

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

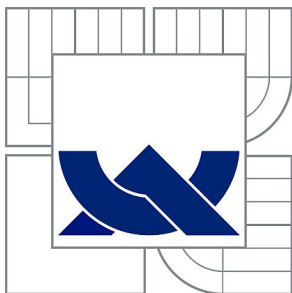
NÁVRH MONITORU TLAKŮ PRO BIOMEDICÍNSKÉ APLIKACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

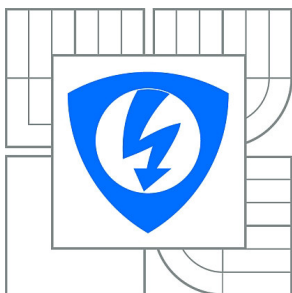
JAN TENORA

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 MONITORU TLAKŮ PRO BIOMEDICÍNSKÉ APLIKACE

DESIGN OF A PRESSURE MONITOR FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

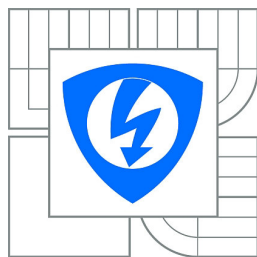
JAN TENORA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VIERA BIOLKOVÁ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jan Tenora

ID: 143922

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Návrh monitoru tlaků pro biomedicínské aplikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Shromážděte požadavky na provedení a funkční vlastnosti analogového experimentálního monitoru tlaků pro biomedicínské aplikace. Prostudujte dostupnou součástkovou základnu pro uvedený účel se současným uvážením možností napájení. Navrhněte schéma zapojení včetně zdůvodnění volby hodnot všech součástí. Realizujte navrhované zařízení.

Oživte navrhované zařízení do zcela funkčního stavu. Nastavte zařízení, 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

Cílem této bakalářské práce bylo nejprve shromáždit požadavky na provedení a funkční vlastnosti navrhovaného monitoru tlaků.

Na základě shromážděných požadavků bylo navrženo blokové a následně i obvodové schéma zapojení celého zařízení.

Dále byla navržena, zhotovena a osazena deska plošných spojů, která byla následně i s ostatními komponenty umístěna do připravené konstrukční krabičky.

Zhotovené zařízení bylo otestováno, nastaveno a jeho proměřením byla ověřena jeho přesnost.

Nakonec byl sepsán uživatelský a servisní manuál.

KLÍČOVÁ SLOVA

Senzor tlaku, operační zesilovač, galvanické oddělení, měnič napětí, napěťová reference

ABSTRACT

The goal of this bachelor's thesis was to gather requirements for the realization and functional features of the proposed pressure monitor.

Based on the collected requirements, the block diagram and also the complete schematic were proposed.

Then the printed circuit board was designed, made and fitted. This board was placed into prepared box together with other components.

Finished equipment was tested, set and also precision was checked by its measurement.

Finally, user guide and also service manual were written.

KEYWORDS

Pressure sensor, operational amplifier, galvanic isolation, voltage converter, voltage reference

TENORA, Jan. *Návrh monitoru tlaků pro biomedicínské aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 38 s., 9 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Viera Biolková

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh monitoru tlaků pro biomedicínské aplikace 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 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.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Věře Biolkové za její ochotu a vedení této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi bakalářské práce Dr. Ing. Vlastimilu Vondrovi za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Požadavky na provedení a funkční vlastnosti	2
1.1 Napájení	2
1.2 Indikace slabých baterií	2
1.3 Tlakové senzory	2
1.3.1 Senzory pro měření průchodu vzduchu	3
1.3.2 Senzor pro měření tlaku vzduchu	3
1.3.3 Senzor pro měření tlaku krve.....	3
1.4 Výstupy	3
1.5 Konstrukční krabička.....	3
1.6 Celková konstrukce.....	4
2 Návrh zapojení	5
2.1 Stabilizátor napětí 5 V	5
2.2 Indikace slabých baterií	6
2.3 Senzory tlaku	6
2.4 Napěťová reference 5 V.....	7
2.5 Přístrojový operační zesilovač	8
2.6 Napěťová reference 2,5 V.....	11
2.7 Galvanické oddělení výstupu.....	12
2.8 DC/DC měnič napětí.....	13
2.9 Přizpůsobení výstupu.....	13
3 Schéma zapojení	14
3.1 Indikace zapnutého zařízení.....	14
3.2 Stabilizátor napětí 5 V	15
3.3 Komparátor	15
3.4 Napěťová reference 5 V.....	16

3.5	Napěťová reference 2,5 V.....	16
3.6	DC/DC měnič napětí.....	17
3.7	Tlakový senzor.....	18
3.8	Přístrojový operační zesilovač	18
3.9	Galvanické oddělení	19
4	Návrh desky plošných spojů	21
5	Měření korekčních křivek	22
5.1	Popis metody.....	22
5.2	Zpracování naměřených hodnot.....	23
5.2.1	Kanál A	23
5.2.2	Kanál B	25
5.2.3	Kanál C	27
5.3	Použité měřicí přístroje a pomůcky	28
5.4	Zhodnocení	29
6	Uživatelský manuál	30
6.1	Popis vnějšku přístroje.....	30
6.1.1	Přední panel	30
6.1.2	Zadní panel	31
6.2	Postup měření	31
6.3	Nabíjení baterií	32
6.4	Tlakové rozsahy kanálů	32
6.5	Technické údaje	33
7	Servisní manuál	34
7.1	Kalibrace zařízení	34
7.2	Nastavení indikace slabých baterií	35
8	Závěr	36
	Literatura	37
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	38
	Seznam příloh	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1:	Principiální zapojení stabilizátoru napětí.....	5
Obr. 2.2:	Komparátor s operačním zesilovačem.....	6
Obr. 2.3:	Principiální zapojení napěťové reference 5 V.....	8
Obr. 2.4:	Operační zesilovač v zapojení provádějícím symetrizaci napětí.....	9
Obr. 2.5:	Zjednodušené vnitřní zapojení přístrojového operačního zesilovače AD623 (převzato z [4]).....	10
Obr. 2.6	Principiální zapojení napěťové reference 2,5 V.....	12
Obr. 2.7:	Vnitřní schéma zapojení optočlenu HCNR201 (převzato z [5]).....	12
Obr. 3.1:	Schéma zapojení stabilizátoru napětí 5 V.....	15
Obr. 3.2:	Schéma zapojení komparátoru.....	16
Obr. 3.3:	Schéma zapojení napěťové reference 5 V.....	16
Obr. 3.4:	Schéma zapojení napěťové reference 2,5 V.....	17
Obr. 3.5:	Schéma zapojení DC/DC měniče napětí.....	17
Obr. 3.6:	Schéma zapojení optočlenu (převzato z [5]).....	19
Obr. 5.1:	Korekční křivka kanálu A.....	24
Obr. 5.2:	Korekční křivka kanálu B.....	26
Obr. 5.3:	Korekční křivka kanálu C.....	28
Obr. 6.1:	Přední panel přístroje.....	30
Obr. 6.2:	Zadní panel přístroje.....	31
Obr. 6.3:	Zapojení konektoru XINYA CAN 50 Z.....	32
Obr. 7.1:	Trimry a vhodné měřicí body pro provádění kalibrace.....	34

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1:	Porovnání vhodných tlakových senzorů.	7
Tab. 3.1:	Navržené rozsahy tlaku a jim odpovídající hodnoty zesílení a odporu pro všechny použité tlakové senzory.	19
Tab. 5.1:	Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro kanál A.	23
Tab. 5.2:	Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro kanál B.	25
Tab. 5.3:	Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro kanál C.	27
Tab. 6.1:	Tlakové rozsahy jednotlivých kanálů s odpovídajícími hodnotami maximálního měřitelného tlaku a maximálního tlakového zatížení.	32

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem monitoru tlaků pro biomedicínské aplikace, tedy návrhem zařízení, které má obsahovat několik různých tlakových senzorů určených k měření tlaku a průtoku vzduchu v dýchacích cestách a tlaku krve.

Na zařízení určená k použití ve zdravotnictví jsou kladeny zvláštní požadavky. Nejdůležitějším takovýmto požadavkem je galvanické oddělení výstupů ze zařízení. Výstupy zařízení jsou totiž plánovány tak, aby na ně mohl být připojen osciloskop nebo bargraf, na kterém bude možné zobrazit průběh či úroveň měřeného tlaku. Pacient, dýchající do náhubku připojeného k tlakovým senzorům, nesmí být ohrožen elektrickým proudem, a to ani v případě, že by osciloskop napájený z rozvodné sítě měl poruchu a do navrhovaného zařízení by z něj unikal vyšší než povolený proud. K zajištění bezpečnosti pacienta proto musí být tlakové senzory galvanicky odděleny od výstupů z navrhovaného zařízení.

Během měření tlaku libovolným tlakovým čidlem nemusí být vždy využit celý rozsah tohoto konkrétního tlakového senzoru. Je tedy třeba přístroj navrhnout tak, aby bylo možné ručně přepínat mezi několika tlakovými rozsahy, což zajistí lepší zobrazení průběhu měřeného tlaku a především lepší odečet konkrétních hodnot v čase na připojeném osciloskopu.

Zařízení by také mělo být co možná nejpřesnější. U některých použitých obvodových prvků jejich výrobci nemohou garantovat vysokou přesnost. To se týká především tlakových senzorů, ke kterým bude pomocí hadiček připojen náhubek. Je tedy třeba zajistit jejich kalibraci, kterou bude nutné provádět ručně před každým měřením.

Jelikož je přístroj plánován tak, aby byl napájen z baterií, je vhodné ho doplnit indikací slabých baterií, aby bylo možné předejít případnému vybití těchto baterií během provádění samotného měření tlaku.

1 POŽADAVKY NA PROVEDENÍ A FUNKČNÍ VLASTNOSTI

V následujícím textu jsou popsány všechny shromážděné požadavky na provedení a funkční vlastnosti analogového experimentálního monitoru tlaků pro biomedicínské aplikace.

1.1 Napájení

Zařízení má být napájeno pomocí šesti nabíjecích NiMH (Nikl-metal hydridových) bateriových článků s napětím 1,2 V. Baterie mají být zařazeny sériově. Celkové napájecí napětí zařízení má tedy dosahovat hodnoty 7,2 V. Nabíjení baterií se má provádět externí nabíječkou, jejíž připojení k zařízení má zprostředkovat konektor XINYA CAN 50 Z.

1.2 Indikace slabých baterií

Zařízení má disponovat indikací slabých baterií. Tato indikace má být realizována prostřednictvím blikající červené LED diody umístěné na předním panelu konstrukční krabičky, ve které bude celé zařízení umístěno.

1.3 Tlakové senzory

Celé zařízení má obsahovat celkem čtyři co možná nejpřesnější tlakové senzory. Všechny tyto tlakové senzory mají být diferenciálního typu, čili mají měřit rozdíl dvou vstupních úrovní tlaku. Jedním vstupním tlakem bude atmosférický tlak. Druhým bude již konkrétní tlak, který má být měřen.

Senzory mají mít měřitelný rozsah tlaků od maximální záporné hodnoty tlaku přes nulu až do maximální kladné hodnoty tlaku. Čili mají být schopny měřit kladnou i zápornou úroveň tlaku.

Každý ze čtyř tlakových senzorů má disponovat třemi ručně přepínatelnými rozsahy tlaku, které v případě nevyužití celého tlakového rozsahu daného čidla umožní vyšší rozkmit napětí na výstupu bloku s konkrétním tlakovým senzorem. Rozsahy mají být nastaveny tak, aby jeden z rozsahů odpovídal zesílení výstupního napětí daného tlakového senzoru přibližně 1 krát (plný rozsah tlaku), druhý rozsah má zesílit výstupní napětí oproti prvnímu rozsahu 2 krát až 4 krát a třetí rozsah má toto napětí zesílit 4 krát až 8 krát v závislosti na celkovém rozsahu daného tlakového čidla.

Má být také umožněna ruční kalibrace nulového rozdílového tlaku senzorů za účelem minimalizování chyby měření. Kalibrace má být prováděna pomocí víceotáčkového potenciometru.

1.3.1 Senzory pro měření průchodu vzduchu

Pro účel měření průchodu vzduchu v dýchacích cestách má zařízení obsahovat celkem dva stejné tlakové senzory. Oba dva senzory pro měření průchodu vzduchu mají mít stejný rozsah, a to minimálně ± 8 cmH₂O, maximálně však ± 15 cmH₂O. Volbu rozsahu je nutné provést na základě dostupných tlakových senzorů na trhu.

Jeden z těchto dvou senzorů má být interní a tedy umístěn na DPS uvnitř konstrukční krabičky.

Druhý senzor by pak měl být externí, což umožní prakticky eliminovat chybu měření, jelikož k externímu čidlu postačí připojit kratší hadičky než k internímu čidlu. Tento externí senzor se má k zařízení připojovat pomocí konektoru XINYA CAN 50 Z.

1.3.2 Senzor pro měření tlaku vzduchu

Pro měření tlaku vzduchu v dýchacích cestách má být použito jedno interní tlakové čidlo osazené na DPS.

Požadovaný rozsah tohoto tlakového senzoru je přibližně ± 50 cmH₂O. Přesný rozsah je nutné zvolit s ohledem na možnosti trhu s tlakovými senzory.

1.3.3 Senzor pro měření tlaku krve

Zařízení má umožňovat i měření tlaku krve. K tomuto účelu musí tedy obsahovat další tlakový senzor. Tento tlakový senzor má být interní. Bude tedy opět osazen na DPS.

Rozsah tohoto tlakového čidla musí být minimálně ± 300 mmHg. Konkrétní rozsah čidla je opět nutné zvolit dle možností trhu s těmito čidly.

1.4 Výstupy

Výstupní napětí má být kladné pro kladné hodnoty měřeného tlaku a záporné pro záporné hodnoty měřeného tlaku. Z tohoto požadavku vyplývá, že při nulovém tlaku má výstupní napětí být nulové.

Výstupy všech tlakových senzorů mají být realizovány pomocí BNC konektorů.

Všechny výstupy musí být galvanicky odděleny od tlakových senzorů. Izolační pevnost mezi výstupními obvody a obvody s tlakovými čidly má dle normy ČSN EN 60601-1 [1] dosahovat hodnoty alespoň 3 kVrms.

1.5 Konstrukční krabička

Celé zařízení má být zabudováno do konstrukční krabičky RE4031 nabízené firmou GM electronic [2]. Jedná se o třídílnou 19“ skříňku o rozměrech 43,65 mm na výšku, 440 mm na šířku a 350 mm do hloubky.

1.6 Celková konstrukce

Posledním požadavkem na samotné zařízení je jeho jednoduchá celková konstrukce, která v případě potřeby umožní jeho mírnou modifikovatelnost či snadnou servisovatelnost. Příkladem modifikovatelnosti může být výměna kteréhokoliv tlakového senzoru za jiný (s jiným tlakovým rozsahem, ovšem stejného konstrukčního provedení). S tím souvisí i možnost snadné změny všech tří ručně přepínatelných měřitelných rozsahů tlaku kteréhokoliv tlakového čidla.

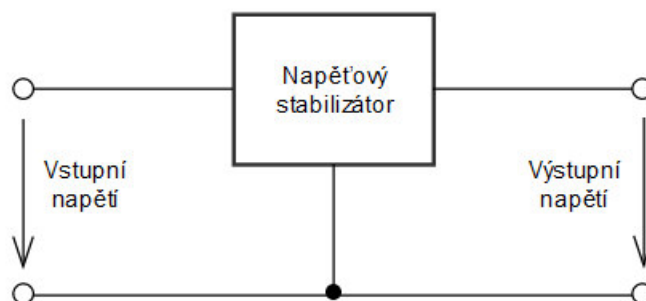
2 NÁVRH ZAPOJENÍ

Tato kapitola blíže pojednává o navrženém zapojení experimentálního monitoru tlaků. V tomto textu je také zdůvodněno, proč bylo vybráno to které konkrétní obvodové řešení a jaké jsou jeho výhody v porovnání s jinými možnými řešeními daného problému. U vybraného řešení je také vysvětlen princip funkce dané části obvodu.

Text v této kapitole je také podpořen blokovým schématem celého zařízení v příloze A.1. Zařízení má obsahovat čtyři tlakové senzory. Zapojení všech čtyř těchto tlakových čidel je naprosto stejné, jelikož všechny tyto senzory mají stejný princip funkce. Z tohoto důvodu jsou v blokovém schématu zobrazeny bloky pouze jednoho tlakového čidla. Tyto bloky jsou pro vyšší přehlednost zvýrazněny šedým podkladem.

2.1 Stabilizátor napětí 5 V

Jelikož zapojení bude obsahovat několik aktivních prvků, které je třeba napájet, je nutné zajistit toto napájecí napětí. Všechny zvolené aktivní prvky jsou schopny pracovat při stejnosměrném napájecím napětí 5 V. Proto je nutné ze stejnosměrného napětí 7,2 V, které dodávají použité baterie, vyrobit napětí o velikosti 5 V. Nejjednodušším řešením je použití napěťového stabilizátoru znázorněného na obr. 2.1.

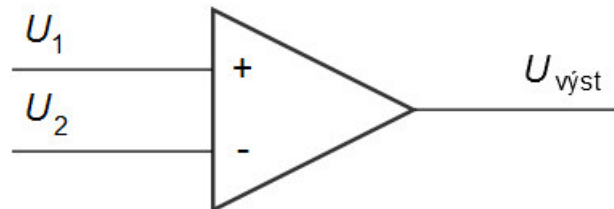


Obr. 2.1: Principiální zapojení stabilizátoru napětí.

Použitý stabilizátor napětí je elektronická součástka na principu integrovaného obvodu, která uvnitř sdružuje několik diskretních součástek. Jedná se o třípólový dvojbran s jednou vstupní a jednou výstupní branou. Tato součástka umožňuje stabilizovat výstupní napětí při změnách vstupního napětí či teploty okolí. Stabilizátor napětí je navržen vždy pro konkrétní velikost výstupního napětí a pro zajištění jeho funkčnosti musí vstupní napětí být vždy o určitou, výrobcem danou hodnotu vyšší, než jeho výstupní napětí. Z textu výše vyplývá, že zvolen byl stabilizátor s výstupním napětím 5 V. Jak již v této kapitole bylo naznačeno, vstupním napětím pro tento stabilizátor bude napětí 7,2 V dodávané bateriemi, které budou napájet celé zařízení. Baterie bude možné považovat za vybité, klesne-li jejich napětí na 6 V (to je dáno úbytkem napětí na stabilizátoru přibližně 1 V při předpokládaném proudovém odběru do 100 mA).

2.2 Indikace slabých baterií

K zajištění indikace slabých baterií je zapotřebí obvod, který bude hlídat velikost napětí na těchto bateriích a v případě poklesu tohoto napětí pod určitou hodnotu zajistí rozblíkání připojené LED diody. Nejvhodnějším a zároveň za tímto účelem nejpoužívanějším obvodovým prvkem je komparátor s operačním zesilovačem zobrazený na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Komparátor s operačním zesilovačem.

Výstup tohoto komparátoru je pouze dvoustavový, a to buďto kladné nebo záporné saturační napětí, protože operační zesilovač v tomto zapojení nemá zápornou zpětnou vazbu a jeho zesílení uvádí jeho výstup do limitace. Uvedené zapojení komparátoru porovnává velikost vstupních napětí U_1 a U_2 . Je-li vyšší napětí U_1 na kladném vstupu, je na výstupu kladné saturační napětí (přibližně 4,5 V). Pokud je vyšší napětí na záporném vstupu U_2 , je na výstupu záporné saturační napětí (v tomto případě 0 V).

Jedno ze vstupních napětí je třeba zvolit jako referenční. Referenčním napětím bylo zvoleno napětí $U_1 = 2,5$ V. Toto napětí je přes odporový napěťový dělič s dělicím poměrem 1:1 získáno z napětí na výstupu 5 V stabilizátoru. Vstup U_2 je připojen na další odporový dělič napětí. Tento dělič má ovšem tentokrát nastavitelný dělicí poměr pomocí víceotáčkového trimru (proměnného rezistoru). Nastavení tohoto trimru zajistí, aby se při poklesu napěťové úrovně baterií na požadovanou hodnotu (v tento moment je $U_1 > U_2$) na výstupu komparátoru objevilo kladné saturační napětí. Při vyšším napětí na bateriích (v tomto stavu je $U_1 < U_2$) bude výstupem komparátoru záporné saturační napětí.

Na výstup komparátoru je třeba připojit červenou LED diodu, která má blikat, je-li na výstupu komparátoru kladné saturační napětí. To se dá vyřešit například připojením astabilního klopného obvodu, který zajistí rozblíkání LED diody. Jednodušším řešením je ovšem v dnešní době použití speciální blikající LED diody. Její použití nevyžaduje zapojení žádných dalších součástí, ovšem tato blikající dioda nedosahuje při stejném proudovém odběru stejné svítivosti jako klasická dioda. Nepředpokládá se ovšem použití zařízení na přímém slunečním světle, kde by nižší svítivost LED diody mohla způsobit problémy, kdy by blikání LED diody nemuselo být patrné. Zapojení tedy využívá tuto blikající LED diodu, jejíž použití se jeví jako vhodnější.

2.3 Senzory tlaku

Při studování trhu s tlakovými senzory bylo zjištěno, že existují jen dva výrobci těchto senzorů, jejichž produkty by bylo možné použít pro účel tohoto experimentálního monitoru tlaků. Jedná se konkrétně o firmy Freescale a Honeywell. Po důkladném

prostudování portfolií obou výrobců bylo rozhodnuto použít tlaková čidla od společnosti Honeywell. Důvodů k tomuto rozhodnutí bylo hned několik. Firma Honeywell nabízí nejen mnohem širší řadu a více provedení (THT i SMD) svých diferenciálních tlakových senzorů, ale její senzory jsou i výrazně přesnější a mají přibližně 4 krát menší proudový odběr. Senzor, který by vyhovoval nejvyššímu požadovanému rozsahu, navíc firma Freescale ani nenabízí. Tlaková čidla od společnosti Honeywell jsou ovšem výrazně dražší. Tab. 2.1 porovnává vhodné tlakové senzory od společností Honeywell a Freescale.

Tab. 2.1: Porovnání vhodných tlakových senzorů.

<i>Výrobce</i>	<i>Označení</i>	<i>Rozsah [cmH₂O]</i>	<i>Max. chyba [cmH₂O]</i>	<i>Max. chyba [mV]</i>
Freescale	MPXV7002DP	±20,39	±2,55	±250
	MPXV7007DP	±71,38	±7,14	±200
Honeywell	HSCDRRN005NDAA5	±12,70	±0,25	±40
	SSCDRRN001PDAA5	±70,31	±2,81	±80
	SSCSRRN400MDAA5	±407,90	±16,32	±80

Parametry tlakových senzorů v tabulce výše jasně dokládají, že má-li být měření tlaku co možná nejpresnější a zároveň mají-li být co možná nejlépe splněny požadavky na tlakové rozsahy těchto senzorů, je třeba použít čidla od společnosti Honeywell, a to i přes jejich vyšší pořizovací ceny. Vybrány byly tedy všechny 3 v tab. 2.1 zobrazené senzory od společnosti Honeywell.

Všechny vybrané tlakové senzory je nutné napájet napětím o hodnotě 5 V. Jelikož je dle katalogových listů výrobce [3] velikost výstupního napětí všech vybraných senzorů (tedy jejich přesnost) závislá na velikosti napájecího napětí, není vhodné pro jejich napájení použít výstupní napětí stabilizátoru napětí. Je tedy nutné použít nějaký velice přesný zdroj napětí. Nejvhodnějším takovýmto napěťovým zdrojem se jeví napěťová reference s výstupním referenčním napětím 5 V, které bude věnována následující kapitola. Pro úplnost ještě uvádím vztah z již zmíněných katalogových listů výrobce [3]

$$Output (V) = \frac{0,8 \times V_{supply}}{P_{max} - P_{min}} \times (P_{applied} - P_{min}) + 0,1 \times V_{supply}, \quad (2.1)$$

kde *Output* (V) je výstupní napětí senzoru, V_{supply} je napájecí napětí, P_{max} a P_{min} reprezentují maximální a minimální hodnotu tlaku daného senzoru a $P_{applied}$ vyjadřuje aktuální hodnotu rozdílu tlaků přivedených na vstupy senzoru. Tento vztah dokládá již zmíněnou potřebu přesného napájecího napětí.

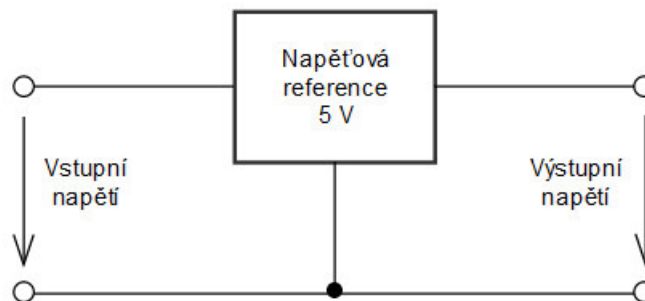
2.4 Napěťová reference 5 V

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole pojednávající o tlakových senzorech, je třeba k napájení těchto senzorů použít napěťovou referenci s výstupním napětím 5 V.

Tuto napěťovou referenci je třeba vybrat s ohledem na maximální proudový odběr všech čtyř tlakových senzorů, které má reference napájet. Dle katalogových listů

tlakových čidel [3] byl tedy určen maximální možný proudový odběr všech těchto čidel, který činí 12 mA (3 mA pro každé jedno čidlo). Napěťová reference tedy musí být schopna dodávat minimálně tento proud. Dále pak by tato reference měla být co možná nejpřesnější, aby byla zajištěna dostatečná přesnost měřeného tlaku viz. kap. 2.3.

S ohledem na tyto požadavky byla po důkladném prostudování možností trhu s elektronickými součástkami a po srovnání několika různých 5 V napěťových referencí zvolena napěťová reference od firmy Analog Devices s označením REF195. Jedná se o složitý integrovaný obvod, jehož principiální zapojení ukazuje obr. 2.3. Tato reference byla vybrána, neboť zvládne dodávat proud až 30 mA, má velmi malou vlastní spotřebu a dosahuje vysoké přesnosti ± 2 mV (procentuálně je to ± 0.04 %). Další důvod, proč bylo rozhodnuto použít právě tento obvod, je ten, že mu stačí jen o málo vyšší vstupní napětí, než je jeho výstupní napětí. Konkrétně pro proudový odběr již zmíněných 12 mA je to o 0,6 V vyšší napětí na vstupu než na výstupu.



Obr. 2.3: Principiální zapojení napěťové reference 5 V.

Na vstupní bránu vybrané napěťové reference REF195 bude přivedeno napětí o hodnotě 7,2 V odebírané z baterií. Na výstupu bude velice přesné referenční napětí o velikosti $5(\pm 0,002)$ V.

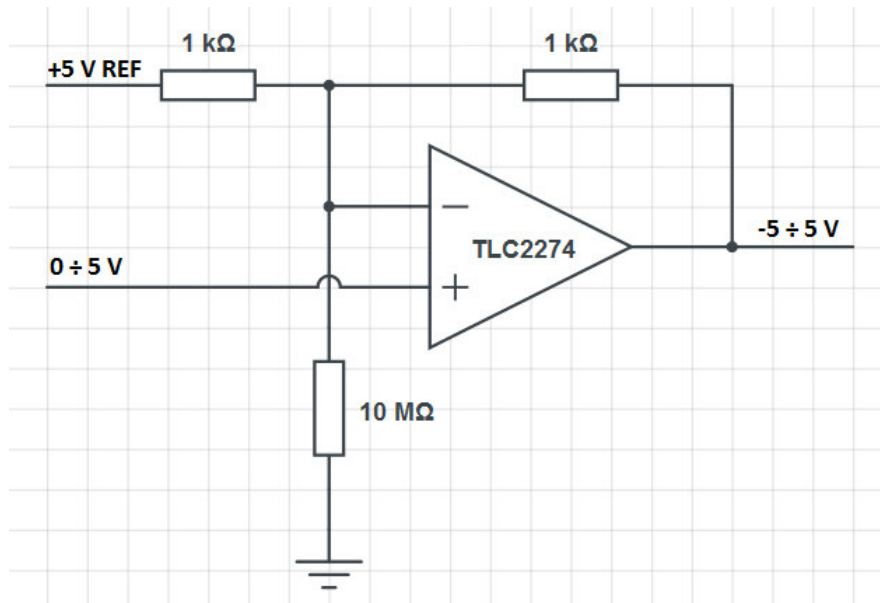
2.5 Přístrojový operační zesilovač

Dle požadavků na zařízení je třeba zajistit několik ručně přepínatelných rozsahů u všech použitých tlakových čidel. Nejvhodnějším řešením je použití operačního zesilovače, který by se připojil hned na výstup tlakového čidla. Tento operační zesilovač musí mít možnost nastavení požadovaného zesílení. Nejvhodnějším ovládacím prvkem pro nastavení zesílení je přepínač se stejným počtem poloh jako má být počet rozsahů.

Za tímto účelem použitý operační zesilovač by ideálně měl mít vstupy i výstup typu rail-to-rail (vstupní i výstupní napětí takového zesilovače může dosahovat hodnoty téměř shodné s napájecím napětím tohoto zesilovače). Zesilovač se vstupy i výstupem typu rail-to-rail je vhodný z důvodu předpokládaného odebírání napájecího napětí z výstupu 5 V stabilizátoru a také proto, že napětí na výstupu tlakových čidel může dosahovat hodnoty $0,5 \div 4,5$ V.

Poměrně jednoduchým zapojením splňujícím požadovaný účel by bylo zapojení operačního zesilovače tak, že by prováděl symetrizaci kladného napětí přivedeného na

jeho vstup. Takové zapojení je znázorněno na obr. 2.4.

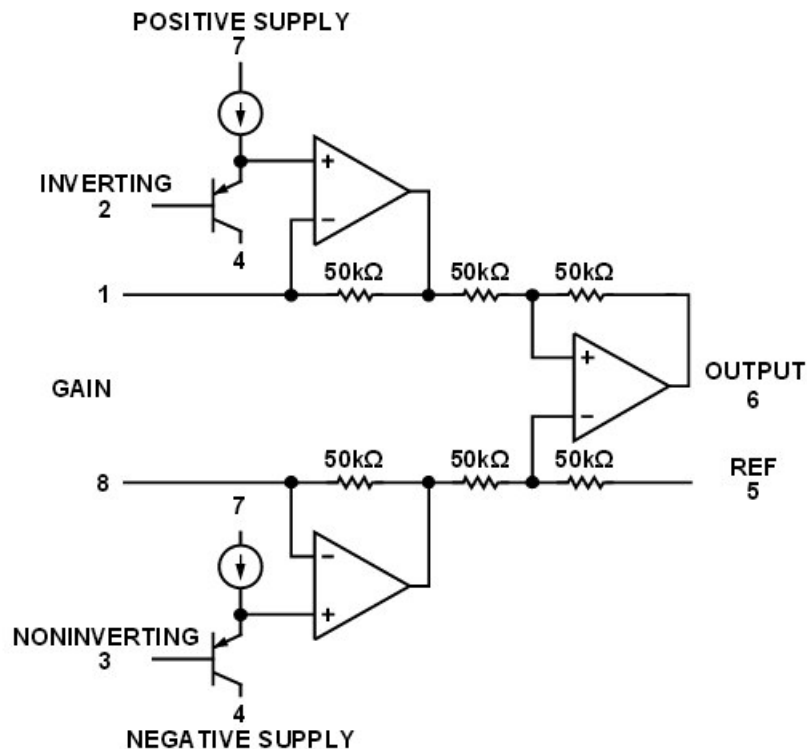


Obr. 2.4: Operační zesilovač v zapojení provádějícím symetrizaci napětí.

Na neinvertující vstup tohoto zesilovače by bylo přivedeno kladné napětí například $0 \div 5 \text{ V}$ a na druhý vstup by bylo přivedeno referenční napětí o velikosti 5 V . Zapojení dle obr. 2.4 má nastaveno napěťové zesílení 2, tedy na výstupu by se objevilo napětí $-5 \div 5 \text{ V}$ v závislosti na velikosti přivedeného vstupního napětí.

Toto řešení, ač je poměrně jednoduché, by ovšem přineslo problém v podobě realizace požadovaného galvanického oddělení výstupu. Jak bude probráno dále v kap. 2.5, galvanické oddělení bude muset být řešeno pomocí optočlenu, a aby bylo možné opticky oddělit napětí o libovolné hodnotě od -5 do 5 V , muselo by zapojení obsahovat dva obvody s optočlenem (jeden pro každou polaritu napětí), což by přispělo k velkému nárůstu složitosti celého zařízení. Je tedy třeba zvolit jiné řešení realizace více ručně přepínatelných rozsahů tlakových čidel. Takové, které s sebou nepřinesou komplikaci v podobě galvanického oddělení výstupu, a to i za cenu mírně větší obvodové složitosti samotného řešení více přepínatelných rozsahů.

Pro účely popisovaného zařízení je nejvhodnější variantou umožňující ruční přepínání rozsahů měřeného tlaku použití tzv. přístrojového operačního zesilovače. Přístrojový operační zesilovač je vlastně rozdílový zesilovač využívající uzavřené smyčky zpětné vazby. Tento zesilovač zesiluje rozdíl vstupních napětí a potlačuje souhlasné napětí přivedené na jeho vstupy. Přístrojový zesilovač se také vyznačuje velkým vstupním odporem. Vybrán byl konkrétně model s označením AD623, který vyrábí společnost Analog Devices. Jedná se o zesilovač s výstupem typu rail-to-rail, s nízkým proudovým odběrem a nastavitelným zesílením. Na obr. 2.5 je znázorněno jeho zjednodušené vnitřní zapojení.



Obr. 2.5: Zjednodušené vnitřní zapojení přístrojového operačního zesilovače AD623 (převzato z [4]).

Přístrojový operační zesilovač je zapojen do obvodu tak, že na PNP tranzistor na pinu 3 (neinvertující vstup) je přivedeno výstupní napětí tlakového senzoru. Na další PNP tranzistor na pinu 2 (invertující vstup) je přivedeno napětí 2,5 V z ručně nastavitelné napěťové reference (bude vysvětleno dále v této kapitole). Tento integrovaný obvod je napájen napětím pouze o jedné polaritě odebíraném z 5 V stabilizátoru napětí. Tedy na pin 7 je připojeno oněch 5 V a pin 4 je uzemněn. Na pinu 6 je výstupní napětí a pin 5 slouží k nastavení napěťového posunu na výstupním pinu a je na něj přivedeno napětí o hodnotě 2,5 V z další napěťové reference (tato reference je probrána podrobněji v kapitole 2.6). Mezi piny 1 a 8 je přes přepínač připojen vždy jeden ze tří přesných rezistorů. Pomocí této jediné externí součástky se nastavuje zesílení samotného přístrojového operačního zesilovače, a tento rezistor tedy fakticky nastavuje použitelný rozsah konkrétního tlakového senzoru.

Zapojení funguje tedy tak, že na výstupu může být nezávisle na nastaveném zesílení napětí přibližně 0,5 ÷ 4,5 V (napěťový rozkmit může být o pár desetín voltu vyšší, což je dáno saturačním napětím obvodu AD623, avšak napětí mimo uvedený rozsah již není nutné). Výstupní napětí 2,5 V ovšem vždy (nezávisle na nastaveném zesílení a tedy fakticky na rozsahu tlaku) odpovídá tlaku 0 cmH₂O. Napětí vyšší než 2,5 V odpovídá tlaku vyššímu než 0 cmH₂O a napětí nižší než 2,5 V odpovídá tlaku nižšímu než 0 cmH₂O. Takto je mimo jiné definováno výstupní napětí tlakového senzoru v závislosti na přivedeném tlaku na jeho vstupy u všech použitých tlakových senzorů [3].

Mějme např. napětí na neinvertujícím vstupu 3,5 V (odpovídá tlaku např. 10 cmH₂O). Rozdílové napětí vůči invertujícímu vstupu, na který je přivedeno

referenčních 2,5 V, je tedy 1 V. Pomocí externího rezistoru na pinech 1 a 8 je nastaveno zesílení 2 krát. Za předpokladu, že by výstup byl brán proti zemi, by na pinu 6 bylo napětí o velikosti 2 V. Napěťová úroveň výstupu je ovšem ve skutečnosti posunuta o napětí na pinu 5, tedy o referenčních 2,5 V. Na výstupu je tedy napětí 4,5 V. Za předpokladu, že by na neinvertujícím vstupu bylo napětí např. 1,5 V (to dle předchozího příkladu odpovídá tlaku -10 cmH₂O), potom rozdílové napětí vůči referenci 2,5 V na invertujícím vstupu by bylo -1 V. Nastavené zesílení 2 krát by toto napětí zesílilo na hodnotu -2 V. Výstup je ovšem posunut o referenčních 2,5 V na pinu 5. Na výstupu je tedy napětí 0,5 V. Jak je vidět z těchto dvou uvedených příkladů, výstupní napětí zesilovače respektuje výrobcem tlakových senzorů nastavenou převodní charakteristiku, pouze v závislosti na nastaveném zesílení snižuje použitelný rozsah tlakových čidel.

Jedním z požadavků na funkční vlastnosti zařízení je ruční kalibrace nulového rozdílového tlaku. Tuto kalibraci zajistí ona pomocí potenciometru ručně nastavitelná napěťová reference o výstupním referenčním napětí zhruba 2,5 V připojená na invertující vstup operačního zesilovače.

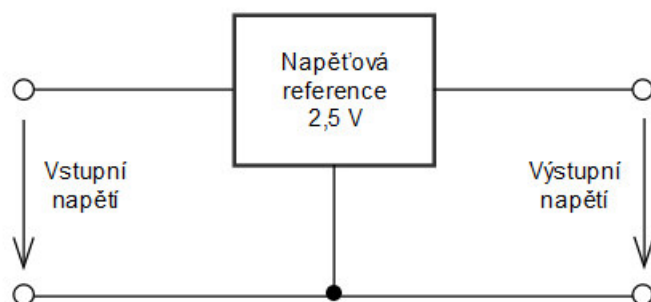
2.6 Napěťová reference 2,5 V

Napěťových referencí s výstupním napětím 2,5 V je v navrhovaném zapojení potřeba hned několik. Na žádnou z těchto uvažovaných referencí není kladen požadavek v podobě maximálního proudového odběru, jako tomu bylo v případě napěťové reference s výstupním napětím 5 V popisované v kap. 2.4.

Jedna ze tří použitých referencí má být ovšem ručně nastavitelná. To znamená, že má poskytovat možnost ručního naladění referenčního napětí na hodnotu zhruba 2,5 V. Je třeba tedy vybrat takovou referenci, jejíž výstupní napětí lze ručně doladit připojením potenciometru či trimru.

Po provedení průzkumu trhu s napěťovými referencemi a porovnání různých druhů byla vybrána součástka označená jako LT1009, kterou vyrábí firma Linear Technology. Přesnost této reference je ± 5 mV, což je v procentuálním vyjádření ± 0.2 %. K této referenci lze připojit proměnný odpor o hodnotě 10 k Ω , který zajistí naladění jejího referenčního výstupu na hodnotu 2,5 V ± 5 %, což je dostatečné pro účel kalibrace nulového tlaku, jelikož maximální napěťová odchylka nejméně přesného použitého tlakového senzoru je ± 120 mV, zatímco zvolená reference umožní ladění ± 125 mV. Tato reference byla vybrána mimo jiné i proto, že je možné na její vstup připojit napětí $5 \div 35$ V.

Principiální zapojení reference je na obr. 2.6. Na vstup je přivedeno 7,2 V, které dodávají baterie. Pakliže k referenci nepřipojíme proměnný rezistor, na výstupu je odebíráno přesných 2,5 V. Použití proměnného rezistoru zajistí již zmíněné doladění výstupního napětí.



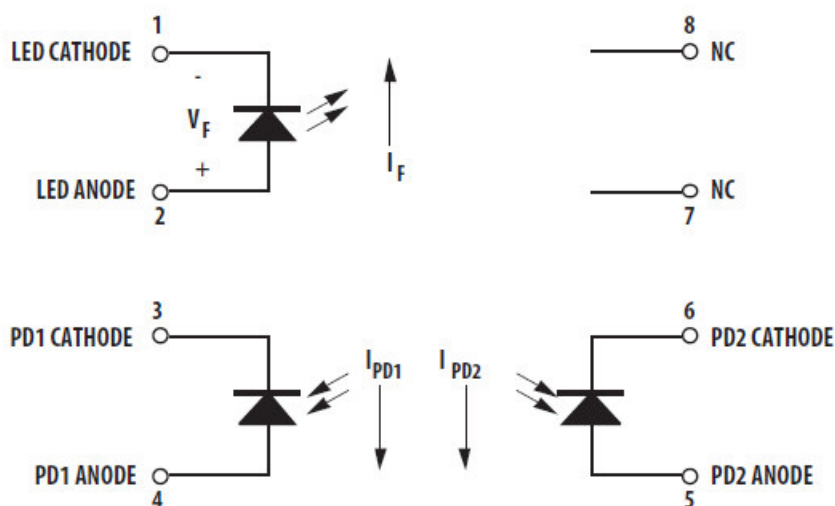
Obr. 2.6 Principiální zapojení napěťové reference 2,5 V.

2.7 Galvanické oddělení výstupu

Aby bylo zajištěno bezpečné používání zařízení, musí být jeho výstup galvanicky oddělen od tlakového senzoru. Izolační pevnost takového oddělení má být dle požadavků minimálně 3 kVrms.

Jelikož výstupní napětí přístrojového operačního zesilovače, které má být galvanicky odděleno, je $0,5 \div 4,5$ V, tedy je stejnosměrné, je nutné realizovat toto oddělení pomocí optočlenu. Takovéto optické oddělení je bezhlučné, má vysokou účinnost a jeho fyzická realizace je prostorově poměrně nenáročná.

Vybrán byl optočlen HCNR201 od firmy Avago Technologies. Jedná se o analogový, vysoce lineární optočlen s napěťovým přenosem 1 (přesnost přenosu je ± 5 %) a s nelinearitou 0,01 %. Tento optočlen tedy zajistí, že na jeho výstupu bude stejné napětí jako na jeho vstupu, tedy $0,5 \div 4,5$ V. Schéma zapojení optočlenu znázorňuje obr. 2.7.



Obr. 2.7: Vnitřní schéma zapojení optočlenu HCNR201 (převzato z [5]).

Zvolený optočlen obsahuje vysoce svítivou AlGaAs LED diodu, která osvětluje dvě blízko k sobě umístěné fotodiody. Vstupní fotodioda může být použita k monitorování a

tudíž ke stabilizování světelného výstupu z LED diody. Výsledkem toho je eliminace nelinearity a posunu charakteristiky LED diody. Výstupní fotodioda produkuje proud, který je lineárně závislý na světelném výstupu LED diody.

Integrovaný obvod optočlenu je nutné doplnit několika dalšími pasivními i aktivními součástkami (popsáno v kapitole 3.9). Vstupní i výstupní obvody optočlenu je tedy třeba napájet. K napájení vstupního obvodu optočlenu se samozřejmě nabízí 5 V stabilizátor napětí. K napájení výstupního, galvanicky odděleného obvodu optočlenu je ovšem nutné zajistit galvanicky oddělené napájecí napětí nejlépe o hodnotě 5 V.

2.8 DC/DC měnič napětí

DC/DC měnič napětí s izolovaným výstupem je nejlepším možným řešením požadavku na galvanicky oddělené napájení výstupního obvodu optočlenu. Tento měnič ovšem musí splňovat daný požadavek na izolační pevnost. Jelikož bude zařízení napájeno z baterií, měl by také tento měnič mít co možná nejvyšší účinnost, aby na něm nevznikala zbytečná výkonová ztráta.

Dle možností trhu byl vybrán DC/DC měnič s izolovaným výstupem od společnosti Traco Power s označením THB 3-0511. Tento konkrétní model nejlépe splňuje dané požadavky. Výstupní napětí měniče je 5 V, rozsah vstupního napětí umožňuje přivedení 7,2 V z baterií a účinnost tohoto integrovaného obvodu je přijatelných 70 %. Velkou výhodou tohoto měniče je také fakt, že k zajištění jeho funkčnosti k němu není třeba připojovat žádné další externí součástky.

2.9 Přizpůsobení výstupu

Jak již bylo zmíněno, výstupem obvodu s optočlenem je napětí $0,5 \div 4,5$ V, kde napětí 2,5 V odpovídá nulovému rozdílovému tlaku na vstupech tlakového senzoru, napětí větší než 2,5 V odpovídá tlaku většímu než 0 cmH₂O a napětí menší než 2,5 V reprezentuje tlak menší než 0 cmH₂O. Dle požadavků má ovšem při nulovém rozdílovém tlaku být na výstupu zařízení 0 V. Výstupní napětí je tedy třeba snížit o 2,5 V.

Nejjednodušším řešením je použití další 2,5 V napěťové reference. Vstupním napětím této reference (obr. 2.6) je 5 V z výstupu DC/DC měniče. Zem výstupního napětí celého zařízení tedy postačí nahradit referenčním potenciálem 2,5 V z této napěťové reference. Takto měřené napětí tedy dosahuje hodnot od -2 V do 2 V a vyhovuje všem zadaným požadavkům ohledně napěťové reprezentace měřeného tlaku.

3 SCHÉMA ZAPOJENÍ

V této kapitole bude podrobně popsáno kompletní schéma zapojení experimentálního monitoru tlaků. Jelikož obvodové řešení všech čtyř tlakových senzorů, které bude zařízení využívat, je stejné, tak kompletní schéma zapojení v příloze č. A.2 zahrnuje z důvodu lepší přehlednosti obvody pouze jednoho tlakového senzoru.

Výběr většiny aktivních prvků byl již zdůvodněn v kap. 2. Jestliže tomu tak u některých prvků nebylo, jejich volba bude objasněna v této kapitole. Stejně tak bude zdůvodněna volba hodnot všech pasivních součástek.

Některé podkapitoly budou z důvodu lepší orientace obsahovat obrázek ukazující konkrétní popisovanou část schématu zapojení a to i přes to, že kompletní schéma zapojení je zahrnuto v již zmíněné příloze č. A.2.

Zapojení bude obsahovat spoustu blokovacích kondenzátorů, které mají sloužit k odstranění případných rušivých střídavých napětí a také ke zvýšení stability některých obvodových prvků. K tomuto účelu byly zvoleny keramické kondenzátory o kapacitě 100 nF a elektrolytické kondenzátory s kapacitou 10 μ F, které by měly zajistit kvalitní širokopásmové blokování. Bude-li tedy v následujícím textu zmíněno použití blokovacích kondenzátorů, nebude již dále zmiňována jejich hodnota ani jejich typ.

Kompletní seznam použitých součástek je k dispozici v příloze A.3.

3.1 Indikace zapnutého zařízení

Do zařízení jsem se rozhodl přidat zelenou LED diodu indikující stav, kdy je zařízení zapnuto. Aby tuto LED bylo možné napájet ze stabilizátoru napětí 5 V, je třeba k ní připojit předřadný odpor, který nastaví proud tekoucí do této diody. Na tomto odporu také vznikne potřebný úbytek napětí.

Aby bylo možné určit potřebnou hodnotu předřadného rezistoru, je třeba znát napětí LED diody a také proud, který má touto LED téci. Vybrána byla LED dioda s napětím 1,9 V v propustném směru a proudovým odběrem 2 mA.

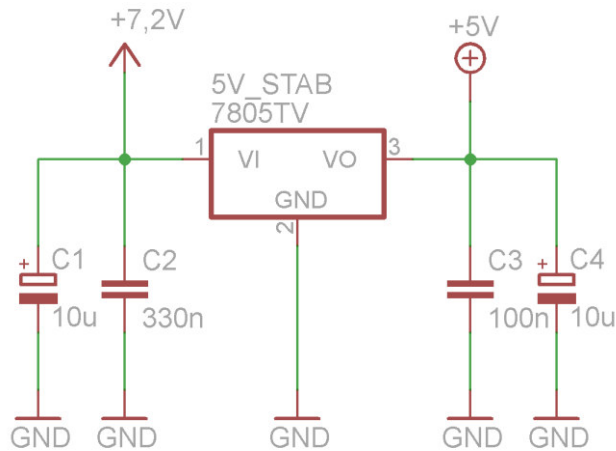
Hodnotu předřadného rezistoru k LED diodě je třeba vypočítat podle vztahu

$$R_{LED} = \frac{U_{STAB} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 - 1,9}{0,002} = 1550 \Omega \quad (3.1)$$

kde U_{STAB} je napětí stabilizátoru, U_{LED} je napětí v propustném směru LED diody a I_{LED} je proud tekoucí touto diodou v propustném směru.

Konkrétní hodnotu je třeba vybrat dle možností trhu a nejlépe nejbližší vyšší hodnotu. Zvolen byl tedy rezistor s odporem 1,6 k Ω z běžně dostupné řady E24.

3.2 Stabilizátor napětí 5 V



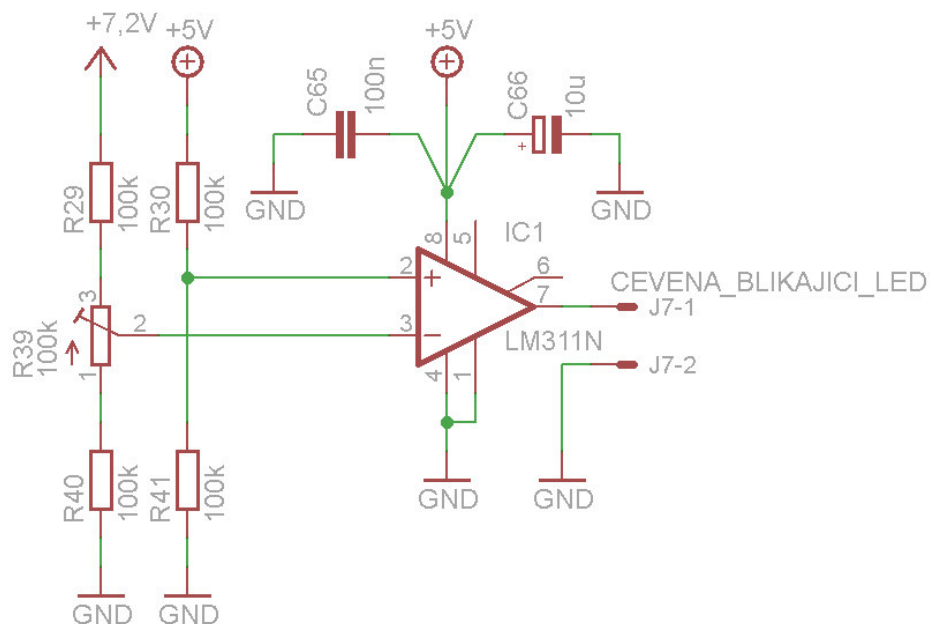
Obr. 3.1: Schéma zapojení stabilizátoru napětí 5 V.

Zapojení stabilizátoru napětí ukazuje obr. 3.1. Použití kondenzátorů C_2 , C_3 a C_4 doporučuje výrobce. C_2 je blokovací kondenzátor a C_3 chrání stabilizátor před rozkmitáním. Kondenzátor C_4 je filtrační a slouží jako krátkodobý zdroj energie při případném poklesu výstupního napětí při prudké změně odebíraného proudu. Na vstup byl ještě přidán další blokovací kondenzátor C_1 , který zajistí širokopásmové blokování a tedy méně zvlněné výstupní napětí.

3.3 Komparátor

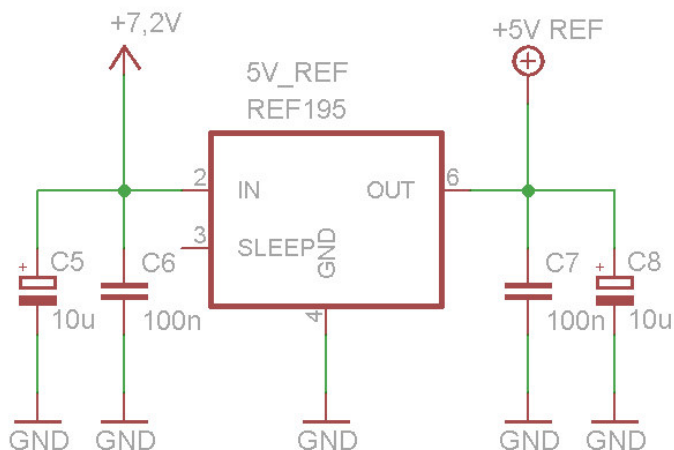
Zapojení komparátoru pro splnění navrženého účelu znázorňuje obr 3.2. K napájecímu pinu komparátoru LM311N jsou připojeny blokovací kondenzátory. Na výstup tohoto komparátoru je pomocí konektoru se zámkem do DPS připojena červená blikající LED dioda.

Na neinvertující vstup má být přivedeno referenční napětí 2,5 V získané pomocí napěťového děliče s dělicím poměrem 1:1. Hodnoty rezistorů R_{30} a R_{41} tedy musí být stejné. Jejich hodnota byla zvolena 100 k Ω . Tato vysoká hodnota odporu zajistí malou výkonovou ztrátu na těchto rezistorech. Na invertující vstup je opět přivedeno napětí přes odporový dělič. Toto napětí má být ovšem ručně nastavitelné. Navržené zapojení trimru R_{39} o hodnotě odporu 100 k Ω a pevných rezistorů R_{29} a R_{40} taktéž o velikosti odporu 100 k Ω zajistí nastavitelný dělicí poměr v rozmezí 1:2 až 2:1. Tento rozsah je pro účel zapojení více než dostatečný.



Obr. 3.2: Schéma zapojení komparátoru.

3.4 Napět'ová reference 5 V



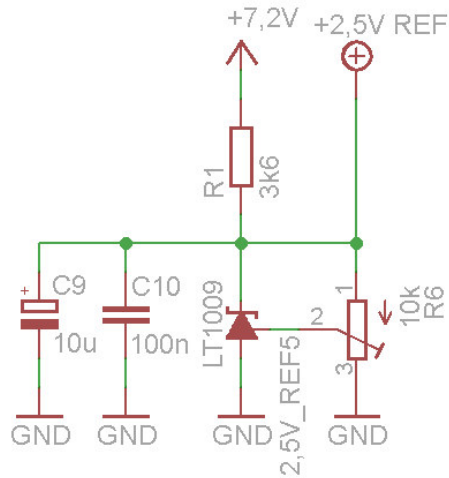
Obr. 3.3: Schéma zapojení napět'ové reference 5 V.

Blokovací kondenzátory na vstupu a na výstupu napět'ové reference na obr. 3.3 jsou zvoleny s ohledem na výrobcem doporučené hodnoty [4].

3.5 Napět'ová reference 2,5 V

Těchto napět'ových referencí je v zapojení použito hned několik. Obr. 3.4 ukazuje zapojení jedné z nich. Zapojení ostatních se liší jen v typu připojeného proměnného

rezistoru. U některých těchto referencí proměnný rezistor není vůbec zapojen. Není tedy nutné popisovat i ostatní, ve schématu zapojení zahrnuté, 2,5 V napěťové reference.

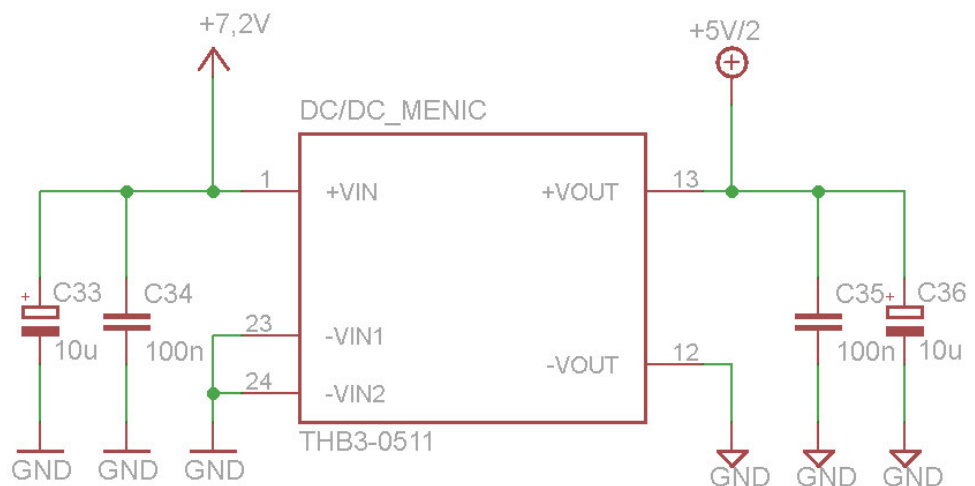


Obr. 3.4: Schéma zapojení napěťové reference 2,5 V.

Zapojení zahrnuje jeden pevný a jeden nastavitelný rezistor (v tomto případě se jedná konkrétně o trimr). Použité hodnoty odporů těchto dvou rezistorů vychází z doporučení výrobce [6]. Zapojení bylo doplněno o blokovací kondenzátory.

3.6 DC/DC měnič napětí

DC/DC měnič napětí je zapojen dle obr. 3.5. Zapojení obsahuje pouze blokovací kondenzátory na vstupní a výstupní bráně měniče.



Obr. 3.5: Schéma zapojení DC/DC měniče napětí.

3.7 Tlakový senzor

Zapojení tlakového senzoru (viz. příloha A.2) obsahuje pouze blokovací kondenzátory na napájecím pinu.

3.8 Přístrojový operační zesilovač

Schéma zapojení přístrojového operačního zesilovače do obvodu je znázorněno v příloze A.2.

U napájecího pinu 7 samotného zesilovače jsou zapojeny dva blokovací kondenzátory. Jeden z těchto kondenzátorů je keramický a má hodnotu 100 nF. Druhý blokovací kondenzátor je tantalový o kapacitě 10 μ F. Použití těchto blokovacích kondenzátorů doporučuje výrobce použitého přístrojového operačního zesilovače [4].

Po jednom keramickém blokovacím kondenzátoru s kapacitou 100 nF je použito u pinů 2 (invertující vstup), 3 (neinvertující vstup) a 5 (referenční terminál).

Mezi piny 1 a 8 je připojen přepínač a 3 rezistory. Hodnoty těchto rezistorů jsou určeny podle požadavků na přepínatelné tlakové rozsahy jednotlivých tlakových čidel. Níže uvedený příklad výpočtu hodnoty jednoho z těchto rezistorů platí pro tlakový senzor s celkovým rozsahem 12,7 cmH₂O, kde tento rezistor upravuje jeho rozsah tak, aby 1 V na výstupu zařízení odpovídal tlaku 2,5 cmH₂O.

Nejprve je třeba určit, jaký tlak odpovídá 1 V při plném rozsahu tlakového senzoru. Již víme, že plnému rozsahu odpovídají 2 V, tedy 1 V \sim 6,35 cmH₂O.

Dále je třeba vypočítat potřebné zesílení, jestliže má 1 V \sim 2,5 cmH₂O. To lze určit ze vztahu

$$G = \frac{P \sim 1V(\text{plný rozsah})}{P \sim 1V(\text{požadovaný rozsah})} = \frac{6,35}{2,5} = 2,54 \quad (3.2)$$

kde P je tlak.

Následně lze již určit hodnotu rezistoru ze vztahu, který uvádí výrobce přístrojového operačního zesilovače [4]

$$R_G = \frac{100 \cdot 10^3}{G-1} = \frac{100 \cdot 10^3}{2,54-1} = 64,935 \text{ k}\Omega \quad (3.3)$$

a dále stačí vybrat nejbližší hodnotu odporu z řady s přesností ± 0.1 %. Zde byl zvolen rezistor o hodnotě 64,9 k Ω .

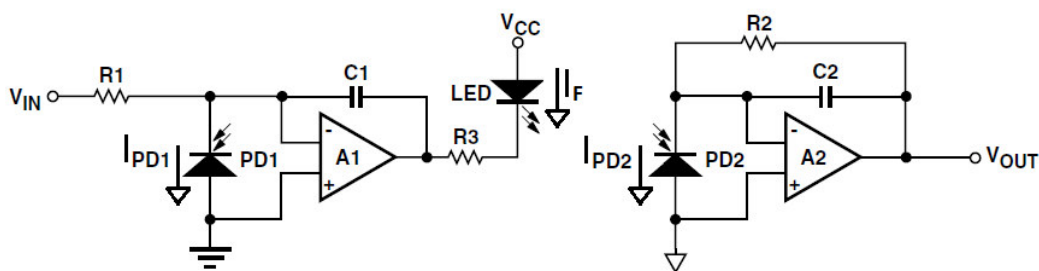
Tab. 3.1 zobrazuje vypočítané hodnoty zesílení a odporů pro všechny použité tlakové senzory a jejich navržené rozsahy.

Tab. 3.1: Navržené rozsahy tlaku a jim odpovídající hodnoty zesílení a odporu pro všechny použité tlakové senzory.

Rozsah senzoru [cmH₂O]	Navržené rozsahy	G [-]	R [kΩ]
±12,7	1 V ~ 5 cmH ₂ O	1,27	374,0
	1 V ~ 2,5 cmH ₂ O	2,54	64,9
	1 V ~ 1 cmH ₂ O	6,35	18,7
±70,31	1 V ~ 25 cmH ₂ O	1,41	243,0
	1 V ~ 10 cmH ₂ O	3,53	39,2
	1 V ~ 5 cmH ₂ O	7,05	16,5
±408	1 V ~ 200 cmH ₂ O	1,02	5100,0
	1 V ~ 100 cmH ₂ O	2,04	95,3
	1 V ~ 25 cmH ₂ O	8,16	14,0

3.9 Galvanické oddělení

K optočlenu HCNR201 je třeba připojit několik pasivních i aktivních součástek k zajištění jeho funkčnosti. Má-li fungovat pouze jako galvanické oddělení napětí o jedné polaritě, je nejvhodnější využít doporučené zapojení udávané výrobcem, které je zobrazené na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Schéma zapojení optočlenu (převzato z [5]).

Toto zapojení obsahuje dva stejné operační zesilovače. Je vhodné, aby tyto zesilovače měly opět vstupy i výstup typu rail-to-rail. Po porovnání několika různých typů těchto zesilovačů od různých výrobců byl vybrán integrovaný obvod MCP6141 od firmy Microchip, který vyhovuje použití v zařízení (napájení 5 V, nízký klidový proud). Oba použité operační zesilovače mají ke svému napájecímu pinu připojeny blokovací kondenzátory.

Rezistory R_1 (ve schématu zapojení v příloze A.2 označen jako R_{14}) a R_2 (sériové spojení trimru R_7 a pevného rezistoru R_{11}) nastavují napěťový přenos. Rezistorem R_1 by

měl téci proud maximálně $50 \mu\text{A}$. Jelikož napěťový úbytek na něm nemůže být větší než $4,5 \text{ V}$, pak dle Ohmova zákona lze určit jeho minimální hodnotu $90 \text{ k}\Omega$. Zvolených $100 \text{ k}\Omega$ tedy vyhovuje požadavku na maximální povolený proud. Při rovnosti odporů R_1 a R_2 je napěťový přenos roven 1, což je požadovaná hodnota, tedy R_2 byl zvolen taktěž $100 \text{ k}\Omega$. Výrobce garantuje přesnost tohoto přenosu pouze $\pm 5 \%$, proto byl do zapojení přidán zmíněný trimr, kterým lze nastavit přenos na velice přesnou hodnotu 1.

Rezistor R_3 (R_9) nastavuje vstupní proud optočlenu I_F , jehož zdrojem je operační zesilovač A1 (OZ3). V katalogových listech optočlenu HCNR201 [5] výrobce doporučuje jeho hodnotu v rozmezí $1 \div 20 \text{ mA}$. Jeho hodnotu lze vypočítat taktěž z Ohmova zákona opět za předpokladu, že napěťový úbytek na něm nemůže být větší než $4,5 \text{ V}$. Zvolených 240Ω zajistí maximální proud $I_F = 18,75 \text{ mA}$.

Kondenzátory C_1 a C_2 (C_{39} a C_{30}) zapojené v záporné zpětné vazbě zesilovačů jsou keramické o kapacitě 100 pF a slouží ke zvýšení stability těchto operačních zesilovačů.

4 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Vzhledem k požadavku na jednoduchou konstrukci a také vzhledem k tomu, že v uvažované konstrukční krabici RE4031 je dostatek místa na umístění poměrně velké DPS, bylo rozhodnuto, že všechny použité součástky budou v provedení THT. Toto provedení umožní lepší manipulaci se samotnými součástkami a také usnadní jejich pájení. Výhodou této technologie součástek je i nízká náročnost na technologickou výrobu DPS.

Deska byla navržena s ohledem na uvažované rozmístění ovládacích prvků na předním a zadním panelu přístrojové krabice.

Návrh desky počítal s vyleptáním jen jedné (spodní) vrstvy s tím, že spoje v horní vrstvě budou realizovány drátovými propojkami.

DPS byla navržena tak, aby splňovala požadavky na výrobu kladené Ústavem radioelektroniky FEKT VUT, kde byla tato deska vyleptána. Takto připravenou desku bylo dále třeba ještě navrtat a opracovat na požadovaný rozměr.

K návrhu DPS byl využit specializovaný počítačový program Eagle vyvíjený společností CadSoft.

Navržená DPS by se dala opticky rozdělit do pěti bloků, kde čtyři bloky jsou stejné a každý z těchto bloků tvoří obvody jednoho z použitých tlakových senzorů. Poslední blok zahrnuje všechny ostatní prvky navrženého schématu zapojení.

Jelikož má zařízení galvanicky oddělené výstupy, bylo nutné výstupní obvody oddělit od zbytku zapojení izolační mezerou minimálně 1 cm. Tzn. na DPS vytvořit mezeru minimálně 1 cm mezi spoji těchto dvou galvanicky oddělených částí.

Návrh využívá několik konektorů se zámkem do DPS. Pomocí těchto konektorů je připojena baterie a také všechny obvody prvky umístěné na předním, případně zadním panelu konstrukční krabice. Použití konektorů umožní snadné odpojení těchto prvků a tedy snadné vyjmutí desky z konstrukční krabice.

Výsledný návrh DPS je k dispozici v příloze B. Obrázky navržené desky nejsou v měřítku 1:1, protože deska svojí velikostí přesahuje maximální možné rozměry příloženého obrázku.

5 MĚŘENÍ KOREKČNÍCH KŘIVEK

Jedním z požadavků na zařízení byla jeho přesnost. Byly tedy změřeny korekční křivky jednotlivých kanálů, které vypovídají o celkové přesnosti zkonstruovaného přístroje.

5.1 Popis metody

Jelikož zařízení slouží k měření tlaku, bylo třeba zajistit měřicí aparaturu, která umožní nastavovat libovolnou hodnotu tlaku, který se přivede na vstup tlakového senzoru příslušného kanálu.

Měřicí aparatura se skládala ze skleněné nádoby, která měla jeden tlakový vstup a dva tlakové výstupy. Ke vstupu byla připojena injekční stříkačka, pomocí které bylo možné nastavit velikost tlaku uvnitř nádoby. K jednomu ze dvou výstupů byl připojen referenční měřicí přístroj. Pro nastavované velikosti tlaku do 140 cmH₂O byl použit digitální měřicí přístroj CA 852 (přesnost $\pm 0,8436$ cmH₂O) a pro vyšší nastavené hodnoty tlaku byl zapojen rtuťový sloupcový ukazatel (přesnost ovlivněna pouze nepřesností odečtu na stupnici). Ke druhému výstupu z tlakové nádoby byl připojen samotný senzor zkonstruovaného měřicího přístroje.

K BNC výstupu příslušného kanálu byl připojen multimetr HP 34401A, na kterém se odečítala velikost stejnosměrného napětí, ze kterého se poté jednoduše pomocí přepočtu určil výsledný naměřený tlak. Přesnost tohoto přístroje na rozsahu 1 V je $\pm(0,002\% \text{ čtení} + 0,0006\% \text{ rozsahu})$ a na rozsahu 10 V je jeho přesnost $\pm(0,0015\% \text{ čtení} + 0,0004\% \text{ rozsahu})$. Přístroj je tedy dostatečně přesný a lze předpokládat, že výsledky měření ovlivní jen naprosto minimálně.

Během měření se ukázalo, že přístroj nefunguje v celém původně zamýšleném rozsahu, kdy na výstupu bylo plánováno napětí v rozsahu $-2 \div 2$ V. Přístroj ukazuje přesně pouze v rozsahu přibližně $-2 \div 1,6$ V. Na vině je použitý přístrojový operační zesilovač AD623, jehož výstup je saturován, pakliže na vstupu je napětí vyšší než 4,1 V. Pro zamýšlené výstupní napětí v rozsahu $-2 \div 2$ V by tento zesilovač musel zvládat pracovat se vstupním napětím až do 4,5 V, tedy by musel mít vstupy typu rail-to-rail. Vzhledem k tomuto faktu byly odvozeny tlakové rozsahy všech kanálů.

5.2 Zpracování naměřených hodnot

5.2.1 Kanál A

Tab. 5.1: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro kanál A.

nastavené	naměřené														
	1 V ~ 200 cmH ₂ O					1 V ~ 100 cmH ₂ O					1 V ~ 25 cmH ₂ O				
p_N [cmH ₂ O]	U_M [V]	p_M [cmH ₂ O]	Δ_p [cmH ₂ O]	K_p [cmH ₂ O]	δ_p [%]	U_M [V]	p_M [cmH ₂ O]	Δ_p [cmH ₂ O]	K_p [cmH ₂ O]	δ_p [%]	U_M [V]	p_M [cmH ₂ O]	Δ_p [cmH ₂ O]	K_p [cmH ₂ O]	δ_p [%]
300	1,481	296,2	-3,8	3,8	-1,27										
250	1,258	251,6	1,6	-1,6	0,64										
200	0,974	194,8	-5,2	5,2	-2,60	1,965	196,5	-3,5	3,5	-1,75					
150	0,721	144,2	-5,8	5,8	-3,87	1,456	145,6	-4,4	4,4	-2,93					
100	0,497	99,4	-0,6	0,6	-0,60	0,996	99,6	-0,4	0,4	-0,40					
50	0,253	50,6	0,6	-0,6	1,20	0,506	50,6	0,6	-0,6	1,20	1,993	49,83	-0,17	0,17	-0,35
25	0,129	25,8	0,8	-0,8	3,20	0,255	25,5	0,5	-0,5	2,00	1,006	25,15	0,15	-0,15	0,60
0	0,002	0,4	0,4	-0,4	-	0,001	0,1	0,1	-0,1	-	-0,008	-0,20	-0,20	0,20	-
-25	-0,123	-24,6	0,4	-0,4	-1,60	-0,250	-25,0	0,0	0,0	0,00	-1,004	-25,10	-0,10	0,10	0,40
-50	-0,247	-49,4	0,6	-0,6	-1,20	-0,499	-49,9	0,1	-0,1	-0,20	-1,988	-49,70	0,30	-0,30	-0,60
-100	-0,502	-100,4	-0,4	0,4	0,40	-1,001	-100,1	-0,1	0,1	0,10					
-150	-0,731	-146,2	3,8	-3,8	-2,53	-1,471	-147,1	2,9	-2,9	-1,93					
-200	-0,984	-196,8	3,2	-3,2	-1,60	-1,971	-197,1	2,9	-2,9	-1,45					
-250	-1,237	-247,4	2,6	-2,6	-1,04										
-300	-1,481	-296,2	3,8	-3,8	-1,27										
-350	-1,729	-345,8	4,2	-4,2	-1,20										
-400	-1,978	-395,6	4,4	-4,4	-1,10										

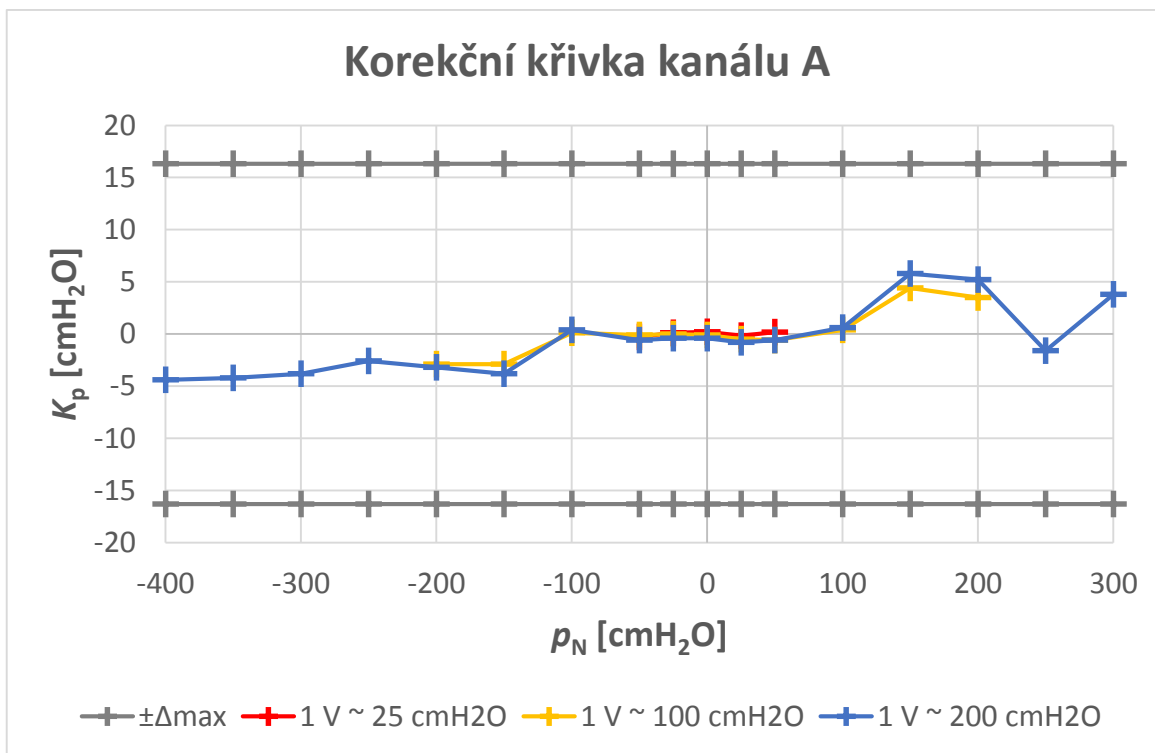
Příklad výpočtu pro 1. řádek:

$$p_M = U_M * \text{"konstanta rozsahu"} = 1,481 * 200 = 296,2 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\Delta_p = p_M - p_N = 296,2 - 300 = -3,8 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$K_p = -\Delta_p = 3,8 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{p_N} * 100 = \frac{-3,8}{300} * 100 = -1,27 \%$$



Obr. 5.1: Korekční křivka kanálu A.

5.2.2 Kanál B

Tab. 5.2: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro kanál B.

nastavené	naměřené														
	1 V ~ 25 cmH ₂ O					1 V ~ 10 cmH ₂ O					1 V ~ 5 cmH ₂ O				
p_N [cmH ₂ O]	U_M [V]	p_M [cmH ₂ O]	Δ_p [cmH ₂ O]	K_p [cmH ₂ O]	δ_p [%]	U_M [V]	p_M [cmH ₂ O]	Δ_p [cmH ₂ O]	K_p [cmH ₂ O]	δ_p [%]	U_M [V]	p_M [cmH ₂ O]	Δ_p [cmH ₂ O]	K_p [cmH ₂ O]	δ_p [%]
35	1,413	35,33	0,33	-0,33	0,93										
30	1,231	30,78	0,78	-0,78	2,58										
25	1,032	25,80	0,80	-0,80	3,20										
20	0,801	20,03	0,03	-0,03	0,13	2,003	20,03	0,03	-0,03	0,15					
15	0,613	15,33	0,33	-0,33	2,17	1,541	15,41	0,41	-0,41	2,73					
10	0,406	10,15	0,15	-0,15	1,50	1,019	10,19	0,19	-0,19	1,90	2,029	10,15	0,15	-0,15	1,45
5	0,203	5,08	0,08	-0,08	1,50	0,514	5,14	0,14	-0,14	2,80	1,035	5,18	0,18	-0,18	3,50
0	-0,011	-0,28	-0,28	0,28	-	-0,011	-0,11	-0,11	0,11	-	-0,009	-0,05	-0,05	0,05	-
-5	-0,232	-5,80	-0,80	0,80	16,00	-0,534	-5,34	-0,34	0,34	6,80	-1,061	-5,31	-0,31	0,31	6,10
-10	-0,431	-10,78	-0,78	0,78	7,75	-1,082	-10,82	-0,82	0,82	8,20	-2,172	-10,86	-0,86	0,86	8,60
-15	-0,652	-16,30	-1,30	1,30	8,67	-1,649	-16,49	-1,49	1,49	9,93					
-20	-0,837	-20,93	-0,93	0,93	4,63	-2,105	-21,05	-1,05	1,05	5,25					
-25	-1,045	-26,13	-1,13	1,13	4,50										
-30	-1,223	-30,58	-0,58	0,58	1,92										
-35	-1,443	-36,08	-1,08	1,08	3,07										
-40	-1,646	-41,15	-1,15	1,15	2,88										
-50	-2,032	-50,80	-0,80	0,80	1,60										

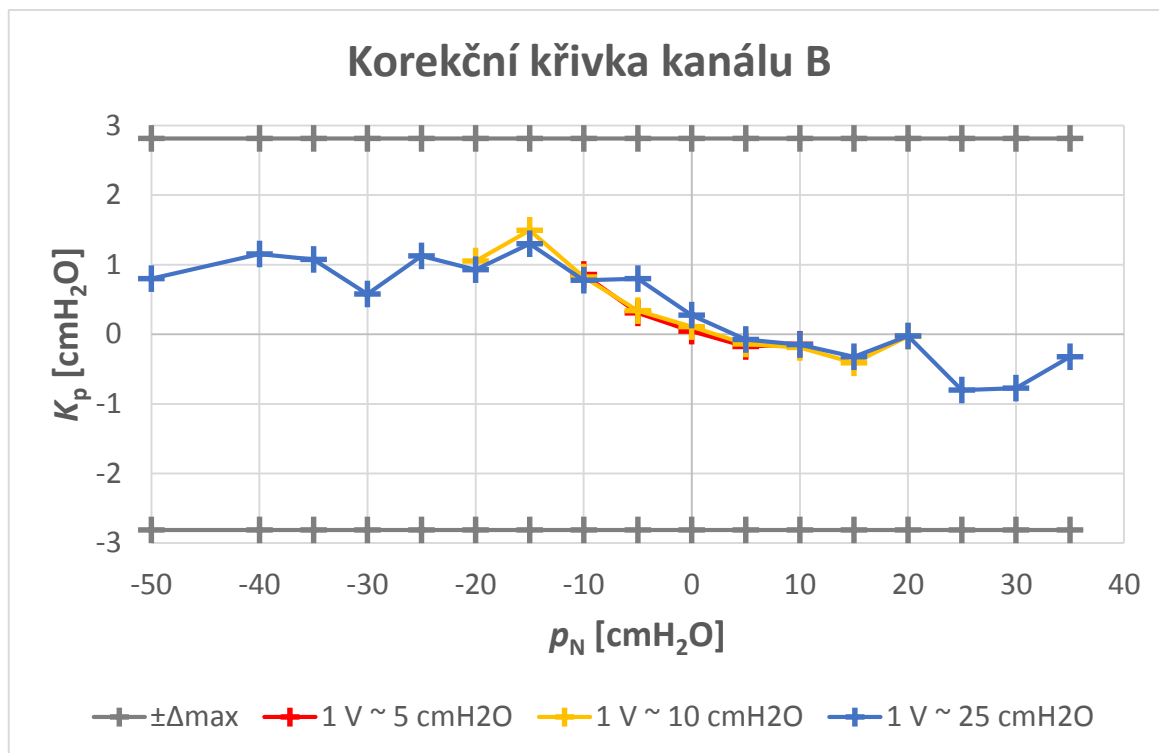
Příklad výpočtu pro 1. řádek:

$$p_M = U_M * \text{"konstanta rozsahu"} = 1,413 * 25 = 35,33 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\Delta_p = p_M - p_N = 35,325 - 35 = 0,33 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$K_p = -\Delta_p = -0,33 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{p_N} * 100 = \frac{0,325}{35} * 100 = 0,93 \%$$



Obr. 5.2: Korekční křivka kanálu B.

5.2.3 Kanál C

Tab. 5.3: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro kanál C.

nastavené	naměřené														
	1 V ~ 5 cmH ₂ O					1 V ~ 2,5 cmH ₂ O					1 V ~ 1 cmH ₂ O				
p_N [cmH ₂ O]	U_M [V]	p_M [cmH ₂ O]	Δ_p [cmH ₂ O]	K_p [cmH ₂ O]	δ_p [%]	U_M [V]	p_M [cmH ₂ O]	Δ_p [cmH ₂ O]	K_p [cmH ₂ O]	δ_p [%]	U_M [V]	p_M [cmH ₂ O]	Δ_p [cmH ₂ O]	K_p [cmH ₂ O]	δ_p [%]
7	1,490	7,45	0,45	-0,45	6,43										
6	1,263	6,32	0,32	-0,32	5,25										
5	1,059	5,30	0,30	-0,30	5,90	2,124	5,31	0,31	-0,31	6,20					
4	0,869	4,35	0,35	-0,35	8,62	1,742	4,36	0,36	-0,36	8,88					
3	0,675	3,38	0,38	-0,38	12,50	1,344	3,36	0,36	-0,36	12,00					
2	0,463	2,32	0,32	-0,32	15,75	0,929	2,32	0,32	-0,32	16,13	2,232	2,23	0,23	-0,23	11,60
1	0,257	1,29	0,29	-0,29	28,50	0,528	1,32	0,32	-0,32	32,00	1,303	1,30	0,30	-0,30	30,30
0	-0,012	-0,06	-0,06	0,06	-	-0,004	-0,01	-0,01	0,01	-	0,002	0,00	0,00	-0,00	-
-1	-0,165	-0,82	0,18	-0,18	-17,50	-0,329	-0,82	0,18	-0,18	-17,75	-0,817	-0,82	0,18	-0,18	-18,30
-2	-0,407	-2,04	-0,04	0,04	1,75	-0,817	-2,04	-0,04	0,04	2,13	-2,043	-2,04	-0,04	0,04	2,15
-3	-0,623	-3,12	-0,12	0,12	3,83	-1,239	-3,10	-0,10	0,10	3,25					
-4	-0,805	-4,03	-0,03	0,03	0,63	-1,621	-4,05	-0,05	0,05	1,31					
-5	-0,931	-4,65	0,35	-0,35	-6,90	-1,868	-4,67	0,33	-0,33	-6,60					
-6	-1,152	-5,76	0,24	-0,24	-4,00										
-7	-1,375	-6,87	0,13	-0,13	-1,79										
-8,5	-1,672	-8,36	0,14	-0,14	-1,65										
-10	-1,982	-9,91	0,09	-0,09	-0,90										

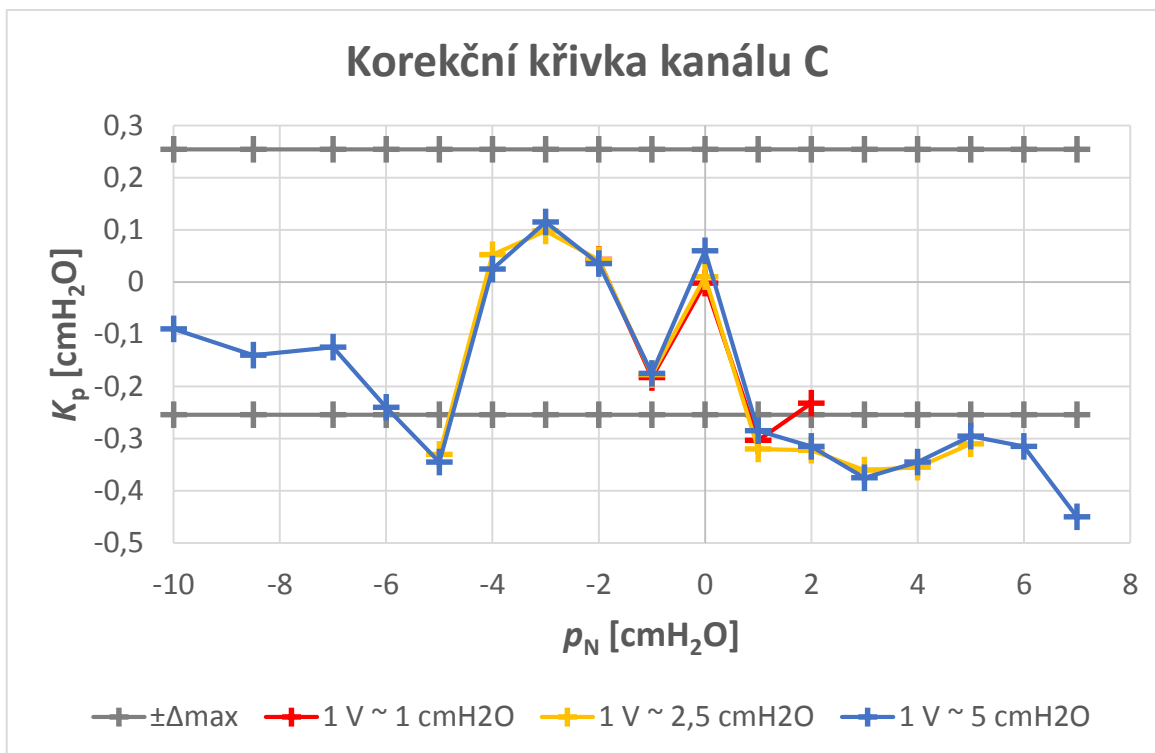
Příklad výpočtu pro 1. řádek:

$$p_M = U_M * \text{"konstanta rozsahu"} = 1,490 * 5 = 7,45 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\Delta_p = p_M - p_N = 7,45 - 7 = 0,45 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$K_p = -\Delta_p = -0,45 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{p_N} * 100 = \frac{0,45}{7} * 100 = 6,43 \%$$



Obr. 5.3: Korekční křivka kanálu C.

5.3 Použité měřicí přístroje a pomůcky

Manometr CHAUVIN ARNOUX CA 852

Rtuťový sloupcový ukazatel tlaku

Multimetr HEWLETT PACKARD 34401A

Skleněná nádoba

Injekční stříkačka

5.4 Zhodnocení

Z naměřených hodnot byly vypracovány korekční křivky, které lze považovat za hlavní výsledek celého měření. Tyto křivky ukazují, jaká je přesnost zkonstruovaného zařízení. Vynesené korekční křivky reprezentují celkovou nepřesnost přístroje, tedy zahrnují nepřesnosti všech použitých obvodových prvků v jednotlivých kanálech. Zobrazené meze reprezentují pouze výrobcem garantovanou maximální nepřesnost daného tlakového senzoru. Dále byly také vypočítány relativní odchylky naměřeného tlaku od jeho skutečné hodnoty.

Výsledky měření pro kanál A ukazují, že jeho přesnost je mnohem vyšší než garantovaná přesnost použitého tlakového senzoru. Maximální relativní odchylka tohoto kanálu je -3,87 %, avšak průměrná hodnota této odchylky je mnohem menší. Z výsledků je také patrné, že zvolený tlakový rozsah nemá prakticky žádný vliv na přesnost.

Dosažené výsledky měření kanálu B opět ukazují, že přesnost tohoto kanálu je mnohem vyšší než garantovaná přesnost použitého tlakového čidla. Relativní odchylka ale v tomto případě dosahuje hodnoty až 9,93 %. Průměrná relativní odchylka je ale i v tomto případě o dost nižší. Vyšší relativní odchylka než v případě kanálu A je nejspíše způsobena použitým referenčním manometrem, ten totiž dosahuje přesnosti $\pm 0,8436$ cmH₂O, což rozhodně není zanedbatelná hodnota v porovnání s tlakovým rozsahem senzoru tohoto kanálu. Zvolený rozsah tlaku zkonstruovaného přístroje opět nemá prakticky žádný vliv na přesnost.

Hodnoty korekce a relativní odchylky v kanálu C jsou mimo výrobcem garantovanou přesnost tlakového senzoru použitého v tomto kanále. Jelikož je zapojení všech kanálů stejné a tlaková čidla ve všech kanálech mají podobnou garantovanou přesnost, lze jednoznačně usoudit, že takto nepřesné dosažené výsledky měření korekční křivky tohoto kanálu jsou způsobeny nepřesným měřením, nikoliv nepřesným přístrojem. Na vině je použitý referenční manometr, který svou přesností $\pm 0,8436$ cmH₂O absolutně nevyhovuje nízkému tlakovému rozsahu tohoto kanálu (potažmo nastavovaným hodnotám tlaku v rozsahu -10 ÷ 7 cmH₂O). Na výsledky měření opět nemá téměř žádný vliv zvolený rozsah kanálu. Lze předpokládat, že v případě použití přesnějšího referenčního měřiče tlaku by naměřené korekční křivky kanálu C byly podobné těm u kanálů A a B.

Kanál D obsahuje stejný tlakový senzor jako kanál C. Jelikož se ukázalo, že kanál C není možné s dostupným vybavením přesně změřit, měření kanálu D by ztrácelo smysl, a proto již neproběhlo.

Z výsledků měření je patrné, že nepřesnost celého zařízení je daleko menší než výrobcem garantovaná maximální nepřesnost použitých tlakových senzorů. To lze vysvětlit vybavením přístroje ruční kalibrací nulového tlaku, která tedy splnila svůj zamýšlený účel.

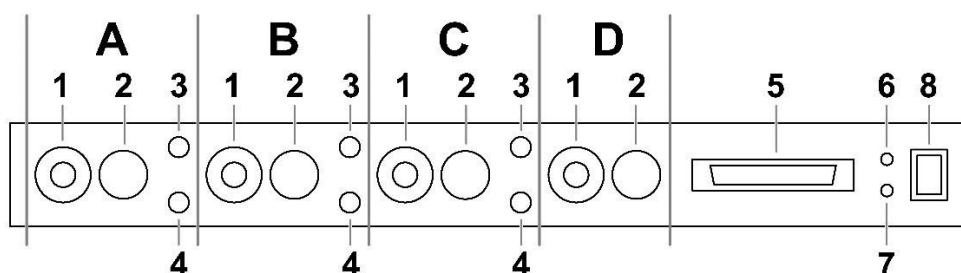
Vzhledem k výše uvedenému lze konstatovat, že zkonstruovaný měřicí přístroj je pro svůj účel experimentálního měření dostatečně přesný.

6 UŽIVATELSKÝ MANUÁL

Následující text pojednává o možnostech zkonstruovaného monitoru tlaků a podrobně popisuje jeho obsluhu. Popis obsluhy zařízení je podpořen obrázky.

6.1 Popis vnějšku přístroje

6.1.1 Přední panel



Obr. 6.1: Přední panel přístroje.

Význam písmen z obr. 6.1:

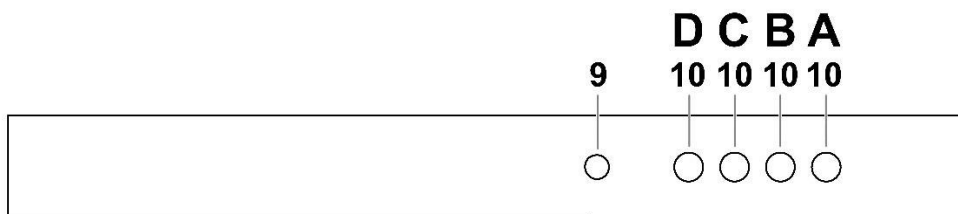
Písmena A, B, C a D označují jednotlivé kanály. Obrázek ukazuje, že každý kanál zahrnuje několik prvků. Kanály A, B a C obsahují interní tlakový senzor. Kanál D využívá externí tlakové čidlo, které se připojuje pomocí konektoru (5).

Význam čísel z obr. 6.1:

- 1 ... Ruční kalibrace nulového tlaku
- 2 ... Přepínání rozsahů
Každý z přepínačů rozsahů má tři polohy. Poloha vlevo znamená vždy největší rozsah. Poloha vpravo znamená nejnižší rozsah.
- 3 ... Vstup kladného tlaku (přetlaku)
Přivedeme-li na tento tlakový vstup přetlak, přístroj bude indikovat kladnou hodnotu tlaku. Přivedeme-li na tento vstup podtlak, naměříme záporný tlak.
- 4 ... Vstup záporného tlaku (podtlaku)
Pakliže na tento vstup přivedeme podtlak, pak bude indikována kladná hodnota tlaku. Naopak přivedeme-li přetlak, přístroj bude ukazovat zápornou hodnotu tlaku.
- 5 ... Připojení externího tlakového senzoru (kanál D) nebo nabíječky baterií
Realizováno konektorem XINYA CAN 50 Z.

- 6 ... Zelená LED dioda
Indikace zapnutého přístroje.
- 7 ... Červená LED dioda
Indikace slabých baterií. Od momentu rozsvěcení této diody se baterie zcela vybijí přibližně za 30 minut.
- 8 ... Vypínač

6.1.2 Zadní panel



Obr. 6.2: Zadní panel přístroje.

Význam čísel z obr. 6.2:

- 9 ... Zemní zdířka (lze využít jako stínění)
- 10 ... Výstupy (BNC konektory)

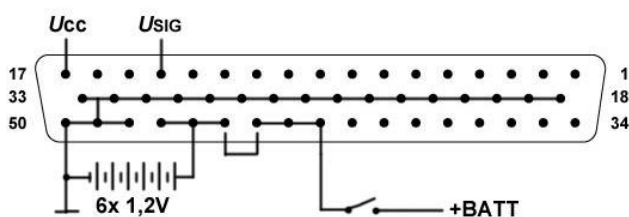
6.2 Postup měření

1. Zapneme zařízení vypínačem (8) (rozsvítí se zelená LED dioda (6)).
2. K výstupnímu BNC konektoru (10) zvoleného kanálu připojíme měřicí přístroj (například osciloskop nebo voltmetr).
3. Provedeme kalibraci nulového tlaku (je třeba provádět před každým měřením). Kalibraci provedeme tak, že od kanálu, který chceme využít k měření, odpojíme (jsou-li připojeny) oba tlakové vstupy (3, 4) a přepínač rozsahů tohoto kanálu (2) nastavíme do polohy vpravo, tedy na nejnižší rozsah, čímž zajistíme nejcitlivější možnou kalibraci. Dále potenciometr (1) daného kanálu nastavíme do takové polohy, aby použitý měřicí přístroj ukazoval nulové napětí. V případě kalibrace kanálu D, který využívá externí tlakový senzor, nejdříve připojíme tento senzor pomocí konektoru (5) a dále již postupujeme obdobně.
4. Na jeden ze dvou tlakových vstupů (3, 4) zvoleného kanálu přivedeme příslušný zdroj tlaku.
5. Přepínačem rozsahů (2) zvolíme vhodný tlakový rozsah. Je doporučeno nejprve nastavit největší rozsah (poloha zcela vlevo). Připojený měřicí přístroj může ukazovat velikost napětí v rozsahu maximálně $-2 \div 1,6$ V. Je-li indikovaná hodnota napětí výrazně menší, lze nastavit menší tlakový rozsah (přepínač (2) o jednu, případně o dvě polohy vpravo), aby se maximální indikovaná hodnota napětí co

nejvíce přiblížila hodnotě -2 V případně 1,6 V, čímž se zlepší odečet naměřených hodnot. Přesáhneme-li v průběhu měření vlivem výrazné změny velikosti přiváděného tlaku tyto hodnoty, je třeba opět snížit rozsah (přepínač (2) přepnout o jednu, případně o dvě polohy vlevo).

6.3 Nabíjení baterií

Níže na obr. 6.3 je zobrazeno zapojení konektoru XINYA CAN 50 Z, pomocí něhož se nabíjí baterie. Samotnou nabíječku je třeba připojit následovně. Na jeden z pinů 18 ÷ 33, 48, 49 nebo 50 záporný pól. Kladný pól pak k pinu 45, 46 nebo 47.



Obr. 6.3: Zapojení konektoru XINYA CAN 50 Z.

6.4 Tlakové rozsahy kanálů

V tab. 6.1 jsou zobrazeny hodnoty rozsahů jednotlivých kanálů. Tabulka také zobrazuje maximální velikost tlaku, který lze na daném rozsahu měřit. U každého kanálu je taktéž zobrazena maximální velikost tlakového zatížení (přetížení), při kterém sice zařízení nebude ukazovat správnou velikost tlaku, ale zároveň se nepoškodí, nedojde-li k překročení této hodnoty. Zařízení je konstruováno tak, že tato hodnota není závislá na zvoleném rozsahu.

Tab. 6.1: Tlakové rozsahy jednotlivých kanálů s odpovídajícími hodnotami maximálního měřitelného tlaku a maximálního tlakového zatížení.

<i>Kanál</i>	<i>Rozsahy</i>	<i>Max. měřitelný tlak [cmH₂O]</i>	<i>Max. tlakové zatížení [cmH₂O]</i>
A	1 V ~ 200 cmH ₂ O	-400 ÷ 320	±1428
	1 V ~ 100 cmH ₂ O	-200 ÷ 160	
	1 V ~ 25 cmH ₂ O	-50 ÷ 40	
B	1 V ~ 25 cmH ₂ O	-50 ÷ 40	±703
	1 V ~ 10 cmH ₂ O	-20 ÷ 16	
	1 V ~ 5 cmH ₂ O	-10 ÷ 8	
C, D	1 V ~ 5 cmH ₂ O	-10 ÷ 8	±762
	1 V ~ 2,5 cmH ₂ O	-5 ÷ 4	
	1 V ~ 1 cmH ₂ O	-2 ÷ 1,6	

6.5 Technické údaje

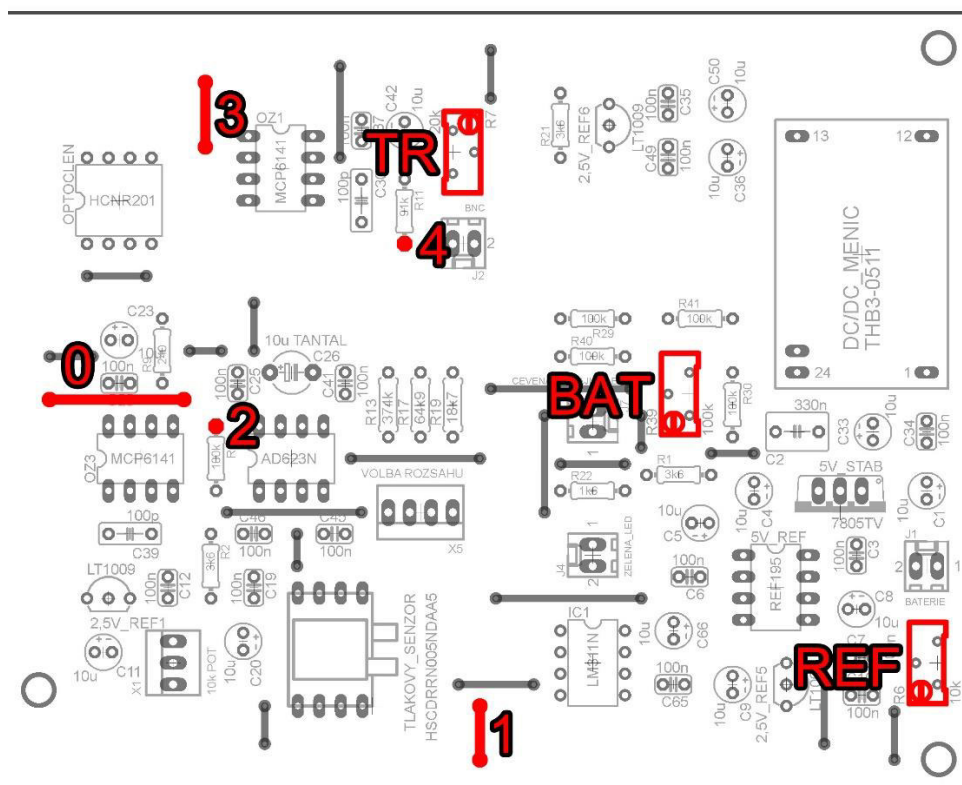
Napájení:	baterie 7,2 V (NiMH 2000 mAh)
Živostnost baterií:	21 hodin
Výstupní napětí:	-2 ÷ 1,6 V
Izolační pevnost výstupů:	3 kVrms
Vnější rozměry:	43,65 x 440 x 350 mm
Provozní teplotní rozsah:	0 ÷ 85 °C

7 SERVISNÍ MANUÁL

Jelikož se jedná o experimentální zařízení pro biomedicínské aplikace, je vhodné minimálně jednou za rok zkontrolovat jeho stav. Tato kontrola spočívá v ověření, zda zařízení ukazuje správnou velikost měřeného tlaku. K ověření je třeba využít druhý, referenční měřič tlaku, který musí být alespoň o řád přesnější. Ukazuje-li tento referenční přístroj výrazně jiné hodnoty (odchylka více než 3 % při maximálním měřitelném tlaku) než samotný přístroj, je třeba provést kalibraci celého zařízení. Pakliže není možné ověřit přesnost zařízení použitím referenčního měřicího přístroje, je třeba rovnou přistoupit ke kalibraci.

7.1 Kalibrace zařízení

Ke kalibraci je třeba použít stejnosměrný voltmetr. Je nutné měřit napětí na řadě míst na desce plošného spoje. Všechny tyto měřicí body jsou vyznačeny v obr. 7.1. Na obrázku jsou také označeny jednotlivé trimry sloužící ke kalibraci. Samotný postup kalibrace se na tento obrázek odkazuje.



Obr. 7.1: Trimry a vhodné měřicí body pro provádění kalibrace.

Význam čísel z obr. 7.1:

0 ...	GND
1 ...	U_{REF} (2,5 V napěťová reference)
2 ...	U_{AD623N} (výstup přístrojového OZ)
3 ...	GND 2
4 ...	U_{VYST}

Postup kalibrace:

1. Během kalibrace se nesmí měnit velikost tlaku přiváděného na tlakové senzory. Odpojíme tedy všechny tlakové vstupy. Na nastavení potenciometru pro ruční kalibraci nulového tlaku a stejně tak na nastavení rozsahu nezáleží.
2. Nejdříve je třeba doladit jednu z 2,5 V napěťových referencí přesně na její jmenovitou hodnotu. K tomu využijeme měřicí body 1 a 0 a trimr označený REF.
3. Dále je třeba změřit výstupní napětí přístrojového operačního zesilovače AD623N (body 2 a 0) a naměřenou hodnotu si poznamenat.
4. Nakonec doladíme napěťový přenos optočlenu na 1. K tomu využijeme měřicí body 4 a 3. Trimr s označením TR nastavíme tak, abychom naměřili stejné napětí jako v přechodím bodě na výstupu AD623N. Místo měřicích bodů 4 a 3 lze s výhodou využít BNC výstup daného kanálu, ovšem v tomto případě musíme trimrem TR nastavit napětí o 2,5 V nižší, než jaké jsme naměřili v přechodím bodu.
5. Body postupu 3 a 4 opakujeme pro další 3 zbývající kanály (všechny 4 kanály jsou na DPS navrženy stejně, čili měřicí body lze u všech kanálů použít obdobně).

7.2 Nastavení indikace slabých baterií

Zařízení umožňuje nastavit napěťovou úroveň baterií, při které začne blikat červená LED dioda signalizující slabé baterie.

Nejvhodnějším způsobem, jakým tuto úroveň nastavit, je odpojení baterií a připojení nastavitelného zdroje napětí. Na tomto zdroji nastavíme požadovanou napěťovou úroveň, například 6,5 V (zařízení je typicky napájeno napětím 7,2 V a přestává fungovat při napětí přibližně 6 V). Trimr BAT nastavíme do takové polohy, kdy začne blikat červená LED dioda (mírné pootočení tímto trimrem po směru hodinových ručiček způsobí zhasnutí červené LED).

8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a zkonstruovat experimentální monitor tlaků pro biomedicínské aplikace. Zařízení mělo obsahovat čtyři kanály. Každý kanál měl umožňovat ruční kalibraci nulového tlaku a také měl mít tři rozsahy. Zařízení dále mělo mít galvanicky oddělené výstupy, a jelikož je napájené z baterií, mělo být doplněno indikací slabých baterií.

Během návrhu tohoto zařízení byly zohledněny všechny shromážděné požadavky na jeho provedení a funkční vlastnosti.

Nejprve byla pečlivě prostudována dostupná součástková základna a po zvážení několika možných variant řešení bylo navrženo a z hlediska funkce vysvětleno blokové schéma. V příslušné kapitole byla také zdůvodněna volba konkrétních stěžejních obvodových prvků.

Na základě tohoto blokového schématu bylo vytvořeno kompletní schéma zapojení a byla zdůvodněna volba hodnot všech použitých součástek.

Dále byla navržena, vyrobena a osazena deska plošných spojů.

Hotovou desku plošných spojů bylo třeba usadit do konstrukční krabičky. Byl tedy zhotoven výkres pro výrobu předního a zadního panelu krabičky a oba tyto panely byly podle něj vyrobeny. Deska plošných spojů byla umístěna do připravené konstrukční krabičky a byl zkompletován zbytek zařízení.

Dále byly otestovány všechny funkce přístroje včetně ověření délky provozu na akumulátor.

Zhotovený přístroj byl zkalibrován a byly změřeny korekční křivky jednotlivých kanálů.

Nakonec byl sestaven uživatelský a servisní manuál. V servisním manuálu byly mimo jiné stanoveny i požadavky na kontrolu a údržbu zařízení.

Zkonstruované zařízení je plně funkční a splňuje všechny na něj kladené požadavky. Zadání bakalářské práce tedy bylo splněno.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 60601-1. *Zdravotnické elektrické přístroje. Část 1: Všeobecné požadavky na bezpečnost.*
- [2] GM electronic. *Sortiment nabídky GM electronic* [online]. 2013 [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/>
- [3] Honeywell. *Sortiment nabídky Honeywell Sensing and Control* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.sensing.honeywell.com/>
- [4] Analog Devices. *Sortiment nabídky Analog Devices* [online]. 2013 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/index.html>
- [5] Avago Technologies. *Sortiment nabídky Avago Technologies* [online]. 2013 [cit. 2013-12-08]. Dostupné z: <http://www.avagotech.com/pages/home/>
- [6] Linear Technology. *Sortiment nabídky Linear Technology* [online]. 2013 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.linear.com/>
- [7] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 4., dopl. vyd. Praha: BEN, 1999, 494 s. ISBN 80-860-5637-6.
- [8] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika*. 5. vyd., V [nakl.] Idea servis 3., rozš. vyd. Praha: Idea servis, 2002, 327 s. ISBN 80-859-7042-2.
- [9] WEBSTER, John G. *Bioinstrumentation*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2004, xiv, 383 p. ISBN 04-714-5257-2.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

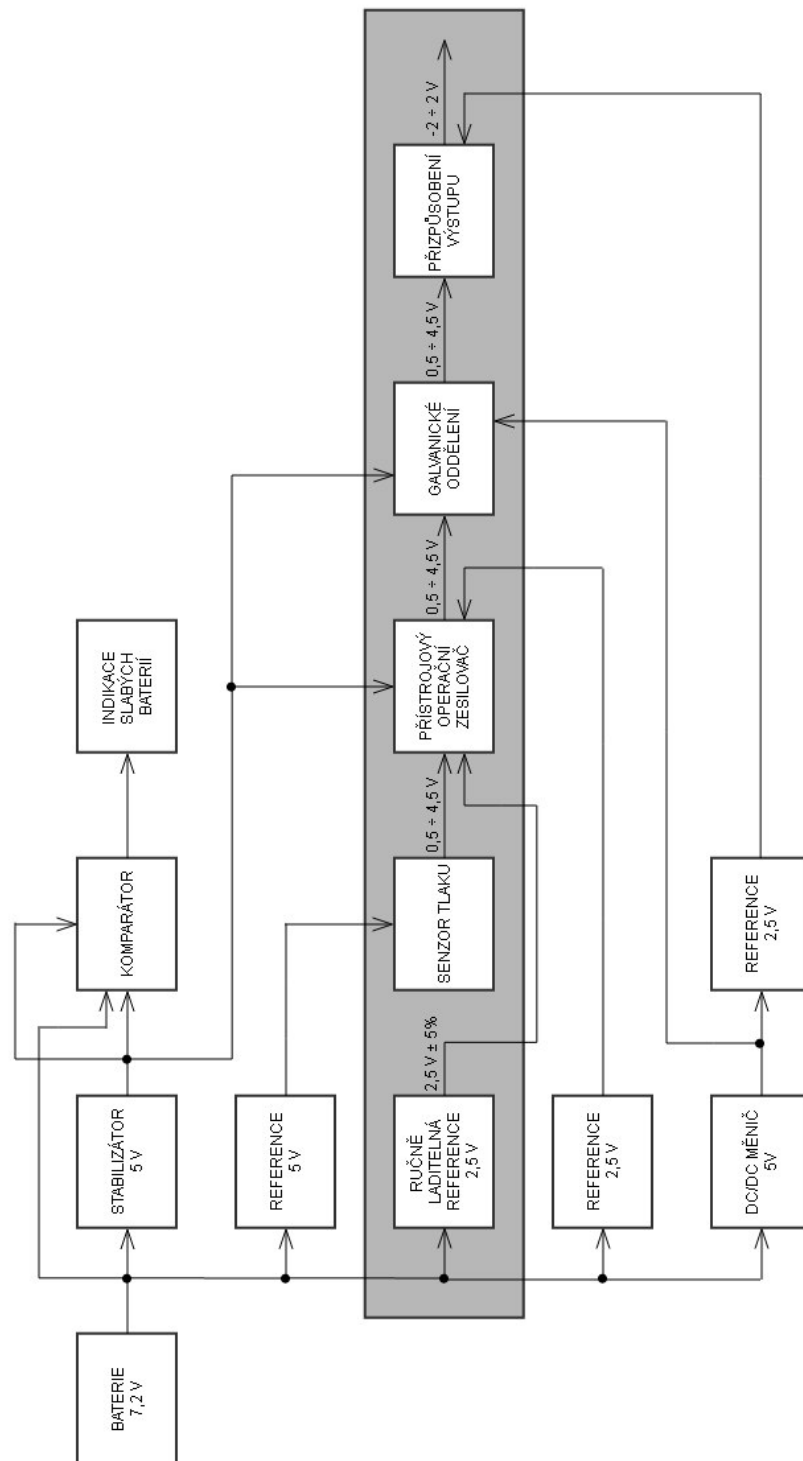
DPS	Deska plošných spojů
STAB	Stabilizátor
REF	Reference
OZ	Operační zesilovač
THT	Through Hole Technology, technologie součástek s drátovými vývody
PDIP	Plastic Dual In-line Package, plastové pouzdro s vývody ve dvou řadách

SEZNAM PŘÍLOH

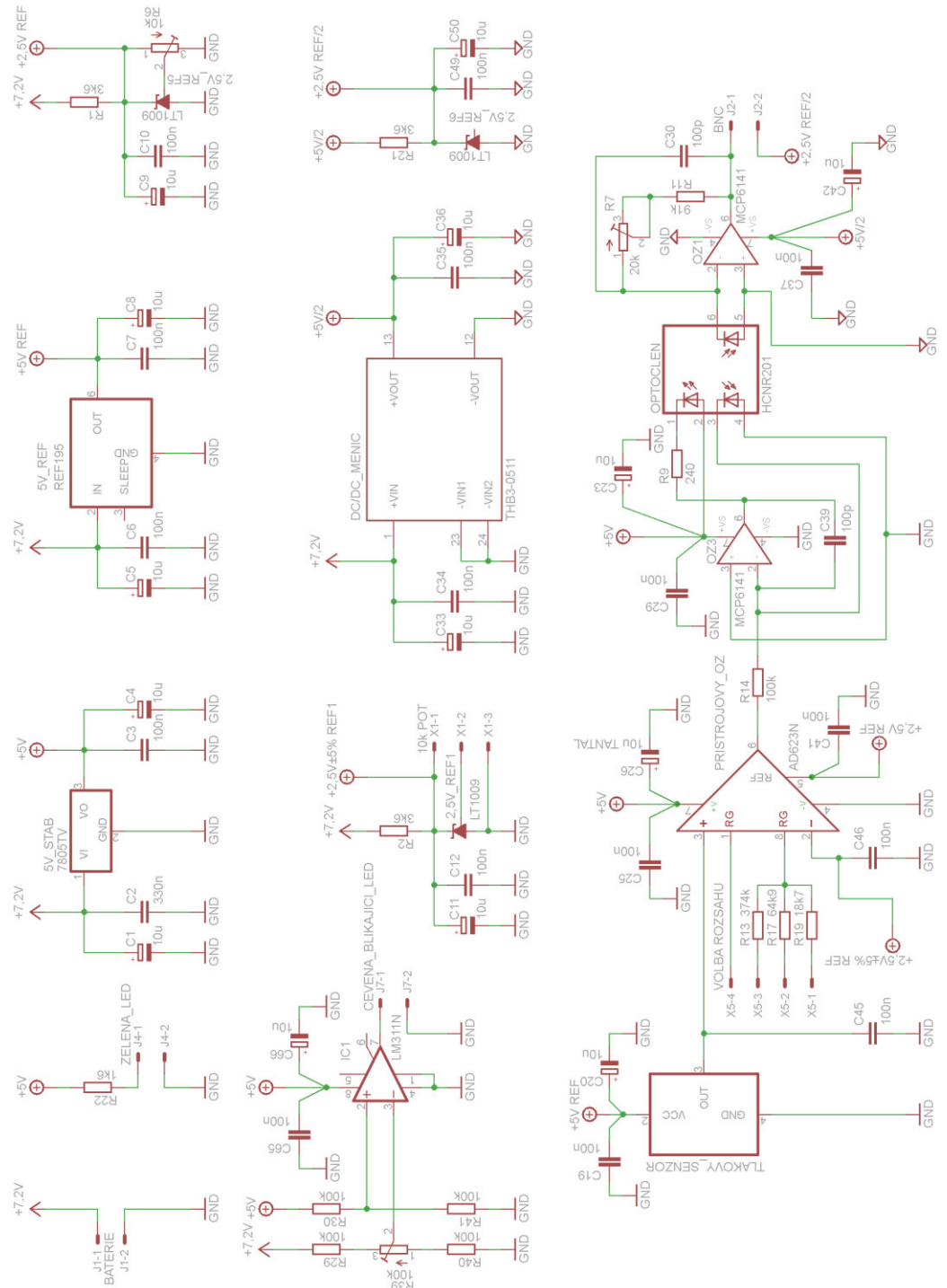
A	Návrh zapojení	40
A.1	Blokové schéma	40
A.2	Schéma zapojení	41
A.3	Seznam součástek	42
B	Deska plošných spojů	43
B.1	Strana spojů.....	43
B.2	Strana součástek.....	44
C	Výkresová dokumentace	45
C.1	Výkres pro výrobu předního a zadního panelu	45
D	Fotodokumentace	46
D.1	Osazená deska plošných spojů.....	46
D.2	Přední panel	47
D.3	Zadní panel	47
D.4	Vnitřní část.....	48

A NÁVRH ZAPOJENÍ

A.1 Blokové schéma



A.2 Schéma zapojení

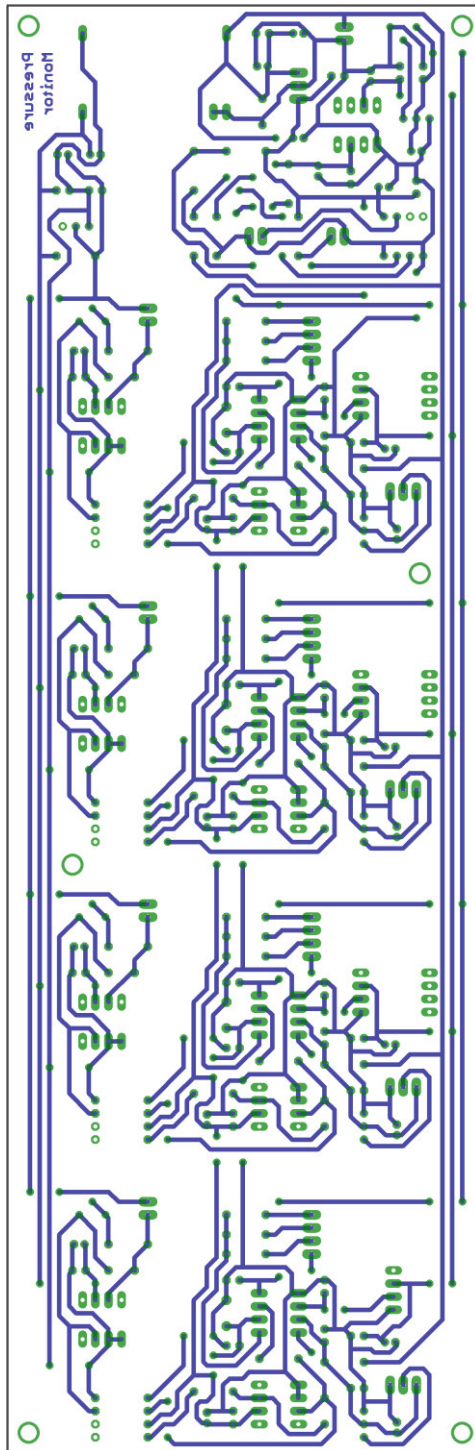


A.3 Seznam součástek

Počet	Hodnota	Označení	Pouzdro	Popis
1	1k6	R22	0204/7	Drátový rezistor
6	3k6	R1, R2, R3, R4, R5, R21	0204/7	Drátový rezistor
1	5M1	R33	0207/7	Drátový rezistor ± 0,1 %
1	10k	R6	RTRIM64Y	Trimr 64 Y
1	14k	R38	0204/7	Drátový rezistor
1	16k5	R20	0207/7	Drátový rezistor ± 0,1 %
2	18k7	R19, R37	0204/7	Drátový rezistor
4	20k	R7, R8, R23, R24	RTRIM64Y	Trimr 64 Y
1	39k2	R18	0207/7	Drátový rezistor ± 0,1 %
2	64k9	R17, R35	0207/7	Drátový rezistor ± 0,1 %
4	91k	R11, R12, R27, R28	0204/7	Drátový rezistor
1	95k3	R36	0207/7	Drátový rezistor ± 0,1 %
8	100k	R14, R16, R29, R30, R32, R34, R40, R41	0204/7	Drátový rezistor
1	100k	R39	RTRIM64Y	Trimr 64 Y
4	240R	R9, R10, R25, R26	0204/7	Drátový rezistor
1	243k	R15	0207/7	Drátový rezistor ± 0,1 %
2	374k	R13, R31	0207/7	Drátový rezistor ± 0,1 %
25	10u	C1, C4, C5, C8, C9, C11, C13, C15, C17, C20, C22, C23, C24, C33, C36, C42, C44, C50, C52, C54, C55, C56, C66, C72, C74	E2-4	Elektrolytický kondenzátor
4	10u	C26, C28, C58, C60	E5-5	Tantalový kondenzátor
40	100n	C3, C6, C7, C10, C12, C14, C16, C18, C19, C21, C25, C27, C29, C31, C34, C35, C37, C38, C41, C43, C45, C46, C47, C48, C49, C51, C53, C57, C59, C61, C63, C65, C67, C68, C71, C73, C75, C76, C77, C78	C025-024X044	Keramický kondenzátor
8	100p	C30, C32, C39, C40, C62, C64, C69, C70	C050-025X075	Keramický kondenzátor
1	330n	C2	C050-045X075	Keramický kondenzátor
1	7805TV	5V_STAB	TO-220	Stabilizátor napětí 5 V
4	AD623ANZ	PRISTROJOVY_OZ, PRISTROJOVY_OZ1, PRISTROJOVY_OZ2, PRISTROJOVY_OZ3	PDIP8	Přístrojový operační zesilovač
4	HCMR201-000E	OPTOCLEN, OPTOCLEN1, OPTOCLEN2, OPTOCLEN3	PDIP8	Optočlen
2	HSCDRRN005NDAA5	TLAKOVY_SENZOR0, TLAKOVY_SENZOR2	PDIP8	Tlakový senzor
1	SSCDRRN001PDAA5	TLAKOVY_SENZOR1	PDIP8	Tlakový senzor
1	SSCSRRN400MDAA5	TLAKOVY_SENZOR3	SIP4	Tlakový senzor
1	LM311N	IC1	PDIP8	Komparátor
6	LT1009CZ#PBF	2,5V_REF1, 2,5V_REF2, 2,5V_REF3, 2,5V_REF4, 2,5V_REF5, 2,5V_REF6	TO-92	Napěťová reference 2,5 V
8	MCP6141	OZ1, OZ2, OZ3, OZ4, OZ5, OZ6, OZ7, OZ8	PDIP8	Operační zesilovač
1	REF195GPZ	5V_REF	PDIP8	Napěťová reference 5 V
1	THB3-0511	DC/DC_MENIC	PDIP24	DC/DC napěťový měnič
4	10k	X1, X2, X3, X4	3PIN	Potenciometr
4		X5, X6, X7, X8	4PIN	Přepínač
1	6 x 1,2 V	J1	2PIN	Baterie
4		J2, J3, J5, J6	2PIN	BNC konektor
1		J4	2PIN	Zelená LED
1		J7	2PIN	Červená blikající LED

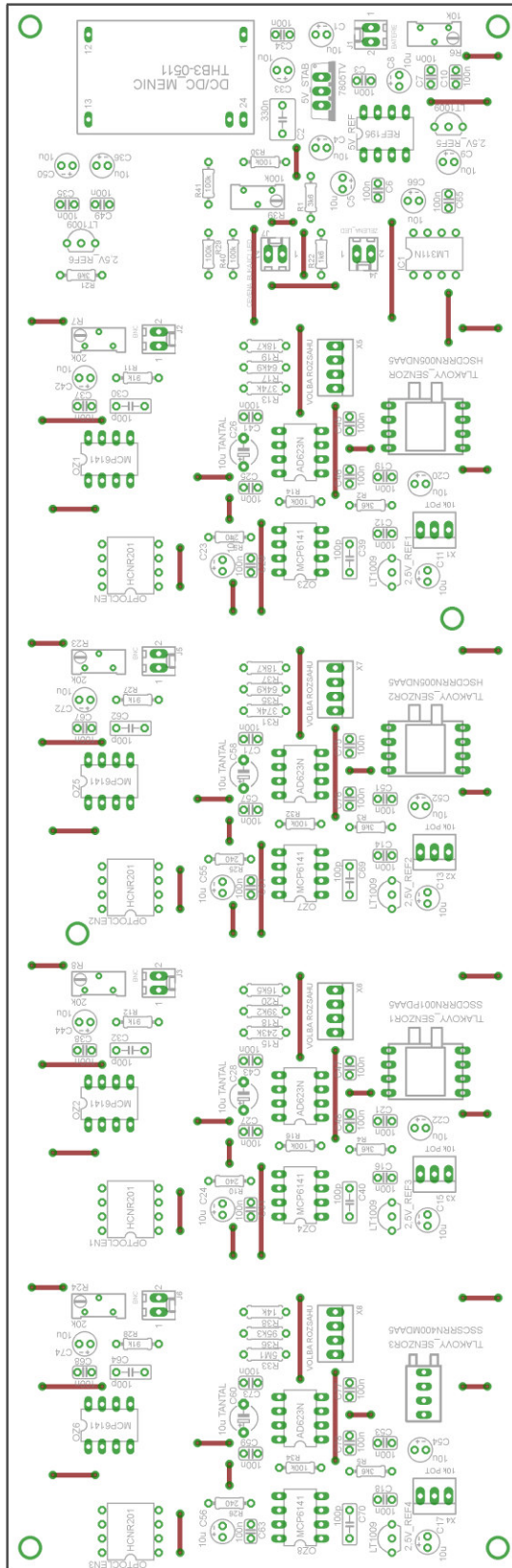
B DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

B.1 Strana spojů



Rozměr desky 280 x 92 [mm], měřítko M17:25

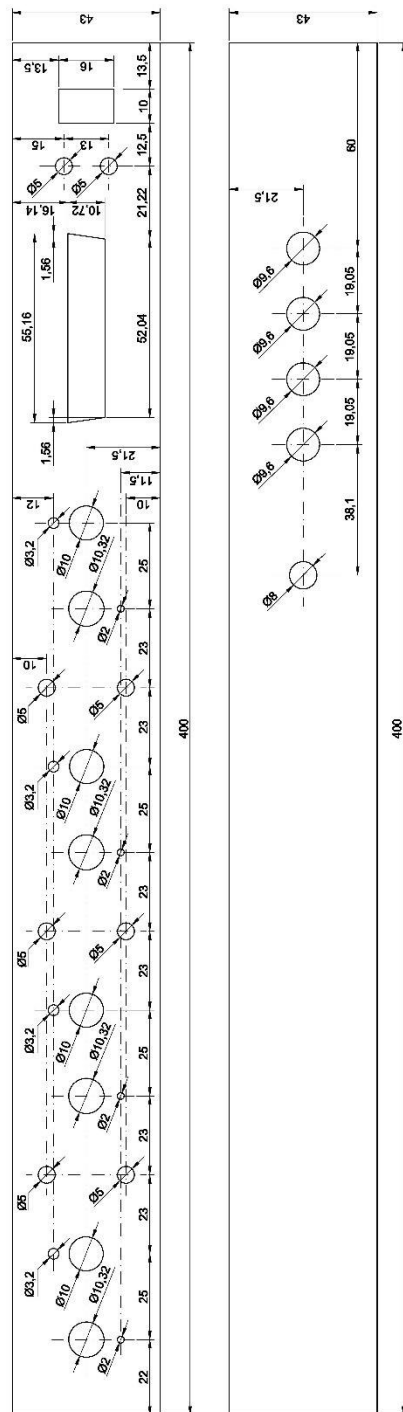
B.2 Strana součástek



Rozměr desky 280 x 92 [mm], měřítko M31:40

C VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

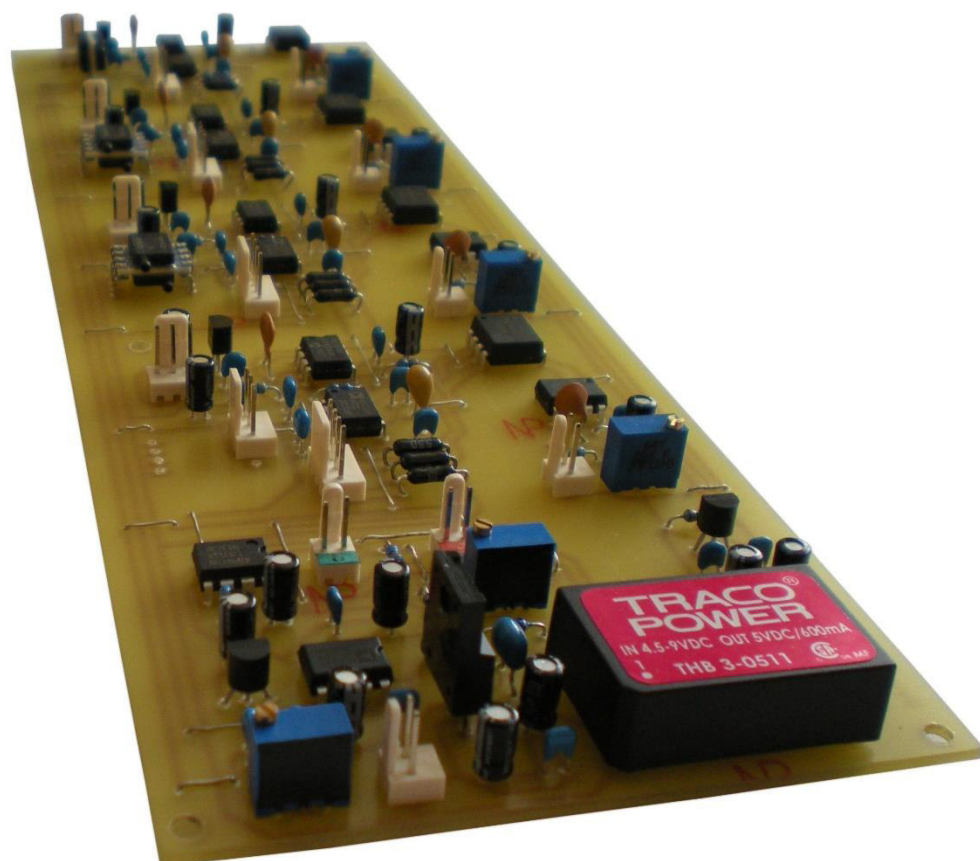
C.1 Výkres pro výrobu předního a zadního panelu



Měřítko M9:20

D FOTODOKUMENTACE

D.1 Osazená deska plošných spojů



D.2 Přední panel



D.3 Zadní panel



D.4 Vnitřní část

