



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrotechnologie

Realizace zkušebního přípravku harmonického filtru

Design of test circuit of active harmonic filter

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management – Technologické systémy  
Název předmětu: BDIP25  
Vedoucí práce: Ing. Brejcha Michal, Ph.D.

**Zpracoval: Bc. Pozníček Lukáš**

---

**Praha 2018**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pozníček** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **420319**  
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 zkušebního přípravku harmonického filtru**

Název diplomové práce anglicky:

**Design of test circuit of active harmonic filter**

Pokyny pro vypracování:

- Seznamte se s vývojovým kitem Raspberry pi, jeho základními funkcemi a s programovacím jazykem Python.
- Propojte Raspberry s přípravkem měření síťových veličin na pracovišti AHF. Zobraďte průběhy napětí, proudu, okamžitého výkonu a hodnoty činného, neaktivního a zdánlivého výkonu.
- Seznamte se s vlivem harmonických složek proudu na kvalitu elektrické energie - účinník.
- Navrhnete a realizujete přípravek výkonové části aktivního harmonického filtru pro hladinu bezpečného malého napětí.
- Ověřte funkci přípravku pomocí ovládací aplikace v Raspberry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] AKAGI, Hirofumi., Edson Hirokazu WATANABE a Mauricio AREDES. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience/ John Wiley, c2007. ISBN 978-0-470-10761-4.
- [2] T. S. Rathnayake, K. T. Rukshan, R. A. T. J. K. Rupasinghe, R. M. M. Ruwanthika and J. P. Karunadasa, 'Design and simulation of single phase active current harmonic filter,' 2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014], Nagercoil, 2014, pp. 978-983.
- [3] SUMMERFIELD, Mark. Python 3: výukový kurz. Brno: Computer Press, 2010. ISBN 978-80-251-2737-7.

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: **26.01.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Michal Brejcha, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
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



Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Lysé nad Labem dne 25. 5. 2018

.....  
Bc. Lukáš Pozníček



Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalu Brejchovi, Ph.D. za vedení, cenné rady a připomínky, především pak za podporu, trpělivost a vstřícný přístup během celého mého studia. Díky patří také mé rodině, kolegům z katedry elektrotechnologií, přátelům, především pak panu Ing. Martinu Hunčovskému a jeho programátorským znalostem. V neposlední řadě chci také poděkovat slečně Mgr. Petře Plevové za připomínky k formálnímu a jazykovému zpracování této práce.

## Abstrakt

Práce je rozdělena do tří částí. První z nich popisuje vliv harmonických složek proudu na kvalitu elektrické energie, matematický popis a analýzu vyšších harmonických a o použitém hardwaru. Druhá kapitola předkládá informace o použitém programovacím jazyce Python a jeho využití při realizaci zkušebního přípravku. Třetí kapitola pojednává o výrobě samotného zkušebního přípravku, jeho propojení s řídicí jednotkou a analýze napájecí sítě, do které byl připojen.

## Klíčová slova

harmonické, aktivní filtr, Python, Raspberry Pi, analýza signálu

## Abstract

This master thesis is divided into three parts. The first one describes the effect of harmonic components on the electric energy quality, mathematical description and analysis of high-harmonics and the used hardware. The second parts presents the programming language Python and its usage during the implementation of the draft gadget. The last part of this thesis deals with the production of the draft gadget, its connection to the managing unit of measure as well as with an analysis of the power network into which the gadget was connected.

## Key words

harmonics, active filter, Python, Raspbery Pi, signal analysis



Obsah	
ÚVOD .....	10
1. Teoretická část.....	13
1.1. Vliv harmonických složek proudu na kvalitu elektrické energie.....	13
1.1.1. Původ vyšších harmonických .....	14
1.1.2. Harmonické a jejich šíření v síti .....	18
1.1.3. Problémy způsobené harmonickými .....	18
1.1.4. Omezování vyšších harmonických .....	21
1.2. Matematické vzorce pro vyšší harmonické.....	22
1.2.1. Základní vlastnosti Fourierovy řady.....	22
1.2.2. Fourierova transformace .....	23
1.2.3. Vzorkovací kmitočet.....	25
1.2.4. Výkony neharmonických průběhů .....	25
1.3. Raspberry Pi .....	27
1.3.1. Základní parametry .....	28
1.3.2. Operační systém Raspbian.....	29
2. SW část .....	30
2.1. Python .....	30
2.1.1. Knihovny .....	30
2.1.2. Programy.....	31
2.2. Řídící aplikace .....	35
3. HW část.....	37
3.1. Zkušební přípravek.....	37
3.1.1. Silový obvod .....	37
3.1.2. Propojení Rapsberry s přípravkem měření síťových veličin .....	42
3.2. Zobrazení průběhů napětí, proudu a hodnoty činného a zdánlivého výkonu. 45	
3.2.1. Nelineární zátěž s dvoucestným usměrňovačem .....	45
3.2.2. Lineární zátěž .....	47
3.2.3. Nelineární zátěž s jednocestným usměrňovačem .....	48
3.3. Aktivní filtrace .....	50
Závěr .....	52
Zdroje a použitá literatura .....	54
Seznamy obrázků .....	55
Seznam příloh .....	55

## ÚVOD

Roční potenciální úspora elektrické energie je u elektrických pohonů obrovská. Z toho důvodu jsou elektrické pohony a všeobecně veškerá elektrická zařízení tématem diskuse o hospodárnosti jejich využití. Díky rozšířenému používání frekvenčních měničů se hospodárnost využití elektrické energie regulovaných pohonů stále zlepšuje, přesto se zde vyskytuje jeden nedostatek. Napájecí síť je stále čím dál tím více zatěžována nelineárními spotřebiči, ke kterým patří vedle spínaných zdrojů nebo energeticky úsporných žárovek právě i měniče frekvence.

V ideálním případě by mělo mít síťové napětí průběh čistě sinusový s konstantní amplitudou a frekvencí. Každý elektrický spotřebič by pak ze sítě měl odebírat sinusový proud s minimálním fázovým posunem. Nelineární spotřebiče však ze sítě odebírají nesinusový zátěžný proud, z čehož plynou odchylky od ideální sinusového průběhu.

Tyto deformace sinusových průběhů mají jako následek zpětné působení na napájecí síť a v technické praxi se jim říká vyšší harmonické. Vyšší harmonické se berou v potaz při posuzování kvality napájecí sítě a při dimenzování některých elektrických zařízení, které mohou být vyššími harmonickými ovlivňovány. Příliš velký obsah vyšších harmonických může vést také například ke špatné funkci některých měřících a regulačních zařízení, což může vést k velkým ekonomickým nebo materiálním škodám. Jednou z možností kompenzace či snížení úrovně harmonických proudů je připojení paralelního aktivního filtru (měniče), který do sítě vnucuje sledované harmonické proudy v opačné fázi.

Realizace zařízení softwarově ovládaného výkonového měniče, jakým jsou například i aktivní harmonické filtry, vyžaduje ze strany návrháře relativně široké znalosti. Návrhář musí být dobře seznámen s problematikou návrhu hardware měničů, s programováním jejich softwarového vybavení a v případě aktivních filtrů také s principy řízení a způsoby potlačování harmonických frekvencí. Každá metoda řízení se totiž může lišit nejen svým programovým vybavením nebo způsobem připojení měniče do sítě, ale také v hardwarové konstrukci měniče.

Teoretické znalosti obnášejí mimo jiné také znalost, jak zpracovat signál za pomoci Fourierovy transformace. Fourierova transformace a všeobecně zpracování

signálu je relativně složitá problematika. Z tohoto důvodu budou zmíněny pouze potřebné základy nutné pro vytvoření funkčního zkušebního přípravku.

Obsáhnout vše uvedené v rámci jednoho semestru diplomové práce je relativně složitý úkol. Složitost úkolů znesnadňuje práci jak zadavateli diplomové práce, tak jejímu zpracovateli. Pokud se studenti zabývali návrhem hardware, již nezbyl čas na jeho testování řídicím algoritmem, pokud se naopak zabývali simulací řídicích algoritmů, tak obvykle po jejich pochopení nezbývalo mnoho času na jejich bezpečnou implementaci do již navržených zařízení. Přímé zkoušky měniče jsou o to horší, že je nutné pracovat na hladině napětí vyšší než 230 V. Proto ze strany vedoucího diplomové práce vznikl tlak na tvorbu jednoduchého přípravku paralelního aktivního filtru, který by splňoval následující vlastnosti:

- Bezpečné pracovní napětí do 50 V,
- malé rozměry,
- snadná přenositelnost,
- možnost tvorby řídicích algoritmů v různých programovacích jazycích,
- snadná vizualizace řídicího procesu a jeho stavových veličin,
- relativně snadná úprava nebo náhrada hardwaru.

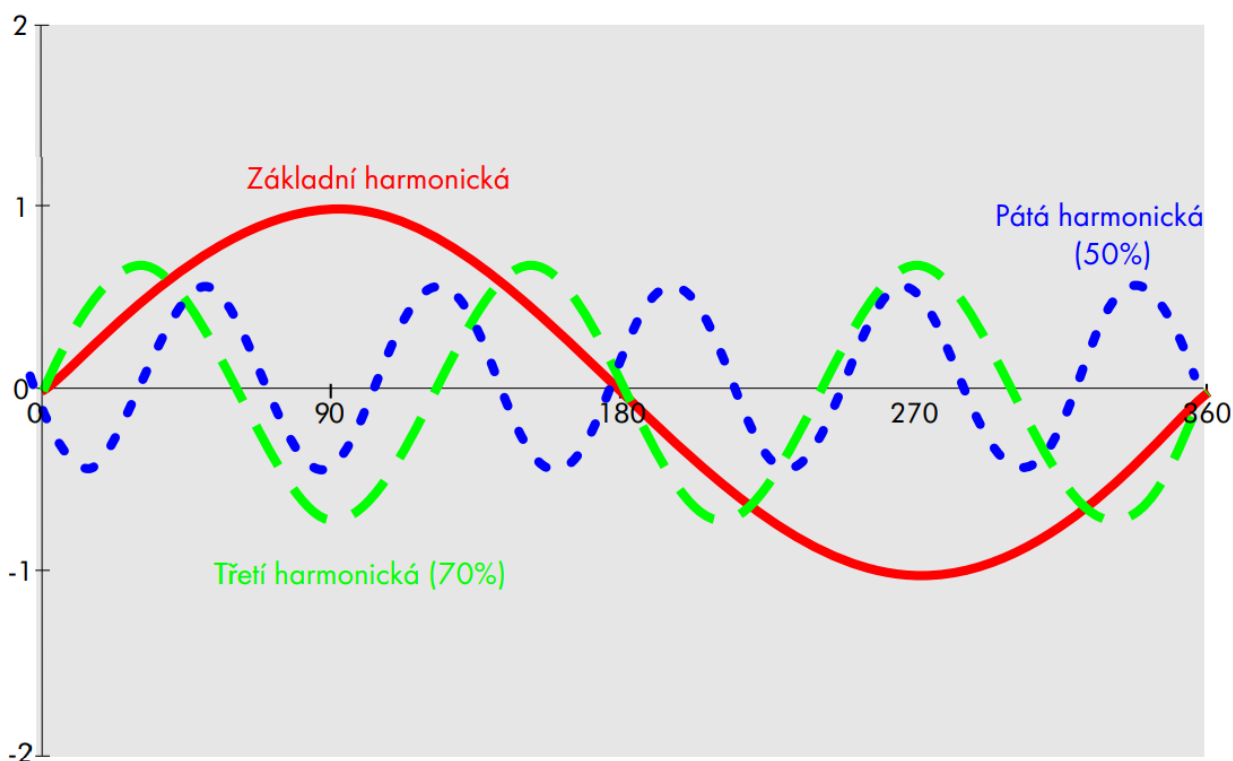
První tři body omezily návrh pouze na jednofázovou verzi aktivního harmonického filtru. Trojfázová varianta by znesnadnila přenositelnost a práci s přípravkem. Ne všude je možné připojení na trojfázový rozvod a je zde také vyšší a tím nebezpečnější hladina napětí. Další body vedly k použití pokud možno klasického osobního počítače nebo notebooku. Takové řešení však omezuje připojení externího hardwaru jen přes dostupná rozhraní, jako jsou USB, ethernet, sériová linka apod. To je vhodné pro vizualizaci procesu, ale méně vhodné pro jeho řízení. Jako velmi vhodná varianta se nakonec jevil použití Raspberry Pi, které sice jen v omezené míře nabízí přímé řízení externí aplikace pomocí PWM a nemá k dispozici ani piny pro analogově digitální převod, nicméně nabízí skvělou propojitelnost. Kromě klasických výše uvedených portů podporuje komunikaci přes sériové sběrnice SPI a I2C a možnost přímé kontroly několika logických pinů. Použití operačního systému Raspbian (linux) s sebou přináší výhody použití obvyklých programů a díky programu VNC i možnost vzdáleného přístupu přes síť.

Cílem této diplomové práce je tedy získat podvědomí o tom, jak vyšší harmonické vznikají, jaký mají vliv na napájecí síť a jak je možné je eliminovat. Především však vytvořit funkční zařízení, které bude tyto vyšší harmonické filtrovat. K tomu je zapotřebí mimo teoretických znalostí také umět v některém programovacím jazyce vytvořit příslušnou ovládací aplikaci a být schopen vyrobit samotné zařízení sloužící k filtraci.

## 1. Teoretická část

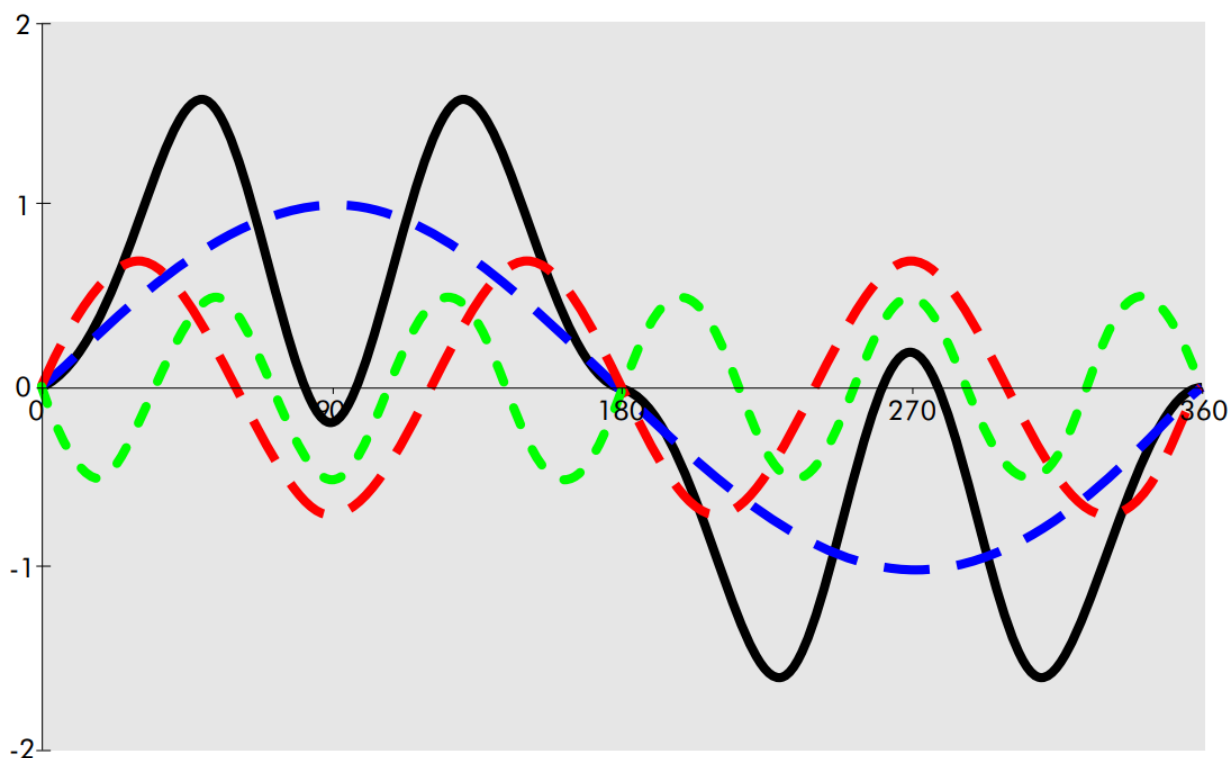
### 1.1. Vliv harmonických složek proudu na kvalitu elektrické energie

V rozvodných sítích se v dnešní době již nevyskytuje čistě sinusový průběh napětí a proudů se síťovou frekvencí 50 Hz, ale vlivem připojení zařízení s nelineární zátěží také složky vyšších harmonických. Harmonické frekvence jsou celé násobky základní nosné harmonické napájecího napětí, tzn. při základní harmonické 50 Hz je třetí harmonická 150 Hz a pátá harmonická je 250 Hz.



Obrázek 1 – Vyšší harmonické [4]

Na obrázku 1 je znázorněn časový průběh základní nosné harmonické, třetí harmonické se 70% amplitudou a páté harmonické s 50% amplitudou. Sumací těchto harmonických získáváme výsledný (původní) zdeformovaný průběh, který demonstruje vliv vyšších harmonických a je vidět na obrázku 2. V reálných podmínkách může být průběh zdeformován mnohem více a zpravidla se skládá z většího množství harmonických složek.



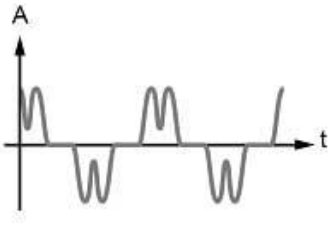
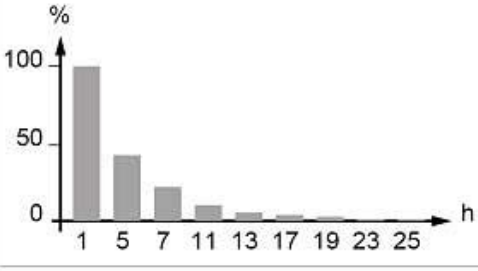
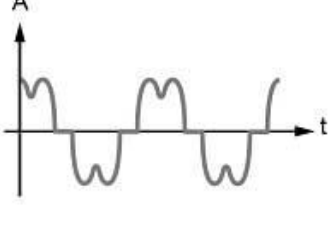
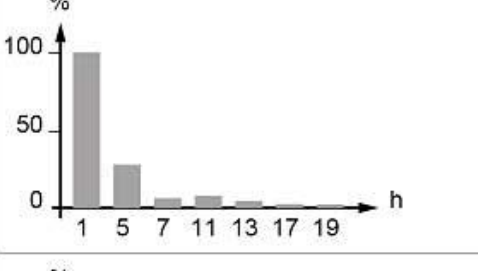
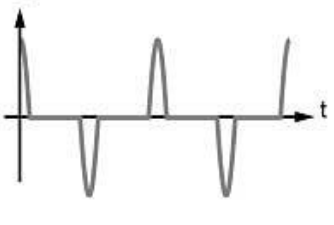
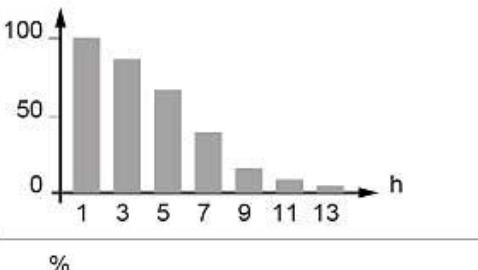
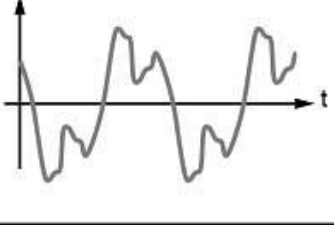
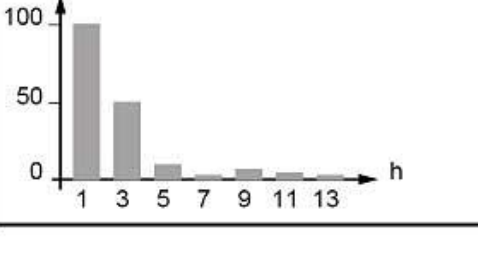
Obrázek 2 – Skládání vyšších harmonických [4]

Výsledný časový průběh není pouze sinusový, což například znamená, že běžné měřicí zařízení, které měří efektivní hodnotu přepočtem ze střední hodnoty půlperiody pro sinusový průběh, nebude měřit správně. Deformovaný průběh na obrázku 2 obsahuje šest průchodů nulou za periodu. Každé zařízení, které využívá průchod proudu nulou jako referenční, nebude fungovat správně. Skutečnost, že takovýto průběh obsahuje i jiné harmonické než pouze základní, musí být brána v úvahu. Pokud se mluví o harmonických v elektroinstalacích, je nejdůležitější proud, protože způsobuje následný vznik harmonických napětí a je zdrojem většiny negativních vlivů na síť. Bez znalosti spektra harmonických proudů nelze provést žádné korektní závěry a vyhodnocení.

### 1.1.1. Původ vyšších harmonických

Zdroji vyšších harmonických v síti jsou především zátěže, které nemají odběr proudu úměrný přiloženému napětí, tj. zátěže nelineární. Za zdroje vyšších harmonických lze také považovat nelineární spínací prvky v síti (například tyristory při fázovém řízení), které svým působením a vzájemnou vazbou mohou generovat vlastní kmity nebo zesilovat vliv primárních zdrojů neharmonických proudů a napětí.

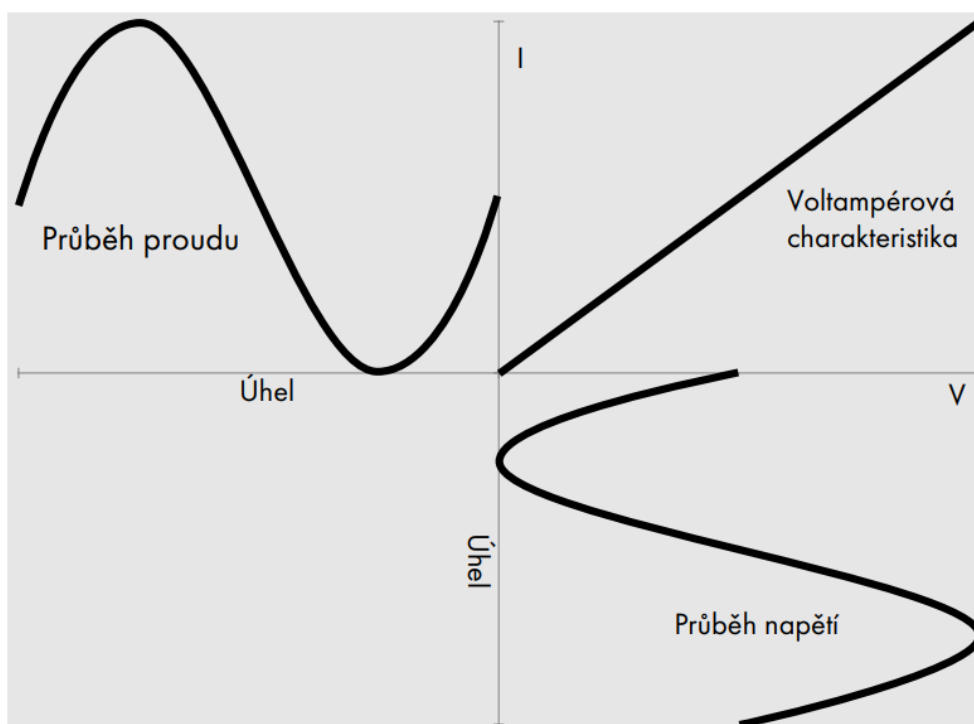
Mezi nejčastější spotřebiče, které odebírají neharmonické proudy patří především spotřebiče se silovými obvody, jakou jsou například motory, spínané zdroje a elektronické předřadníky světelných zdrojů. Dále jsou to spotřebiče pracující s elektrickým obloukem, například obloukové pece a svářečky. V poslední řadě jsou také způsobeny neharmonickými úbytky napětí na impedancích sítě v důsledku procházejícího neharmonického proudu. Na obrázku 3 jsou příklady průběhů proudů a spektra vyšších harmonických v závislosti na zátěži. Deformace odebíraných proudů jsou dané nelinearitou obvodů daných zátěží.

Nelineární zátěž	Průběh proudu	Spektrum	THDI <sub>ČSt</sub>
Pohony s frekvenčními měniči			44%
3f usměrňovače			28%
Elektronické napájecí zdroje			115%
Světelné zdroje			53%

Obrázek 3- Výskyt vyšších harmonických [6]

Z obrázku 3 je patrné, že u daných typů zátěže se vyskytují pouze liché harmonické vyšších řádů. Je to z toho důvodu, že sudé harmonické se v síti téměř nevyskytují. Sudá harmonická se objeví pouze pokud má kladná půlvlna jiný průběh než půlvlna záporná.

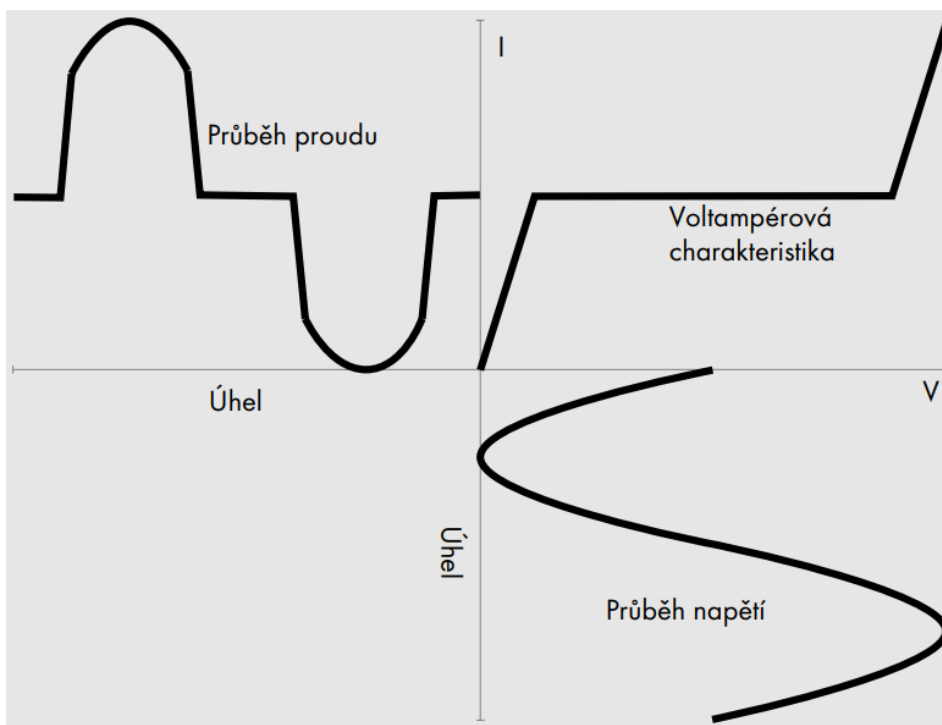
V obvodu, který obsahuje pouze lineární zátěž, je průběh proudu úměrný napájecímu napětí. Pokud je tedy napájecí napětí sinusového průběhu, má sinusový průběh i proud. Voltampérová charakteristika zátěže vyjadřuje závislost napětí na proudu a v tomto případě bude lineární.



Obrázek 4 – VA charakteristika lineární zátěže [4]

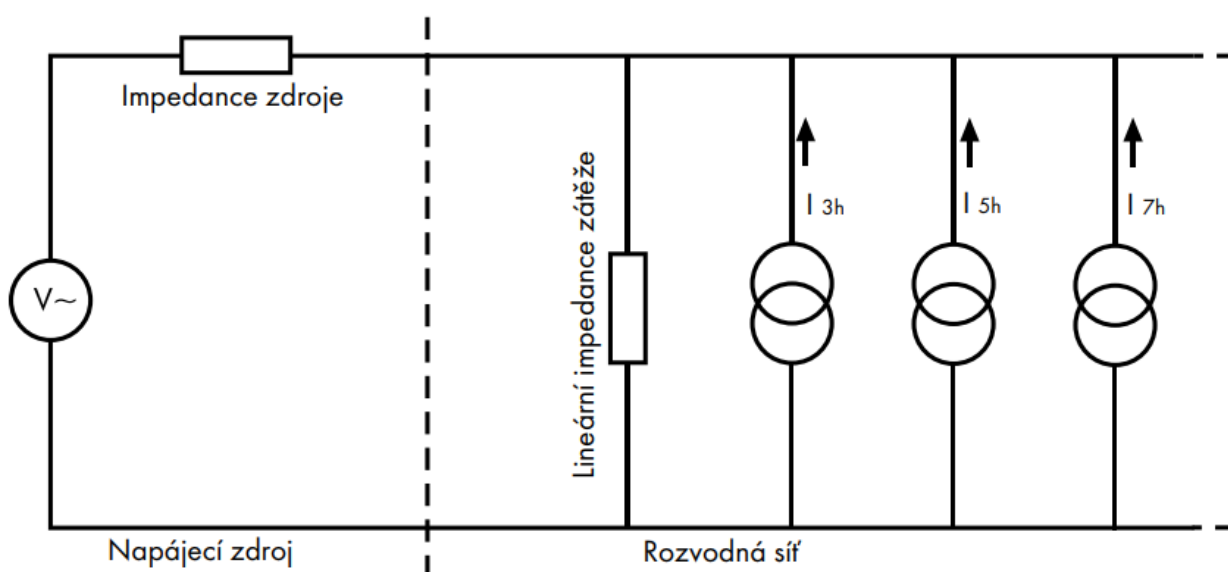
V případě nelineární zátěže, kterou je spínaný zdroj (dvoucestný usměrňovač s kondenzátorem), již průběh odebíraného proudu sinusový nebude. Proud je odebírán pouze tehdy, když napájecí napětí zdroje překročí napětí na kondenzátoru. V tomto případě již nebude voltampérová charakteristika lineární.





Obrázek 5 – VA charakteristika nelineární zátěže [4]

Za určitých zjednodušení lze nelineární zátěž reprezentovat náhradním obvodem, kdy se zátěž nahradí lineární zátěží představující odebíraný proud o základní harmonické frekvenci s paralelně zařazenými proudovými zdroji, z nichž každý generuje harmonický proud o násobku základní harmonické. Jak již bylo řečeno, sudé harmonické se vyskytují pouze zřídka, dříve se ale vyskytovaly běžně díky častému používání jednocestného usměrňovače.



Obrázek 6 – Náhradní obvod nelineární zátěže [4]

### 1.1.2. Harmonické a jejich šíření v síti

Vygenerované harmonické proudy se šíří od svého zdroje, kterým je v tomto případě nelineární zátěž, směrem do sítě. Rozložení těchto proudů do jednotlivých větví sítě se řídí Ohmovým zákonem a pro každou frekvenci může být výpočet proveden pomocí principu superpozice a Theveninova teorému. Jednotlivé harmonické proudy lze spočítat jako komplexní veličiny a vektorovým součtem proudů všech spotřebičů ve fázi potom určit celkové zatížení napájecího systému.

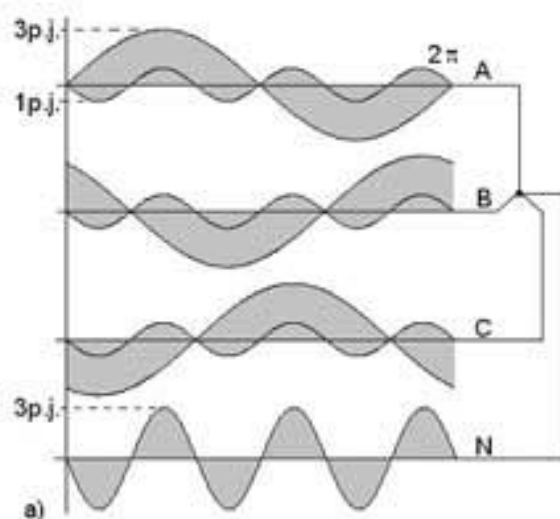
Šíření a velikost jednotlivých harmonických se mění také v závislosti na tom, zda bude síť obsahovat kmitavé obvody a na tom, jak se budou frekvence vyšších harmonických přibližovat k rezonanční frekvenci těchto obvodů. Další případy, které mají vliv na šíření vyšších harmonických v síti, jsou zmíněny v následujících kapitolách.

### 1.1.3. Problémy způsobené harmonickými

Problémy způsobené harmonickými mohou být dvou typů, jedny jsou způsobené harmonickými proudy a druhé harmonickými napětími. V případě problémů způsobených harmonickými proudy je to:

- **přetížení středního vodiče**

V trojfázové síti jsou fázová napětí vzájemně posunuta o  $120^\circ$  a v případě, že jsou všechny fáze zatíženy stejně, středním vodičem neprotéká žádný proud. V případě, kdy zatížení jednotlivých fází není stejné, protéká středním vodičem proud, který je dán vektorovým součtem fázových proudů. V případě proudů o násobcích 3. harmonické jsou však vlivem vyšší frekvence ve všech fázích shodné fázové posuny. Proudů ve středním vodiči tak nejsou nulové, jsou dány součtem daných složek v jednotlivých fázích. Tím dochází k jeho vyššímu zahřívání, než je původně dimenzováno, a jeho zatížitelnost tak musí být snížena zhruba na 60 %. [4]



Obrázek 7 – Sčítání proudů ve středním vodiči pro 3. harmonickou [6]

- **tepelné namáhání transformátoru**

Harmonické ovlivňují transformátory dvěma způsoby. Jedním z nich jsou ztráty vířivými proudy, které rostou s kvadrátem řádu harmonické. Výsledkem je vyšší provozní teplota a tím pádem i zkracování jejich životnosti. Druhým ze způsobů je vliv násobků harmonické 3. řádu, a to v případě, že primární vinutí je zapojené trojúhelníka a sekundární do uzemněné hvězdy (běžný případ transformátorů v distribučních sítích). Harmonické jsou ve fázi, uzavírají se pouze v primárním vinutí a nešíří se dále do sítě. Z tohoto důvodu je třeba je brát v potaz při dimenzování jmenovitého zatížení transformátoru.

- **rušení při spínání vypínačů**

Proudový chránič fungující na sčítání proudů ve fázovém a středním vodiči může být rušen právě harmonickými. Spínač, jakožto elektromechanický prvek, nemusí umět harmonické složky proudu sčítat korektně a tím pádem bude vybavovat chybně. Dále pak některá zařízení generující harmonické, generují i spínací poruchy, které by měly být filtrovány v napájecím obvodu zařízení. K tomu určené filtry mají mezi fází a zemí zapojené speciální bezpečnostní kondenzátory (při jejich poruše nedochází k vodivému spojení fáze s kostrou). Jejich hodnota je vždy omezena maximálním přípustným svodovým proudem. (podle norem by měl být menší než 350 mA). Svodový proud kondenzátoru roste s frekvencí, proto se dá říci, že hodnota kapacit bezpečnostních kondenzátorů je omezena také přítomností harmonických složek.

- **přetěžování kompenzačních kondenzátorů**

Kompenzační kondenzátory jsou využívány ke zlepšení účinníku vlivem kompenzace fázového posunutí způsobeného indukční zátěží. Impedance kondenzátoru s frekvencí klesá, zatímco impedance sítě roste. Z toho důvodu je kondenzátor harmonickými zatěžován více a pokud na to není dimenzován, může dojít k jeho poškození. Problém taky může způsobovat rezonance kapacity kondenzátoru a indukčnosti sítě. V tom případě se mohou vyskytnout velké hodnoty napětí nebo proudů, které opět mohou vést k poškození. Rezonanci se lze vyhnout zařazením tlumivky do série s kompenzačním kondenzátorem (hrazená kompenzace) tak, aby celková impedance byla nejmenší pro nejvýraznější harmonickou. To způsobí omezení harmonického proud protékajícího kompenzačním kondenzátorem.

- **skinefekt**

Při napájecí frekvence sítě 50 Hz se skinefekt projevuje velmi málo. Pro vyšší harmonické nad 350 Hz (7. harmonická) se stává skinefekt výrazným, protože způsobuje přídavné ztráty oteplením. Stejně jako v případě transformátorů je výsledkem vyšší provozní teplota a tím pádem i zkracování životnosti vedení.

V případě problémů způsobených harmonickými napětími se jedná o:

- **harmonické zkreslení napětí**

Harmonický proud odebíraný nelineární zátěží má vliv na napěťové zkreslení na impedanci napájecí sítě. Toto napájecí napětí sítě má pak vliv na deformaci úbytků napětí na impedanci kabelů. Vlivem toho se takto zkreslené napájecí napětí objeví i na svorkách připojených lineárních zátěží a dojde k průtoku neharmonického proudu. Řešením tohoto problému je pak oddělení obvodů zátěží generující harmonické proudy od obvodů zátěží, které mohou být těmito harmonickými proudy rušeny. Napěťové zkreslení vlivem nelineární zátěže pak neovlivní napájení lineární zátěže.

- **indukční motory**

V případě indukčních motorů způsobuje zkreslení napájecího napětí nárůst ztrát vířivými proudy podobně jako u transformátorů. Tyto přídavné ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru. Každé takto vzniklé pole se snaží otáčet motorem rozdílnou rychlostí buďto dopředu nebo dozadu. Proudů indukovaných do

rotoru pak dále zvyšují ztráty. Motory, u kterých hrozí výskyt harmonických, na to musí být příslušně dimenzovány a musí počítat s vyššími ztrátami.

- **poruchy při průchodu nulou**

Regulátory a různé měřicí přístroje reagují právě na průchod napětí nebo proudu nulou. V případě vypínání indukivní zátěže se při průchodu proudu nulou regenerují přechodové jevy, čímž se méně namáhají polovodiče. Detekci průchodů nulou napětí lze najít například v synchronizaci síťových (například rekuperačních) střídačů. Vlivem harmonických může docházet k průchodu napětí nulou i několikrát během půlperrody a změny napětí při průchodu napětí nulou budou rychlejší. To může výrazně ovlivnit správnou funkci takovýchto zařízení.

#### 1.1.4. Omezování vyšších harmonických

Existuje několik možností, jak potlačit harmonické složky proudu tak, aby neovlivňovaly napájecí síť. Jedná se o pasivní filtry, aktivní filtry a izolační transformátory. Každá z nich má své výhody a nevýhody a vhodné použití závisí především na důkladné analýze aktuálního případu.

- **pasivní filtry**

Pasivní filtry slouží k filtraci tak, že zajišťují cestu s nízkou impedancí pro harmonické proudy tak, že se uzavírají přes filtr a nedostanou se tak do napájecí sítě. Filtr se provádí buďto pro filtraci jedné harmonické nebo širokopásmové pro filtraci více harmonických.

Vyskytuje se také řešení, kdy se filtr zapojí do série harmonického zdroje, a to buď do fázového nebo do středního vodiče. Filtr pak blokuje harmonické proudy, aby se nemohly šířit od zdroje do napájecí sítě a na jejichž impedancích by vznikl úbytek, který by způsobil zkreslení průběhu napětí.

- **aktivní filtry**

V případě instalací, kde nelze výskyt jednotlivých složek vyšších harmonických předvídat, je nutné omezovat jejich šíření aktivními filtry. Takovýto případ může nastat v elektroinstalacích IT, kde jsou jednotlivá zařízení přemísťována a situace se z hlediska vyšších harmonických neustále mění.

Aktivní filtr se do obvodu připojuje paralelně se zátěží. Přes proudovou sondu se analyzuje výskyt vyšších harmonických v proudu zátěže. Takto získaná data se zpracují a na jejich základě se vytvoří průběh zbytkového proudu, který je potřeba přivést zpět do sítě s opačnou fází. Protože jsou harmonické proudy vytvořeny v aktivním filtru, odebírá se z napájecí sítě proud pouze první harmonické. Takovýmto způsobem je možná redukce proudů vyšších harmonických až o 90 %.

- **izolační transformátory**

Jak bylo zmíněno v kapitole o vlivech vyšších harmonických, proudy násobků 3. harmonické se uzavírají přes primární vinutí transformátoru zapojeného do trojúhelníka. Ačkoliv je tento problém nutné brát v potaz při dimenzování transformátoru, lze tohoto jevu využít právě pro filtraci harmonických, které se díky tomu nebudou dostávat zpět do sítě.

## 1.2. Matematické vzorce pro vyšší harmonické

Většina průběhů elektrických veličin je sice periodická, ale jejich průběh je neharmonický. Protože je výhodné pracovat s průběhy harmonickými, požaduje se vyjadřovat periodickou veličinu jako nekonečnou řadu složenou z konstanty a harmonických veličin o kmitočtech v násobcích základního kmitočtu. Takovýto rozklad se nazývá harmonickou analýzou a vzniklá řada se nazývá Fourierova řada.

### 1.2.1. Základní vlastnosti Fourierovy řady

Funkce  $f(t)$  je periodická, pokud pro každé  $t$  platí:

$$f(t + T) = f(t) \quad (1.1)$$

Fourierova řada periodické funkce  $f(t)$  s úhlovým kmitočtem  $\omega$  má poté tvar:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{+\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)] \quad (1.2)$$

Pro výpočet koeficientů Fourierovy řady potom platí následující vztahy:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1.3)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt \quad (1.4)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt, \quad h = 1, 2, \dots \quad (1.5)$$

V praxi se však častěji používá tzv. spektrální tvar Fourierovy řady ve tvaru:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} D_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (1.6)$$

$$D_h = \sqrt{(a_h^2 + b_h^2)} \quad \text{a} \quad \varphi_h = \arctan \frac{b_h}{a_h} \quad (1.7)$$

Posloupnost amplitud  $D_h$  jednotlivých složek dané periodické funkce  $f(t)$  se nazývá amplitudové spektrum. Posloupnost počátečních fází  $\varphi_h$  se nazývá fázové spektrum periodické funkce  $f(t)$ . [8]

### 1.2.2. Fourierova transformace

Fourierovu řadu v komplexním tvaru popisuje následující rovnice:

$$f(t) = \sum_{h=-\infty}^{+\infty} c_h e^{jh\omega t} \quad (2.1)$$

kde

$$c_h(jh\omega t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jh\omega t} dt \quad (2.2)$$

Frekvenční spektrum časového průběhu lze získat spektrální analýzou, kterou lze provést přímou Fourierovou transformací podle následujícího vzorce:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.3)$$

Zpětná Fourierova transformace je pak definována jako:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(f) e^{j2\pi f t} df \quad (2.4)$$

V případě potřeby analyzovat frekvenční spektrum u průběhu, který byl získán vzorkováním měřeného signálu s konstantní vzorkovací periodou  $T_v$ , je třeba použít algoritmy pro diskretní Fourierovu transformaci (DFT). Jedná se o transformaci posloupnosti diskretních hodnot do frekvenční oblasti.

Algoritmus pro přímou diskretní Fourierovu transformaci je definován podle následující rovnice:

$$F(f_h) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) e^{-jn\frac{2\pi}{N}h} = DFT\{f(t_n)\}, \quad (2.5)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

Pro transformaci z frekvenční oblasti do časové je pak potřeba použít zpětné diskretní Fourierovy transformace ( $DFT^{-1}$ ) podle následující rovnice:

$$f(t_n) = \sum_{h=0}^{N-1} F(f_h) e^{jn\frac{2\pi}{N}h} = DFT^{-1}\{F(f_h)\}, \quad (2.6)$$

$$h = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

Zavede-li se  $W = \frac{e^{-j2\pi}}{N}$ , lze pak předchozí rovnice 2.5 a 2.6 upravit do tvarů:

$$F(f_h) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) W^{hn} \quad (2.7)$$

$$f(t_n) = \sum_{h=0}^{N-1} F(f_h) W^{-hn} \quad (2.8)$$

Při výpočtu DFT je potřebný počet násobení roven kvadrátu vzorků, tedy  $N^2$ . Pro velký počet vzorků  $N$  je pak doba výpočtu i pro výkonné počítače neúměrně dlouhá. Z toho důvodu se používá algoritmus tzv. rychlá Fourierova transformace (FFT). Tento algoritmus byl poprvé popsán v roce 1965 autory J. W. Cooley a J. W. Tukey (stejný algoritmus byl znám Carlu Friedrichu Gaussovi již v roce 1805). Jeho podstata spočívá v tom, že existuje podobnost mnoha prvků matic  $W^{hn}$ . Pro výpočet je pak zapotřebí pouze  $(N/2) \cdot \log_2 N$  násobení. Například pro  $N = 2048 = 2^{11}$  vzorků se potom zkrátí výpočet zhruba 372krát. [8]



### 1.2.3. Vzorkovací kmitočet

U číslicového zpracování signálů hraje významnou roli správná volba vzorkovací frekvence signálu, který je následně frekvenčně analyzován. Protože  $h$ -tá spektrální čára odpovídá kmitočtu  $f = h/T_0$ , lze pak psát:

$$T_0 = T_v \cdot N = \frac{N}{f_v} \rightarrow f_h = \frac{h}{T_v \cdot N} \quad (3.1)$$

Dosazením  $h$  na místo  $N$  pak plyne, že  $N$ -té spektrální čáře odpovídá kmitočet  $f_v$ :

$$f_N = \frac{N}{N \cdot T_v} = \frac{1}{T_v} = f_v \quad (3.2)$$

Z hlediska volby kmitočtu je pak potřeba, aby byla dodržena podmínka  $f_v > 2 \cdot f_m$ . V případě nedodržení této podmínky bude docházet k jevu známému jako aliasing efekt, kdy dochází k překrytí frekvenčních spekter vzorkovaného signálu a ke ztrátě informace. [8]

### 1.2.4. Výkony neharmonických průběhů

V rozvodném systému je v místě připojení spotřebiče napětí a proud, které lze vyjádřit pomocí vzorce:

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} u_k(t) \quad (4.1)$$

kde

$$u_k(t) = \sqrt{2}U_k \sin(k\omega t + \varphi_{uk}) \quad \text{a} \quad u_0(t) = U_0 \quad (4.2)$$

$$i(t) = \sum_{l=0}^{\infty} i_l(t) \quad (4.3)$$

kde

$$i_l(t) = \sqrt{2}I_l \sin(l\omega t + \varphi_{il}) \quad \text{a} \quad i_0(t) = I_0 \quad (4.4)$$

Základní definice výkonu vychází z rovnice pro okamžitý výkon:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (4.5)$$

Dosažením lze získat:

$$p(t) = \sum_{k=0}^{\infty} u_k(t) \cdot \sum_{l=0}^{\infty} i_l(t) \quad (4.6)$$

Činný výkon je definován jako střední hodnota okamžitého výkonu:

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots = \sum_{h=0}^{\infty} P_h = P_0 \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h \quad (4.7)$$

Činný výkon neharmonického napětí a proudu je roven součtinu činných výkonů jednotlivých harmonických a stejnosměrného výkonu.

Zdánlivý výkon, který byl zaveden jako pomocná veličina, je obdobně jako u harmonického napětí a proudů definován jako součin efektivních hodnot napětí a proudů:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} \quad (4.8)$$

Jalový výkon, který udává míru nevyužité energie, která se pouze vyměňuje mezi zdrojem a zátěží, je dán následujícím vzorcem:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_k \quad (4.9)$$

Protože u neharmonických průběhů dochází k nerovnosti, zavádí se pojem deformační výkon, který je dán vzorcem:

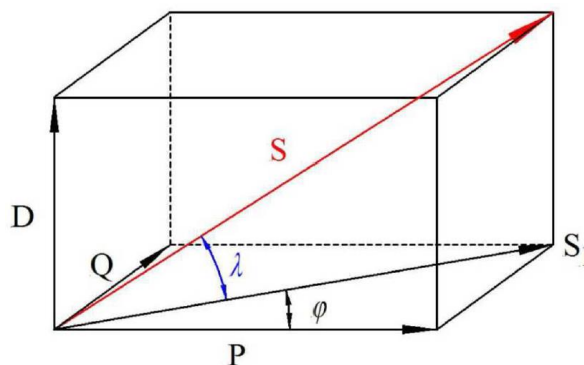
$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (4.10)$$

Stejně jako jalový výkon představuje i deformační výkon neužitečnou složku zdánlivého výkonu, která vyvolává ztráty v napájecí síti a snižuje využitelnost přenosu. V neharmonických obvodech se účinník nepočítá pomocí  $\cos \varphi$ , jako je tomu v případě harmonických obvodů, ale pouze jako podíl činného a zdánlivého výkonu.

Účinník pro neharmonické obvody je definován následujícím vzorcem:

$$\Lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (4.11)$$

Zdánlivý výkon v síti s výskytem vyšších harmonických je graficky znázorněn v diagramu na obrázku 8.



Obrázek 8 – Diagram složek výkonů [8]

### 1.3. Raspberry Pi

Raspberry Pi je one-board mikropočítač vytvořený v roce 2012 charitativní organizací Raspberry Pi Foundation, která byla založena s hlavním cílem opětovného zavedení počítačových dovedností na nízké úrovni pro mládež ve Velké Británii. Cílem bylo oživení mikropočítačové revoluce z osmdesátých let, kdy vznikla celá generace kvalifikovaných programátorů.

Jméno Raspberry Pi bylo kombinací touhy vytvořit alternativní počítač s názvem po ovoci (například jako Apple, BlackBerry atp.) a původního konceptu vytvoření jednoduchého počítače, který lze naprogramovat pomocí jazyka Python (zkrácený na Pi).

Python byl vybrán jako vhodný programovací jazyk pro začátečníky a také proto, že poskytuje bohatou sadu kódovacích nástrojů a současně umožňuje jednoduché psaní programů. To umožňuje začátečníkům postupně zavádět pojmy a metody, na nichž jsou založeny moderní programovací jazyky, aniž by od nich vyžadovaly, aby je uživatelé od začátku znali. Je velmi modulární a s velkým množstvím dalších knihoven, které lze snadno importovat a rychle rozšiřovat funkčnost.

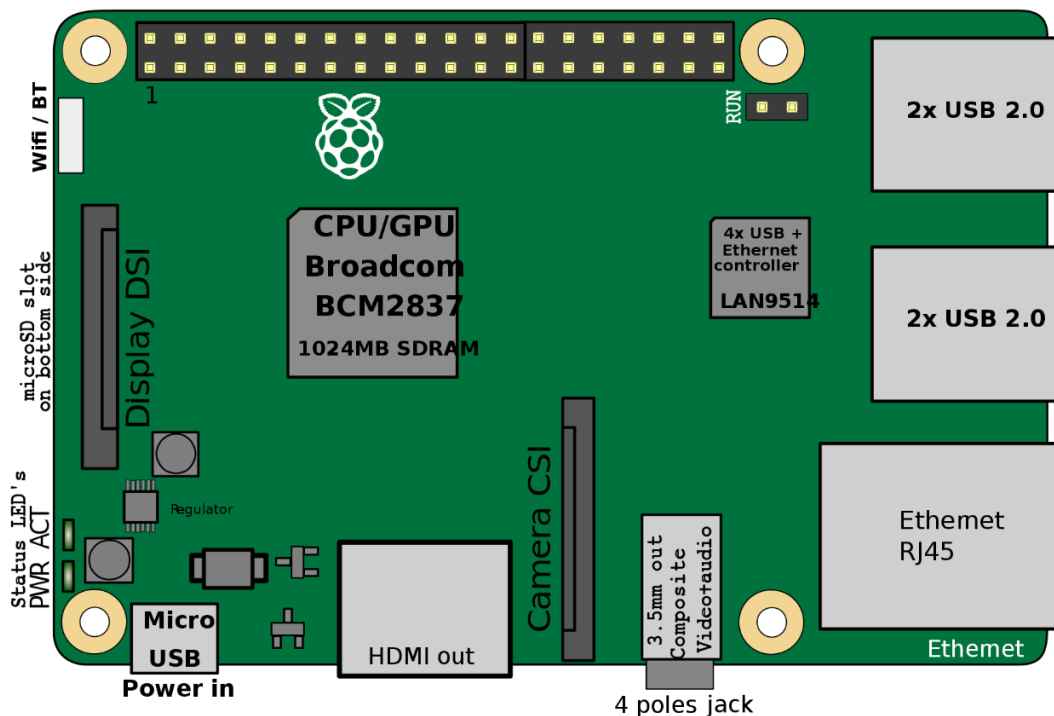
Na rozdíl od platformy Arduino je možné Raspberry Pi použít nejen k ovládání různých zařízení pomocí GPIO kontaktů, ale i k samotnému vývoji příslušných aplikací. Lze ho také použít jako multimediální přehrávač videa nebo hudby nebo i jen pro přístup k Internetu.

Jako nevýhodu lze považovat absenci A/D převodníků. Je-li při projektu tato možnost požadována, nezbyvá, než použít externí A/D převodník, který bude tuto funkci plnit.

### 1.3.1. Základní parametry

V projektu je použit mikropočítač Raspebrry Pi 3 Model B V1.2 s parametry:

- Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU
- 1 GB RAM
- integrované BCM43438 wireless LAN a Bluetooth Low Energy (BLE)
- 40 pin GPIO
- 4 USB2 porty
- 4 pólový stereo výstup a kompozitní video port
- HDMI port
- Port fotoaparátu CSI pro připojení kamery
- Displej DSI pro připojení dotykového displeje
- Micro SD port pro načítání operačního systému a ukládání dat
- MicroUSB napájecí port (2,5 A)



Obrázek 9 – Raspberry Pi 3B [12]

### 1.3.2. Operační systém Raspbian

Raspbian je operační systém odvozený z Debianu a byl vyvinutý přímo pro mikropočítače Raspberry Pi. Raspbian vytvořil Mike Thompson a Peter Green jako nezávislý projekt. Je vysoce optimalizován pro nízko-výkonové ARM procesory řady Raspberry Pi.

Raspbian používá PIXEL (Pi Improved Xwindows Environment Light) jako své hlavní desktopové prostředí. Skládá se z upraveného pracovního prostředí LXDE a správce oken Openbox. Distribuce je dodávána s programy Mathematica, prohlížečem Chromium (light verze prohlížeče Chrome) a dalšími kancelářskými a vývojářskými programy.

Operační systém se instaluje z SD karty, na které musí být manager pro instalaci operačního systému New Out Of Box Software (NOOBS). S pomocí toho manageru lze posléze operační systém Raspbian jednoduše nainstalovat.

## 2. SW část

### 2.1. Python

Python se řadí mezi jedny z nejsnáze osvojitelných jazyků, je srozumitelný a čitelný pro čtení i zápis. Jedná se o multiplatformní jazyk a v něm napsané programy lze spustit ve Windows i v unixových systémech, jako je například Linux, Mac OS apod. Program je vytvořen formou skriptu, tudíž je nutné pouze jeho zkopírování bez nutnosti jakékoliv kompilace. Jedna z nejsilnějších stran Pythonu je, že je volně dostupný s kompletní standardní knihovnou, díky čemuž lze zvládat základní věci jen pomocí několika málo řádků kódu. Kromě standardní knihovny je také k dispozici spousta knihoven třetích stran, z nichž některé poskytují oproti knihovně standardní výkonnější a sofistikovanější možnosti psaní kódu. V Pythonu lze programovat v procedurálním, v malé míře funkcionálním, ale především objektově orientovaném stylu.

#### 2.1.1. Knihovny

Cílem této kapitoly je stručné přiblížení funkcí několika knihoven, které tvoří hlavní části ve zdrojovém kódu řídicí aplikace. Ve zdrojovém kódu je samozřejmě naimportováno knihoven více, jejichž přínos již ale není natolik zásadní, aby musel být zmiňován.

##### 2.1.1.1. Matplotlib

Matplotlib je Python knihovna pro tvorbu grafů. Přesto, že je její původ v emulaci příkazů v prostředí MATLAB, je na něm nezávislá a v Pythonu je používána v plném rozsahu. Knihovna byla navržena s myšlenkou, aby s její pomocí bylo možné vytvářet jednoduché grafy již po sepsání jednoho příkazu. Při vytváření této knihovny byla snaha o dosažení následujících parametrů:

- Grafy by měly vypadat dobře. Důležitý požadavek byl na vzhled textu
- Postscriptový výstup pro zařazení s dokumenty TeX
- Zabudovatelnost do grafického uživatelského prostředí pro vývoj aplikace
- Kód by měl být tak jednoduchý, aby byl snadno pochopen, případně rozšířen
- Vytváření grafů by mělo být velmi snadné

Instalace knihovny je možná několika způsoby, výběr záleží především na typu operačního systému. V případě operačního systému Raspbian byla instalace provedena zadáním příkazu:

```
sudo apt-get install python-matplotlib
```

do příkazového řádku a následná instalace již proběhla automaticky. [7]

#### 2.1.1.2. PySerial

Tato knihovna zajišťuje jednoduché navázání sériové komunikace mezi dvěma moduly. Podporuje většinu používaných operačních systémů a implementací Python. Umožňuje různé nastavení délek datového typu. Podporuje práci s i bez časového limitu. Tato knihovna je napsána pouze v čistém Pythonu, bez podpory dalších jazyků.

Instalaci je stejně jako v předchozím případě možné provést zadáním následujícího příkazu:

```
sudo apt-get install python-pyserial
```

do příkazového řádku. [9]

#### 2.1.1.3. PyQt4 QtGui

PyQt je vyvíjen britskou firmou Riverbank Computing s veřejnou i komerční licencí. Jedná se o knihovnu, která nabízí jednu z možností, jak v programovacím jazyce Python vytvořit grafické uživatelské rozhraní (GUI). Aplikace napsané s použitím PyQt4 běží na všech operačních systémech, které jsou podporovány knihovnou Qt4. [10]

Instalace probíhá totožně jako v předchozích případech pomocí následujícího příkazu zadaného do příkazového řádku:

```
sudo apt-get install python-qt4
```

#### 2.1.2. Programy

Vytvoření následujících programů bylo zadáno za účelem osvojení si základních funkcí, které byly následně použity v řídicí aplikaci. Jedná se o Rozklad na prvočísla, ve kterém bylo cílem naučit se pracovat s poli. Dále o jednoduchý textový editor, kde bylo cílem řízení toku programu a práce s textovým souborem. V poslední řadě to byla komunikace po sériové lince.

### 2.1.2.1. Rozklad na prvočísla

Pro rozklad na prvočísla byla použita metoda faktorizace dělením. Ze všech metod je časově nejnáročnější, nicméně pro naprogramování je to velice jednoduché.

Je-li nějaké číslo  $n$ , které rozkládáme na součin prvočísel, je potřeba najít všechna prvočísla do hodnoty  $\sqrt{n}$ . Jakmile se tato prvočísla získají, dělí se jimi původní číslo. Pokud dělení vyjde beze zbytku, daný dělitel je součástí rozkladu. Pokud nevyjde, přejde se na další prvočíslu v seznamu. Jakmile se dojde na konec seznamu, je rozklad hotový. [5]

Tento postup je naprogramován pomocí výčtu prvních 25 prvočísel. Tento limit sice omezuje možnost rozkladu pro vysoká čísla, pro ten příklad je to však dostačující. Program funguje totožně s výše vysvětleným postupem pro faktorizaci dělením, je pouze doplněn o uživatelské rozhraní v podobě příkazového řádku.

```
import math
import sys
def root(y):
    y = math.sqrt(y)
    return int(y)
def factorization_by_dividing (i):
    prime_numbers = [2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47,
53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97]
    list=[]
    number = 0
    while len(prime_numbers) != number:
        if i%prime_numbers [number] == 0:
            list.append(prime_numbers [number])
            i = i/prime_numbers [number]
        else:
            number = number + 1
        if i == 1: break
    list.append(int(i))
    return list
print ("Start")
x = int(input("Enter an integer in range 0 - 100.\n"))
print("Entered number:", x)
if (x < 0):
    print("The number is less than 0.\n")
    exit()
elif (x > 100):
    print("The number is greater than 100.\n")
    exit()
else:
    print("The number is in range.")
    y = root(x)
    print ("The root of the number is: ", y)
    n = factorization_by_dividing(x)
    print ("Prime factorization result is: ", n)
input("Press the enter key to exit.")
```



### 2.1.2.2. Jednoduchý textový editor souboru

Tento program slouží ke čtení, zápisu a přepisu textového souboru. Pokud v cílovém adresáři není textový soubor s názvem text.txt, je ten to soubor vytvořen a následně je možné ho pomocí příkazů přečíst, zapsat do něj nějaký text nebo k již zapsanému textu nějaký další text připsat. Stejně jako v předchozím případě je program doplněn o uživatelské rozhraní v podobě příkazového řádku.

```
def reading():
    file = open(name, 'r')
    str = file.read()
    print ("Read string is : ", str)
    file.close()
    return

def writing():
    file = open(name, 'w')
    inp = input('Input text: ')
    file.write(inp)
    file.close()
    return

def appending():
    file = open(name, 'a')
    inp = input('Input text: ')
    file.write(inp)
    file.close()
    return

def next_step():
    y = int(input("What else?\n1 : Read again.\n2 : Write again.\n3 : Append
again.\n4 : Exit.\nChoose a number:"))
    name = 'text.txt'
    if y == 1:
        reading()
        next_step()
    if y == 2:
        writing()
        next_step()
    if y == 3:
        appending()
        next_step()
    if y == 4:
        exit()
    return

print ("Program run.")
x = int(input("Modes of opening a file.\n1 : Opens a file for reading
only.\n2 : Opens a file for writing only.\n3 : Opens a file for
appending.\nChoose a number:"))
name = 'text.txt'
if x == 1:
    reading()
    next_step()
if x == 2:
    writing()
    next_step()
if x == 3:
    appending()
    next_step()
```

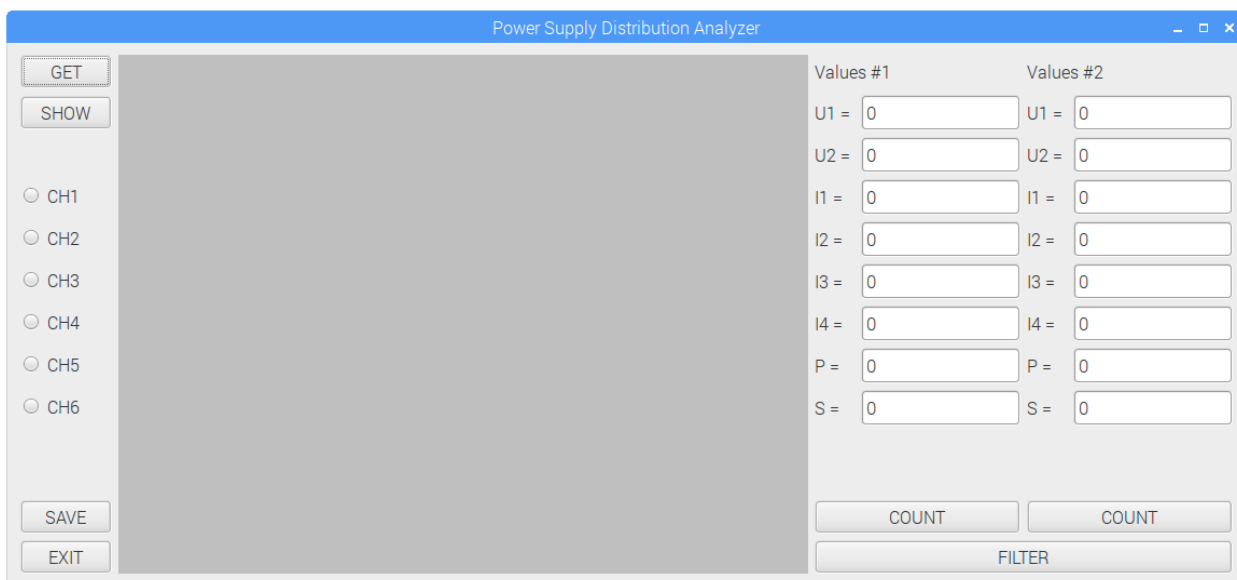
### 2.1.2.3. Komunikace po sériové lince

Poslední příklad slouží k navázání komunikace po sériové lince mezi deskou Raspberry Pi a deskou Tiva C Series LaunchPad, která zde slouží jako A/D převodník. Program naváže sériovou komunikaci mezi těmito deskami o rychlosti 115200 Bps, čemuž odpovídá přenosová rychlost zhruba 115,2 kB/s. Raspberry Pi odešle příkaz `b'#GET1\n'`, na jehož základě Tiva odešle string hodnot jedné periody o 64 vzorcích. Přijatý řetězec je pomocí rekurentního výrazu a cyklu `for` převeden na string čísel s desetinnou tečkou, která jsou následně vykreslována pomocí knihovny `matplotlib` do přehledného grafu.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import serial
import re
print ("Start")
ser=serial.Serial(
    port = "/dev/serial0",\
    baudrate = 115200,\
    parity = serial.PARITY_NONE,\
    stopbits = serial.STOPBITS_ONE,\
    bytesize = serial.EIGHTBITS,\
    timeout=1)
print(ser.name)
ser.write(b'#GET1\n')
ser.flush()
read_byte=str(ser.read(512))
print ("Incoming text:")
print (read_byte)
print ("End of reading")
read_data = [float(x) for x in re.findall(r'[+-]?\d+(?:\.\d+)?', read_byte)]
print ("String:", numbers_string)
plt.plot(numbers_string)
plt.ylabel('Incoming numbers')
plt.show()
print ("End of plot")
ser.close
```

## 2.2.Řídící aplikace

Řídící aplikace běží na platformě Raspberry Pi, je napsána v programovacím jazyce Python a pomocí grafického uživatelského rozhraní umožňuje ovládat zkušební přípravek harmonického filtru.



Obrázek 10 – Grafické uživatelské rozhraní

Strukturu celého programu lze rozdělit do čtyř bloků. První z nich se stará o grafické uživatelské rozhraní. Za pomoci knihovny PyQt vytváří uživatelské okno, ve kterém jsou souřadnicově vykresleny jednotlivé prvky, jako jsou tlačítka, grafy a jednotlivé popisky. Jak je vidět na obrázku 10, v levé části se nacházejí ovládací tlačítka včetně zaškrtačkových políček pro výběr požadovaného kanálu. V centrální části je prostor pro vykreslování grafů. V pravé části se pak vypisují vypočítané střední hodnoty napětí a proudů a výkony.

Jako druhý blok lze považovat přijímání dat po sériové komunikaci. Aplikace si pomocí jednoduchých příkazů vyžádá data z A/D převodníku pro všechny měřené kanály. Přijatá data pak zpracuje do podoby číselného řetězce. Takto zpracovaná data jsou uložena do bufferu a připravena k dalšímu využití.

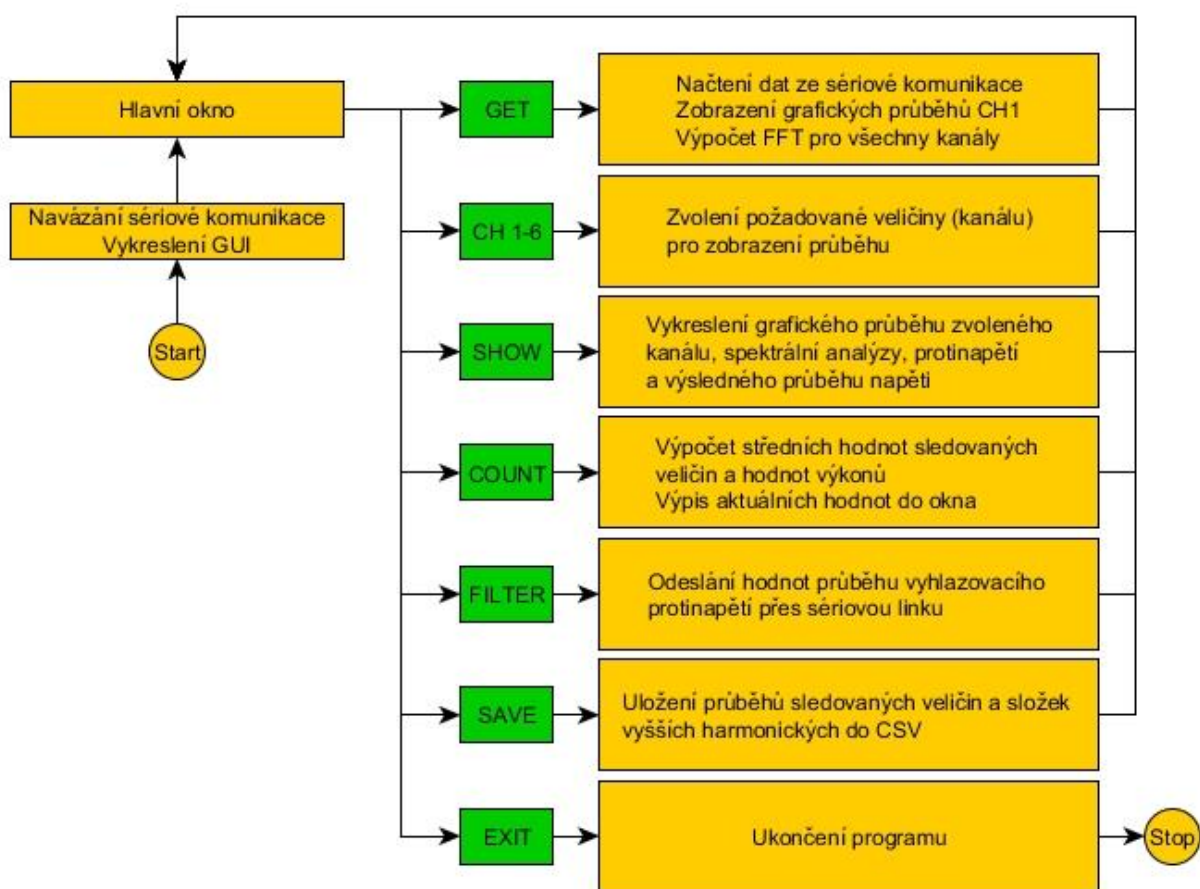
Třetí část na základě požadavku vykresluje data uložená v bufferu. Provádí spektrální analýzu v podobě Fourierovy transformace a vytváří průběh potřebného filtračního protiproudu.

Čtvrtá část se pak stará o poslání dat potřebného průběhu protiproudu po sériové lince zpět do převodníku, který na jejich základě vytváří PWM signál.

Celá aplikace disponuje těmito funkcemi:

- čtení a zapisování dat po sériové komunikace
- zobrazování průběhů napětí a proudů
- spektrální analýza průběhu
- výpočet středních hodnot napětí a proudů, činného a zdánlivého výkonu
- výpočet průběhu protiproudu
- uložení dat do CSV

Chod řídicí aplikace z hlediska uživatele popisuje i následující vývojový digram. Po spuštění programu se vykreslí grafické uživatelské rozhraní, ve kterém lze pomocí tlačítek vykonávat jednotlivé úkoly. U každého tlačítka, která jsou znázorněna zeleně, je popsáno, jakou funkci řídicí aplikace po jeho stisknutí vykoná. Po vykonání požadované funkce se program vrací zpět do hlavního okna a čeká na další příkazy.



Obrázek 11 – Blokové schéma řídicí aplikace

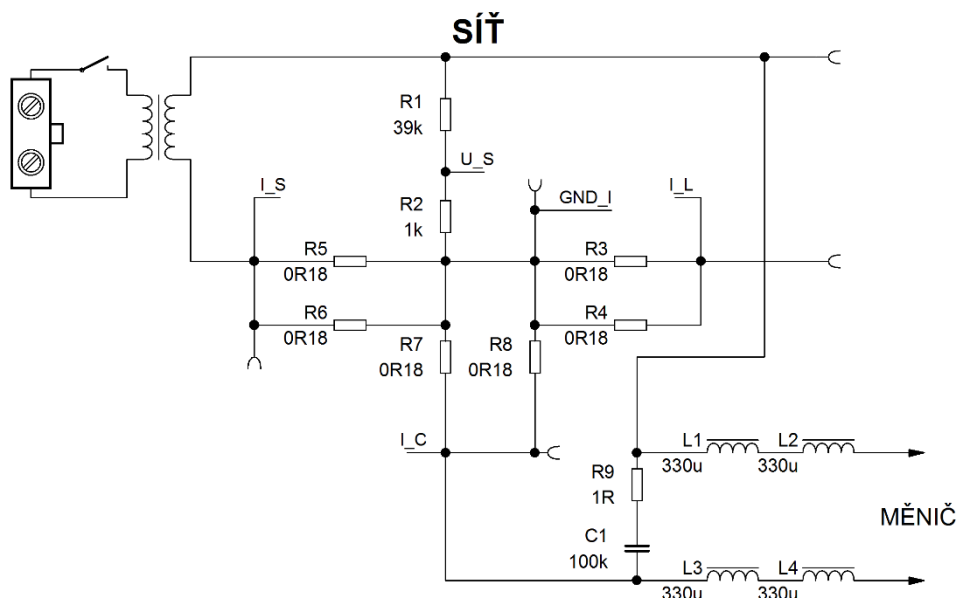
### 3. HW část

#### 3.1.Zkušební přípravek

Návrh a realizace přípravku výkonové části aktivního harmonického filtru pro hladinu bezpečného malého napětí, který je možné řídit pomocí Raspberry, probíhal v několika fázích, které jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.

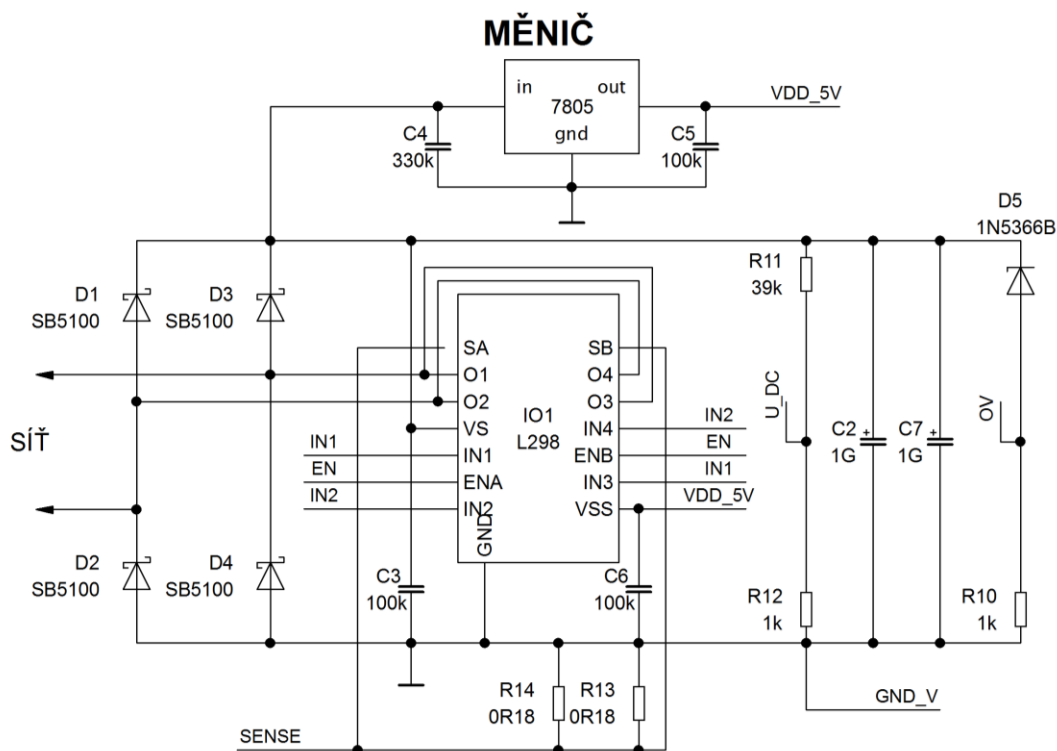
##### 3.1.1. Silový obvod

V první fázi bylo potřeba navrhnout vhodné schéma výkonového přípravku, který má sloužit k aktivní filtraci. Takovéto schéma je po částech zobrazené na následujících obrázcích. Jako komplet je pak k dispozici v příloze č. 1.



Obrázek 12 – Schéma zapojení "SÍŤ"

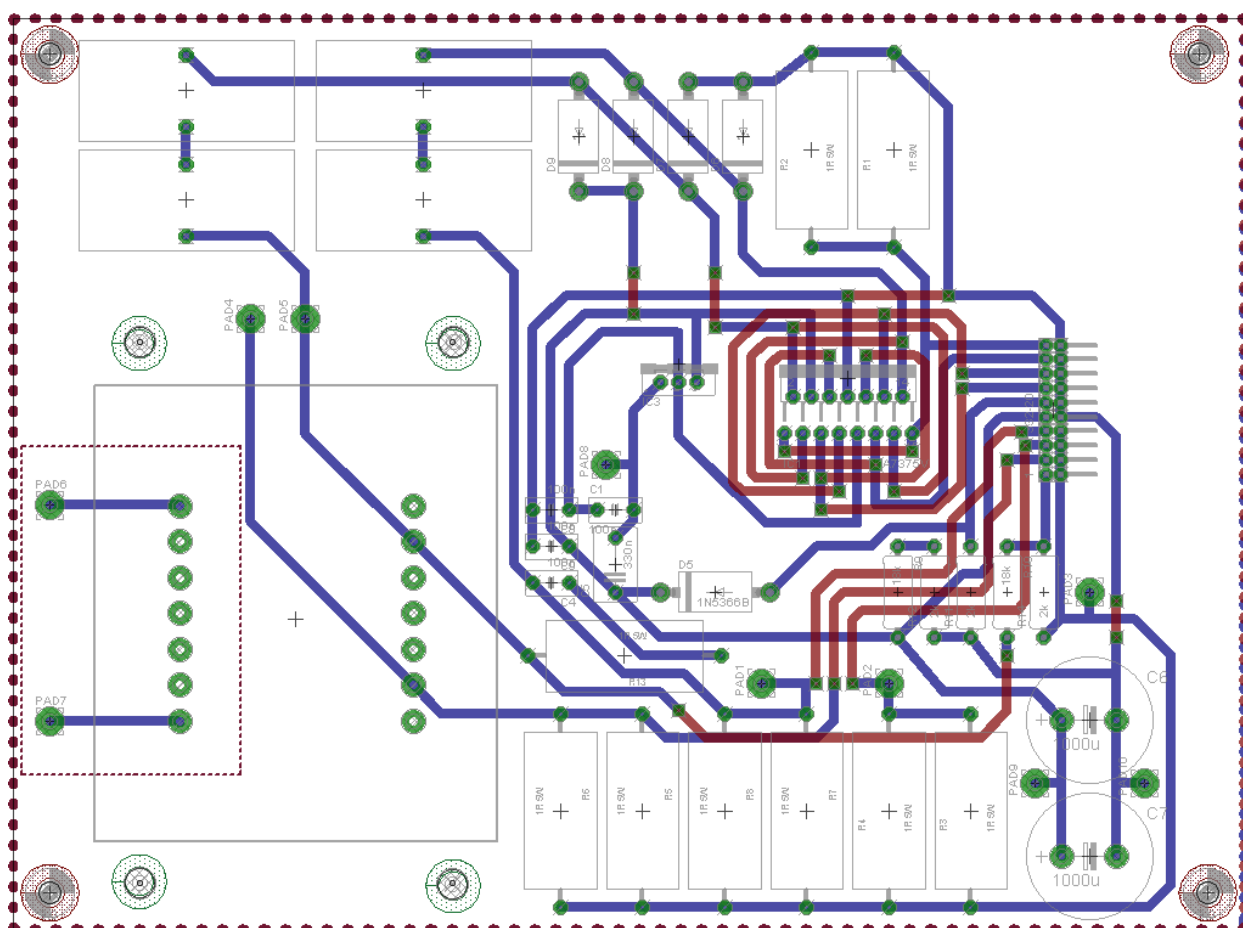
V části na obrázku 12 se nachází transformátor, který transformuje síťové napětí 230 V na bezpečnou hladinu 12 V, která byla zvolena pro tento přípravek jako pracovní. Výkon tohoto transformátoru je 30 VA. Dále se zde nacházejí sériové a paralelní kombinace odporů, které slouží jako bočníky pro měření proudu nebo děliče pro měření napětí a příslušné signály jsou přivedeny na měřící svorkovnici. Vstup do měniče je opatřen filtrem, který začíná RC členem, na který navazují vyhlazovací cívky s železoprachovým jádrem. Rezistor R1 ve filtru má pouze tlumící účel pro případ vzniku rezonance. Cívky L1-4 slouží k vyhlazování filtračního proudu, který je odebírán/dodáván měničem. Vstup měniče za filtrem a schéma měniče jsou zobrazeny na obrázku 13.



Obrázek 13 – Schéma zapojení "MĚNIČ"

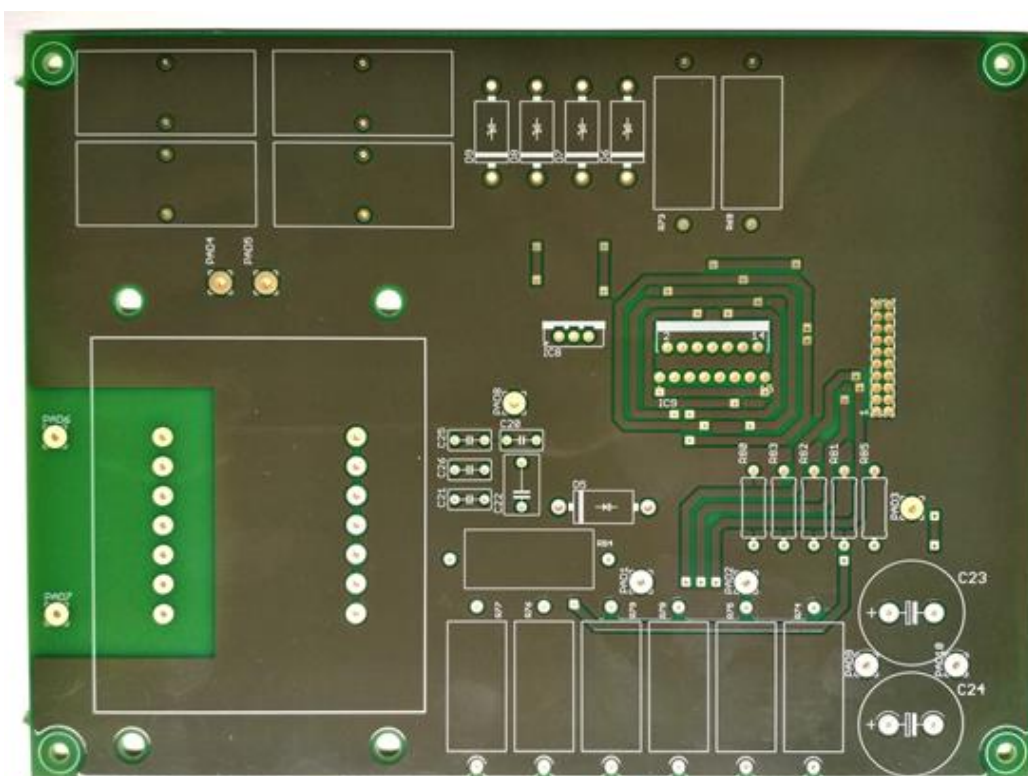
Tato část, která navazuje na vyhlazovací cívky z předchozí části, začíná notoricky známým Graetzovým můstkem, jenž slouží pro usměrnění střídavého napětí na napětí stejnosměrné. Nejvýraznější částí tohoto obvodu je integrovaný obvod s označením L298N. Jedná se o integrovaný monolitický obvod v pouzdře Multiwatt15. Slouží jako výkonný duální full-bridge ovladač navržený na ovládání pomocí TTL (transistor-transistor-logic) standardu. Společně se základní funkcí diodového můstku vytváří můstek řízený. [13] K dispozici má dva vstupy, pomocí kterých může spínat výstupy O1-4 na napájecí napětí (napětí kondenzátorů C2, C7) nebo na zem v závislosti na vstupním signálu. V tomto případě se jedná o spínání dvou kondenzátorů, každý o kapacitě 1000  $\mu\text{F}$ . Jejich paralelní kombinací je dosaženo celkové kapacity 2 mF a slouží zde jako zdroj napětí resp. pro akumulaci energie, která je nutná k aktivní filtraci. Ke kondenzátorům je paralelně připojena Zenerova dioda, která slouží k zamezení a detekci přepětí na kondenzátorech. Dále je zde stabilizátor pevného napětí s označením 7805CV-DG-STM. Jeho výstup je připojen jako napájení a referenční úroveň pro logické vstupy obvodu L298. Stejně jako v předchozí části obvodu se i zde vyskytují sériové a paralelní kombinace odporů, které slouží jak pro omezení proudu, tak pro vyvedení uzlů na měřící svorkovnici.

Na základě tohoto schématu byl pomocí softwaru Eagle vytvořen layout desky plošného spoje. Vzhledem ke složitosti obvodu v blízkosti integrovaného obvodu L298N byl pro zachování kompaktní velikosti zvolen oboustranný typ plošného spoje. Z důvodu použití některých součástek, které nemají typická pouzdra, bylo zapotřebí si některá upravit nebo kompletně nakreslit. Konkrétně se jedná o pouzdro transformátoru, které nebylo k dispozici v žádné podobě a muselo být tedy kompletně nakresleno. Menší úpravy pak požadovala pouzdra pro toroidní cívky. Bylo zapotřebí upravit také správné rozmístění nožiček integrovaného obvodu L298N, protože pouzdro poskytované doinstalovanou knihovnou nekorespondovalo s vývody uvedenými v datasheetu k dané součástce. Takto vytvořený layout oboustranné desky plošného spoje je znázorněn na obrázku 14. Jednotlivé vrstvy jsou zde barevně odlišeny tak, že vrchní strana desky má barvu červenou a spodní strana desky barvu modrou.



Obrázek 14 – Layout DPS

Deska plošného spoje se nechala vyrobit na zakázku. Jak již bylo zmíněno, jedná se o oboustranný plošný spoj, kde jsou obě strany vzájemně spojeny prokovy. Veškeré otvory určené pro instalaci THT součástek jsou také prokoveny. Deska je z obou stran opatřena nepájivou maskou, z přední strany je pak ještě natisknuto osazovací schéma obsahující pouzdra a značení součástek. Přední strana desky je zobrazena na obrázku 15.



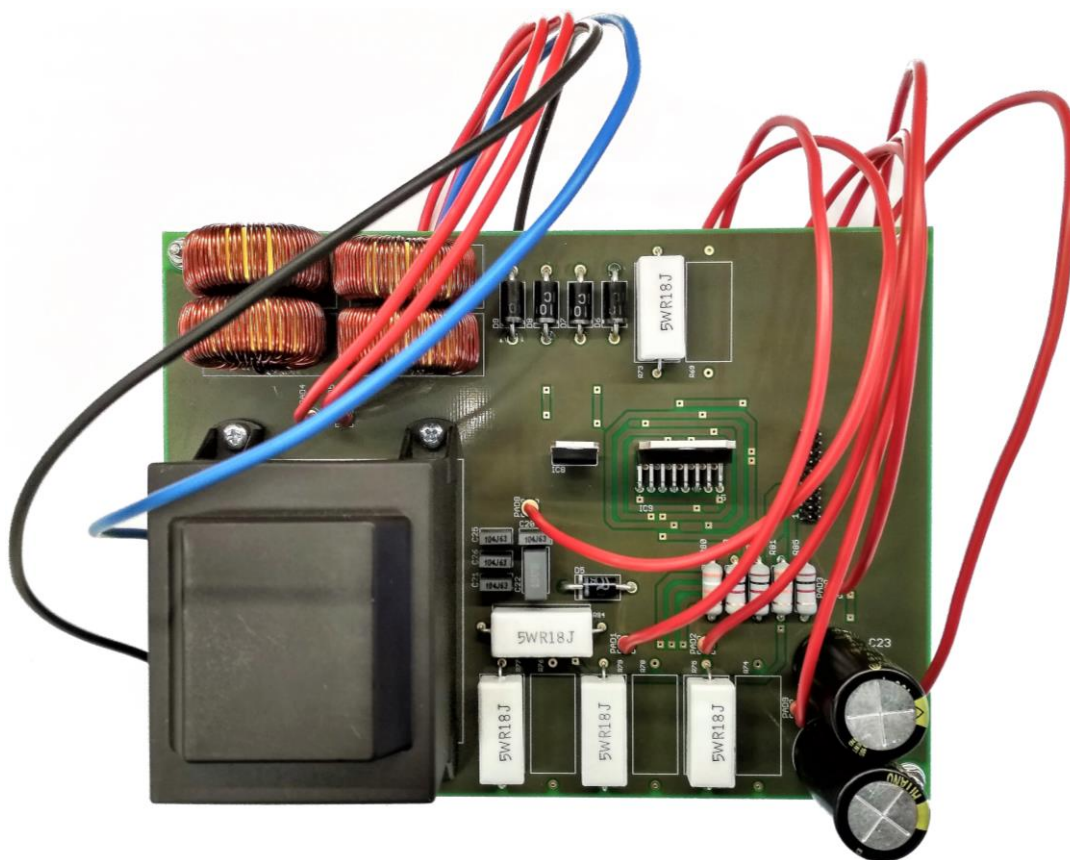
Obrázek 15 – Přední strana DPS

V příloze č. 2 je k dispozici tabulka, která se nazývá BOM. To je anglická zkratka pro „Bills Of Materials“ a v překladu do češtiny ji lze chápat jako kusovník nebo seznam součástek. V tabulce je uvedený také počet kusů dané součástky a kód součástky z obchodu GM Electronics, který dodává na evropský trh součástky pro elektroniku, měřicí přístroje a řadu dalších výrobků pro elektrotechnickou výrobu.

Po osazení všemi součástkami a připájení drátů pro vyvedení napájecích a měřících bodů na svorkovnici odpovídal stav výkonové části obrázku 16. Z obrázku je patrné, že nebyly osazeny všechny součástky, konkrétně se jedná o odpory s označením 5WR18J. Tyto odpory jsou párové, paralelně řazené, a vždy došlo k nenainstalování jednoho z nich. Je to z toho důvodu, že deska je dimenzována na

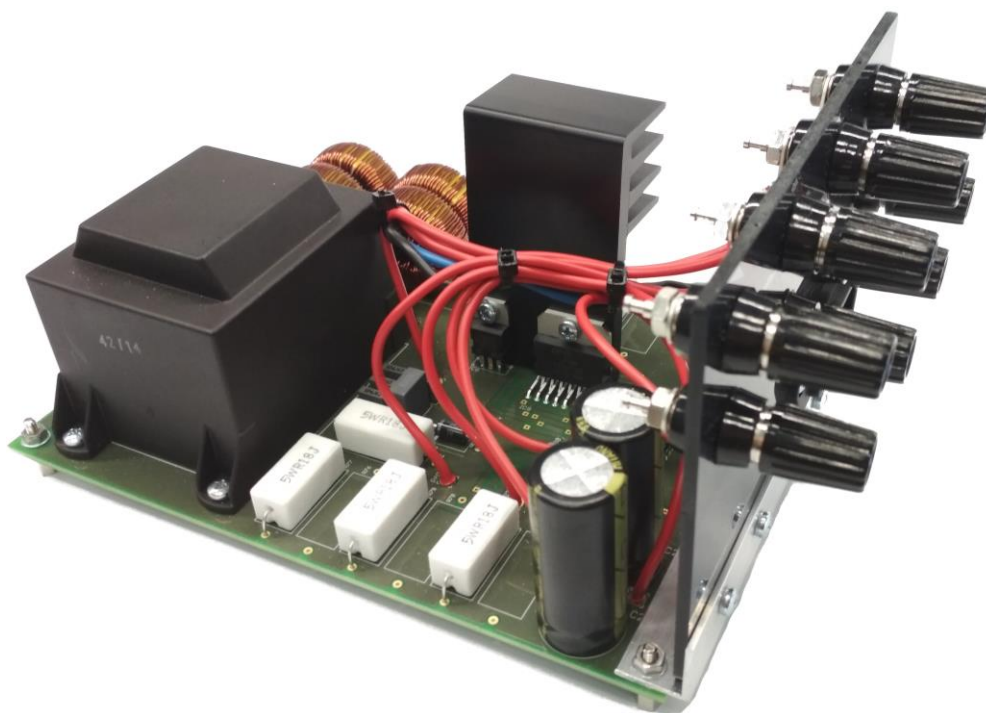


větší proudy, než bylo postačující pro aktuální potřeby následného testování. Nicméně při potřebě zvýšení protékajících proudů lze odpory dodatečně nainstalovat, a proudy tím zvýšit.



*Obrázek 16 – Osazení DPS součástkami*

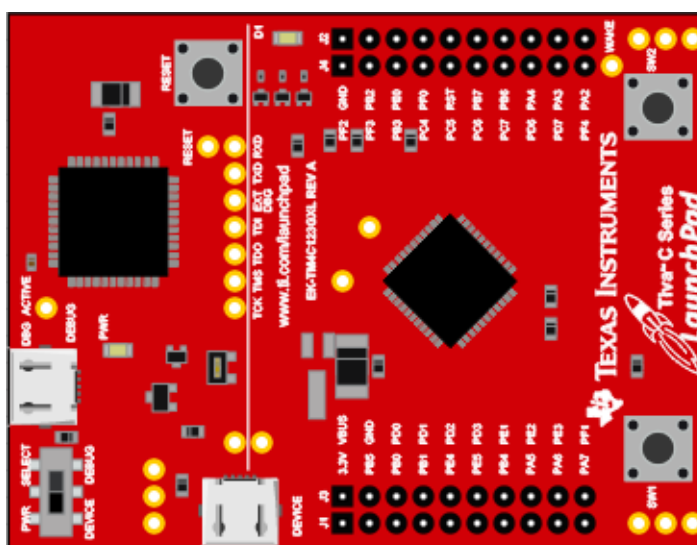
Po osazení všemi součástkami a vyvedení měřicích bodů bylo potřeba připevnit dráty na svorkovnici. Ta je vyrobena z černého plexiskla a je osazena osmi panelovými zdírkami a napájecím konektorem GSI-2. Zdíčky slouží jak k propojení přípravku se zátěží, tak k připojení měřicích přístrojů pro kontrolní měření. Dále byl na součástky integrovaného obvodu a stabilizátoru pevného napětí připevněn společný chladič. Na desku byly také namontovány distanční sloupky, aby nedošlo k poškození nebo zkratování spodních vývodů THT součástek. Výsledný vzhled přípravku je zobrazen na obrázku 17, detailněji je přípravek zdokumentován v příloze č. 3.



Obrázek 17 – Výsledný vzhled přípravku

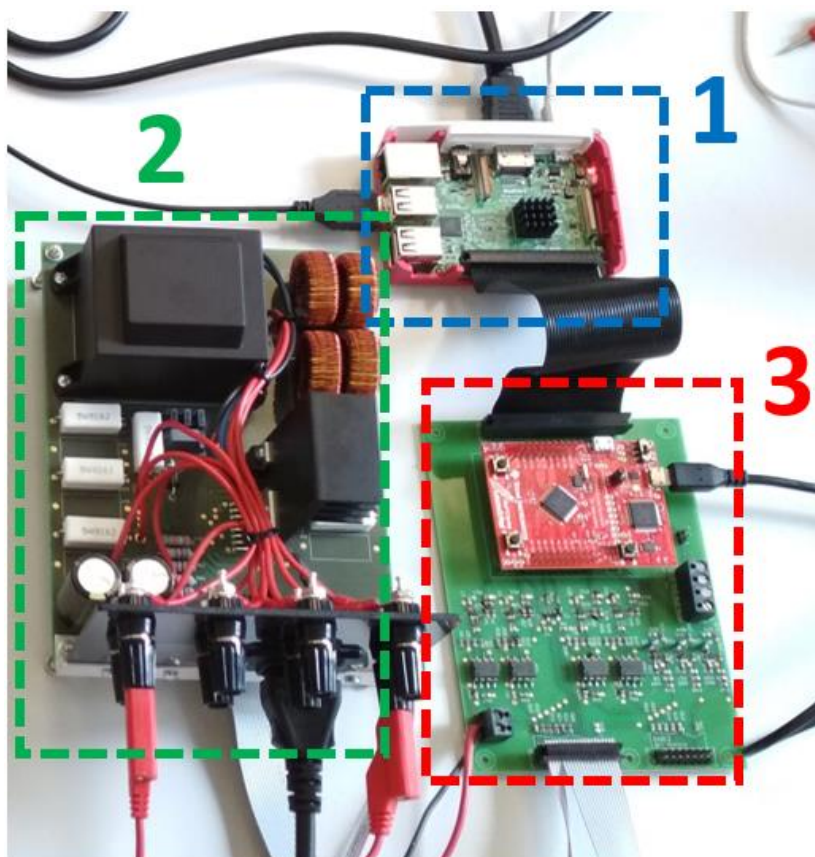
### 3.1.2. Propojení Raspberry s přípravkem měření síťových veličin

Takto vyrobené zařízení je potřeba propojit s Raspberry Pi, jakožto s řídicí jednotkou. Jak již bylo zmíněno, Raspberry Pi nedisponuje analogově digitálními převodníky, proto zde musel být umístěn převodník, který tuto funkci bude zajišťovat. Jako převodník byla zadána deska Tiva C s vlastní výkonovou deskou. Toto řešení se později ukázalo jako nevhodné, detailněji je tento problém probrán v kapitole „3.3 Aktivní filtrace“.



Obrázek 18 – Tiva C Controller [11]

Na obrázku 19 je zobrazené propojení Raspberry Pi (modře) s přípravkem síťových veličin (zeleně) a mezi nimi zapojeným převodníkem Tiva C (červeně). Propojení mezi Raspberry Pi a Tiva C zajišťuje sériová sběrnice, po které běží sériová komunikace. Tiva C a přípravek pro měření síťových veličin jsou také propojeny sběrnicí, která už ale na rozdíl od předchozího případu přenáší analogové signály. Obě desky, jak Raspberry Pi tak Tiva C jsou napájeny síťovými adaptéry dodávající 5 V DC. DPS s Tiva C má navíc jedno napájení 5 V DC z externího zdroje, jelikož tato deska musela zajistit galvanické oddělení některých vstupů z konektoru přípravku aktivního filtru. Přípravek pro měření síťových veličin je připojen přímo do sítě 230 V / 50 Hz. Přes jeho svorkovnice je pak možné připojovat jednotlivé zátěže a externími měřáky kontrolovat například napájecí napětí nebo napětí ve stejnosměrném obvodu.

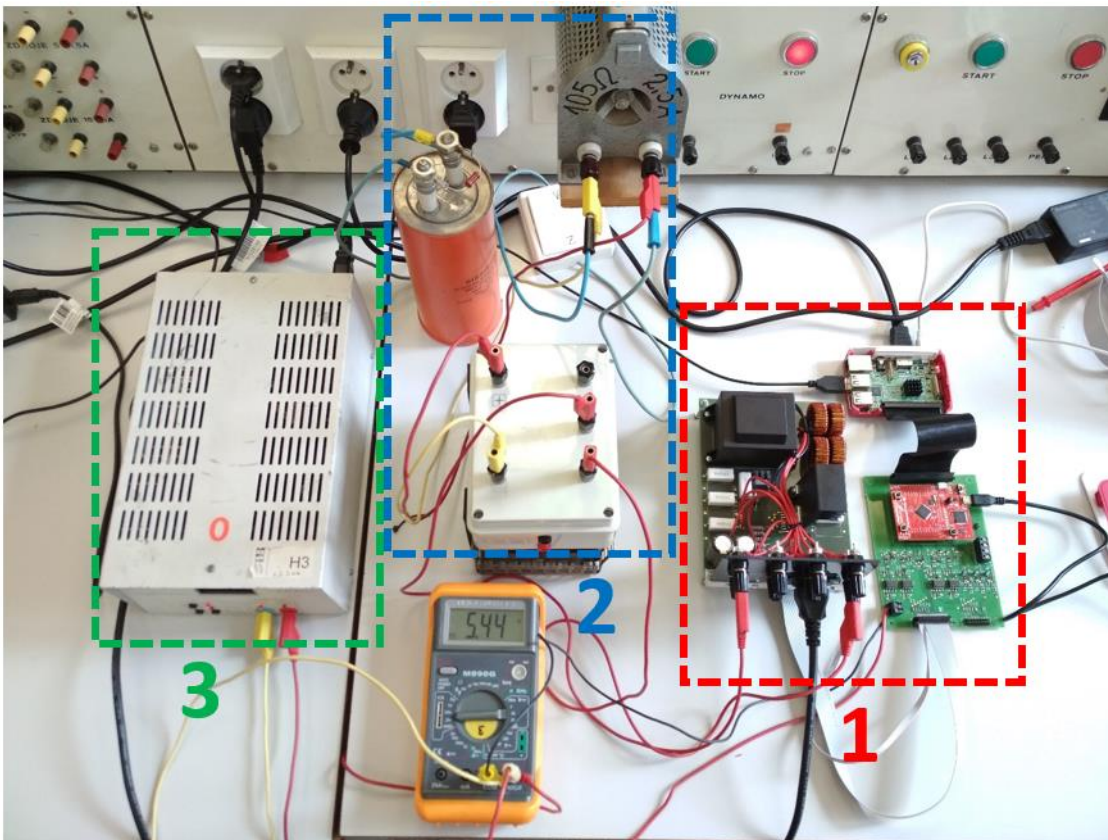


Obrázek 19 – Zapojení AHF

K takto sestavenému AHF (aktivní harmonický filtr) již bylo možné připojovat jednotlivé zátěže. Takováto sestava je znázorněna na obrázku 20. Červeně je označen právě AHF, jehož zapojení je detailněji popsáno výše. Dále je na obrázku modře označena zátěž, kterou v daném okamžiku tvořil dvoucestný usměrňovač, ke kterému byl připojený paralelní RC obvod. Jednotlivé zátěže jsou detailněji popsány v následující

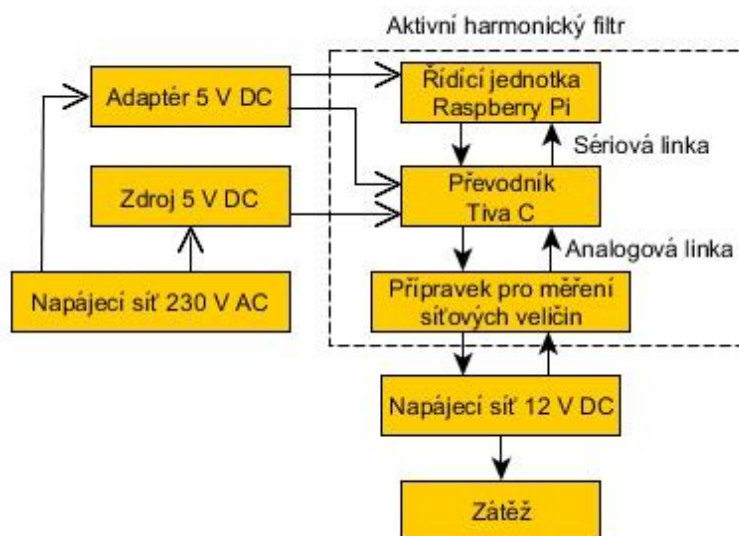


kapitole. Zeleně je pak označen externí zdroj, který dodával 5,5 V DC do výkonové desky převodníku Tiva C.



Obrázek 20 – Připojení napájení a zátěže k AHF

Pro přehlednější zobrazení vzájemných propojení je na obrázku 21 k dispozici blokové schéma zapojení všech částí, včetně zapojení napájení a připojení zátěže.



Obrázek 21 – Blokové schéma zapojení AHF

### 3.2. Zobrazení průběhů napětí, proudu a hodnoty činného a zdánlivého výkonu

Po zapojení obvodu popsaném v přechodí kapitole, bylo možné pomocí řídicí aplikace začít odečítat jednotlivé hodnoty a zobrazovat jejich průběhy. Během prvního spuštění bylo potřeba nejdříve přiřadit pod jednotlivé kanály požadované veličiny a kalibrovat přepočty v řídicí aplikaci tak, aby zobrazovala reálné hodnoty odpovídající 1 voltu, respektive ampéru.

Přiřazení jednotlivých kanálů bylo zvolené podle následující tabulky:

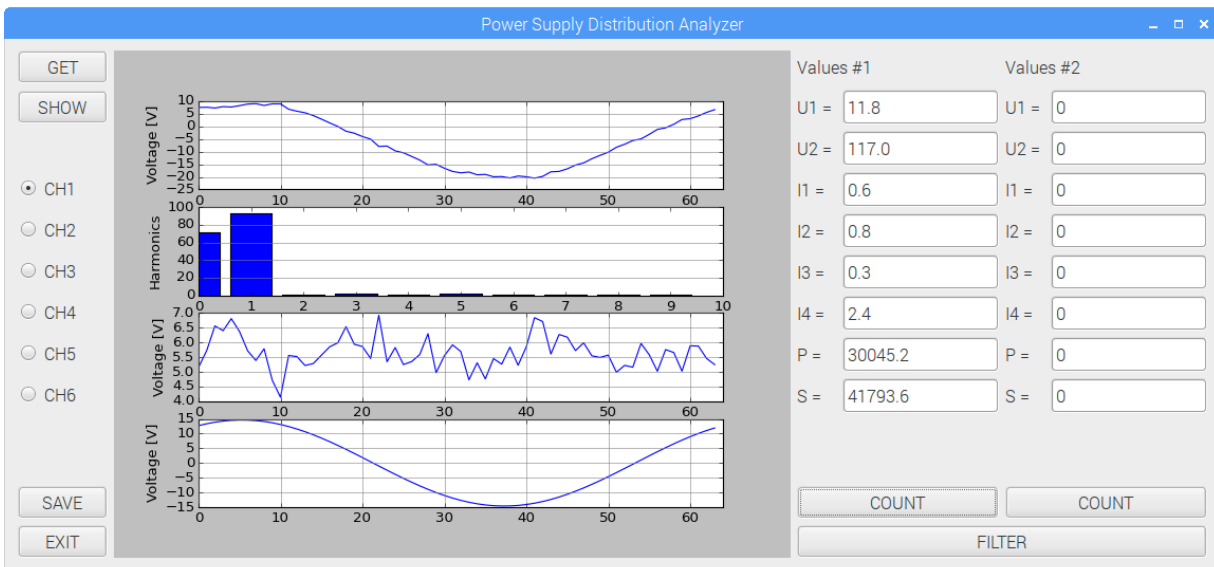
kanál	veličina	označení	popis
CH 1	U1	U_S	napětí napájecí sítě
CH 2	U2	U_DC	napětí na svorkách kondenzátoru
CH 3	I1	I_S	proud napájecí sítě
CH 4	I2	I_C	proud z měniče
CH 5	I3	I_L	proud do zátěže
CH 6	I4	sense	detekce chyby na tranzistorech

*Tabulka 1 – Přiřazení kanálů*

Pro ověření funkčnosti přípravku i řídicí aplikace byly do obvodu postupně zapojeny celkem tři zátěže. Jako zátěž bylo v různých kombinacích použito kondenzátoru o kapacitě 22  $\mu$ F, posuvného rezistoru o celkovém odporu 105  $\Omega$ , který byl po celou dobu měření zhruba na jedné třetině, čemuž by odpovídal odpor 35  $\Omega$ , a napěťového zdroje.

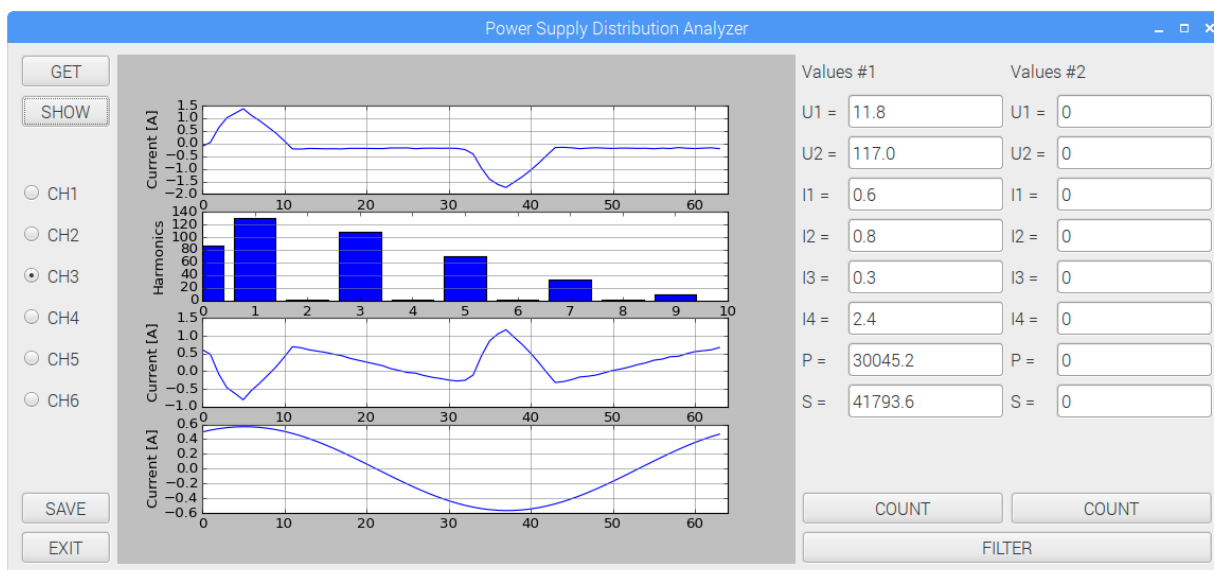
#### 3.2.1. Nelineární zátěž s dvoucestným usměrňovačem

V prvním případě se jednalo o nelineární zátěž, která byla tvořena dvoucestným usměrňovačem, posuvným odporem a napěťovým zdrojem. Napěťový zdroj simuloval předpětí, které by zde existovalo při přítomnosti vyhlazovacího kondenzátoru. Jako vypočítací postačí pro všechny zátěže průběhy napětí a proudu napájecí sítě. Veškeré průběhy jsou ve větším měřítku k dispozici v přílohách číslo 4-9.



Obrázek 22 – Průběh napětí, nelineární zátěž, dvoucestný usměrňovač

Na obrázku 22 je zachycený průběh napětí napájecí sítě U1 pro nelineární zátěž. Z prvního průběhu je patrné mírné zdeformování napájecího napětí sítě. Z druhého grafu je patrné, že se zde významně vyskytuje pouze nultá stejnosměrná složka a první nosná složka, následující harmonické jsou oproti těmto dvěma zanedbatelné. Složka stejnosměrného posunu je bohužel způsobena chybou návrhu na přípravku TIVA C. Třetí průběh zobrazuje, jaké napětí by bylo zapotřebí dodat, aby došlo k vyhlazení napětí do takového stavu, kterému by odpovídal průběh na posledním grafu. V pravé části je pak vidět vypočítaná střední hodnota napětí U1, které odpovídá 12 V stejnosměrného obvodu. Střední hodnota U2, která má hodnotu 117 V, vlivem offsetu neodpovídá skutečnosti. Tato chyba je detailně popsána v kapitole 3.3.

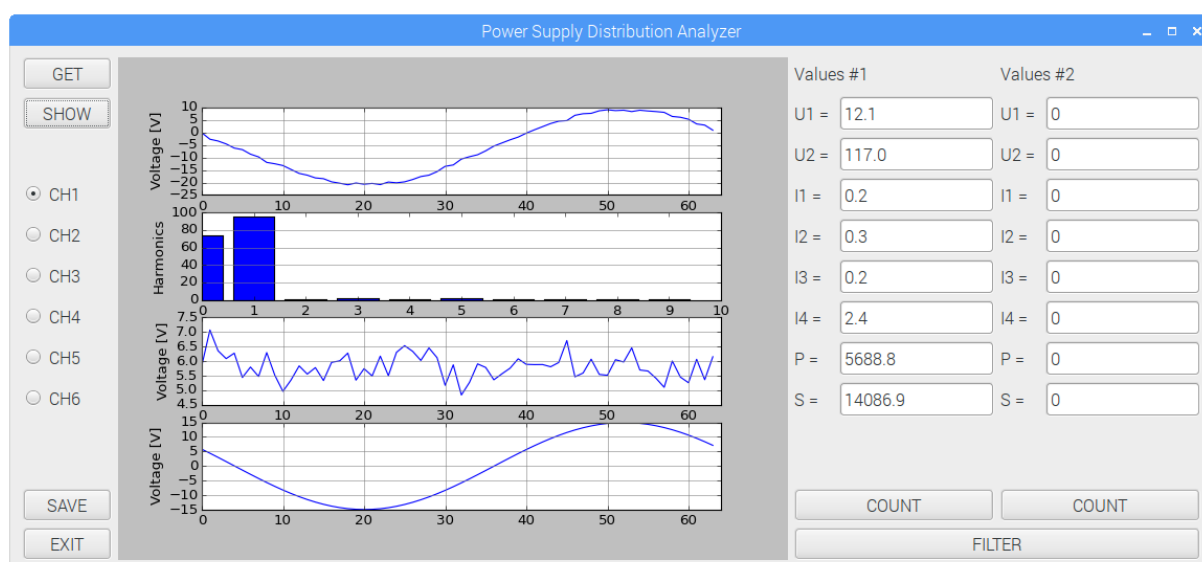


Obrázek 23 – Průběh proudu, nelineární zátěž, dvoucestný usměrňovač

Na obrázku 23 je zachycený průběh proud napájecí sítě I1 pro nelineární zátěž. Z jeho průběhu je jasně patrný vliv nelineární zátěže. Od optimálního sinusového se průběh proudu výrazně liší. Na druhém grafu je už patrný výskyt lichých vyšších harmonických. Třetí průběh zobrazuje, jaký proud je zapotřebí dodat, aby došlo k vyhlazení průběhu proudu do takového stavu, kterému by odpovídal průběh na posledním grafu, a nedocházelo by k výskytu vyšších harmonických. V právě části je vidět střední hodnota proudu 0,6 A.

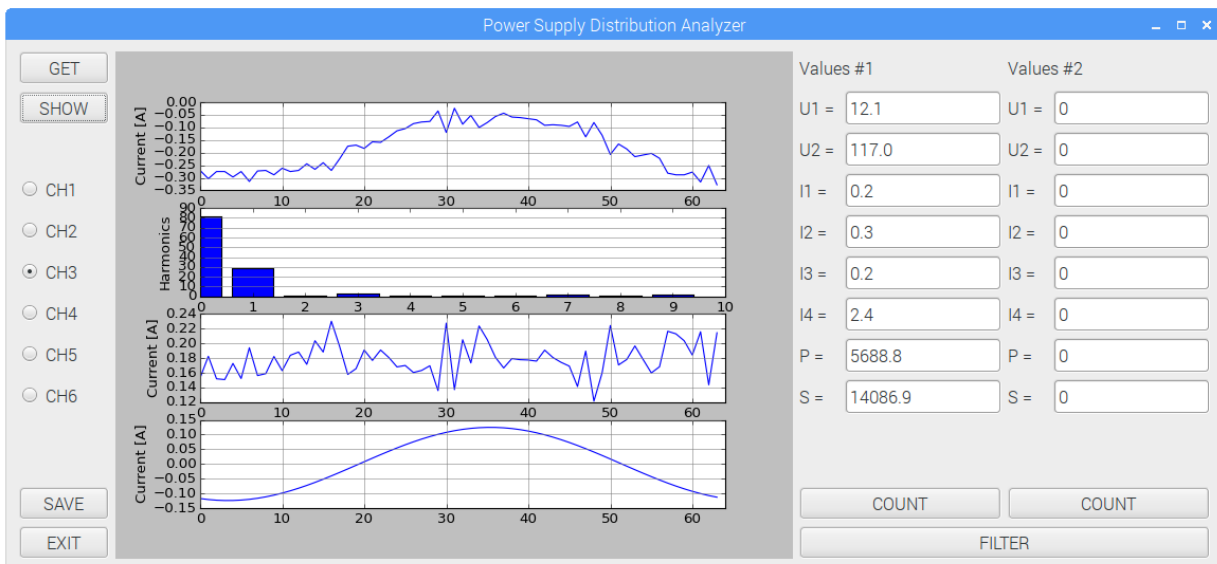
### 3.2.2. Lineární zátěž

V druhém případě se jednalo o lineární zátěž, která byla tvořena pouze kondenzátorem, tudíž je zde předpoklad přítomnosti výhradně jalového proudu.



Obrázek 24 – Průběh napětí, lineární zátěž

Na obrázku 24 je zachycený průběh napětí napájecí sítě U1 pro lineární zátěž. Stejně jako v předchozím případě i zde je z prvního průběhu patrné mírné zdeformování napájecího napětí sítě. Z druhého grafu je patrné, že se zde významně vyskytuje pouze nultá stejnosměrná a první nosná složka, následující harmonické jsou oproti těmto dvěma opět zanedbatelné. V pravé části je opět vidět vypočítaná střední hodnota napětí U1, které odpovídá 12 V stejnosměrného obvodu.



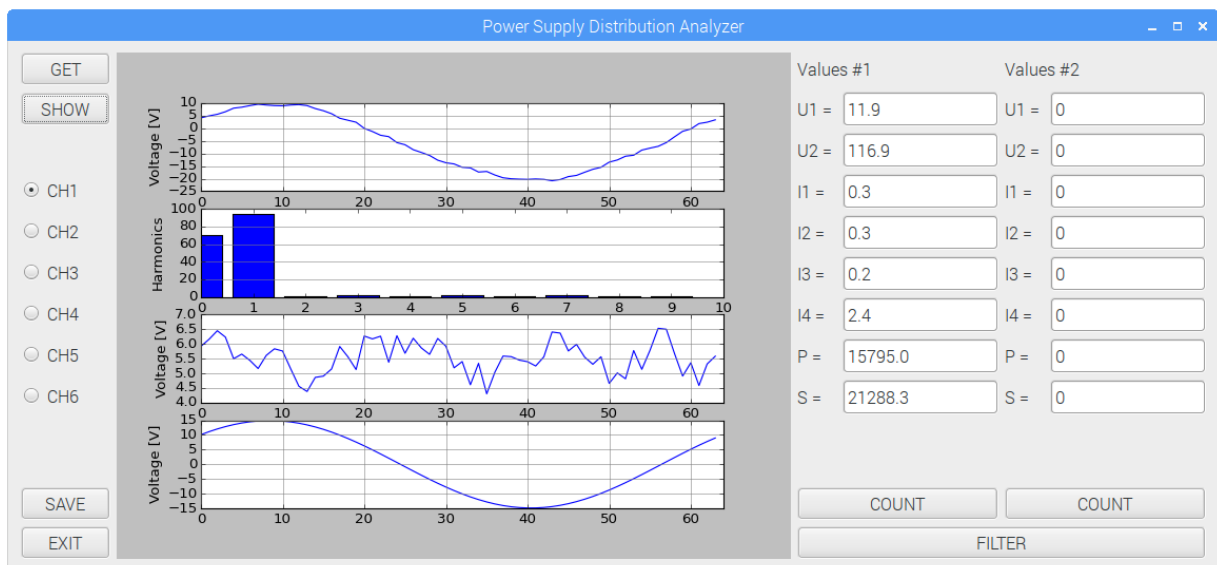
Obrázek 25 – Průběh proudu, lineární zátěž

Na obrázku 25 je zachycený průběh proud napájecí sítě I1 pro lineární zátěž. Z jeho průběhu je patrné, že zátěž nemá na napájecí síť nijak významný vliv. Od optimálního sinusového se průběh proudu liší pouze lokálními peaky. Na druhém grafu je stejně jako v případě napětí zřejmé, že se zde významně vyskytuje pouze nulová stejnosměrná složka a v menší míře i první nosná složka, následující harmonické jsou oproti těmto dvěma opět zanedbatelné. V právě části je vidět střední hodnota proudu 0,2 A. Jakékoliv stejnosměrné offsety v signálech výše pochopitelně v měřených průbězích nebyly. Ty byly zavlečeny až chybným měřením přípravku TIVA C, který ovšem nebyl náplní této práce. Samotný přípravek aktivního filtru i program pracovaly správně.

### 3.2.3. Nelineární zátěž s jednocestným usměrňovačem

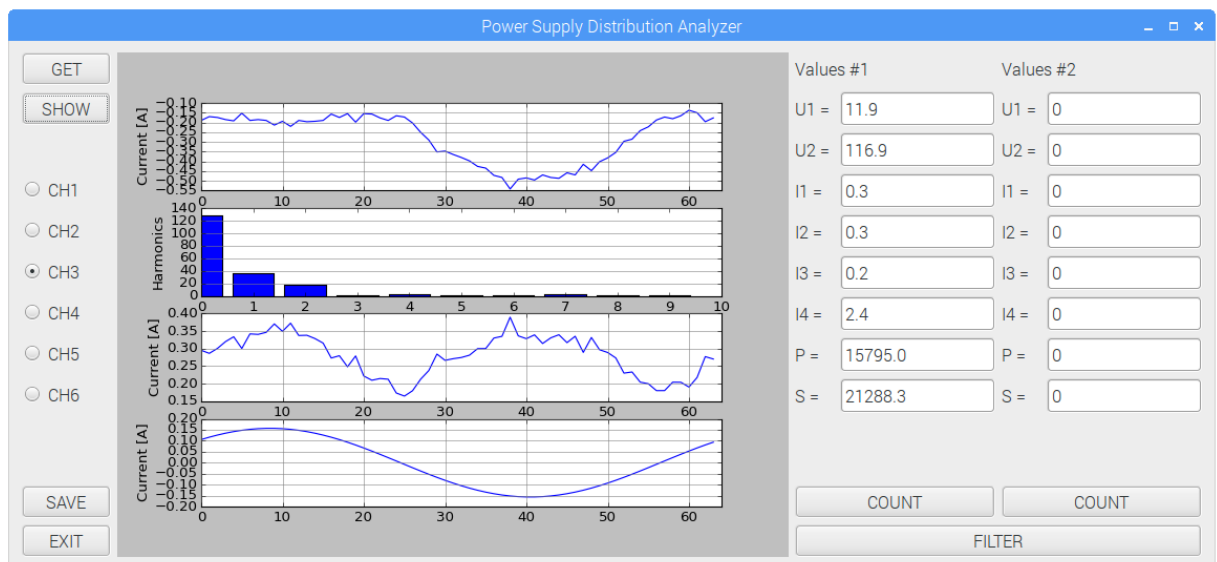
Ve třetím případě se jednalo opět o nelineární zátěž, která byla tvořena stejně jako v prvním případě posuvným odporem a napěťovým zdrojem pouze s tím rozdílem, že usměrňovač byl pouze jednocestným.





Obrázek 26 – Průběh napětí, nelineární zátěž, jednocestný usměrňovač

Na obrázku 26 je zachycený průběh napětí napájecí sítě U1 pro nelineární zátěž. Stejně jako v předchozích případech i zde je z prvního průběhu patrné mírné zdeformování napájecího napětí sítě. Z druhého grafu je patrné, že se zde významně vyskytuje pouze nulová stejnosměrná složka a první nosná složka, následující harmonické jsou oproti těmto dvěma opět zanedbatelné. V pravé části je opět vidět vypočítaná střední hodnota napětí U1, které odpovídá 12 V stejnosměrného obvodu.



Obrázek 27 – Průběh proudu, nelineární zátěž, jednocestný usměrňovač

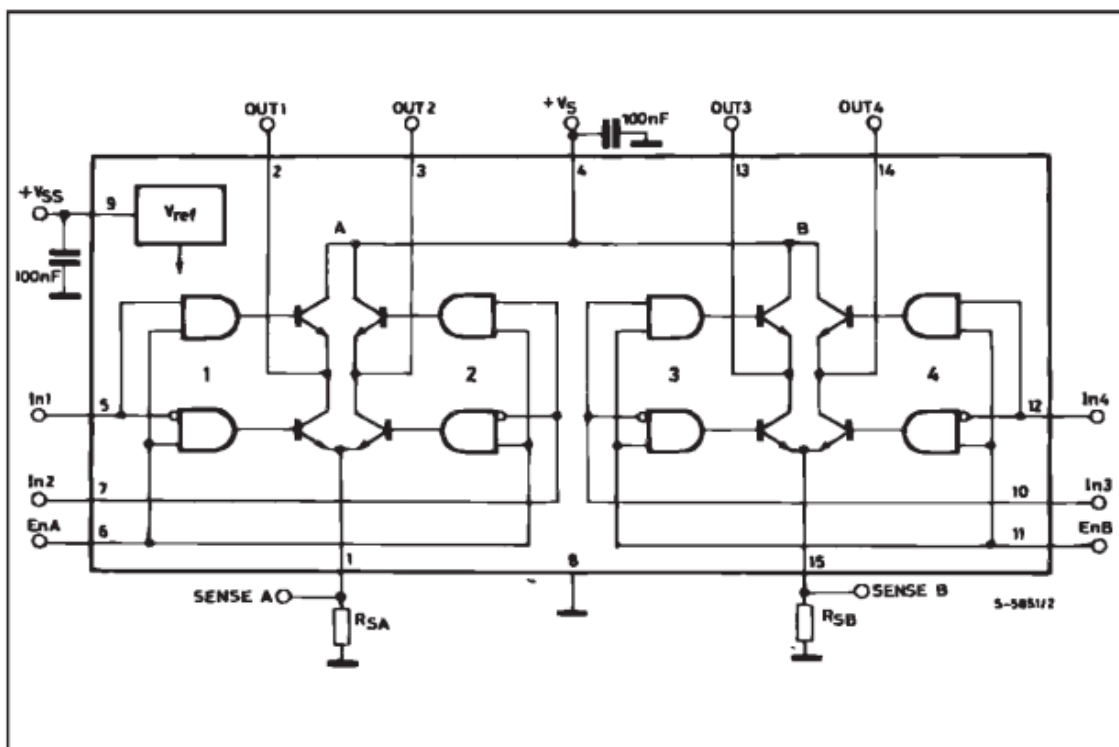
Na obrázku 27 je zachycený průběh proudu napájecí sítě I1 pro nelineární zátěž. Z jeho průběhu je opět patrný vliv nelineární zátěže. Od optimálního sinusového se průběh proudu výrazně liší. Od přechodného případu nelineární zátěže se liší také tím, že

proud je odebírán pouze v jedné půlperiodě, což je způsobeno použitím jednocestného usměrňovače. Na druhém grafu je patrný výskyt nulté stejnosměrné složky, v menší míře i první nosná složka a druhá sudá složka. Přítomnost sudé složky vyšších harmonických je způsobena rozdílným průběhem kladné a záporné půlperiody. Třetí průběh zobrazuje, jaký proud je zapotřebí dodat, aby došlo k vyhlazení průběhu proudu do takového stavu, kterému by odpovídal průběh na posledním grafu a nedocházelo by k výskytu vyšších harmonických. V právě části je opět vidět střední hodnota proudu 0,3 A. Je zde také patrný offset průběhu proudu, který je způsoben chybou, která je detailně popsána v následující kapitole.

Ve všech třech případech je možné pozorovat významný rozdíl mezi činným a zdánlivým výkonem. Teoreticky by se tyto hodnoty pro ideální lineární odporovou zátěž neměli lišit vůbec, prakticky pak minimálně. Tato chyba je způsobena přípravkem převodníku Tiva C. Vlivem jeho špatného navržení nedochází ke správnému fázování a snímání vzorku. Vlivem návrhové chyby docházelo k ovlivňování offsetu mezi jednotlivými kanály. Tím se zavádí chyba i do výpočtu, který pak ukazuje takto významný rozdíl mezi činným a zdánlivým výkonem.

### 3.3. Aktivní filtrace

Měření a zobrazení průběhů napětí, proudu a hodnoty činného a zdánlivého výkonu byla jedna ze dvou funkcí zkušebního přípravku. Druhou funkcí je aktivní filtrace zjištěných vyšších harmonických. Řídící aplikace na základě analyzovaného signálu vytvořila průběh takového proudu, který když je puštěn zpět do sítě, dojde k potlačení vyšších harmonických. Jak již bylo zmíněno u schématu zkušebního přípravku, o to se stará duální můstkový řadič, jehož schéma je na obrázku 28. Tento můstek je řízen PWM signálem z převodníku Tiva C. PWM signál, který je vytvořen na základě vypočítaného filtračního průběhu, je vytvářen právě výkonovou deskou převodníku Tiva C. Takto řízený řadič pouští proud z kondenzátorů, na kterých může být až 40 V DC, zpět do sítě.



Obrázek 28 – Blokový diagram L298N

Při oživování a testování zkušebního přípravku byla ovšem zjištěna chyba, která nebyla způsobena přípravkem pro měření síťových veličin a filtrem ani řídicí jednotkou. Chyba se vyskytla ve desce převodníku Tiva C, kde už při jejím návrhu, který nebyl součástí této diplomové práce, došlo k chybě. Ta má za následek to, že operační zesilovače, které se na výkonové desce nacházejí, mají společnou zem jako přípravek pro měření síťových veličin a filtraci. Vlivem toho dochází k tomu, že převodník nezvládá správně synchronizovat průběhy. Tím, že nedošlo ke galvanickému oddělení se také vyskytuje offset některých naměřených hodnot, což bylo patrné u průběhů proudu v případě lineární zátěže a nelineární zátěže s jednocestným usměrněním.

V důsledku této chyby bylo upuštěno od zkoušení funkce aktivní filtrace, neboť by hrozilo, že dojde k poškození a ztrátě funkčnosti integrovaných obvodů na testovacím přípravku. Dokud nebude odstraněna chyba na desce převodníku Tiva C, nelze ověřit funkčnost řízení výkonové části AHF.

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit zkušební přípravek harmonického filtru. To obnášelo hned několik kroků. Prvním z nich byla teoretická část, která obnášela seznámení se s vlivem harmonických složek proudu na kvalitu elektrické energie. Tyto teoretické znalosti byly nezbytné k tomu, aby mohl být zkušební přípravek správně navržen a aby mohla být vytvořena řídicí aplikace.

Dalším důležitým krokem bylo seznámit se s vývojovým kitem Raspberry Pi, jeho základními funkcemi a s programovacím jazykem Python. Na základě tohoto kroku jsem získal první zkušenosti s operačním systémem založeným na Linuxu a osvojil si programovací jazyk Python v takové míře, že jsem byl schopen vytvořit řídicí aplikaci.

Po vytvoření řídicí aplikace následoval návrh a realizace přípravku výkonové části aktivního harmonického filtru pro hladinu napětí 12 V. To obnášelo vytvoření funkčního schématu, na jehož základě byla vytvořena deska plošného spoje. Po osazení desky součástkami šlo výsledek považovat za kompletní výkonovou část přípravku. Během tohoto kroku došlo k prověření znalostí při návrhu obvodů, plošných spojů a také manuální zručnosti v podobě pájení plošného spoje.

Když byla výkonová část i řídicí aplikace hotové, mohlo dojít k jejich vzájemnému propojení. Díky tomu mohly být během ověřování funkce přípravku pomocí ovládací aplikace v Raspberry Pi zobrazeny průběhy napětí, proudu, okamžitého výkonu a hodnoty činného a zdánlivého výkonu. Zde už se začaly objevovat první nesrovnalosti. Vlivem návrhové chyby převodníku docházelo k ovlivňování offsetu mezi jednotlivými kanály. Tyto komplikace byly způsobeny špatnou funkcí převodníku, konkrétně se jednalo o absenci galvanického oddělení operačních zesilovačů. Realizace převodníku ovšem nebyla součástí této diplomové práce. Na základě této chyby nemohla být ověřena aktivní filtrace, jelikož hrozilo nevratné poškození integrovaných obvodů harmonického filtru.

Do budoucna by mělo dojít k nápravě výkonové části převodníku, díky čemuž by mělo být možné ověřit funkčnost samotné filtrace vyšších harmonických. Do té doby bych chtěl v rámci zdokonalování znalostí v programovacím jazyce Python dodělat do řídicí aplikace další funkci. Jednalo by se o možnost jednotlivě si vybírat, které složky vyšších harmonických budou zrovna filtrovány. Po těchto krocích by měl přípravek sloužit jako plnohodnotný harmonický filtr a měl by být k dispozici pro potřeby měření v univerzitních laboratořích.

## Zdroje a použitá literatura

- [1] AKAGI, Hirofumi., Edson Hirokazu WATANABE a Mauricio AREDES. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience/ John Wiley, c2007. ISBN 978-0-470-10761-4.
- [2] T. S. Rathnayake, K. T. Rukshan, R. A. T. J. K. Rupasinghe, R. M. M. Ruwanthika and J. P. Karunadasa, 'Design and simulation of single phase active current harmonic filter,' 2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014], Nagercoil, 2014, pp. 978-983.
- [3] SUMMERFIELD, Mark. Python 3: výukový kurz. Brno: Computer Press, 2010. ISBN 978-80-251-2737-7.
- [4] CHAPMAN, David. Harmonické: Příčiny a účinky [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider17/resources/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>
- [5] VOJÁČEK, Jakub. Prvočíselný rozklad [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.maths.cz/clanky/118-prvociselny-rozklad>
- [6] DRÁPELA, Jiří. Frekvenční složky ve výkonových systémech: Harmonické, jejich původ, šíření, důsledky a omezování [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/harmonicke/view>
- [7] Matplotlib: History [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://matplotlib.org/users/history.html>
- [8] KŮS, Václav. Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-062-8.
- [9] PySerial [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://pythonhosted.org/pyserial/index.html#>
- [10] PyQt: Intro [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>
- [11] SHAHRYIAR, Shawon. TIVA C GPIOs [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://embedded-lab.com/blog/tiva-c-gpios/>
- [12] RaspberryPi 3B [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RaspberryPi\\_3B.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RaspberryPi_3B.svg)
- [13] DUAL FULL-BRIDGE DRIVER [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.332-005.1.pdf>

## Seznamy obrázků

Obrázek 1 – Vyšší harmonické [4].....	13
Obrázek 2 – Skládání vyšších harmonických [4] .....	14
Obrázek 3- Výskyt vyšších harmonických [6].....	15
Obrázek 4 – VA charakteristika lineární zátěže [4].....	16
Obrázek 5 – VA charakteristika nelineární zátěže [4].....	17
Obrázek 6 – Náhradní obvod nelineární zátěže [4] .....	17
Obrázek 7 – Sčítání proudů ve středním vodiči pro 3. harmonickou [6].....	19
Obrázek 8 – Diagram složek výkonů [8].....	27
Obrázek 9 – Raspberry Pi 3B [12] .....	28
Obrázek 10 – Grafické uživatelské rozhraní .....	35
Obrázek 11 – Blokové schéma řídicí aplikace .....	36
Obrázek 12 – Schéma zapojení "SÍŤ" .....	37
Obrázek 13 – Schéma zapojení "MĚNIČ" .....	38
Obrázek 14 – Layout DPS .....	39
Obrázek 15 – Přední strana DPS .....	40
Obrázek 16 – Osazení DPS součástkami .....	41
Obrázek 17 – Výsledný vzhled přípravku .....	42
Obrázek 18 – Tiva C Controller [11] .....	42
Obrázek 19 – Zapojení AHF.....	43
Obrázek 20 – Připojení napájení a zátěže k AHF .....	44
Obrázek 21 – Blokové schéma zapojení AHF.....	44
Obrázek 22 – Průběh napětí, nelineární zátěž, dvoucestný usměrňovač .....	46
Obrázek 23 – Průběh proudu, nelineární zátěž, dvoucestný usměrňovač.....	46
Obrázek 24 – Průběh napětí, lineární zátěž.....	47
Obrázek 25 – Průběh proudu, lineární zátěž .....	48
Obrázek 26 – Průběh napětí, nelineární zátěž, jednocestný usměrňovač .....	49
Obrázek 27 – Průběh proudu, nelineární zátěž, jednocestný usměrňovač.....	49
Obrázek 28 – Blokový diagram L298N .....	51

## Seznam příloh

Příloha č.1 - Schéma zapojení

Příloha č.2 - BOM

Příloha č.3 - Přípravek výkonové části AHF

Příloha č.4 - Průběh napětí, nelineární zátěž s dvoucestným usměrňovačem

Příloha č.5 - Průběh proudu, nelineární zátěž s dvoucestným usměrňovačem

Příloha č.6 - Průběh napětí, lineární zátěž

Příloha č.7 - Průběh proudu, lineární zátěž

Příloha č.8 - Průběh napětí, nelineární zátěž, jednocestný usměrňovač

Příloha č.9 - Průběh proudu, nelineární zátěž, jednocestný usměrňovač