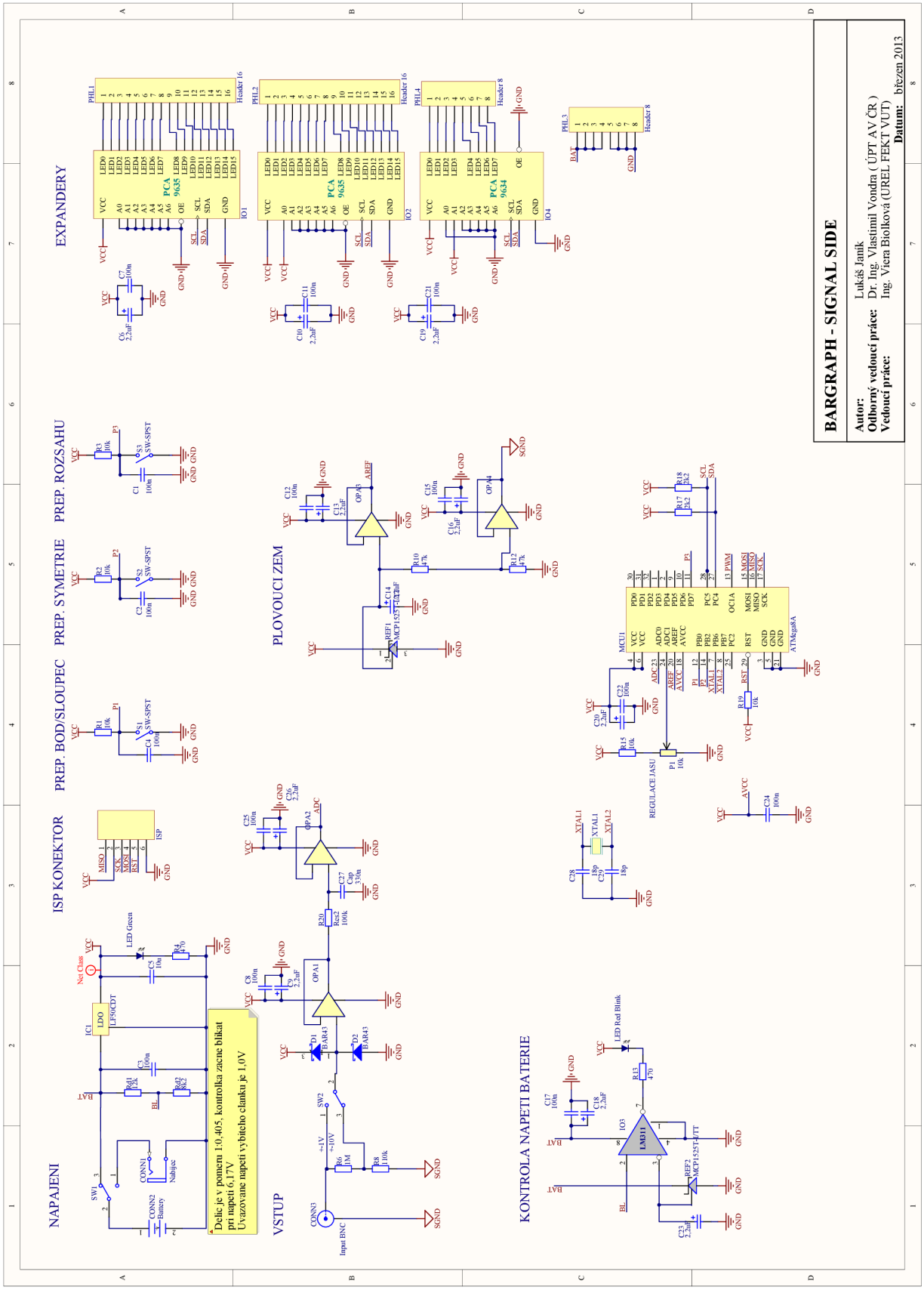

NAPAJENI
ISP KONEKTOR
PREP. BOD/SLOUPEC
PREP. SYMETRIE
PREP. ROZSAHU
EXPANDERY
VSTUP
PLOVOUCI ZEM
KONTROLA NAPETI BATERIE
PWM STUPEN
Delic je v pomeru 1:0,405, kontrolka zacne blikat pri napeti 6,17V
Uvazovane napeti vybiteho clanku je 1,0V
Budice LED:
MOSFET FDV303N (SOT23)
Rdson=0,45ohm ; Ugs=4.5V
PWM Driver:
MOSFET AP9T16GH-HF (D2PAK)
Rdson=25mohm ; Ugs=4.5V
BARGRAPH - SIGNAL SIDE
Autor: Lukáš Janík
Odborný vedoucí práce: Dr. Ing. Vlastimil Vondra (ÚPT AV ČR)
Vedoucí práce: Ing. Viera Biolková (UREL FEKT VUT)
Datum: březen 2013

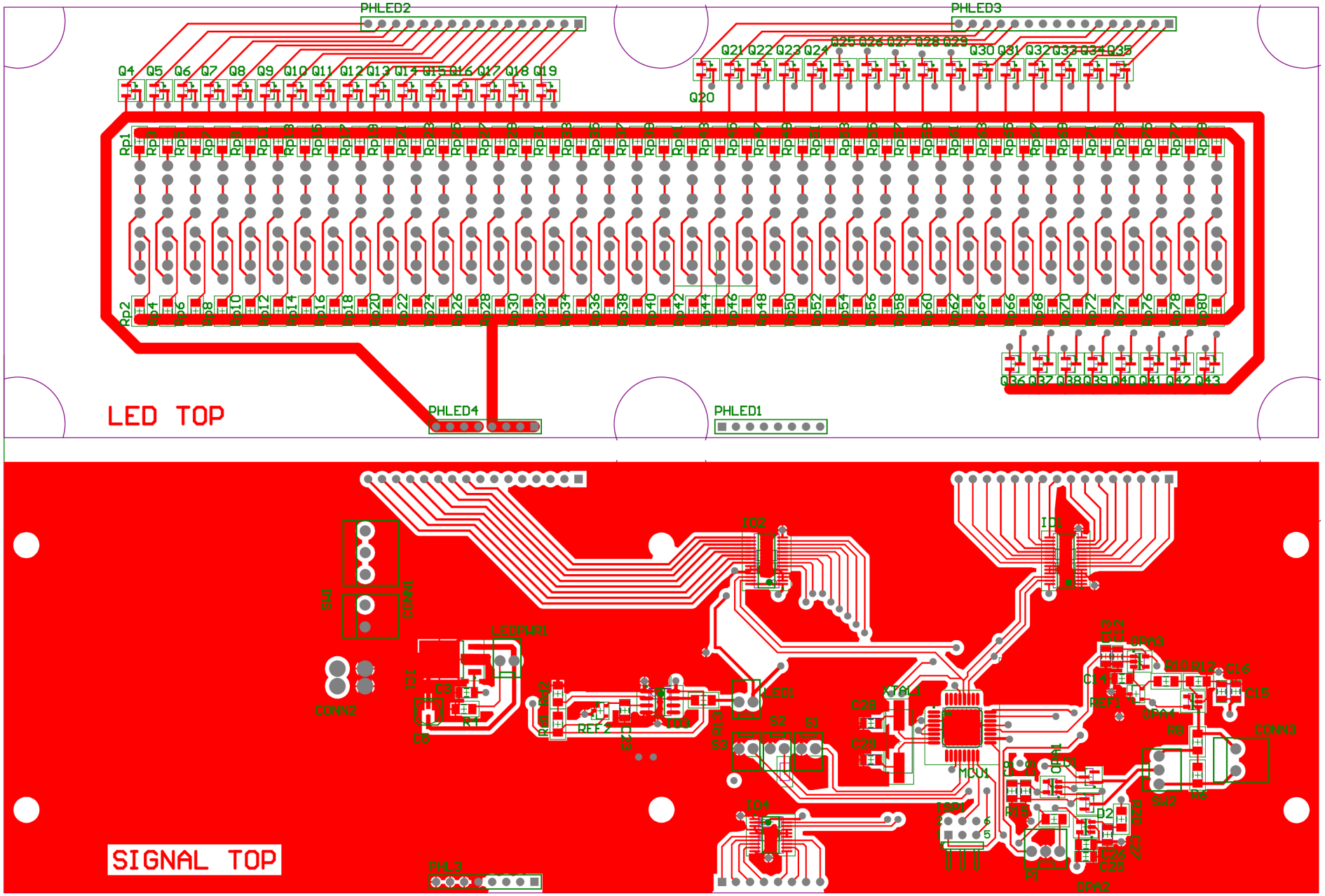


BARGRAPH - DISPLAY SIDE


PHLED2
PHLED3
PHLED4
PHLED1
PHL3
Rp40
SW1
CONN2
LEDPWR1
LED1
R19
IC1
C3
C5
Q2
R14
R16
C17
C18
C1
C23
REF2
R11
IO3
S3
S2
S1
C2
C4
C20
R1
R3
R2
R7
IO2
C11
C10
C101
IC5
MCU
ISP1
OPA1
OPA2
OPA3
OPA4
C13
C12
C14
R10
R12
C16
C15
REF1
Q1
D3
REL1
SW2
R8
CONN3
R6
R18
R17
R15
D1
D2
R20
C27
C26
C25
P1
C24
C22
C19
C21

A.4.2 Nová verze




PHLED2
PHLED3
Q4 Q5 Q6 Q7 Q8 Q9 Q10 Q11 Q12 Q13 Q14 Q15 Q16 Q17 Q18 Q19
Q20
Q21 Q22 Q23 Q24 Q25 Q26 Q27 Q28 Q29 Q30 Q31 Q32 Q33 Q34 Q35
Q36 Q37 Q38 Q39 Q40 Q41 Q42 Q43
Rp1
Rp2
LED TOP
PHLED4
PHLED1
IC2
IC1
SW1
CONN1
CONN2
LEDPWR1
IC3
C3
R1
C6
R4
R6
REF2
IC3
R13
LED1
S2
S1
S3
XTAL1
C28
C29
MCU1
IC4
USB1
R15
D2
C26
C25
P1
OPA2
R9
R8
SW2
CONN3
OPA1
REF1
C14
OPA3
R10
R12
C16
C15
SIGNAL TOP
PHL3

LED BOTTOM

SIGNAL BOTTOM

A.5 Seznam součástek

Tab. A.1: Seznam součástek

Seznam součástek – bargraf

Komentář	Hodnota	Kusy	Popis	Značka	Footprint
AD8515ARTZ-R2		3	R2R OpAmp	OPA1, OPA2, OPA3	SOT23-5
AP9T16GH-HF		1	MOSFET PWM	Q33	TO252
ATMega8A		1	MCU	MCU	TQFP32
BAR43		10	Schottky Diode 15mA; 4ns; SOT23	D1, D2	
Cap Pol2	2,2uF	8	Elyt blokovaci	C5, C12, C16, C18, C19, C21	POLAR0.8
FDV303N		40	N-MOSFET, Budic led radku	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q10, Q11, Q12, Q13, Q14, Q15, Q16, Q17, Q18, Q19, Q20, Q21, Q22, Q23, Q24, Q25, Q26, Q27, Q28, Q29, Q30, Q31, Q32, Q35, Q36, Q37, Q38, Q39, Q40, Q41, Q42	SOT23
ISP		1	Konektor ISP - lamaci lista 90°	ISP1	
LF50CDT		1	LDO Regulator	IC1	TO252
LM211 Comparator		5	Komparator napeti baterie	IO3	
MCP23017		2	16b I2C expander	IO1, IO2	
POT	10k	1	10k lin potenciometr	P1	
MCP1525T-I/TT		3	Reference - komparator baterie	D4	SO8
Doprava		1			
BC817		1	NPN Bipolar Transistor	Q34	SOT23
Cap ceramic	100n	12	Blokovací kapacitor	C1, C4, C6, C7, C9, C11, C13, C15, C17, C20, C22, C23	RAD-0.3
Elyt	10u	1	Vst kondenzator	C3	RAD-0.3
LED Green		1	Led green 3mm	LED33	
LED Red Blink		1	LED low battery 3mm	LED131	
LED Yellow		1	Led yellow 3mm	LED34	
Rezistory	47k	2			1206
	10k	5			
	100	80			
	620	1			
	300	1			
	1M	1			
	2k2	2			
	100k	1			
	13k	1			
	470	1			
	4k7	1			
	750k	1			
	12k	1			
	8k2	1			
Input BNC		1	BNC Elbow Connector	C10	BNC_RA CON
LED		40	LED - bargraf	LED1,	
Nabijec		1	Nabijeci konektor	C2	RCA/4.5-H2
6x1,2V		1	Multicell Battery	BT1	BAT-2
SW_FUNC		4	Prepinac nabijeni, Prepinac 1V/10V	SW1, SW2	TL36WW1505

B ZDROJOVÝ KÓD

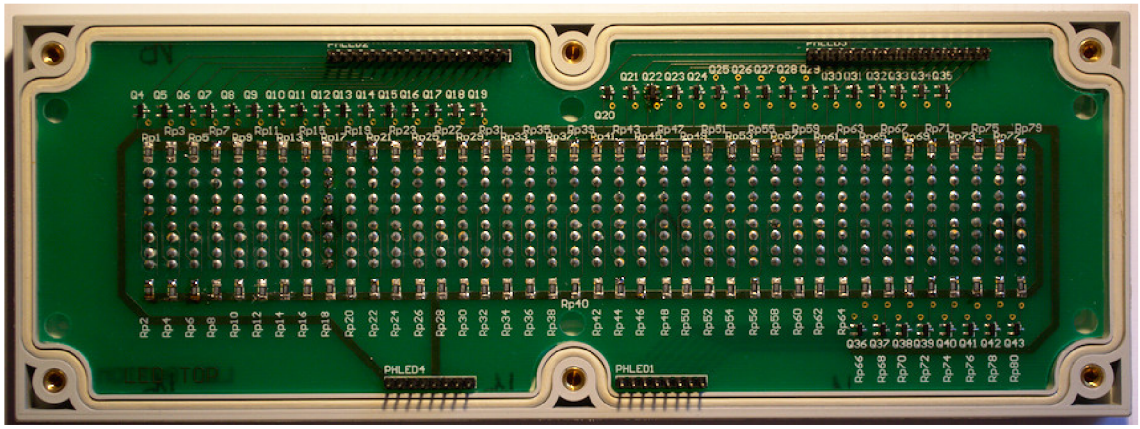
C NAMĚŘENÉ HODNOTY

Tab. C.1: Tabulka naměřených hodnot pro převodní charakteristiku

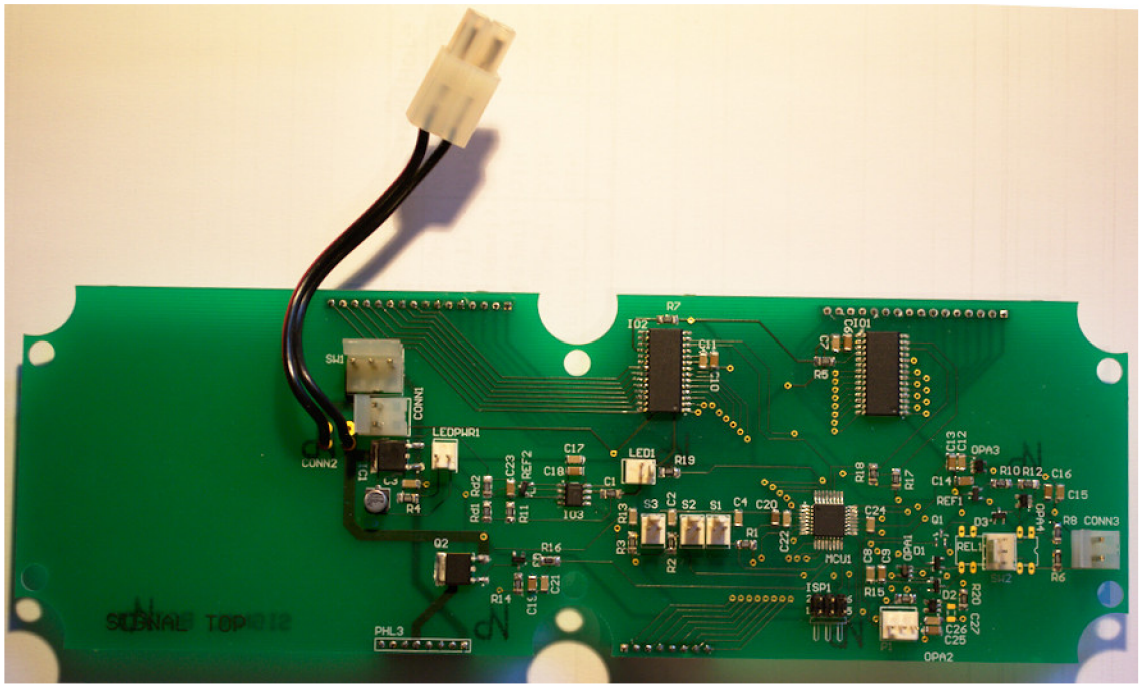
Asymetricky		Symetricky		Asymetricky		Symetricky	
Sloup.	Napětí	Sloup.	Napětí	Sloup.	Napětí	Sloup.	Napětí
[-]	[V]	[-]	[V]	[-]	[V]	[-]	[V]
1	0,000	1	-0,989	20	0,465	22	0,047
1	0,005	2	-0,988	20	0,489	22	0,089
2	0,007	2	-0,941	21	0,494	23	0,097
2	0,025	3	-0,938	21	0,518	23	0,139
3	0,026	3	-0,882	22	0,522	24	0,142
3	0,050	4	-0,880	22	0,537	24	0,195
4	0,055	4	-0,834	23	0,542	25	0,201
4	0,075	5	-0,829	23	0,569	25	0,247
4	0,084	5	-0,786	24	0,571	26	0,251
5	0,085	6	-0,783	24	0,598	26	0,296
5	0,099	6	-0,736	25	0,601	27	0,301
5	0,101	7	-0,724	25	0,618	27	0,345
6	0,105	7	-0,677	26	0,621	28	0,349
6	0,122	8	-0,676	26	0,646	28	0,402
6	0,132	8	-0,631	27	0,649	29	0,408
7	0,133	9	-0,625	27	0,665	29	0,451
7	0,152	9	-0,580	28	0,668	30	0,453
7	0,161	10	-0,578	28	0,695	30	0,497
8	0,162	10	-0,521	29	0,698	31	0,503
8	0,180	11	-0,517	29	0,723	31	0,559
9	0,183	11	-0,474	30	0,726	32	0,562
9	0,206	12	-0,468	30	0,743	32	0,608
10	0,211	12	-0,435	31	0,746	33	0,611
10	0,238	13	-0,420	31	0,771	33	0,653
11	0,243	13	-0,364	32	0,775	34	0,660
11	0,258	14	-0,361	32	0,799	34	0,704
12	0,261	14	-0,316	33	0,806	35	0,706
12	0,288	15	-0,312	33	0,825	35	0,761
13	0,292	15	-0,268	34	0,826	36	0,766
13	0,315	16	-0,264	34	0,850	36	0,812
14	0,318	16	-0,217	35	0,853	37	0,815
14	0,336	17	-0,216	35	0,880	37	0,860
15	0,337	17	-0,164	36	0,883	38	0,863
15	0,365	18	-0,158	36	0,898	38	0,917
16	0,369	18	-0,111	37	0,901	39	0,922
16	0,384	19	-0,107	37	0,925	39	0,967
17	0,386	19	-0,068	38	0,933	40	0,971
17	0,413	20	-0,060	38	0,957		
18	0,414	20	-0,008	39	0,966		
18	0,442	21	-0,002	39	0,979		
19	0,445	21	0,000	40	0,980		
19	0,459	21	0,041	40	0,980		

D FOTO REALIZACE

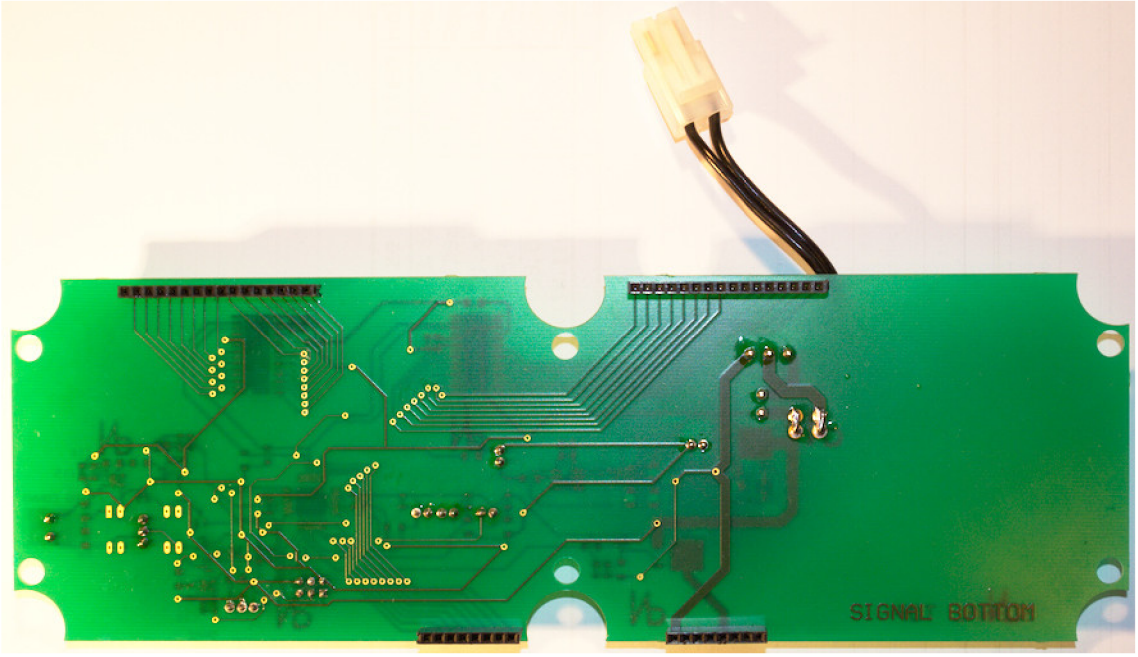
D.1 Osazené DPS



Obr. D.1: zobrazovací deska (strana bottom)



Obr. D.2: řídící deska (strana top)



Obr. D.3: řídící deska (strana bottom)

D.2 Hotové zařízení

Obr. D.4: Pohled zepředu

Obr. D.5: Detail horního panelu