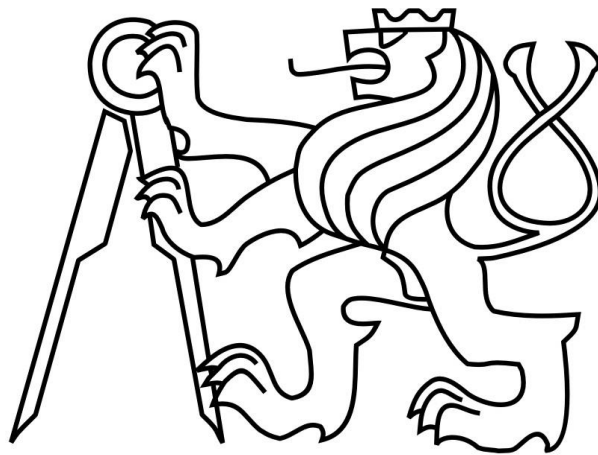


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Bc. Jan Ševčík

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE

**MĚŘÍCÍ MODUL PRO PRACOVNÍŠTĚ AKTIVNÍHO
HARMONICKÉHO FILTRU
DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vedoucí práce: Ing. Michal Brejcha, Ph.D.

Autor: Bc. Jan Ševčík

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ševčík** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **399671**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Realizace měřicího modulu pro pracoviště aktivního harmonického filtru

Název diplomové práce anglicky:

Implementation of measuring module for active harmonic filter workstation

Pokyny pro vypracování:

1. Pomocí softwaru LabView vytvořte program pro platformu CompactRIO, který umožní práci s měřicím modulem s čidly LEM.
2. Provedte měření na modulu. Ve vytvořeném programu zobrazte pro 3f zatez: proudy v každé fázi a napětí mezi fázemi
3. Dále z naměřených průběhů získejte efektivní hodnoty, maximální hodnoty a případně rozklad na jednotlivé harmonické
4. Výsledky měření porovnejte s měřicím přístrojem CIMR, porovnejte frekvenční spektra a proveďte kalibraci. Porovnejte filtrovaný a nefiltrovaný výstup přípravku a zhodnoďte fázovou chybu. Navrhněte úpravy přípravku

Seznam doporučené literatury:

- [1] SEVCIK, Jan. MERICI MODUL PRO PRACOVISTE AKTIVNIHO HARMONICKEHO FILTRU. Praha, 2015. Bakalarska prace. CVUT v Praze. Vedouci prace Michal Brejcha.
[2] HAASZ, Vladimír. Elektrické měření: přístroje a metody. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství CVUT, 2005, 337 s. ISBN 80-010-2731-7.
[3] ZAHLAVA, Vít. Navrh a konstrukce desek plosnych spoju: principy a pravidla praktickeho navrhu. Praha: BEN - technicka literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
[4] Datovy list "Voltage Transducer LV 25-P", dostupny z: <http://www.lem.com/docs/products/lv%2025-p.pdf>
[5] Datovy list "Current Transducer LA 55-P", dostupny z: <http://www.lem.com/docs/products/la%2055-p%20e.pdf>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Michal Brejcha Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **07.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržení etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....
Jan Ševčík

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Michalu Brejchovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky a odborný dohled. Poděkování také patří doc. Ing. Václavu Papežovi, CSc. a Ing. Tomáši Cetlovi, kteří mě v rámci volitelného předmětu Konstrukce a realizace elektronických obvodů (A0B13KEO) zasvětili do této problematiky.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí přípravku pro měření proudu a napětí. V práci je uveden popis pracoviště, pro který je modul určen a souhrnné informace o LEM čidlech. Cílem práce je navrhnout a zkonstruovat prototyp modulu pro měření proudu a napětí v rozsahu ± 1000 V a ± 50 A. Tyto signály mají být vyvedeny v podobě napětí 0 až ± 10 V s možností přepínání filtrovaného a nefiltrovaného výstupu. Jako filtr je použita dolní propust s mezním kmitočtem 2,5 kHz. Návrh obsahuje: elektrické zapojení, DPS a mechanický návrh krytu a předního panelu přípravku

Annotation

This thesis deals with the design and construction of the sensor module for measurement of current and voltage. The thesis contains a description of the workplace for which the module is designed and summary information about LEM sensors. The aim of the thesis is to design and construct a prototype module for current and voltage measurement within ± 1000 V and ± 50 A. These signals are to be output in the form of voltage 0 to ± 10 V with switching of filtered and unfiltered output. As a filter, a low pass filter with a 2.5 kHz cut-off frequency is used. Design includes: electrical connection, PCB and mechanical design of the cover and front panel of the product

Obsah

Prohlášení.....	iv
Poděkování.....	v
Anotace	1
Annotation.....	1
1 ÚVOD.....	4
2 Pracoviště aktivního harmonického filtru.....	5
2.1 Rušení harmonických složek.....	5
2.1.1 Spínané zdroje:.....	6
2.1.2 Elektrické předřadníky kompaktních svítidel	7
2.1.3 Trojfázová zátěže.....	7
2.1.4 Problém s harmonickými v elektro instalacích.....	7
2.2 Kompenzace jalového výkonu	8
2.3 Popis aktivního filtru.....	10
2.4 Zapojení pracoviště.....	11
2.4.1 Obvod zátěže	11
2.4.2 Obvod měniče	11
2.5 Blokové schéma měniče	13
2.6 Propojení svorkovnice funkčního vzorku a dolů CompactRIO	14
2.7 Vývojové prostředí.....	16
3 LEM čidla	17
3.1 Hallův jev:	17
3.2 Měření proudu pomocí Hallova jevu.....	18
3.3 Proudový senzor s otevřenou smyčkou.....	19
3.4 Proudový senzor s uzavřenou smyčkou	20
3.5 Proudové senzory s ostatními technologiemi	22
3.6 Výhody měření proudu pomocí Hallova jevu	22

3.7	Proudové čidlo LEM LA 55-P	22
	23
3.8	Napěťové čidlo LEM LV 25-P	23
	24
4	Elektrický návrh.....	25
4.1	Návrh zapojení proudové DPS	25
4.2	Návrh zapojení napěťové DPS	27
4.3	Návrh zapojení filtru	28
5	Realizace DPS	30
5.1	Návrh měřicích desek	30
5.2	Návrh předřadníku.....	32
5.3	CANON 15 konektor	33
5.4	Kompletní modul	33
6	Testování měřicího modulu	35
6.1	LabVIEW program.....	36
6.2	Průběhy z LabVIEW	36
6.3	Porovnání výstupních dat	38
7	Závěr.....	39
7.1	Napájecí zdroj	39
7.2	Ladící potenciometry	39
7.3	Konstrukční nedostatky	39
8	Bibliografie	40

1 ÚVOD

Tato diplomová práce navazuje bakalářskou prací návrh měřicího modulu pro pracoviště aktivního harmonického filtru. Původní koncept byl částečně pozměněn a vypracován v návrhovém softwaru EAGLE, na místo původní Formica. Tento modul je určen pro měření v rozsahu proud ± 25 A a napětí ± 1000 V. Proudové výstupní signály z LEM čidel jsou převedeny na napětí ± 10 V, tento napěťový signál vyveden na výstupní CANON konektor, a to s možností nefiltrovaného, nebo filtrovaného průběhu dolní propustí o mezním kmitočtu $f_m = 2,5$ kHz.

Signály z tohoto modulu budou dále zpracovány v zařízení CompactRIO od firmy National Instrument, kde bylo i provedeno testování prototypu modulu.

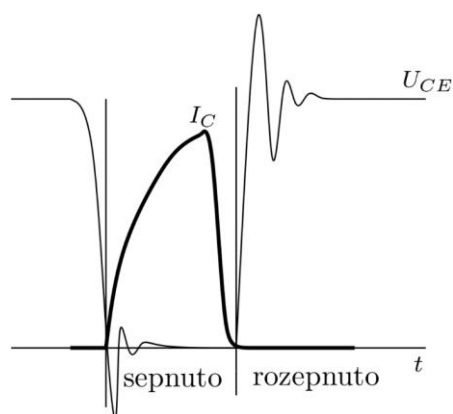
Výstupem této práce je prototyp, výrobní data a soupis připomínek doladění u dalších kusů toho modulu.

2 Pracoviště aktivního harmonického filtru

Protože měřicí modul byl navržen a konstruován pro aplikaci na pracovišti aktivního filtru, bude v této kapitole stručně popsán princip a zapojení tohoto pracoviště. Tento popis je převážně převzat z disertační práce vedoucího této diplomové práce (1), který se odkazuje na úpravu popisu nepublikované verze projektové dokumentace, která byla vypracována v rámci interního grantu „SGS2012: Síťové kondicionéry – funkční vzorek“. Dále popisy aktivního filtru a dopadu na napájecí síť byly převzaty z diplomové práce (2) a odborného časopisu (3). Tedy znova opakuji, že se nejedná o práci autora této diplomové práce, ale pouze o převzetí popisu pro ucelení představy, kde bude měřicí modul používán a uvedení do problematiky.

2.1 Rušení harmonických složek

Aktivní filtr je určen pro kompenzaci harmonických proudů v síti, které jsou způsobeny nelineárními spotřebiči. Jako nelineární spotřebiče se všeobecně označují zařízení, která navzdory sinusovému napětí napájecí sítě odebírají nesinusový průběh proudu. Periodicky nesinusovou funkci lze vyjádřit jako součet sinusových složek (popřípadě složky stejnosměrné). Základní harmonická v napájecí síti je 50 Hz, ostatní složky jsou celočíselný násobek této základní harmonické. Harmonické proudy tečou od rušícího zařízení do sítě a na impedanci sítě vyvolají úbytky. Tyto úbytky napětí se superponují na průběh napětí a způsobují tak deformaci křivky síťového napětí ve společném napájecím bodě. Vlivem deformace křivky napájecího napětí vzniká rušení na parazitní kapacitě a indukčnosti, které šíří se vyzařováním, induktivní a kapacitní vazbou a po vedení. Na (Obr. 1) je znázorněna tato změna napětí U_{CE} a proudu I_C , vlivem spínání bipolárního tranzistoru.



Obrázek 1: průběh napětí U_{CE} a proudu I_C bipolárního tranzistoru (2)

Vlivem tohoto rušení, které se šíří na velké vzdálenosti je ovlivněn provoz ostatních zařízení připojených v síti, obzvláště zařízení citlivá na tvar průběhu napětí. (4)

Příkladem těchto nelineárních spotřebičů jsou:

Jednofázové zátěže:

- Spínané zdroje
- Elektrické předradníky kompaktních svítek
- Malé zdroje nepřerušitelného napájení (UPS)

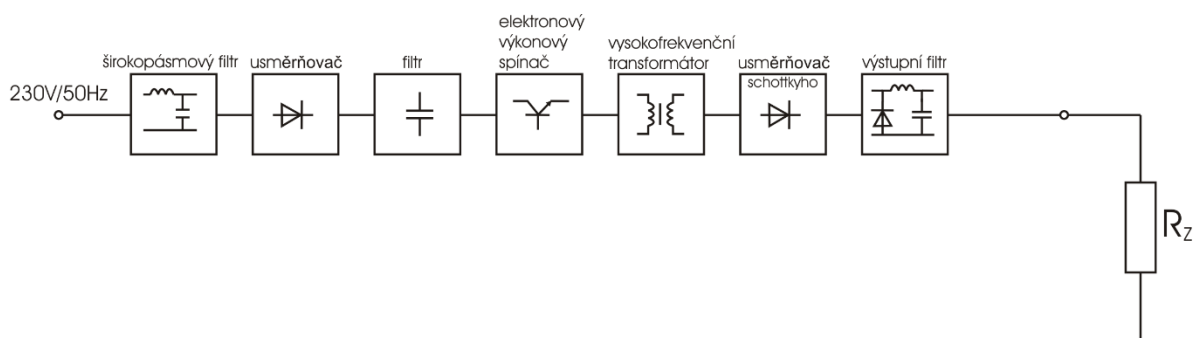
Trojfázová zátěž:

- Elektrická regulace pohonů
- Velké zdroje nepřerušitelného napájení (UPS)

2.1.1 Spínané zdroje:

Většina moderních elektronických zařízení využívá pro své napájení spínané zdroje. Ty využívají přímo řízený usměrňovač na rozdíl od tradiční metody, která využívá snížení napětí pomocí transformátoru, dále usměrní neřízeným diodovým usměrňovačem, a nakonec vyhlazení průběhu napětí kondenzátorem (většinou doplněn ještě stabilizátor napětí). Přímou řízený usměrňovač přímo nabíjí kondenzátor, který pak napájí zátěž stejnosměrným proudem.

Výhoda jsou menší velikost, cena a váha, způsobena absencí transformátoru, nebo je pro menší rozměry provozování ve vf obvodě viz. (Obr. 2)



Obrázek 2: Blokové schéma spínaného zdroje.

Nevýhoda spočívá v tom, že zátěž namísto lineárního odběru proudu, provede pulsní odběr proudu. Ten obsahuje velké množství třetí a dalších vyšších řádů harmonických složek a má významný obsah vysokofrekvenční složky. Jednoduchý širokopásový filtr na vstupu spínaného zdroje (Obr.2) vyruší tyto vysokofrekvenční složky, ale nemá žádný účinek na harmonické proudy, které tečou zpět do napájecí sítě.

Jednofázová jednotka UPS ukazuje velmi podobnou charakteristiku jako mají spínané zdroje.

2.1.2 Elektrické předřadníky kompaktních svítidel

Elektronické předřadníky slouží k vylepšení účinnosti svítidel. Jejich hlavní výhodou je, že umožňují prodloužit životnost a zároveň zachovat úroveň osvětlení. Jejich největší nevýhodou je produkce harmonických složek v odebíraném proudu.

2.1.3 Trojfázová zátěž

Elektronické regulátory otáček, UPS jednotky a usměrňovače jsou obecně založeny na principu trojfázového můstku, který je také známý jako tzv. šesti pulsní můstek, protože se zde vyskytuje 6 pulsů za jednu periodu (jeden za půl periodu a fázi) na jeho stejnosměrném výstupu.

2.1.4 Problém s harmonickými v elektro instalacích

Problémy způsobené harmonickými proudy:

- **Přetížení středního vodiče:** V trojfázové síti jsou fáze napětí vzájemně posunuta o 120° , a tedy pokud jsou všechny fáze stejně zatíženy, je výsledný proud ve středním vodiči nulový. Jestli je zatížení nevyvážené, středním vodičem protéká vektorový součet fázových proudů a ten je vždy menší než proud fázový. Z těchto důvodů se minulosti začaly používat pro trojfázové kabelové rozvody se středním vodičem o nižším průřezu. Toto však nelze říct o prouděch třetí harmonické, které se naopak ve středním vodiči sčítají.
- **Vlivy na transformátory:** Zaprvé zatížení vířivými proudy, které rostou s kvadrátem řádu harmonické. Důsledkem je mnohem vyšší provozní teplota a tím klesá životnost transformátoru.
- **Rušení při spínání vypínačů:** Proudové chrániče vypínají, jestli je součet proudů ve fázovém vodiči a ve středním vodiči mimo nastavené meze. Následkem je chybné

vypínání, protože tyto vypínače jako elektromechanické zařízení nemusí korektně sčítat harmonická složky proudu.

- **Skin efekt:** Střídavý proud má tendenci protékat okrajovou plochou vodiče. Tento jev se významně projevuje u kmitočtech nad 350 Hz, tj. od 7. harmonické a výše.

Problémy způsobené harmonickými proudy:

- **Indukční motory:** Napěťové zkreslení způsobuje nárůst ztrát vířivými proudy podobně jako u transformátorů. Přídavné ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru, z nichž každé se pokouší otáčet motorem různou rychlostí dopředu nebo dozadu. Proudů indukovaných do rotoru na vyšších kmitočtech pak dále zvyšují ztráty.
- **Poruchy při průchodu nulou:** Mnohé elektronické regulátory určují bod, kdy napájecí napětí prochází nulou a v tento okamžik vypnuli zátěž, aby minimalizovali přechodové jevy. Tím se snižuje namáhání polovodičových spínacích zařízení. Jsou-li v napájecím napětí harmonické, nebo přechodové jevy, pak jsou změny napětí při průchodu nulou rychlejší a hůře identifikovatelné, nebo může být i několik průchodů nulou. To vede k nepravdělnostem v provozu regulátor.

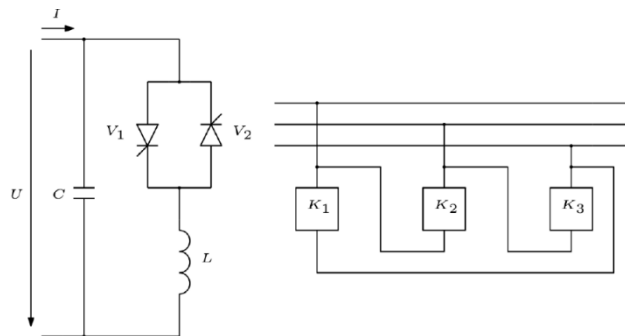
(5)

2.2 Kompenzace jalového výkonu

Distributoři elektrické energie vyžadují od odběratelů odběr s účinnkem od 0,96 - 1. Za menší hodnotu účinnku jsou velkoodběratelé postihováni. Následky menšího účinnku jsou pokles přenášeného činného výkonu, zhoršení zkratového poměru (zvýšení dimenzování: transformátory, vypínače, spínače, měřicí technika, jistící přístroje a ochrany) a zvýšení úbytku napětí v rozvodu el. energie (nestabilita rozvodné soustavy).

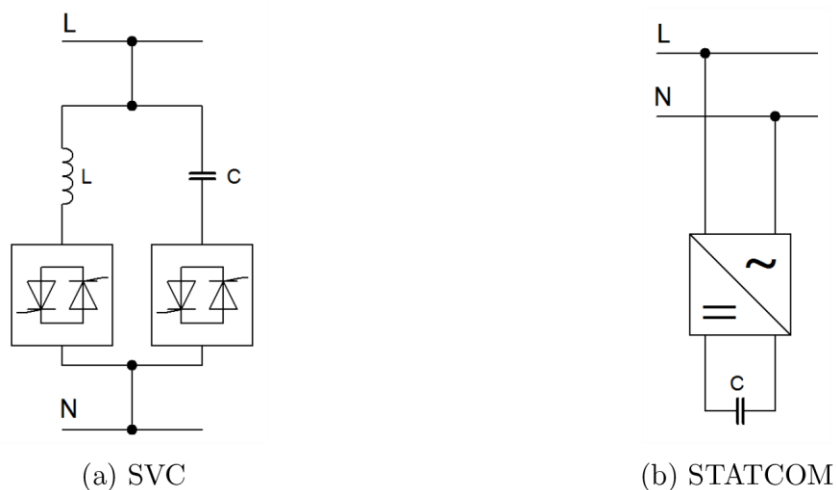
Nejjednodušší kompenzace jalového výkonu je pasivní kompenzace příslušné reaktance. V síti jsou nejčastějším případem zátěže induktivního charakteru (např. motory). Vzniklý induktivní proud je kompenzován proudem paralelně připojeného kondenzátoru. Návrh hodnoty kapacity je prováděn na základě velikosti jalového výkonu, který má být ze sítě odstraněn. V 3f síti lze kondenzátorové baterie vytvořit v zapojení do hvězdy nebo do trojúhelníku. Častějším je zapojení do trojúhelníku. Na každém kondenzátoru je sdružené napětí a pro stejný jalový výkon je tak nutná třetinová kapacita v porovnání se zapojením do hvězdy. Velikost

kapacitního proudu lze řídit postupným připojováním jednotlivých baterií k síti. Jedná se tedy spíše o hrubou regulaci.



Obrázek 3: Střídavý menič napětí jako kompenzátor v trojfázovém provedení (2)

Často bývá také problém výskytu harmonických složek v průběhu síťového napětí nebo proudu. Pro vyšší frekvence harmonických klesá kapacitní reaktance, tudíž hrozí přetížení kondenzátoru. Z tohoto důvodu se často využívá hrazená kompenzace, která spočívá v zařazení tlumivky před kondenzátorovou baterií. Na druhou stranu je daný systém téměř bezúdržbový a relativně levný a nezanáší do sítě další harmonické složky proudu.



Obrázek 4: Aktivní kompenzace jalového výkonu (1)

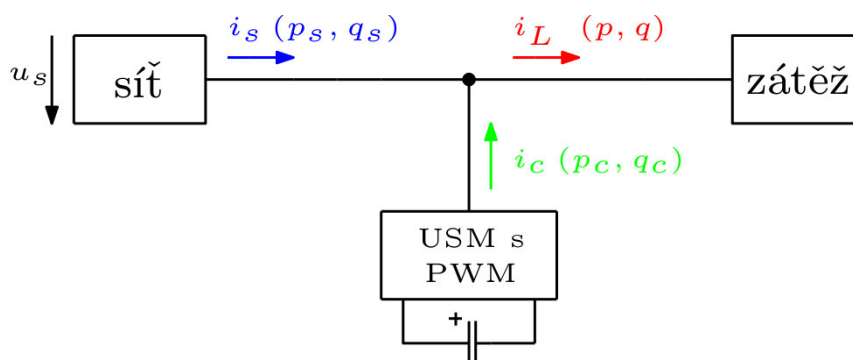
Sofistikovanějším způsobem kompenzace jsou statický kompenzátor jalového výkonu (Static Var Compensator – SVC) nebo statický synchronní kompenzátor (Static Synchronous Compensator – STATCOM).

SVC jsou vlastně tyristorově spínané reaktance. Existuje mnoho topologií. Jedna z možností je na (Obr.3). Řízení tyristory umožňuje relativně plynulou regulaci jalového výkonu jak v oblasti

induktivních, tak v oblasti kapacitních proudů. Na druhou stranu v průběhu regulace vznikají harmonické složky proudu vlivem jeho skokových změn nebo přerušení. V tomto ohledu je výhodnější STATCOM. Jeho výstupem je sinusový proud generovaný pomocí PWM, která předbíhá nebo zpožďuje za napětím o 90° podle charakteru kompenzovaného proudu. Jelikož je zpracovávána jen jalová energie, není nutno třeba zvláštního napájecího zdroje ve stejnosměrném obvodu. Ten je zde nahrazen pouze kondenzátorem. V rámci jedné periody je vždy odebraná energie rovna té dodané, a proto nedochází k jeho vybíjení. Kondenzátor je dobíjen jen při dynamických změnách odběru jalové energie v síti a při hrazení ztát vlivem svodů. Oba aktivní systémy vyžadují spolehlivou synchronizaci spínání s průběhy síťových veličin. (1)

2.3 Popis aktivního filtru

Lze je považovat jako paralelně nebo sériově zapojené generátory řízené, tak aby byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Nejčastější konstrukční uspořádání aktivního filtru odpovídá řízenému usměrňovači, který je zatížen pouze kondenzátorem. Usměrňovač je pomocí PWM (pulzně šířková modulace) řízen tak, aby odebíraný proud byl stejný, ale v opačné fázi než proud s harmonickými složkami, které chceme potlačit. Výsledkem je odběr harmonického proudu ve fázi s napětím. Tento je možno připojit tak, aby kompenzoval filtroval odběr několika zařízení. Takto je možno připojit filtr tak, aby kompenzoval (filtroval) odběr několika zařízení najednou.



Obrázek 5: Zapojení aktivního filtru. (2)

Účinnost se pohybuje v rozmezí mezi 93-97% a je podobně jako statické a dynamické vlastnosti určena jednak parametry použitých součástek, jednak řídicím algoritmem pulzního usměrňovače.

2.4 Zapojení pracoviště

Tento popis je převzat z práce (1) a popisuje, jak bylo pracoviště zapojeno a jak by mělo být znovu, nebo se tomuto zapojení přiblížit.

Zapojení pracoviště bylo provedeno dle (Obr.6). Silový obvod byl napájen z 3f transformátoru $3 \times 230 \text{ V} / 3 \times 170 \text{ V}$ v zapojení Yn/Y. Transformátor byl napájen z laboratorního stolu a galvanickým odděloval a snižoval napětí v měřicím obvodu. Měřicí obvod tak tvořila izolovaná IT síť, v níž případně se používá typ 3f měniče bez vyvedeného napěťového středu kondenzátorů ve stejnosměrném obvodu. Na sekundární straně transformátoru se obvod dělí na dvě paralelní větve.

2.4.1 Obvod zátěže

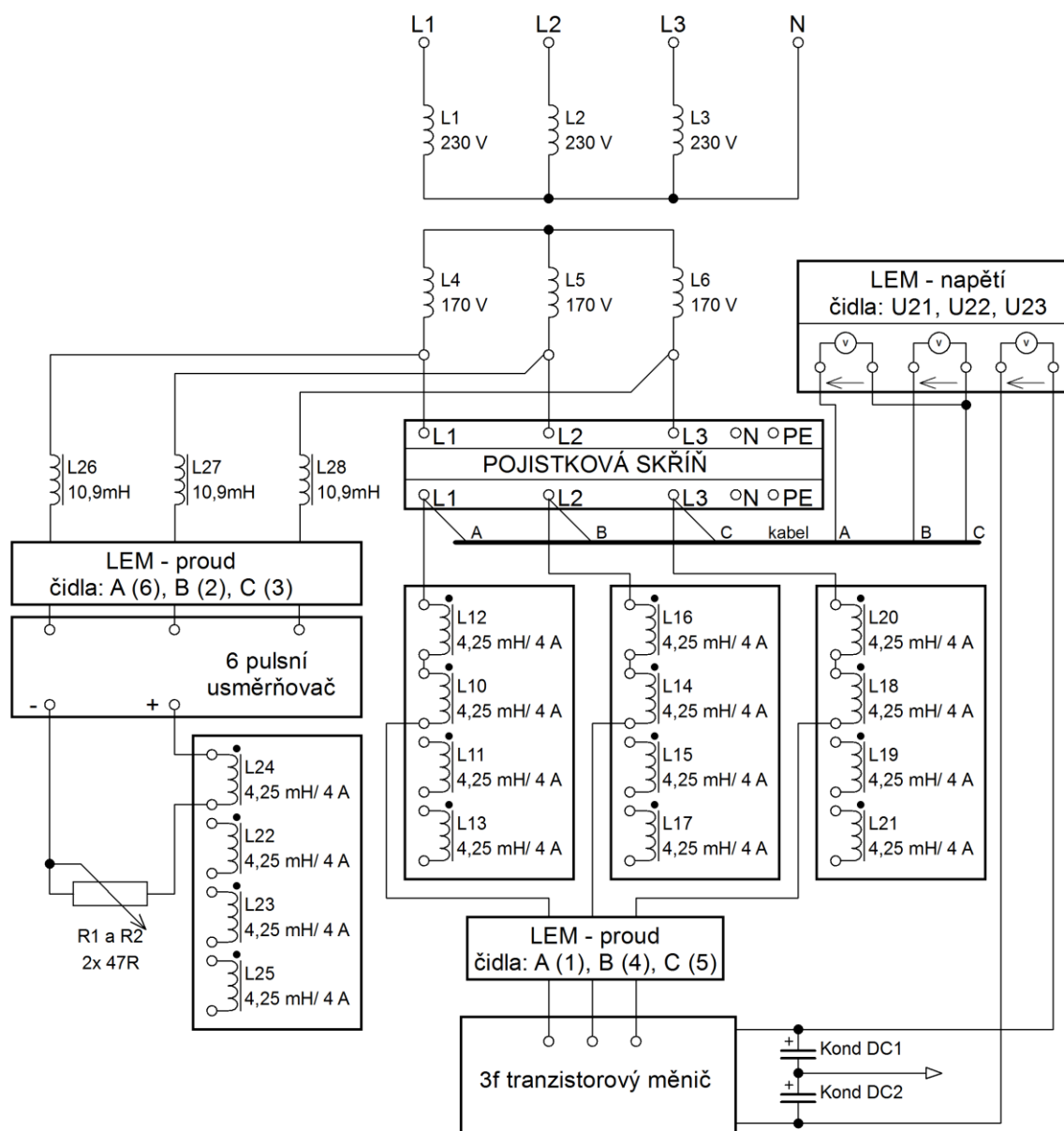
- Každá fáze obsahuje tlumivku o indukčnosti 10,9 mH na jádře z transformátorových plechů se vzduchovou mezerou. Jmenovitý jalový výkon tlumivky byl 400 VA.
- Za tlumivkou byl umístěn přípravek s čidlem LEM pro měření proudu v každé fázi.
- Samostatnou zátěž tvořil 6pulzní diodový usměrňovač, který byl zatížen sériovým spojením dvou potenciometrů a přípravku tlumivky. Maximální hodnota odporu potenciometrů byla 47Ω a tlumivku bylo možno přepínat ve 4 sekcích a hodnotou indukčnosti 4,25 mH. Jmenovitý proud tlumivky byl 4 A, čímž byl omezen maximální proud na stejnosměrné straně.

2.4.2 Obvod měniče

- Obvod měniče začínal pojistkovou skříní s hlavním vypínačem. Ta zde byla z bezpečnostních důvodů pro případ chybné činnosti řídicího programu a nechtěného propojení fází do zkratu. Po zapnutí vypínače pojistkové skříně docházelo nejdříve k propojení napájení a obvodu měniče přes sériový rezistor. Ten se po definovaném čase překlenul kontaktem časového relé. Uvedené opatření zde bylo pro omezení nárazového proudu, který vzniká při nabíjení kondenzátoru ve stejnosměrném obvodu měniče při jeho připojení na síť
- Ze svorek pojistkové skříně byly čidly LEM snímány sdružené hodnoty napětí mezi fázemi L3-L1 a L3-L2. Poslední vstup přípravku napěťových LEM čidel se používal pro sledování napětí ve stejnosměrném odvodu měniče. Maximální vstupní napětí přípravku bylo 1 kV.

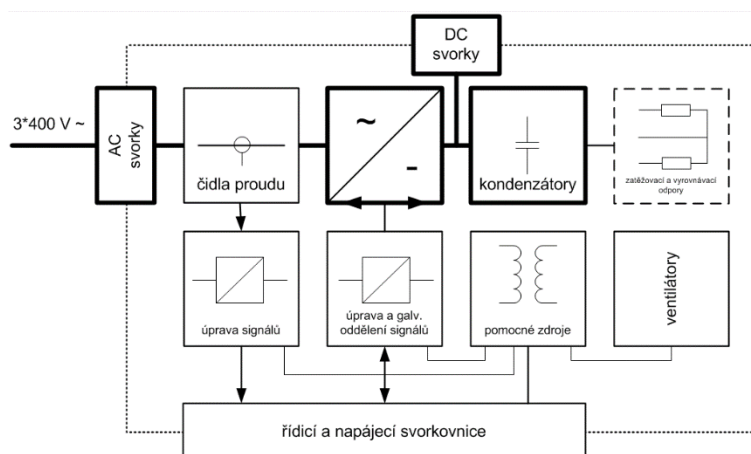
- Mezi pojistkovou skříní a vstupem do měniče byly umístěny filtrační tlumivky. Tlumivky měly vyvedeny 4 odbočky s maximální dosažitelnou indukčností 16 mH.
- Proud na vstupu do měniče byl opět sledován přes proudová LEM. Číselné označení čidel v pořadí fází bylo 1, 4, 5.

Výstupy všech čidel LEM byly sledovány pomocí AD převodníku platformy CompactRIO, které jsou stejně jako výkonová část měniče, popsány níže.



Obrázek 6: Zapojení výkonové části pracoviště vývoje aktivního harmonického filtru (1)

2.5 Blokové schéma měniče

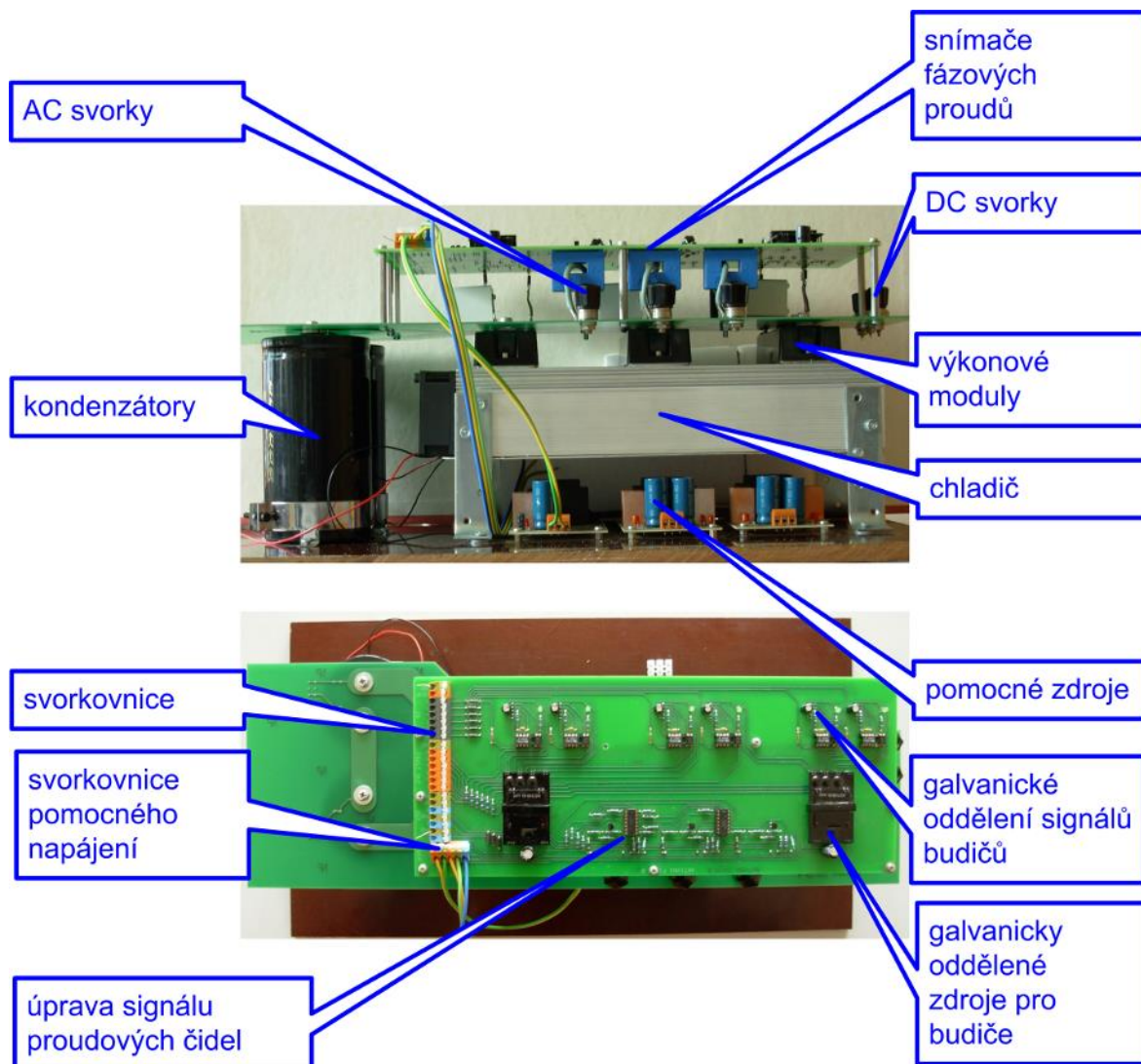


Obrázek 7: Blokové schéma měniče (1)

Silový obvod funkčního vzorku se skládá ze svorek, modulů LEM pro měření proudu, AC/DC měniče tvořeného trojicí výkonových tranzistorových modulů umístěných na společném chladiči a stejnosměrného obvodu tvořeného dvěma elektrolytickými kondenzátory o kapacitě 4,7 mF v serii. Pro zlepšení vyrovnání potenciálu na obou kondenzátorech jsou paralelně připojeny dva rezistory. Vzhledem k vysokému zarušení signálů proudových čidel LEM na funkčním vzorku, byly pro měření využívány přípravky s čidly vně měnič.

Měnič je řízen signály z „řídící a napájecí svorkovnice“. Veškeré řídicí obvody jsou tudíž vně měniče a jsou zajišťovány pomocí platformy CompactRIO, což je rekonfigurovatelný systém pro řízení sběr dat firmy National Instruments. Tento systém zároveň načítá data ze všech modulů LEM a celém obvodu. Propojení svorkovnice, výstupů z LEM a jednotlivých modulů CompactRIO, společně s významy jednotlivých signálů, je schematicky zobrazeno na (Obr.7).

Ve spodní části měniče pod chladičem (viz Obr.8) jsou upevněny pomocné zdroje stejnosměrného napětí. Postupně jsou označeny písmeny A, B a C. Zdroj A má výstupní napětí 20 V a napájecí tranzistorový moduly. Zdroje C je symetrický ± 15 V a jeho výstupem je připojen na svorkovnici měniče v místě označeného jako „Vsup“. Tento zdroj je paralelně spojen se zdrojem na DPS měniče, který je určen pro napájení modulu NI9474 a CompactRIO. Důvodem je, že výstupní proud původního zdroje na DPS měniče je pouze 100 mA a nedostačuje pro napájení daného modulu.



Obrázek 8: Uspořádání měniče (1)

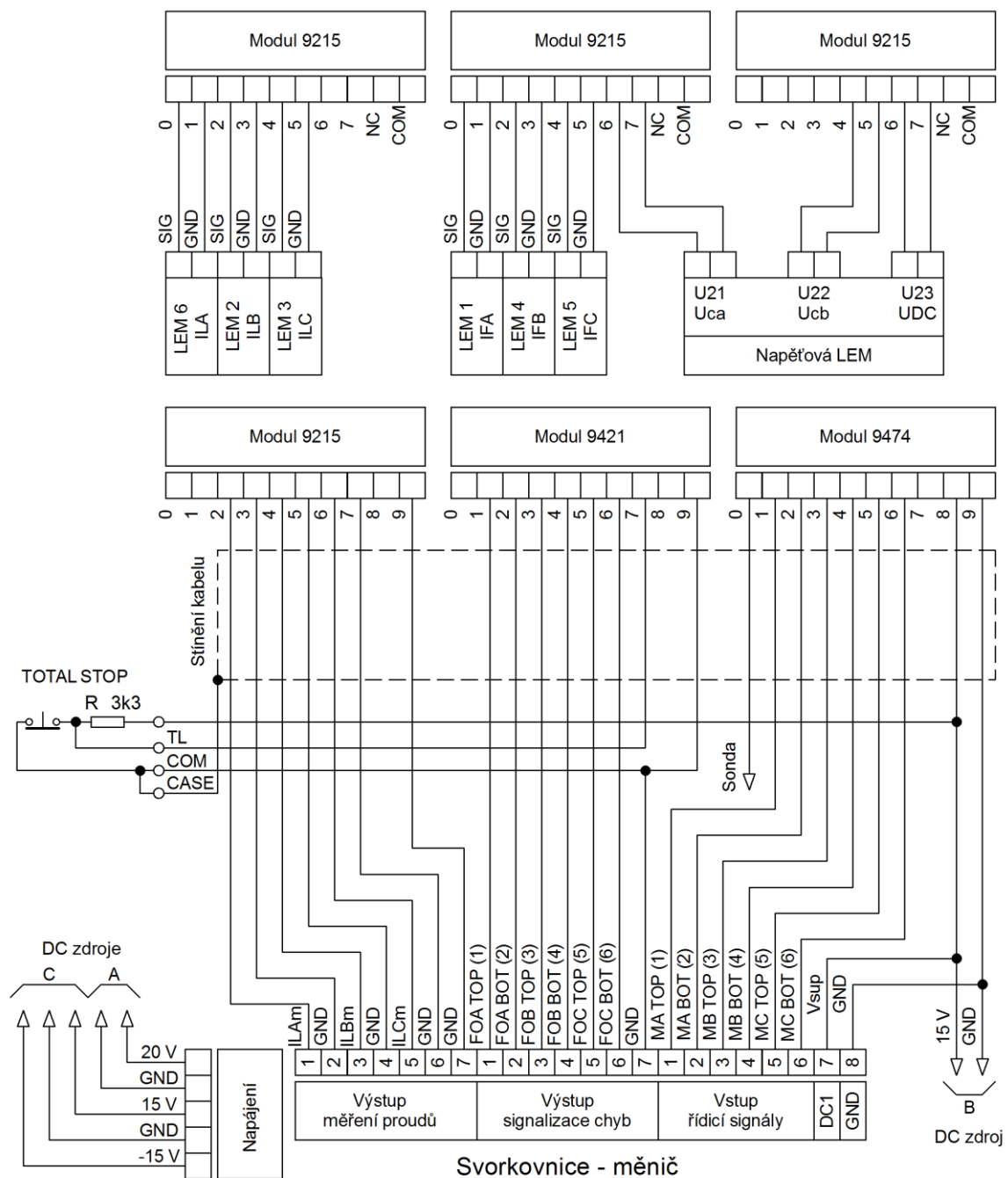
2.6 Propojení svorkovnice funkčního vzorku a dolů CompactRIO

Tento popis opět popisuje stav zapojení dle práce (1) a kterému by se budoucí zapojení mělo blížit. Během testování měřicího modulu pro toto pracoviště byl použit pouze zásuvný modul NI9215.

Pro řízení měniče byla použita platforma CompactRIO cRIO-9014 vybavena následujícími 6 zásuvnými moduly:

- 4× modul NI9215: A/D převodník, 4 kanály, 100 kS/s, 16 bitů, ± 10 V
- 1× modul NI9421: logické vstupy, 8 kanálů, 100 μ s, maximální frekvence 10 kHz, logické signály (12 až 24) V
- 1× modul NI9474: logické vstupy, 8 kanálů, 1 μ s, maximální frekvence 1 MHz, logické signály (5 až 30) V, maximální proud 1 A.

Moduly NI9274 slouží k převodu analogových signálů z výstupů LEM čidel. Jelikož LEM čidla na DPS měniče nebylo možné pro měření proudů použít (rušení), byl jeden modul nadbytečný, ačkoliv po celou dobu vývoje byl stále připojen dle (Obr.9). Logické vstupy NI9421 sloužily pro sledování signalizace chyb tranzistorových molů a logické výstupy NI9474 sloužily pro řízení spínání tranzistorů. Na (Obr.9) jsou moduly dle pořadí fází označeny MA, MB a MC a jednotlivé tranzistory podle polohy v můstku na TOP (horní) a BOT (spodní). Podobné označení nesou také příslušné chybové signály, které začínají písmenem F.



Obrázek 9: Zapojení (1)

Ze svorkovnice měniče bylo také vyvedeno tlačítko „TOTAL STOP“, to bylo napájeno z části svorkovnice, kam byl připojen pomocný zdroj B a jeho výstupním signálem byl přiveden na vstup 7 modulu NI9421. Jednalo se pouze o logický signál, který byl určen pro reakci řídicího programu měniče a nejednalo se proto o skutečné odpojení měniče v případě nebezpečí.

2.7 Vývojové prostředí

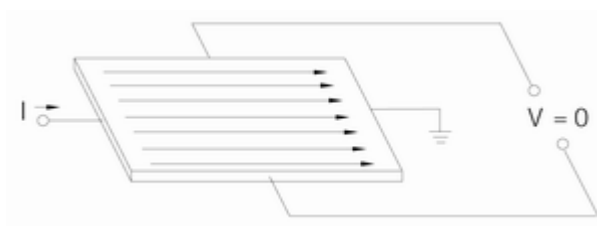
Program pro platformu CompactRIO byl vytvářen v prostředí Labview. Programové prostředí Labview je svým způsobem podobné vytváření modelů v prostředí SIMULINK. K dispozici je seznam předvolených bloků, jako je například sčítání, násobení, Fourierova transformace, paměť typu FIFO apod. Ty pak uživatel přesouvá (vybírá) do pracovní plochy a propojuje signály tak, aby vznikl požadovaný program. Jedná se tedy o techniku programování „drag and drop“. U všech bloků lze nastavit určité parametry určující jejich chování. U aritmetických bloků lze například určit přesnost s jakou mají být dané početní operace prováděny a jakým způsobem má být ošetřeno případné přetečení. Kvůli tomu i v tomto prostředí musí mít vývojář povědomost o chování datových operací (výpočty v binárních číslech apod.). V případě platformy CompactRIO může být program aplikován buď do hradlového pole nebo signálového procesoru. Vzhledem k tomu, že program aktivního harmonického filtru musí pracovat v reálném čase s krátkou reakční dobou, byly všechny algoritmy vždy cíleny do hradlového pole. Ve všech případech byla měření prováděna pro vzorkovací frekvenci 10 kHz.

(1)

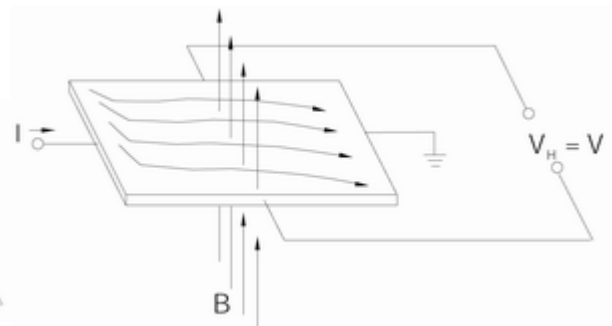
3 LEM čidla

3.1 Hallův jev:

Princip Hallova jevu, který byl objeven v roce 1879 a pojmenován po jeho objeviteli Edwinu Hallovi, spočívá ve vychylování směru magnetického toku el. proudu v závislosti na velikosti indukce magnetického pole B , které je kolmé na polovodičovou (křemíkovou) tenkou destičku, tzv. Hallův element. Výsledkem je generování rozdílového napětí na bočních stranách elementu právě velikosti působícího magnetického pole či jeho kolmosti na vzhledem k destičce. (6)



Obrázek 11 (7)

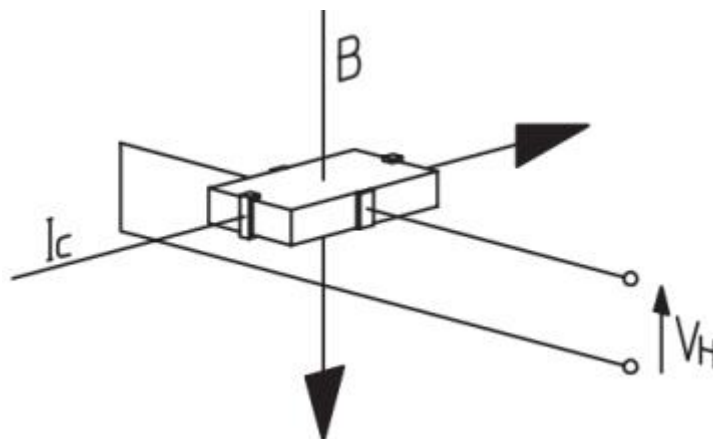


Obrázek 10 (7)

Zatímco bez působení magnetického pole na Hallův element je směr proudu přímý (vlevo), při jeho působení dochází k zakřivení jeho dráhy (vpravo)

Pokud tedy Hallův element, jímž protéká konstantní hodnota proudu I_C (je připojen na zdroj konstantního napětí), není vystaven působení magnetického pole B , napětí U_H (V_H) na jeho svorkách nulové.

Pokud se objeví v jeho okolí magnetické pole působí na elementem procházející proud elektronů tzv. Lorenzova síla, která elektrony vychyluje z přímého směru vždy k jedné boční straně destičky silou podle vzorce: $F = Q(v \times B)$, kde Q je náboj, v je jejich rychlost a B je indukce působícího magnetického pole. Změní se tak rozdělení náboje, kdy na jedné straně je větší koncentrace nosičů náboje (elektronů), než na druhé, a tedy obě boční stěny destičky mají rozdílný potenciál. Vzniká tak elektrické pole E a na svorkách Hallova elementu se generuje tzv. Hallovo napětí U_H (V_H). (7)



Obrázek 12: Hallův článek (6)

Velikost Hallova napětí U_H platí vztah:

$$U_H = R_H \cdot \frac{I_C \cdot B}{d} \quad (1)$$

kde I_C proud protékající destičkou a R_H je Hallova konstanta v $[m^3/(A \cdot s)]$, která je určena typem materiál a je závislá na teplotě, a d je tloušťka polovodičové destičky. Velikost kolmo působící magnetické indukce, která vychyluje tok elektronů na jednu ze stran desky a vytváří tak Hallovo napětí, lze popsat přes Biotův-Savartův zákon:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (2)$$

Kde μ_0 je permeabilita vakua, která je rovna $1,256637061 \times 10^{-6}$ H/m, I je měřený proud tekoucí vodičem ve vzdálenosti r od destičky. (6)

3.2 Měření proudu pomocí Hallova jevu

Zjednodušeně pokud se vyjde z rovnic (1) a (2), tak vhodnou konstrukcí s Hallovým článkem a magnetickým jádrem, které koncentruje magnetické pole vyvolané proudem vodičem, lze vytvořit proudový senzor.

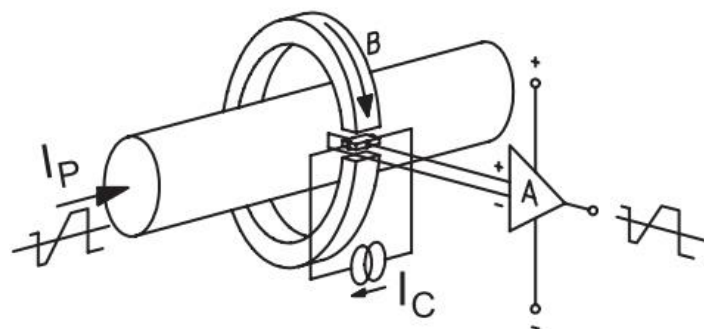
Napětí generované článkem je velice malé a praktickému použití tohoto jevu se rozšířilo teprve až s příchodem pokročilých polovodičových technologií, které umožnily toto malé napětí zesílit a dále zpracovat. Pokud se vyjde z příkladu proudu o velikosti 100 mA protékající vodičem

vzdálené 5 mm od Hallova článku, tak vychází magnetická indukce maximálně v jednotkách μT , což je prakticky hodnota příliš nízká pro měření Halloovým článkem. Typické citlivosti dnešních Hall-effect senzorů se pohybují maximálně ve stovkách mV/mT , takže pro jednotky μT je signál ze senzorů pod úrovní šumu.

Jedna z přímočarých cest je zvýšení řídicího proudu I_C a snížení tloušťky destičky d , což jsou protichůdné požadavky. Každý parametr má své praktické limity. Řídicí proud nelze zvyšovat a zároveň snižovat tloušťku na nerealizovatelné rozměry, které navíc zvyšují odpor pro řídicí proud. Praktický způsob zvýšení citlivosti je v přidávání smyček vodiče s měřeným proudem za cenu větší velikosti a většího odporu pro měřený proud. Tento způsob zvyšování magnetické indukce do Hallova článku využívá většina výrobců modulových řešení proudových senzorů (bude popsáno níže).

V následujících kapitolách budou vysvětleny používané technologie Hall-effect proudových senzorů. (6)

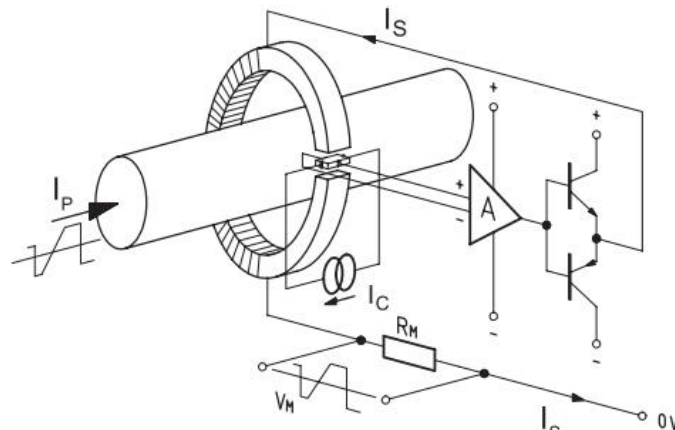
3.3 Proudový senzor s otevřenou smyčkou



Obrázek 13 (6)

Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější řešení s nízkou spotřebou a zanedbatelným vložitelným odporem, které prakticky vychází z úvah uvedených v předešlé kapitole. Nevýhodou této koncepce je omezená lineární závislost výstupního napětí na měřeném proudu, protože je potřeba se pohybovat v lineární oblasti hysterezní křivky použitého magnetického jádra. Oproti koncepci s uzavřenou smyčkou mají tyto senzory výraznější teplotní drift, menší frekvenční rozsah a horší reakční dobu (odezvu). (6)

3.4 Proudový senzor s uzavřenou smyčkou



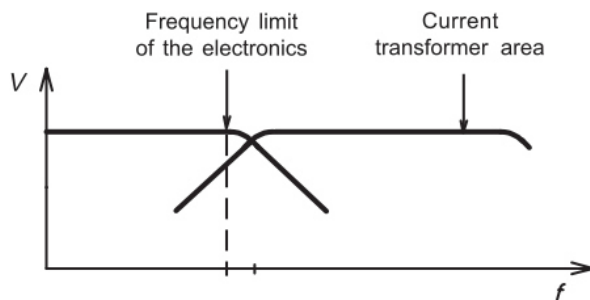
Obrázek 14 princip senzoru s uzavřenou smyčkou (6)

Některé nevýhody systémů s otevřenou smyčkou eliminuje použití koncepce s uzavřenou smyčkou. Zatímco u otevřené smyčky velikost napětí z Hallova článku sloužilo k určení velikosti proudu I_P , tak v tomto systému slouží řízení obvodu ke generování kompenzačního proudu I_S do cívky omotané kolem magnetického jádra, ve kterém vyrovná celkový magnetický tok na nulu. Velikost proudu I_S prakticky odpovídá velikosti měřeného proudu I_P v poměru počtu závitů na jádře podle vztahu:

$$I_S = \frac{I_P \cdot N_P}{N_S} \quad (3)$$

kde počet závitů N_P vodiče s měřeným proudem je prakticky roven 1 nebo může být zvýšen pro větší citlivost. Proud I_S prochází bočnicí R_M , na kterém se měří napětí odpovídající velikosti proudu. Vzhledem k tomu, že celkový magnetický tok je nulový, tak odpadá problém s celkovou nelinearitou hysterezní křivky použitého materiálu jádra. Dále díky tomuto principu je kompenzována teplotní závislost magnetického materiálu.

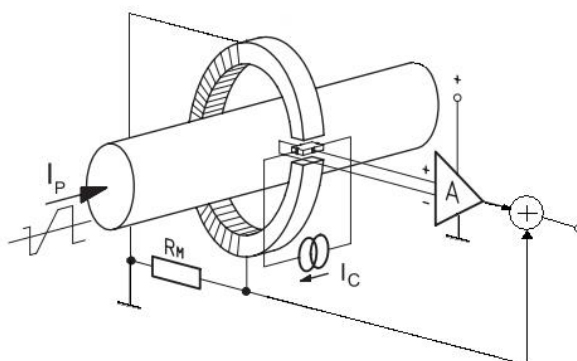
Samotný Hallův článek a příslušné obvody mají limitovaný frekvenční rozsah, který je rozšířen částí tvořící proudový transformátor, jak je naznačeno v (Obr. 15).



Obrázek 15 :Frekvenční rozsah senzoru s uzavřenou smyčkou (6)

Díky tomu dosahují tyto senzory vyšší šířky pásma než senzory s otevřenou smyčkou a výrazně lepší odezvy. Senzory mají proudový výstup vhodný do aplikací s velkým rušením, který lze snadno převést na napěťový (viz Obr. XYZ). Dále poskytují lepší linearitu a přesnost. Nevýhody jsou větší rozměry, spotřeba sekundárního obvodu a pochopitelně cena.

Existuje modifikace nazvaná ETA (η), která kombinuje výhody obou systémů. Princip spočívá v tom, že pro nižší frekvence se sensor chová jako systém s otevřenou smyčkou a pro vyšší jako proudový transformátor.



Obrázek 16: Princip ETA (6)

Tímto způsobem se výrazně sníží spotřeba senzoru, protože není potřeba generovat kompenzační proud I_s a sensor lze napájet nesymetrickým napájením. Proto odtud název ETA – účinnost. Zde je nutno podotknout, že většina senzorů na principu uzavřené nebo otevřené smyčky je napájena nesymetrickým napájením a napěťový výstup pro nulový proud odpovídá polovině napájecího napětí (typicky 2,5 V pro napájení 5 V). Senzory ETA jsou v porovnání se systémy s uzavřenou smyčkou paradoxně dražší. Důvodem je složitější realizace části tvořící proudový transformátor. Podle dostupných informací je jedním z mála výrobců ETA proudových senzorů jenom LEM. (6)

3.5 Proudové senzory s ostatními technologiemi

Do této skupiny, které jsou schopné měřit i DC proud, spadají senzory postavené na technologii Fluxgate, které poskytují v porovnání s předchozími systémy lepší vlastnosti, co se týče citlivosti a frekvenčního rozsahu.

Technologie Fluxgate senzorů je relativně k Hall-effect senzorům mladší. Jejich princip byl znám delší dobu, ale teprve nedávno několik výrobců díky rozvíjející se technologii začalo vyrábět tyto proudové senzory. Principem se podobají systému s uzavřenou smyčkou s rozdílem, že místo Hallova článku je použit tzv. „nasytitelný induktor“ (saturable inductor).

Tyto články jsou schopny měřit velmi slabé magnetické pole až úrovně jednotek nT. To jsou takové hodnoty, které Hallovy články nejsou schopné detekovat. Tomu odpovídají i vyráběné proudové senzory s rozsahy cca od 100 mA do 500 mA. Značnou nevýhodou těchto senzorů je velmi vysoká cena a citlivost na nežádoucí rušivé magnetické pole. (6)

3.6 Výhody měření proudu pomocí Hallova jevu

- Galvanické oddělení od měřeného obvodu
- Vysoká účinnost (měření bez přidaných ztrát)
- Malá konstrukční velikost a hmotnost
- Velký měřicí rozsah
- Nízká spotřeba
- Široké frekvenční pásmo
- Krátká odezva
- Nízký teplotní drift
- Výborná linearita
- Velmi dobrá celková přesnost

3.7 Proudové čidlo LEM LA 55-P

Pro měření proudu zátěže bylo použito čidlo LEM LA 55-P. Toto čidlo obsahuje Hallovu sondu v kompenzačním zapojení (kompenzace magnetických účinků měřeného proudu). Je určeno pro měření efektivních hodnot (True RMS) AC, DC a pulzních proudů. Primární obvod (silový) je galvanicky oddělen od sekundárního (elektronického). Toto čidlo je umístěno v plastovém pouzdře a je určeno přímo pro uchycení na desku plošného spoje. Snímač LA 55 je průvlekový, to znamená, že počtem závitů (průvleků) vodiče, skrz který teče měřený proud, lze měnit rozsah čidla. Měřicí rozsah čidla je ± 70 A. Při měření AC proudu je také důležité znát frekvenční rozsah. Podle výrobce nastává útlum 1 dB při frekvenci měřeného proudu 200 kHz. Jelikož hodláme zpracovávat proudy do frekvencí 2,5 kHz, není pro nás tento údaj kritický. V tabulce

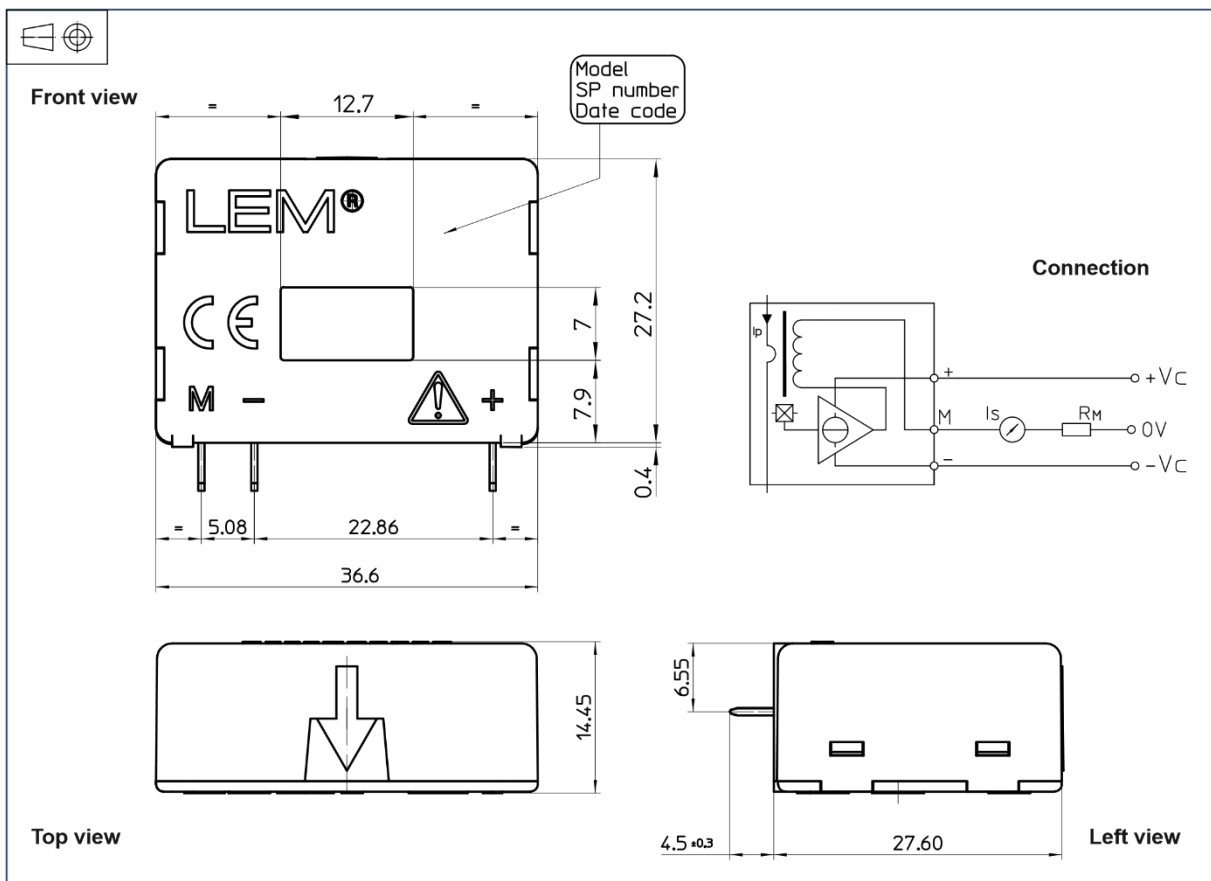
1 níže jsou uvedené důležité údaje čidla LA 55-P. Výstupní proud I_s je kladný, pokud měřený proud prochází ve směru šipky vyznačené na pouzdru jak je vidět na obr 10 a obr. 11.



Obrázek 17: 3D model čidla LA 55-P (8)

Veličina	min.	max.	Jednotky
I_{pm}	±70		A
I_{pn}	50		A
I_{sn}	50		mA
K_N	1:1000		-
$V_c (\pm 5\%)$	±12	±15	V
$R_m (\pm 15V, \pm 50mA)$	100	350	Ω
I_c	10 + I_s		mA
T_a	-40	+85	$^{\circ}C$

Tabulka 1: Parametry čidla LEM LA 55-P (8)

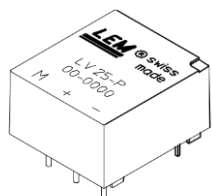


Obrázek 18: Třísóvý výkres a scéma vnitřního zapojení čidla LEM LA 55-P (8)

3.8 Napěťové čidlo LEM LV 25-P

Pro měření napětí bylo zadavatelem zvoleno čidlo LEM LV 25-P. Typicky se toto čidlo používá pro měření vstupních efektivních hodnot napětí střídačů a pulzních měničů. Jedná se tedy o stejnosměrné napětí, které je ještě vyhlazeno kondenzátorem s velkou kapacitou ve stejnosměrném mezi-obvodu. Napěťové čidlo obsahuje Hallovu sondu. Umožňuje měření střídavých, stejnosměrných a impulsních napětí. Proud úměrný měřenému napětí je dán

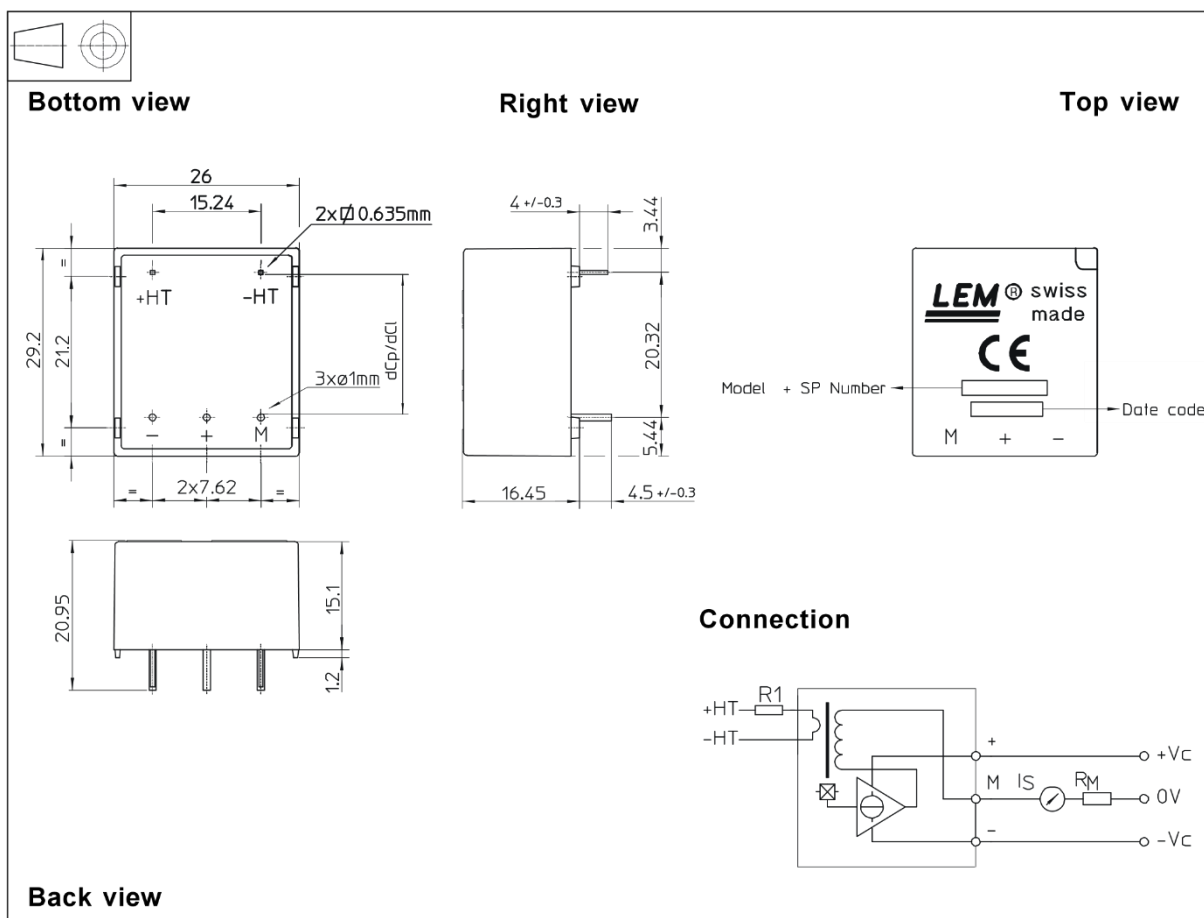
externím odporem R1, který je vypočítán uživatelem. Primární obvod (vysoko-napěťový) je galvanicky oddělen od sekundárního obvodu (výstupního). Vstup tohoto snímače je na rozdíl od snímače proudu „měkký“ (vnitřní odpor je dán předřadným odporem R1) tj. kompenzační elektronika uvnitř snímače ovlivňuje magnetické poměry v magnetickém obvodu a odezva snímače je proto pomalejší než u čidla LA 55. Na obr. XYZ je vidět zapojení čidla.



Obrázek 19: 3D model čidla LV 25-P (8)

Veličina	min.	max.	Jednotky
V_{pn}	10	500	V
I_{pm}	0	± 14	mA
I_{pn}	50		mA
I_{sn}	25		mA
K_n	2500:1000		-
$V_c (\pm 5\%)$	± 12	± 15	V
$R_m (\pm 15V, \pm 50mA)$	100	350	Ω
I_c	$10 + I_s$		mA
T_a	0	+70	$^{\circ}C$

Tabulka 2: Parametry čidla LEM LV 25-P (8)

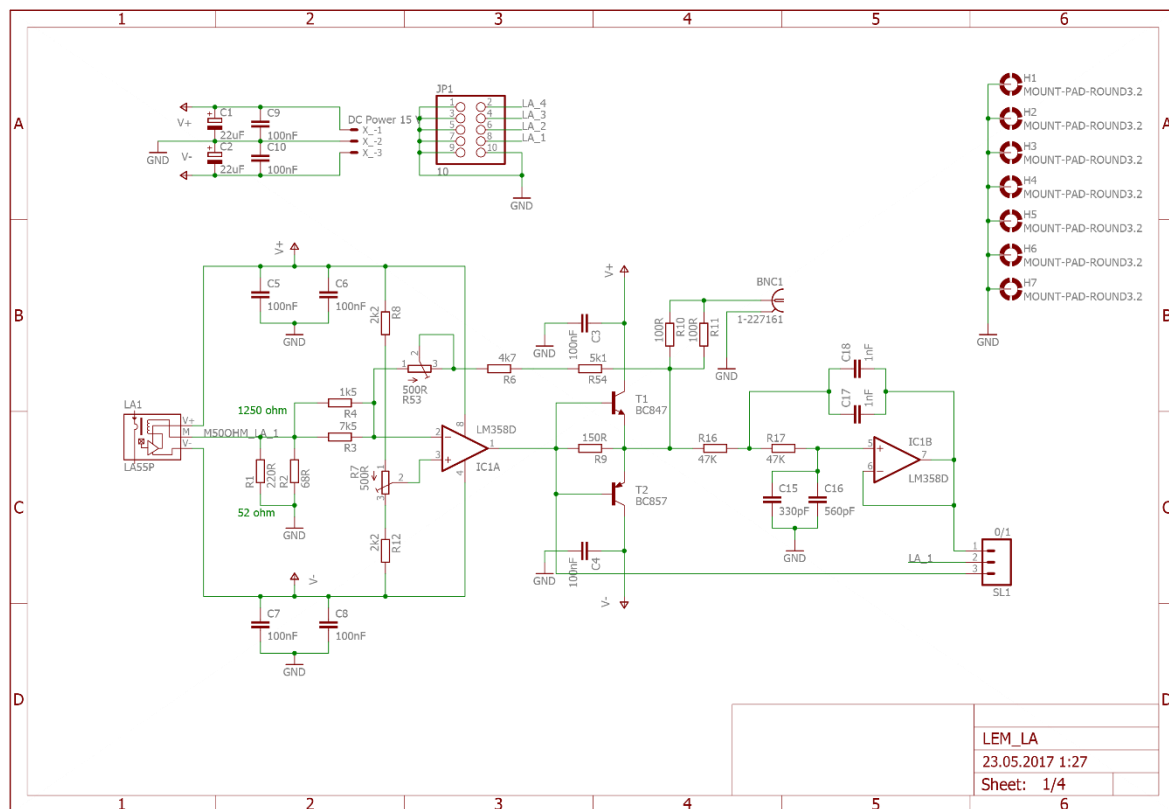


Obrázek 20: Třísý výkres a scéma vnitřního zapojení čidla LEM LV 25-P (8)

4 Elektrický návrh

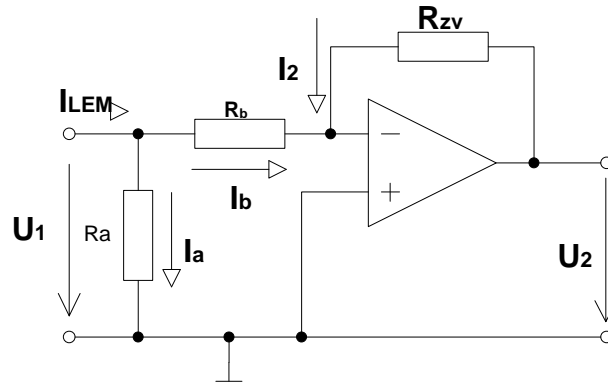
Návrh zapojení obvodu probíhal pomocí softwaru EAGLE Schematic, tato část softwaru vytváří podklady pro samotný návrh DPS jsou zde voleny součástky z knihovny, kterou má tento software rozsáhlou díky velké komunitě uživatelů. Občas se však stane, že daná součástka se v knihovně nenachází a je nutný její návrh, to jsem si vyzkoušel na napěťovém čidle, kdy jsem vytvořil schématickou značku a posléze pouzdro, které jsme dané značce přidělil. Další výhodou je zde volení určitých součástek včetně hodnot, takže již na začátku jsem uvažoval dostupnost typu a velikosti součástek, které budou dále použity.

4.1 Návrh zapojení proudové DPS



Obrázek 21: Schéma zapojení proudového měřicího v EAGLE Schematic

Zde je kompletní schéma zapojení proudového měřicího obvodu, tento obvod je na proudové desce čtyřikrát. Na desku je přivedeno symetrické napájení ± 15 V na kontakty X1-3, kde jsou pro vyhlazení vstupního napětí umístěny vyhlazovací kondenzátory C1 a C2 ($22 \mu\text{F}$) a odrušovací kondenzátory C9 a C10 (100 nF). Tyto odrušovací kondenzátory jsou dále umístěny u napájení LEM čidel a operačních.



Obrázek 22: Zapojení invertujícího operačního zesilovače pro proudové LEM čidlo (8)

Proudové LEM čidlo má maximální výstupní proud $I_{LEM} = 25 \text{ mA}$, tento proud se rozdělí na proudovém děliči v poměru R_b/R_a tak, aby I_b byl přibližně 1 mA . Dále je zde zapojen invertující zapojení operačního zesilovače pro převedení signálního proudu I_b na napětí U_2 .

Tento převod je dán vztahem:

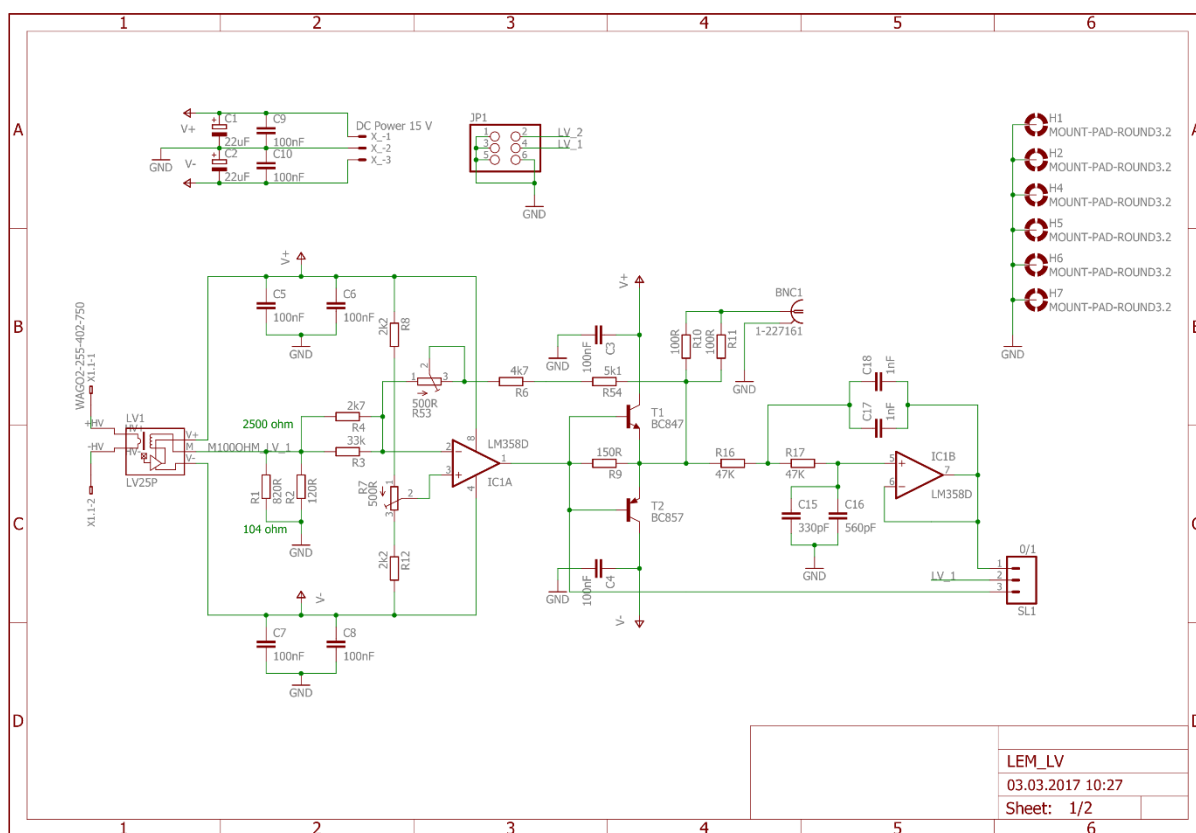
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_{zv}}{R_b} \quad (4)$$

$$I_{LEM} = I_a + I_b = 25 \text{ mA} \quad (5)$$

$$I_a = \frac{R_b}{R_a + R_b} = 1,038 \text{ mA} \rightarrow I_b = I_{LEM} - I_a = 23,96 \text{ mA} \quad (6)$$

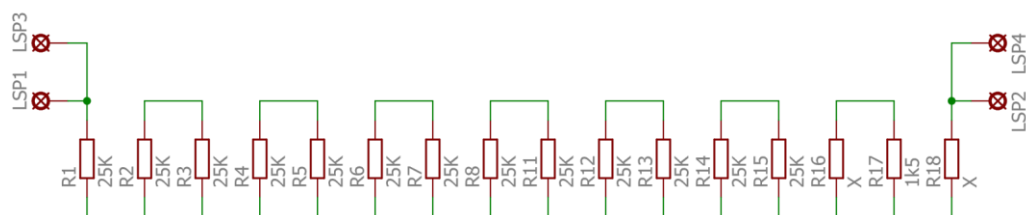
kde U_2 chceme rovno 10 V , R_b je 1250Ω a $U_1 = R_a \cdot I_a = 1,248 \text{ V}$. R_{zv} tedy vychází něco málo přes $10 \text{ k}\Omega$. Pro doladění odporu R_{zv} je do obvodu zařazen potenciometr R_{53} o hodnotě 500Ω . Pro doladění offsetu virtuální nuly je použit potenciometr R_7 , který je přes rezistory R_{12} a R_8 připojen k symetrickému napájení. Dále je do obvodu BNC konektor nefiltrovaného výstupu a 50Ω odporem. Pro stabilizaci výstupní napětí jsou zde bipolární tranzistory T1 a T2, které jsou řízeny proudem, který teče přes odpor R_9 . Pro přepínání filtrovaného na nefiltrovaného výstupu na JP1 jsou zde piny SL1, ty jsou dále vyvedeny na panel modulu. Samotný filtru bude rozebrán v další kapitole.

4.2 Návrh zapojení napěťové DPS



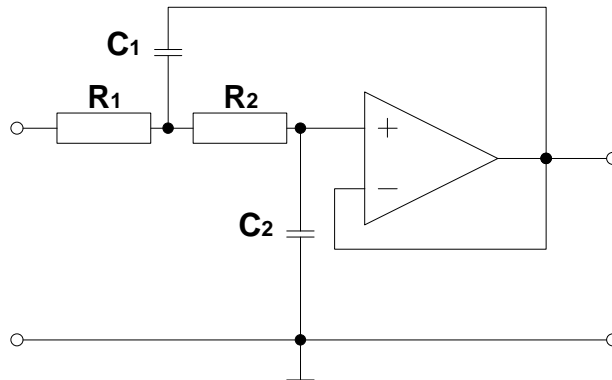
Obrázek 23: Schéma zapojení napěťového měřičho v EAGLE Schematic

Jak je vidět zapojení napěťového čidla se liší pouze o vstupy z desky s napěťovými děliči a proudový dělič za LEM čidlem, který má výstup $I_{LEM} = 25 \text{ mA}$, takže totožný výpočet, jako u proudového čidla. Vstupní napěťový předřadník je dimenzován každý usek na 250 V. Jednotlivé úseky tvořili odpor $R_p = 25 \text{ k}\Omega$, pouze první usek byl ponížěn o 250 Ω , což je odpor primárního vinutí čidla. Celá sada se vždy vytvořila ze 14 rezistoru a poslední dva byly doplněni do přesné hodnoty.



Obrázek 24: Schéma zapojení jedné sady předřadníku.

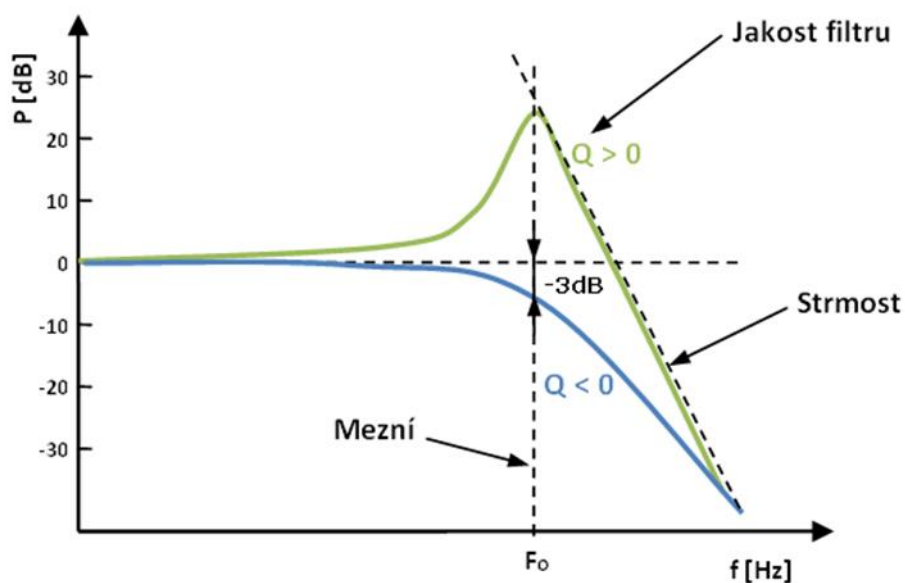
4.3 Návrh zapojení filtru



Obrázek 25: Schéma zapojení s dolní propustí Sallen-key (8)

Dále byl zadán RC filtr dolní propust s mezním kmitočtem $f_m = 2,5$ kHz, R v řadech k Ω a činiteli jakosti $Q = 3/4$. Použil jsme zapojení aktivní dolní propusti Sallen-Key, které se skládá ze dvou rezistorů R1 a R2, dvou kondenzátorů C1 a C2 a zesilovače napětí. Ten je v praxi reprezentován neinvertujícím zapojení operačního zesilovače. V tomto případě je zvolen zesilovač s jednotkovým zesílením, takže je operační zesilovač použit ve funkci téměř ideálního sledovače napětí.

Funkci zapojení lze zjednodušeně popsat ve třech základních kmitočtových oblastech. Na nízkých kmitočtech se kondenzátory C1 a C2 jeví jako rozpojený obvod (mají velkou impedanci) a vstupní signál je pouze převeden sledovačem na výstup. V okolí kmitočtu pólu mají



Obrázek 26: Charakteristika dolní propusti Sallen-Key (8)

kondenzátory impedanci přibližně stejného řádu jako rezistory R_1 , R_2 a signál je pomocí kladné zpětné vazby přes kondenzátor C_1 zesílen podle nastavené hodnoty jakosti Q .

Na vysokých kmitočtech se kondenzátory chovají jako zkrat (malá impedance), takže se signál na vstupu OZ blíží nule a je dále přenesen sledovačem na výstup. Kmitočtové vlastnosti dolní propusti Sallen-Key jsou značně závislé na frekvenčních parametrech použitého operačního zesilovače. Mezi nimi má na chování dolní propusti největší vliv nenulový výstupní odpor operačního zesilovače označený jako R_{outOZ} a projeví se deformací přenosu zejména v oblasti vyšších kmitočtů. Modulovou kmitočtovou charakteristiku lze popsat pomocí několika parametrů – přenos v propustném pásmu K_0 , maximum přenosu na kmitočtu pólu $K_{max} = K(f_p)$, jakost pólu Q_p , minimum přenosu K_{min} , kmitočet minima přenosu f_{Kmin} a dalších.

$$C_1 = 2nF = C31 || C32 \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{4 \cdot Q^2} = \frac{2 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot \left(\frac{3}{4}\right)^2} = 888,88pF \approx C33 || C34 \quad (8)$$

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_m = 15\,708 \quad (9)$$

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{\omega_0 \cdot \sqrt{C_a \cdot C_b}} = 47\,k\Omega = R31 = R32 \quad (10)$$

Je zde použit druhý OZ z pouzdra, proto na schématu není zakresleno jeho napájení. Volil jsem C_1 tak, aby $R_{1,2}$ vyšlo v řádech $k\Omega$.

5 Realizace DPS

Návrh probíhal v software EAGLE Board, který přebírá zapojení z EAGLE Schematic a vytváří „ratsnest“, které zajišťuje kontrolu správného vedení cesty.

5.1 Návrh měřicích desek

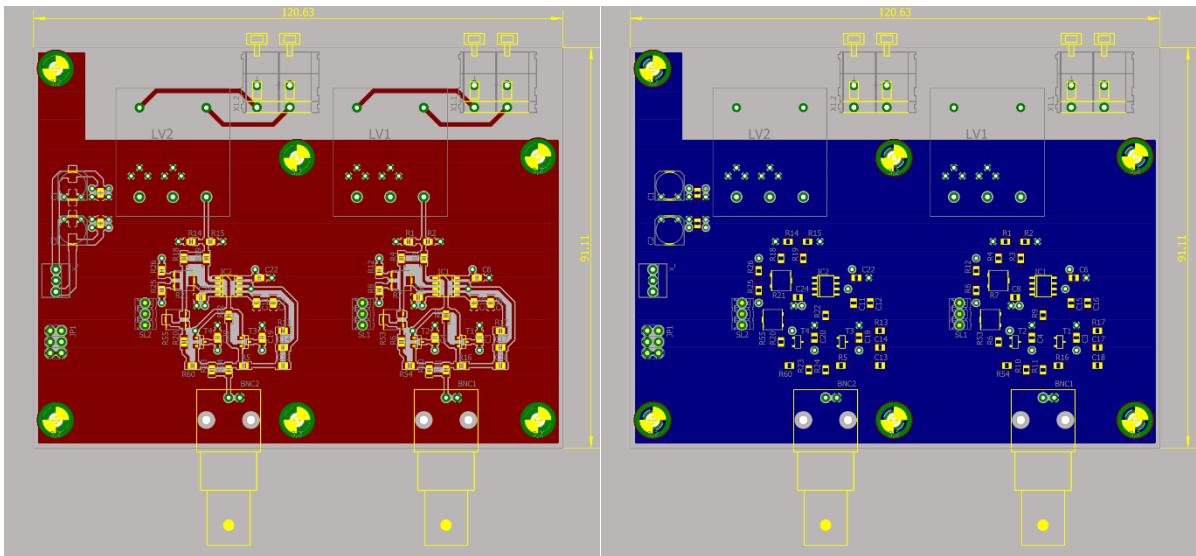
Protože princip návrhu proudové a napěťové DPS je podobný budou rozebrány najednou. Pouze napěťová DPS je trochu odlišná tím, že v okolí vstupu LEM čidel není rozlita měď, a to pro dodržení izolační vzdálenosti při 1 kV.

Samotné desky byli navrženy jako čtyřvrstvé:

- Rychle signály
- ZEM (GND)
- Symetrické napájení ± 15 V
- Pomalé výstupní signály

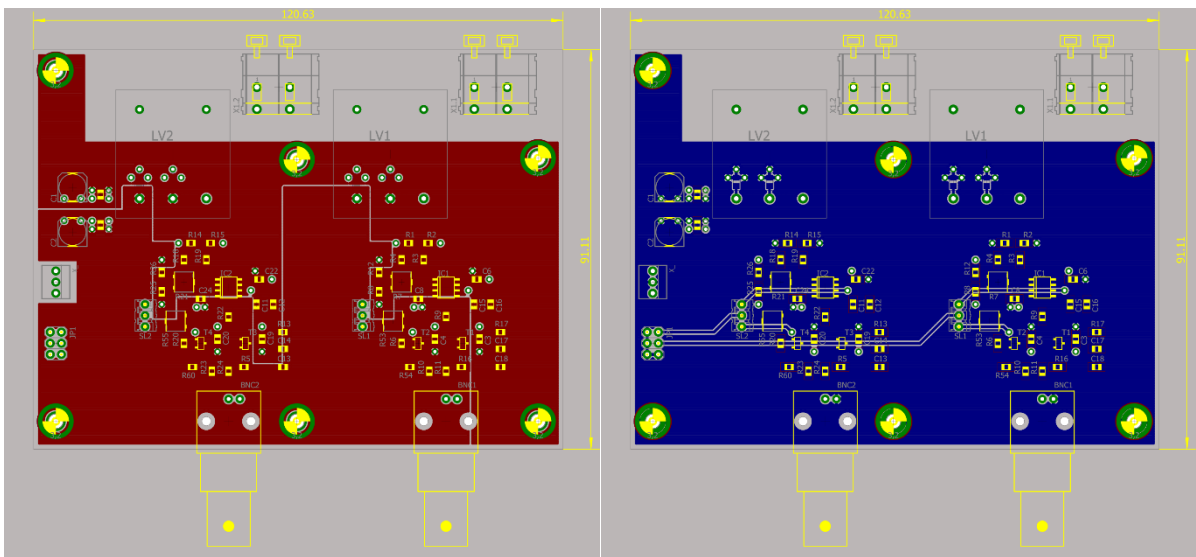
Jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou propojeny přes prokovy a prokovené otvory vývodových součástek. Většina součástek je montována technologií SMD, proto jsou zde prokovy nutné. Rozlita měď pod celé druhé vrstvě DPS (mimo vstupy napěťových LEM) zajistí odrušení všech signálů od sebe a okolí, dále zkrácení všech smyček. Blokovací keramické kondenzátory jsou umístěny co nejbližší vývodům napájení daných součástek pro eliminaci rychlých napěťových špiček, protože jsou umístěny co nejbližší a je pod nimi rozlita GND, které jsou připojeny několika prokovy, je zaručena minimální indukčnost a maximální rychlost odvedení těchto špiček do GND. U všech signální cest je kladen důraz na minimální vzdálenost mezi součástkami, ale s ohledem na odstínění a křížení. BNC konektory byly umístěny na okraj DPS, aby se bylo možno se na jejich konektory připojit na panelu modulu. Výstupy signálů z pinů JP1,2 na CAN15 jsou konstruovány, tak aby vždy mezi signálními vodiči byl jeden stínící (připojení na GND) a tím se zmenšuje smyčka pro zpětné proudy. Protože v rozmístění jsou si proudová a napěťová měřicí deska podobná je zde z rozměrových pouze ukázka jednotlivých vrstev na napěťové měřicí desce.

Obrázek 27: DPS vrstva rychlých signálů

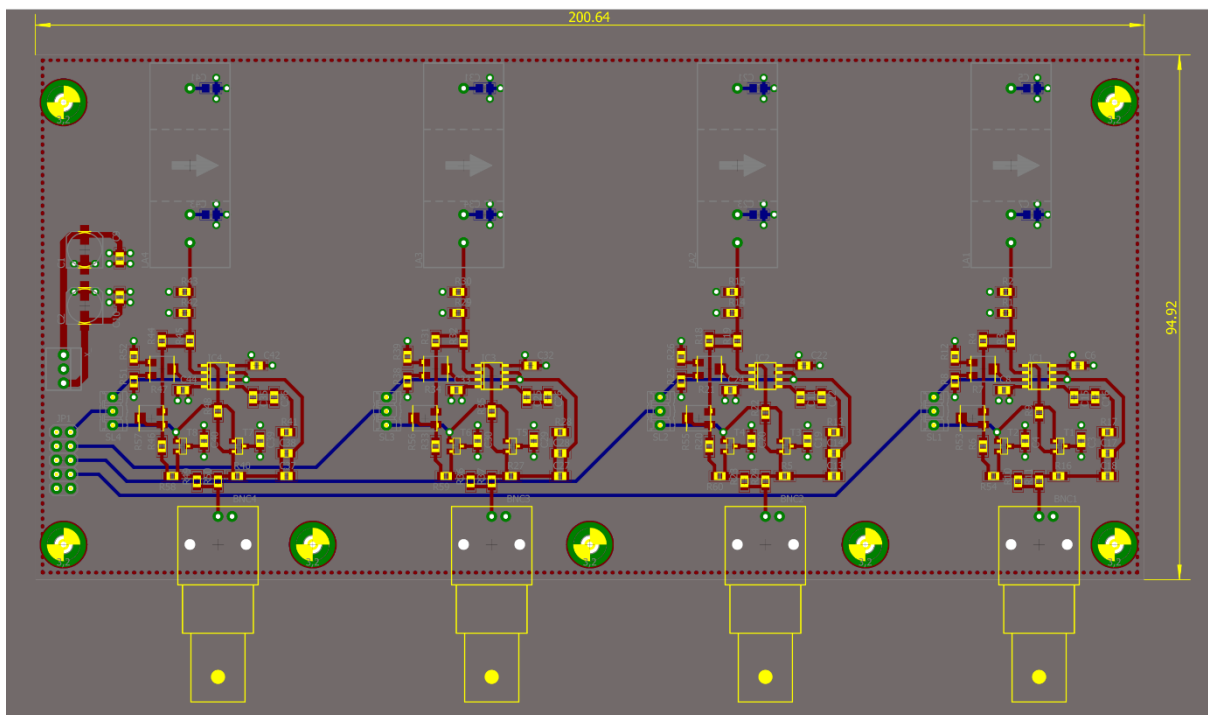


Obrázek 28: DPS GND vrstva

Obrázek 29: DPS napájecí vrstva

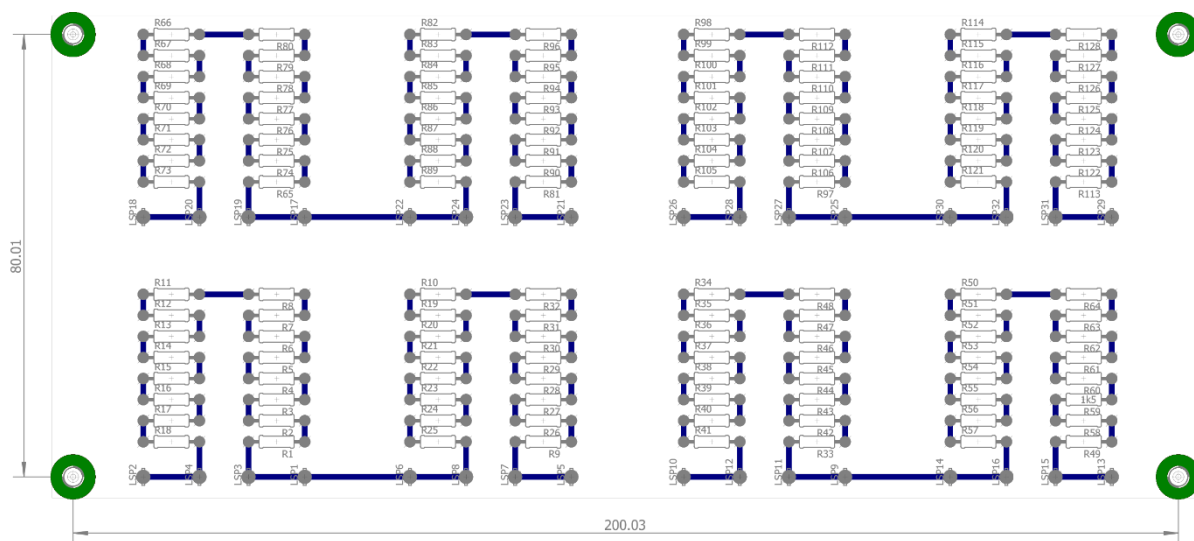


Obrázek 30: DPS vrstva pomalých signálů



Obrázek 31: DPS proudové měřicí desky všechny vrstvy bez rozlité mědi.

5.2 Návrh předřadníku



Obrázek 32: DPS předřadníku

5.3 CANON 15 konektor

Všechny signály jsou vyvedeny CAN15 konektor, na který se připojuje CompactRION



Obrázek 33 CAN15 konektor

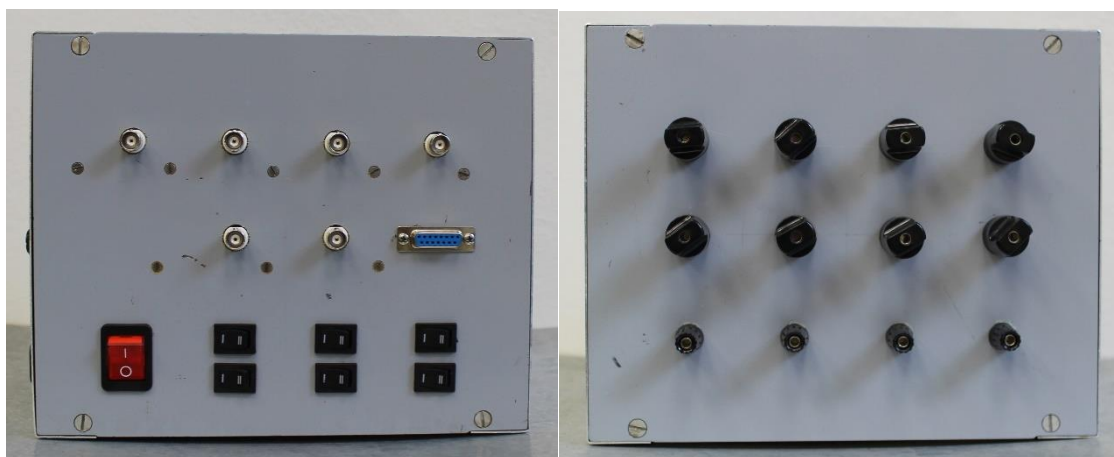
V níže tabulce 3 je znázorněno rozmístění signálů na jednotlivých pinech

8	7	6	5	4	3	2	1
U1	U2	GND	I1	I2	I3	I4	GND
15	14	13	12	11	10	9	
GND	GND	GND	GND	GND	GND	GND	

Tabulka 3 rozložení signálu na konektoru

5.4 Kompletní modul

Obrázek 34: Přední strana modulu

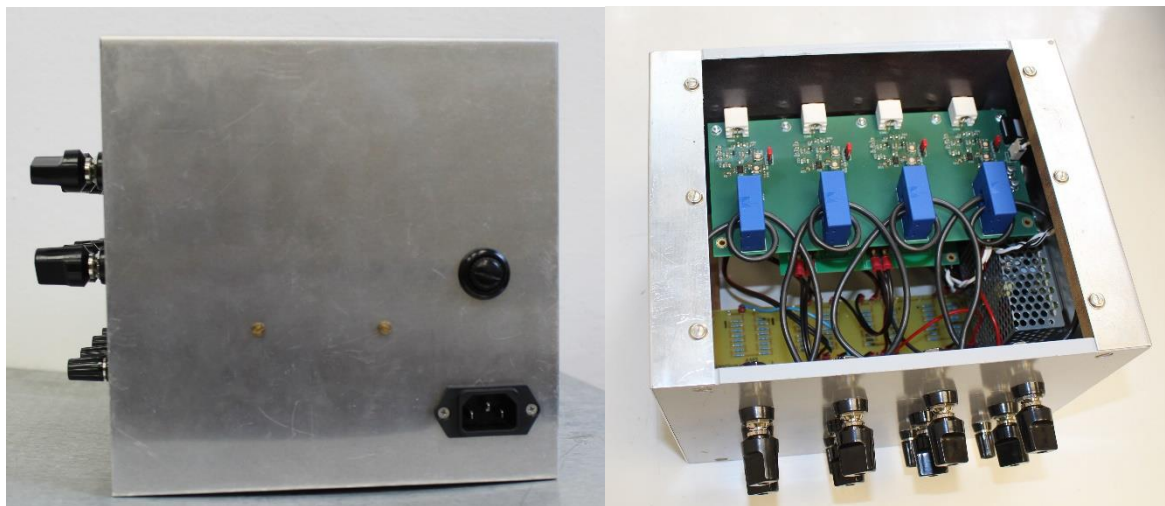


Obrázek 35: Zadní strana modulu

Na přední straně je vidět v první řadě čtveřice BMC konektorů od proudových čidel a druhé řadě BNC konektory od napěťových čidel. Dále CANON konektor, šest přepínačů filtrovaného

a nefiltrovaného výstupu. Jako poslední je zde umístěn vypínač napájení. Na zadní straně jsou umístěny proudové (větší) a napěťové (menší) svorky.

Obrázek 36: Boční pohled

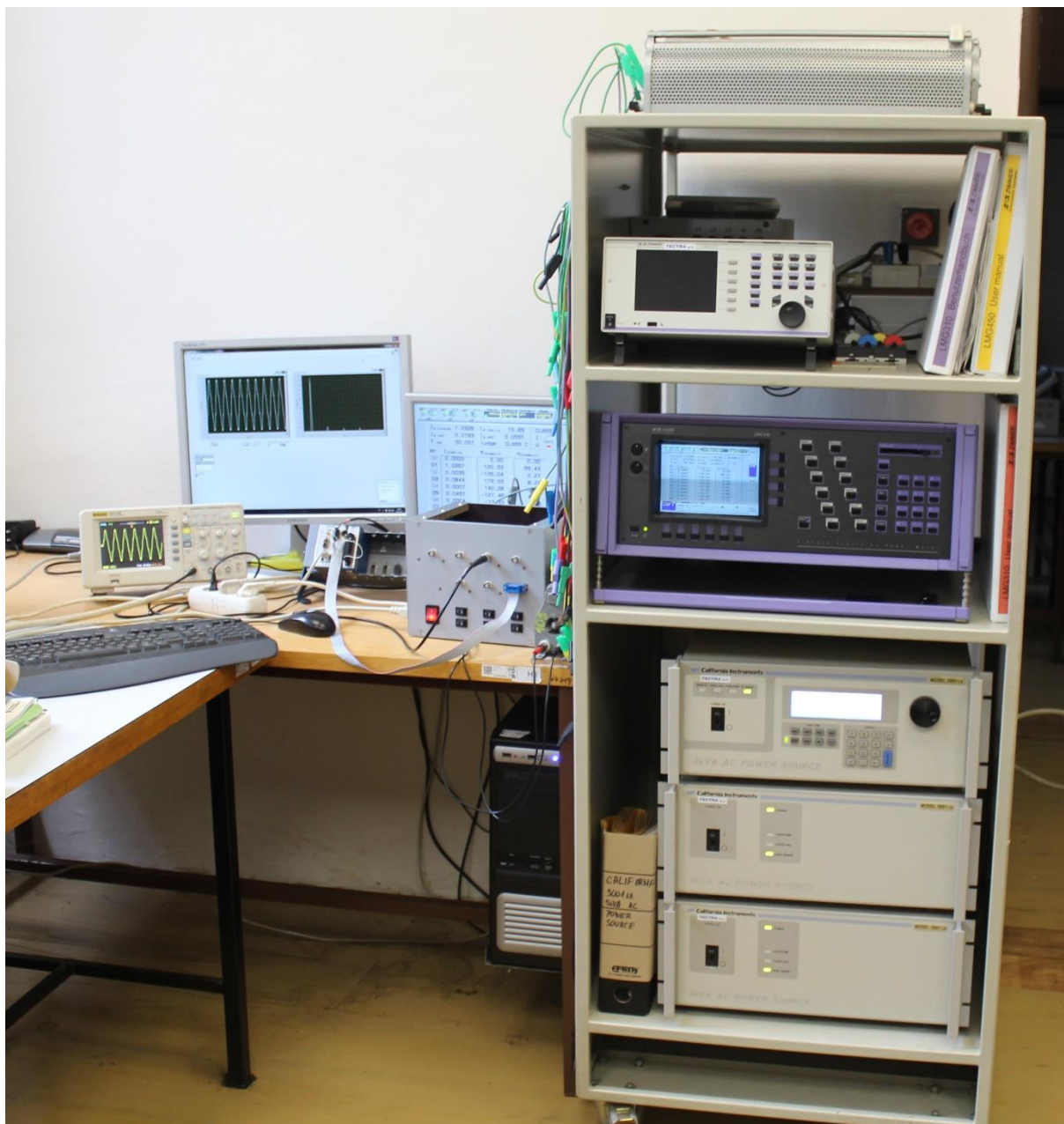


Obrázek 37: pohled z perspektivy

Na boční pohledu vidíme napájecí konektor a šroubovací pojistku. Poslední pohled složí jako orientační, jak je vnitřek uspořádán.

6 Testování měřicího modulu

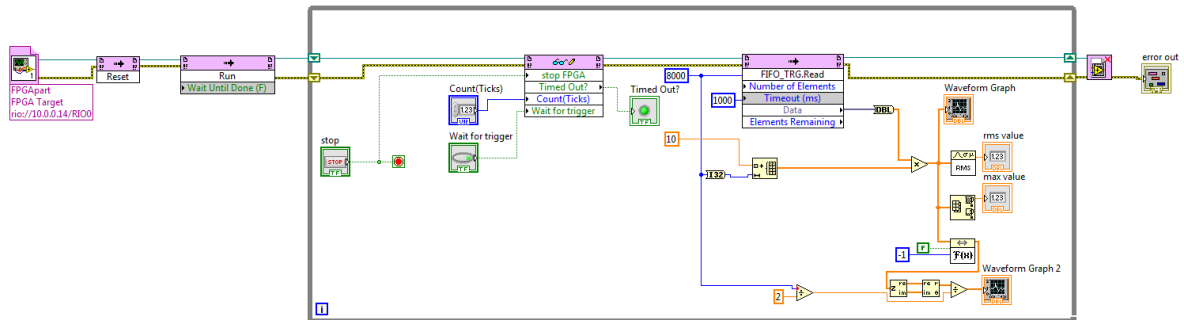
Samotné testování probíhalo pomocí zařízení Zimmer a Californi Instrumentv, které složili jako zdroje přesného signálu sinusový, obdélníkový a normovaný průběh podle normy ČSN 4.13. Dále byl na pracovišti osciloskop pro zkalibrování a kontrolu výstupních signálů. Signály z měřicího modulu byly přivedeny do CompactRIO a zpracovány v LabVIEW. Celé pracoviště je možno vidět na (Obr. 38).



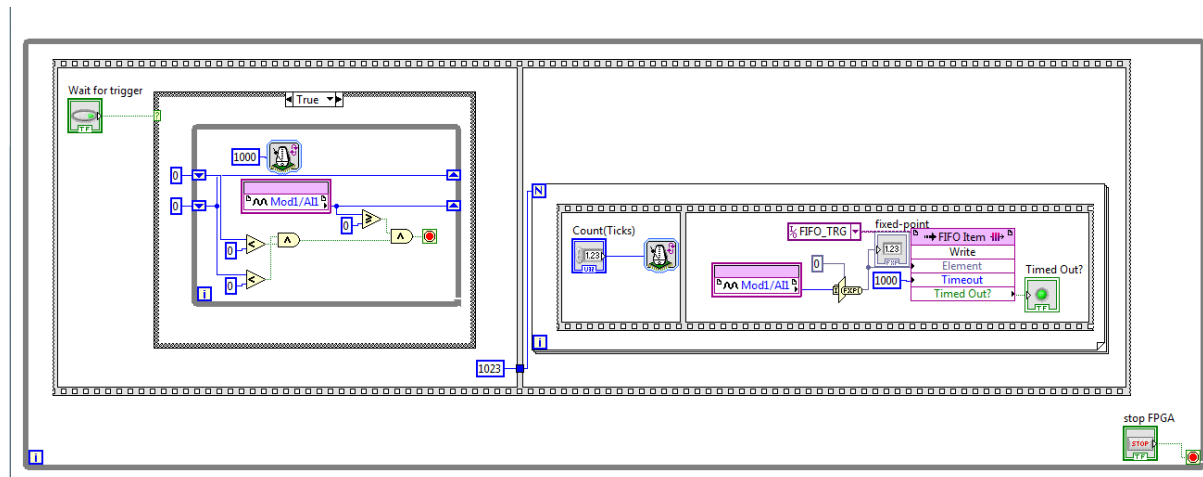
Obrázek 38: Foto pracoviště, kde bylo prováděno testování.

6.1 LabVIEW program

Na (Obr. 39 a 40) je vidět program LabVIEW kterým byla data zpracována.



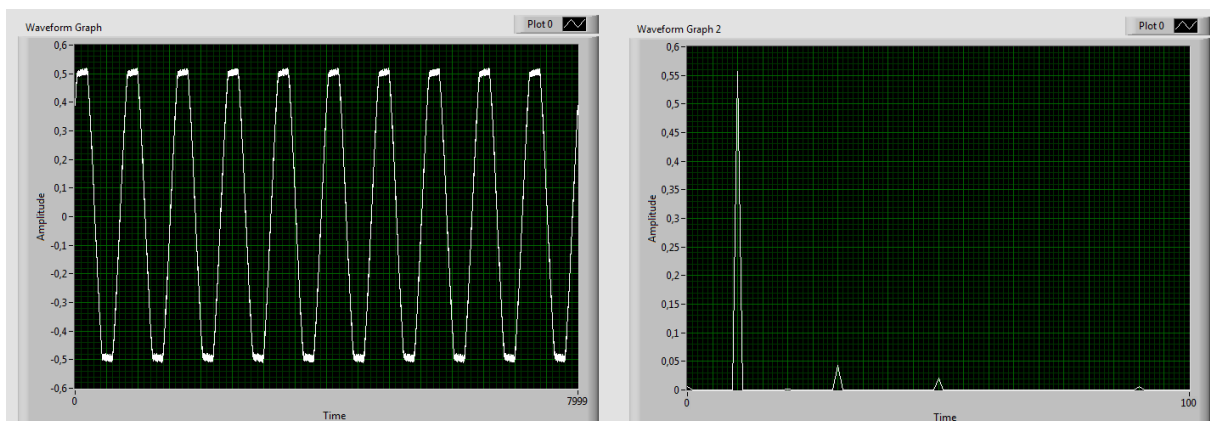
Obrázek 39: Program pro zobrazení žádaných veličin.



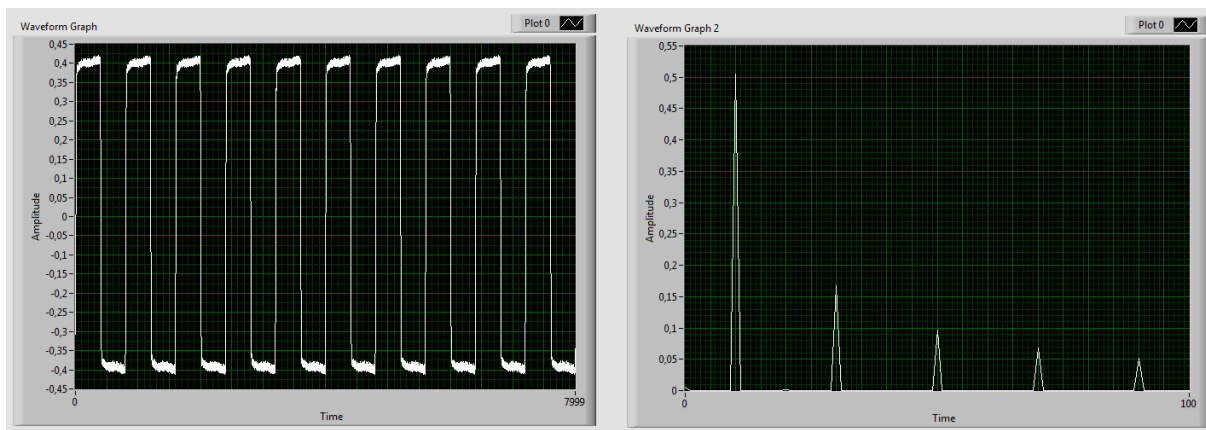
Obrázek 40: Program pro zpracování vstupních signálů.

6.2 Průběhy z LabVIEW

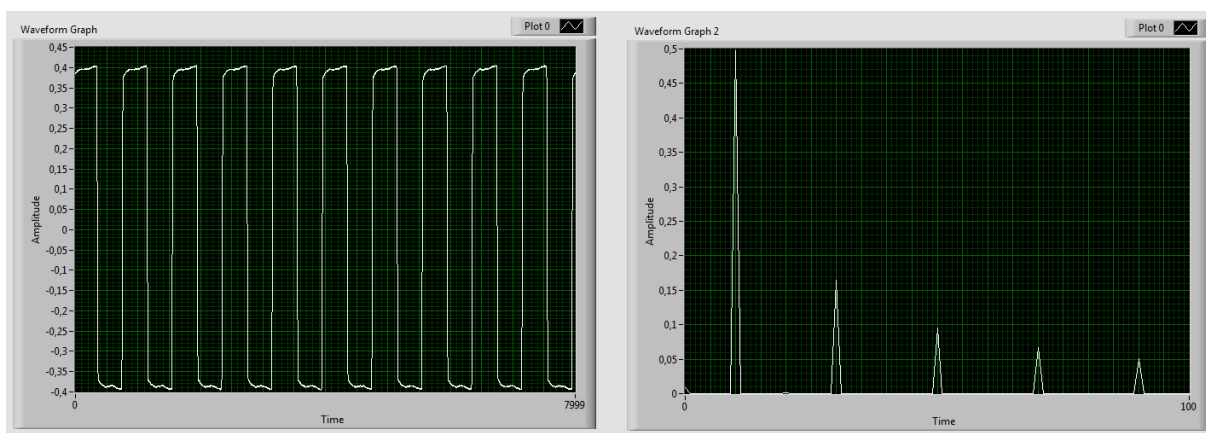
Zde je několik průběhu, které byli testovány.



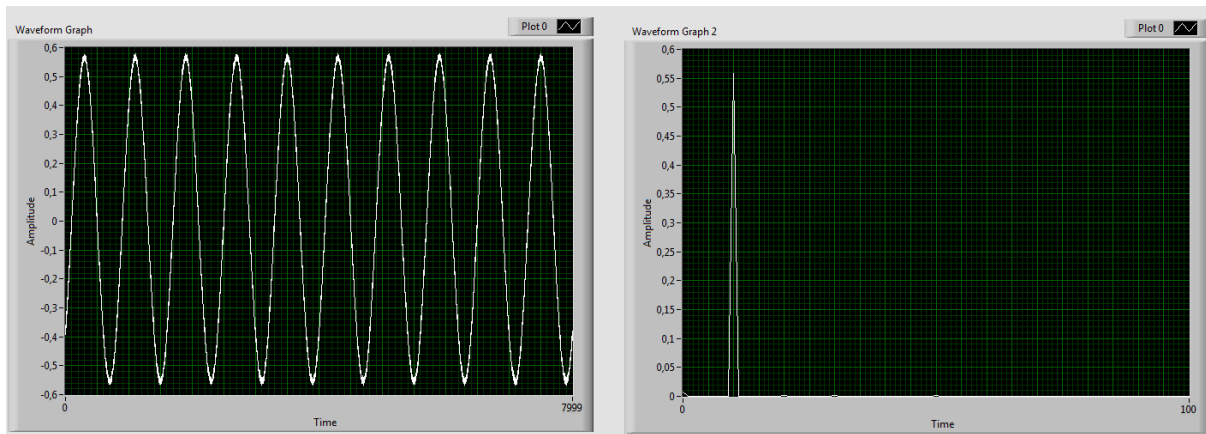
Obrázek 41: test ČSN 4.13, 1A, 1000 vzorků, CH2



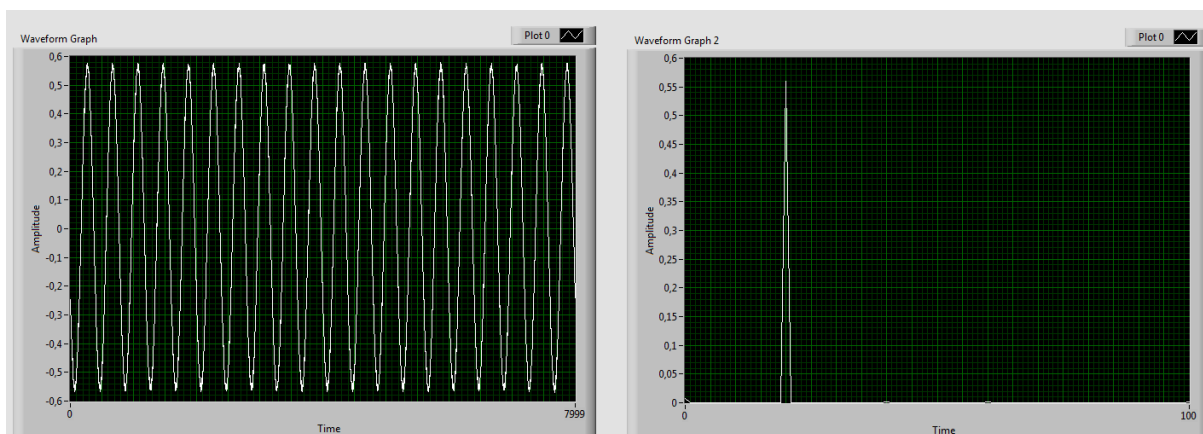
Obrázek 42: Test obdélník, 1A, 1000 vzorků, CH2



Obrázek 43: Test obdélník, 1A, filtrovaný, 1000 vzorků, CH2



Obrázek 44: Test sinus, 1A, 1000 vzorků, CH2



Obrázek 45: Test sinus, 1A, 2000 vzorků, CH2

6.3 Porovnání výstupních dat

Nakonec byli porovnány hodnoty ze zdroje ZIMMER a odečtené hodnoty z LabVIEW.

CH1 obdelník			
Harm	Source [A]	Labview [V]	Převod [A/V]
1	0,90	0,37	2,42
3	0,30	0,12	2,39
5	0,17	0,07	2,40
7	0,12	0,05	2,39
9	0,09	0,04	2,36

Tabulka 4: Obdélíkový průběh CH1

CH2 obdelník			
Harm	Source [A]	Labview [V]	Převod [A/V]
1	0,90	0,37	2,42
3	0,30	0,12	2,39
5	0,18	0,07	2,40
7	0,12	0,05	2,40
9	0,09	0,04	2,37

Tabulka 5: Obdélíkový průběh CH2

CH2 CSN 4.13			
Harm	Source [A]	Labview [V]	Převod [A/V]
1	1,00	0,41	2,43

Tabulka 6: ČSN 4.13 průběh CH2

CH2 SIN			
Harm	Source [A]	Labview [V]	Převod [A/V]
1	1,00	0,41	2,43

Tabulka 7: Sinusový průběh CH2

7 Závěr

Výstupem této práce je prototyp a seznam nedostatků které je třeba odstranit.

7.1 Napájecí zdroj

Během měření zdroji kolísalo napětí a vlivem odběru čidel, to se negativně projevvalo na ostatních čidlech, a proto bylo nutné měřit čidla postupně. Řešení toho problému je zvolení kvalitnější zdroj s vyšším výstupní napětím, než je požadováno a na měřící desky umístit stabilizátory napětí. Tento způsob bude mít větší tepelné ztráty, které vzniknou při maření výkonu na stabilizátoru napětí, ale měl by tento problém odstranit.

7.2 Ladící potenciometry

Dalším problémem, který vzniknul byli potenciometry na ladění offsetu a zesílení. Tento problém spočíval vtom, že 500 Ω měl příliš hrubý krok. Řešení toho problému je zapojení do série 47 Ω potenciometr pro jemné ladění.

7.3 Konstrukční nedostatky

Nakonec několik konstrukční nedostatků, které způsobovali jen drobné problémy.

- Umístění napěťového LEM čidla na vrchní stranu desky
- Více přístupné místo zkratovací propojky na přepínání filtrování u desce pro měření napětí.

8 Bibliografie

1. **Brejcha, Michal.** *Řízení impulsních systému pro kompenzaci neaktivní energie sítě.* Praha : FEL ČVUT, FEL ČVUT, 2014.
2. **Koupeny, Jaroslav.** *Řídicí algoritmy aktivních filtrů.* Praha : FEL ČVUT, 2008.
3. **odbornecasopisy.cz.** [Online]
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyssi-harmonicke-a-jejich-pusobeni-na-sit--11949>.
4. **M, Tesařová.** *Průmyslová elektroenergetika.* Plzeň : ZČU, 2000.
5. **Chapman, David.** *Harmonické příčiny a účinky.* Velká Británie : Copper Development Association.
6. **Štindl, Bc. Daniel.** *Měření proudu Hallovými senzory.* Brno : VUT, 2016.
7. **automatizace.hw.cz.** [Online] <http://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip>.
8. **Ševčík, Jan.** *Měřicí modul pro pracoviště aktivního harmonického filtru.* Praha : FEL ČVUT, 2015.