

Univerzita Hradec Králové  
Přírodovědecká fakulta

## **Bakalářská práce**

2016

Petr Jakubský

Univerzita Hradec Králové  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra fyziky

# **Zkreslení a filtrace síťového napětí na výstupu záložního zdroje**

Bakalářská práce

Autor: Petr Jakubský  
Studijní program: B1701 Fyzika  
Studijní obor: Fyzikálně-technická měření a výpočetní  
technika  
Vedoucí práce: doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc.

**Univerzita Hradec Králové**  
Přírodovědecká fakulta

**Zadání bakalářské práce**

**Autor:** **Petr Jakubský**

Studijní program: B1701 – Fyzika

Studijní obor: Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika

**Název závěrečné práce:** **Zkreslení a filtrace síťového napětí na výstupu záložního zdroje.**

**Cíl, metody, literatura, předpoklady:**

Teoretická část: principy DC/AC měničů, jejich výstupní signály, dolní a pásmové propusti. Zkreslení harmonických signálů, Fourierova analýza.

Praktická část: Měření na výstupu měniče, návrh a stavba dolnofrekvenční propusti pro frekvenci 50 Hz. Ověření funkce propusti na signálu zkresleném transformátorem s železným a feritovým jádrem a dále tlumivkou. Záznam a zpracování signálu digitálním osciloskopem. Měření na měniči se zátěží 25 a 100 W.

Frisch, Herbert: Základy elektroniky a elektronických obvodů Faktor,Z. a kol.: Transformátory a laděné cívky pro sdělovací techniku Krejčík.M., Veselka,J.: Elektrotechnické tabulky sdělovací a automatizační techniky Mařátko,J., Foitová, E. : Elektronické součástky a základní obvody Elektronika pro 3.roč. SPŠE

Garantující pracoviště: **katedra fyziky**

Vedoucí práce: doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc.

Konzultant:

Oponent: Radocha Karol, Ing. Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce: 16. 10. 2015

Datum odevzdání závěrečné práce: 08. 08. 2016

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval (pod vedením vedoucího bakalářské práce) samostatně a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

Ve Velkém Třebešově dne: 08. 08. 2016

## **Anotace**

JAKUBSKÝ, Petr. *Zkreslení a filtrace síťového napětí na výstupu záložního zdroje*. Hradec Králové: Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové, 2016. 48s. Bakalářská práce.

Bakalářská práce obsahuje dvě části. Část teoretická popisuje principy DC/AC měničů a dále jejich výstupní signály. Druhá část bakalářské práce zahrnuje návrh dolní propusti k záložnímu zdroji hq-inv600C/12, ověření funkce propusti na signálu zkresleném transformátorem s železným jádrem a dále tlumivkou, záznam a zpracování signálu digitálním osciloskopem. Měření na měniči se zátěží 25 a 100 W, měření zkreslení harmonických signálů a následně Fourierovu analýzu.

Klíčová slova: AC/DC měnič, frekvenční filtr, hq-inv600C/12, UPS, zkreslení harmonických signálů, Fourierova transformace

## **Annotation**

JAKUBSKÝ, Petr. Distortion and filtering mains voltage at the output of the UPS. Hradec Králové: Faculty of Science, University of Hradec Králové, 2016. 48p. Bachelor Thesis.

The Bachelor thesis contains two parts. The theoretical part describes principles of DC/AC inverters and their output signals. The second part includes the construction design of the lowpass to BPS hq-inv600C/12, verification of throughput function on the signal distorted by a transformer with iron core and furthermore a choke, then recording and signal processing with the help of a digital oscilloscope. Measurements on the inverter with load of 25 and 100 W, measurements of harmonic signals distortions, and subsequently Fourier analysis.

Key words: AC/DC inverters, frequency filter, hq-inv600C/12, UPS, harmonic signals distortion, Fourier transform

# Obsah

Úvod.....	8
<b>1 Teoretická část:.....</b>	<b>9</b>
1.1 Úvod:.....	9
1.2 Rozdělení měničů napětí.....	9
1.2.1 Analogový princip měničů.....	9
1.2.2 Měniče napětí na principu spínaného zdroje.....	9
1.2.3 Podle tvaru výstupního signálu:.....	9
<b>2 Funkce a parametry měničů napětí.....</b>	<b>11</b>
2.1 Funkce UPS ( <i>Uninterruptible Power Supply/Source</i> ).....	11
2.2 Výkon trvalý a špičkový výstupní výkon.....	11
2.3 Ochrany měničů napětí.....	11
<b>3 Dolní a pásmové propusti.....</b>	<b>12</b>
3.1 Napěťový přenos.....	13
3.2 Dolní propust.....	15
3.3 Příklady možných zapojení dolních propustí.....	15
3.4 Horní propust.....	16
3.5 Pásmová propust.....	17
3.6 Příklady možných zapojení pásmových propustí.....	18
<b>4 Zkreslení harmonických signálů.....</b>	<b>18</b>
4.1 Harmonické zkreslení- THD (Total harmonic distortion).....	18
4.2 Intermodulační zkreslení.....	19
4.3 Frekvenční zkreslení.....	20
4.4 Fázové zkreslení.....	20
4.5 Přečtové zkreslení.....	20
<b>5 Fourierova transformace.....</b>	<b>21</b>
5.1 Fourierova věta a Fourierův rozvoj.....	21
5.2 Zjednodušení Fourierova rozvoje.....	22
5.3 Matematická metoda harmonické analýzy.....	24
5.4 Numerická metoda harmonické analýzy.....	24
<b>6 Praktická část:.....</b>	<b>25</b>
6.1 Záložní zdroj HQ-INV600C/12.....	25
6.2 Měření na výstupu měniče.....	26
6.3 Návrh dolnofrekvenční propusti pro 50Hz.....	29
6.4 Konstrukce.....	31
6.5 Ověření funkce dolnofrekvenční propusti.....	32
6.5.1 Simulace v programu Micro-Cap 11.0.1.4.....	32
6.5.2 Reálné zapojení dolnofrekvenční propusti.....	33
6.5.3 Měřící pracoviště.....	33
6.5.4 Akumulátor.....	34

6.6	Ověření funkce dolnofrekvenční propusti na signálu zkresleným transformátorem.....	36
6.7	Doplnění dolnofrekvenčního filtru o síťový odrušovací filtr .....	37
6.8	Průběh na výstupu dolnofrekvenční propusti s odrušovacím filtrem .....	37
6.9	Zkreslení harmonického signálu zvonkovým transformátorem .....	40
6.9.1	Parametry zvonkového transformátoru.....	40
6.9.2	Ukázka zkreslení na výstupu nezátíženého zvonkového transformátoru. .	40
6.10	Zkreslení harmonického signálu tlumivkou .....	43
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Seznam použité literatury a zdrojů .....</b>	<b>46</b>



# Úvod

Tato práce je zaměřena na použití záložních zdrojů s modifikovaným sinusem a možnostech filtrace výstupního signálu. V této práci se budu zabývat měřeními na záložním zdroji HQ-INV600C/12 který mi byl k tomuto účelu zapůjčen vedoucím mé práce.

# 1 Teoretická část:

## 1.1 Úvod:

Záložní zdroj pracuje na principu měniče elektrické energie. Jsou to elektrotechnická zařízení navržena a zkonstruována k účelu měnit napětí. Zpravidla mění malá stejnosměrná napětí na napětí střídavá s parametry odpovídajícím síťovému napětí.

Obecně se měniče používají v situacích, kdy není k dispozici síťový zdroj elektrické energie. Jejich použití je časté ve funkci záložního zdroje pro zařízení, která chceme udržet v činnosti při výpadku elektrické energie. Další způsob využití může být při cestování autem kdy máme k dispozici zásuvku zapalovače. Toto napětí je potřeba měnit (transformovat) pro napájení např. notebooku nebo ledniček a dalších přístrojů, které nemají možnost napájení přímo zásuvkou zapalovače v automobilu.

## 1.2 Rozdělení měničů napětí

Měniče můžeme dělit podle několika kritérií:

Podle konstrukce měničů napětí buď konstruovaných na 12 nebo 24voltový zdroj.

### 1.2.1 Analogový princip měničů

Tento typ měničů napětí pracuje na analogovém principu, jedná se o nejstarší kategorii. Řídící elektronika zajišťuje buzení hlavních výkonových prvků (bipolární tranzistory, tranzistory typu FET) výstupní průběh nabývá zpravidla tvaru obdélníku, modifikovaného sinusu či sinus. Výstupní obvod je galvanicky oddělen transformátorem. Napětí z výkonových spínacích prvků měniče napětí je přiváděné na transformátor. Řízení činnosti měniče napětí je analogové.

### 1.2.2 Měniče napětí na principu spínaného zdroje

Tento typ požívá nejčastěji výstup s modifikovaným sinusem. Princip činnosti se liší v tom, že není transformováno napětí na výstupu. Ale využívá se principů modernějších spínaných zdrojů. Kde je nejprve nízké bateriové napětí transformováno na vysoké napětí, které je následně komutováno do tvaru modifikované sinusovky. Při této komutaci je dosaženo vysoké účinnosti. A tyto měniče mohou být lehké a malé s malou vlastní spotřebou na rozdíl od analogových měničů, které bývají kvůli výstupnímu transformátoru hmotnější při shodném výkonu.

### 1.2.3 Podle tvaru výstupního signálu:

Měniče napětí s obdélníkovým výstupním napětím.

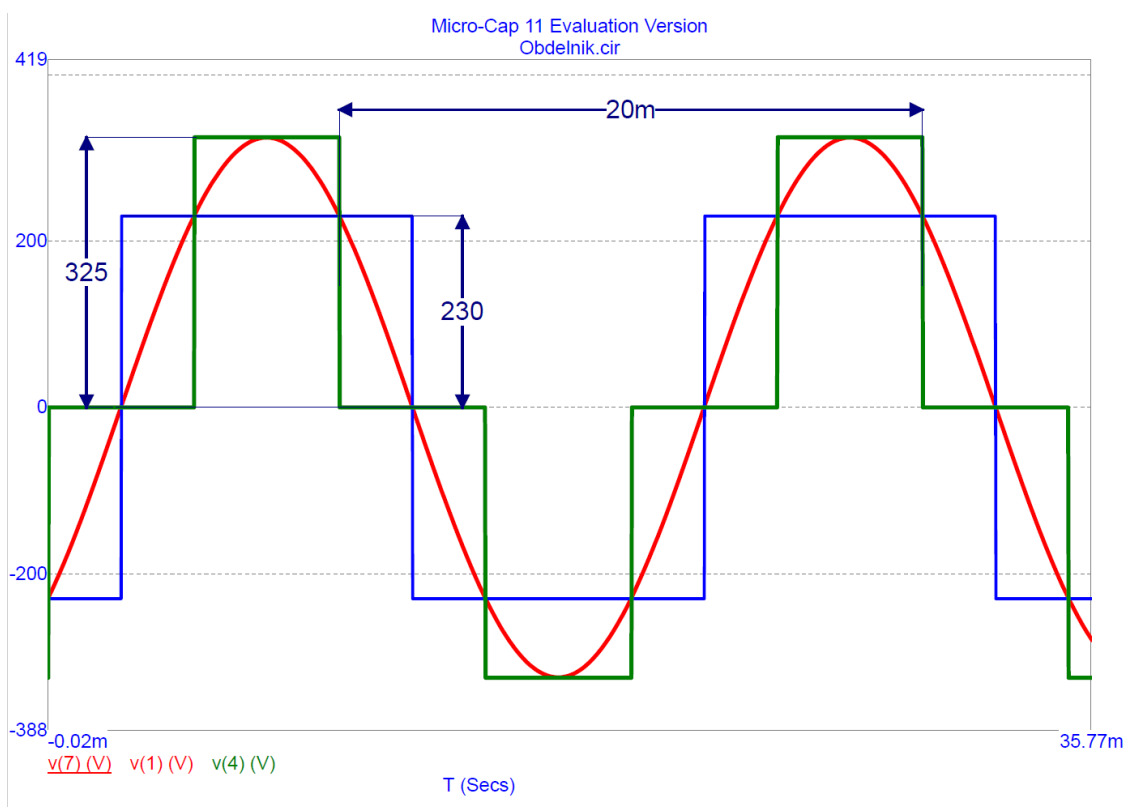
Tento typ se již prakticky nepoužívá, protože je zastaralý. Má několik nevýhod oproti dalším typům měničů. Nevýhodou je amplituda výstupního napětí, která je pouze 230V. Na rozdíl od sinusového průběhu, který má amplitudu 325V. Efektivní hodnota je shodná s efektivní hodnotou sinusového průběhu ale amplituda nikoli. Tento problém se projeví u spotřebičů, které mají na svém vstupu usměrňovač. Po usměrnění získáme napětí, které bude téměř o 30% nižší oproti usměrnění zdroje se sinusovým průběhem.

Měniče napětí s modifikovanou sinusovkou.

Průběh výstupního napětí tohoto měniče se více podobá obdélníkovému, než sinusovému průběhu. Jedná se o měniče, které jsou levnější než měniče s čistým sinusem. Jejich výhodou je že mají výstupní parametry, které se více blíží čistému sinusovému průběhu. Měniče napětí s modifikovaným sinusem mají stejnou efektivní hodnotu výstupního napětí a také mají stejnou amplitudu jako sinusový průběh tedy 325V. Problém může nastat při napájení citlivé elektroniky např. LCD monitorů kde může dojít například k chybnému zobrazování, v případě pohanění motorů může docházet ke zvýšené hlučnosti a zvýšenému zahřívání. Modifikovaný sinus může způsobit další poruchy chodu spotřebičů.

Měniče napětí se sinusovým průběhem.

Tento typ měniče má na výstupu hladký sinusový průběh. Proto je možné napájet takovýmto měničem jakoukoli spotřební elektroniku. Jediné omezení je výstupní výkon měniče. Obecně platí, že čím více se výstupní průběh blíží sinusovému, tím nižší účinnost bude daný měnič napětí mít. Měniče napětí s obdélníkovým průběhem nebo modifikovaným sinusem dosahují účinnosti okolo 90% u sinusového měniče napětí je účinnost asi 60%.



**Obr. 2-1:** Porovnání parametrů jednotlivých výstupních průběhů  $U=f(t)$ .

modrý průběh- výstup měniče napětí s obdélníkovým výstupním napětím  
zelený průběh- výstup měniče napětí s modifikovaným sinusovým průběhem  
červený průběh- výstup měniče napětí s čistě sinusovým průběhem

## 2 Funkce a parametry měničů napětí

### 2.1 Funkce UPS (*Uninterruptible Power Supply/Source*)

Je to důležitá funkce měničů napětí (záložních zdrojů) zajišťující nepřerušené napájení spotřebiče při výpadku elektrické sítě. Při běžném provozu je spotřebič napájen z elektrické sítě (měnič napětí je v režimu ByPass). V tomto režimu měnič aktivně nenapájí spotřebič pomocí akumulátoru, ale na jeho výstup je přivedeno síťové napětí. Dojde-li k výpadku elektrické sítě, měnič napětí tento výpadek detekuje a režim ByPass je vypnut, následně dojde k napájení spotřebiče z měniče napětí. Ten začne odebírat výkon z připojeného akumulátoru. V takovém případě měnič hlídá napětí akumulátoru, aby nedošlo k jeho poškození a eventuálnímu zničení. V případě že napětí klesne pod danou mez, spotřebič přestane být napájen měničem napětí. Je-li obnoveno napájení z elektrické sítě, spustí se automatické nabíjení, aby byl akumulátor znovu připraven na další výpadek. Funkce UPS se často používá jako záložní zdroje pro oběhová čerpadla, záložní zdroje pro PC a servery, záložní zdroje pro zabezpečovací techniku, aj.

### 2.2 Výkon trvalý a špičkový výstupní výkon

Výrobce měničů napětí zpravidla uvádějí dva typy výkonů a to trvalý a špičkový výkon. Trvalý výkon je označení pro výkon, který je schopen měnič dodávat delší dobu. Špičkový výkon může měnič napětí dodat jen po několik stovek milisekund. Špičkový výkon lze využít především v době spuštění spotřebiče, kdy spotřebič pro svůj rozběh může potřebovat i několiknásobek provozního příkonu. Ovšem tato napěťová špička musí být dostatečně krátká. U motorů je tato doba zpravidla delší než stovky milisekund. A příkon takového motoru při rozběhu může dosahovat až několiknásobku spotřeby udávané na štítku. Proto nemusí být měnič napětí schopen správně pracovat, a jeho použití je dobré dopředu znát.

### 2.3 Ochrany měničů napětí

#### **Ochrana proti přetížení:**

Jedná se o ochranu, která v případě přetížení měniče vlivem odběru vysokého proudu spotřebič odpojí.

#### **Ochrana proti vysokému stejnosměrnému napětí na vstupu:**

Tento typ chrání měnič napětí v případě, kdy se objeví na výstupu vysoké napětí, které vzniká při odpojování spotřebiče s induktivním charakterem.

#### **Proti zkratová ochrana střídavého výstupu:**

Tato ochrana zabraňuje zničení měniče napětí při poruše vyvolávající zkrat na výstupu měniče.

#### **Ochrana polarity baterie:**

Ochrana měniče napětí v případě přepólování vstupních svorek na akumulátoru.

### Tepelná ochrana:

Ochrana proti přehřátí měniče napětí. Přesáhne-li teplota měniče napětí povolenou mez, tepelná ochrana měnič napětí vypne a předejde tak jeho zničení.

### Ochrana akumulátoru proti hlubokému vybití baterie:

Tato ochrana chrání olověné akumulátory, které jsou citlivé na tzv. hluboké vybití. Pokud je akumulátor opakovaně zcela vybit výrazně se zkracuje se jeho životnost. Tato ochrana průběžně monitoruje napětí akumulátoru, a pokud napětí klesne pod 10V (u 12V akumulátoru) nebo pod 20V (u 24V akumulátoru) akumulátor je automaticky od měniče napětí odpojen. Často bývá instalována v měniči napětí zvuková výstraha, která před opojením baterie, upozorní uživatele s dostatečným předstihem dopředu, aby uživatel mohl bezpečně vypnout dané spotřebiče (například počítač), než dojde k odpojení baterie.

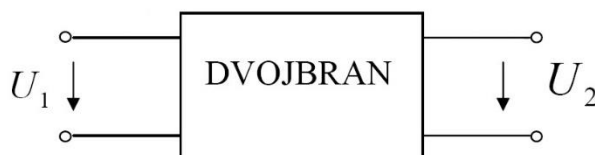
### SoftStart:

Je funkce, kterou jsou převážně vybaveny typy měničů napětí s vysokým výkonem. Tato funkce omezuje proudový náraz, při spuštění měniče. Napětí a proud je po spuštění zvyšován postupně. Tímto způsobem může být zajištěn chod spotřebiče, který má při svém spuštění proudový náraz a nemusel by být řádně či vůbec spuštěn měničem napětí bez této funkce.

[1]

## 3 Dolní a pásmové propusti

Dolní a pásmové propusti spadají od oblasti frekvenčních filtrů. Frekvenční filtry jsou lineární elektrické obvody (jednobrany, dvojbrany). Dvojbrany mají dvě dvojice svorek vstupní a výstupní. Frekvenční filtry zpracovávají vstupní signál v předem zvoleném frekvenčním rozsahu, tento zpracovaný signál je přiveden na svorky výstupní. Filtry jsou navrhovány tak aby určité frekvenční složky propouštěli téměř bez útlumu v tzv. propustném pásmu a jiné frekvenční složky potlačili v tzv. útlumovém pásmu (potlačeném pásmu, nepropustném pásmu).



Obr. 3-1: Dvojbran

Důležité uplatnění frekvenčních filtrů je v radiotechnice pro výběr přijímaných signálů. Za anténou je zařazen laditelný selektivní frekvenční filtr. Filtrem projde uživatelem zvolené frekvenční pásmo, které je následně zpracováváno, ostatní pásma jsou potlačena.

Dále v audio technice, v korekčních předzesilovačích kdy se dané filtry uplatňují pro zesílení či potlačení daného frekvenčního pásma (basy, středy a výšky). Či pro

frekvenční výhybky v reproduktorech, v případě více pásmových reproduktorových soustav se před daný reproduktor zařazuje frekvenční výhybka, ta propouští jen dané frekvenční pásmo, na které je daný reproduktor navržen. Používání filtrů je v elektrotechnice velmi časté a v určité míře se uplatňuje téměř v každé její oblasti.

### 3.1 Napět'ový přenos

Obecně je přenos dán poměrem výstupní veličiny a veličiny vstupní.

Důležitou charakteristickou veličinou těchto obvodů, je jejich napět'ový přenos „ $A$ “.

Je definován vztahem: 
$$A = \frac{U_2}{U_1}$$

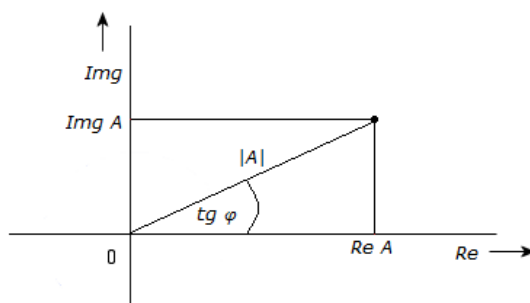
Kde:  $U_1$ ..... je vstupní napětí  
 $U_2$ ..... je výstupní napětí

Přenos dvojbranu je komplexní číslo, které závisí na frekvenci.  
 Vyjadřujeme ho ve dvou tvarech:

#### a) Složkový tvar:

$$A = Re A + jIm A$$

Kde:  $ReA$ .....je reálná složka přenosu  
 $ImA$ .....je imaginární složka přenosu  
 $j$ .....imaginární jednotka (v elektrotechnický popisech se nepoužívá označení  $i$ )



**Obr. 4-1:** Rovina komplexních čísel.

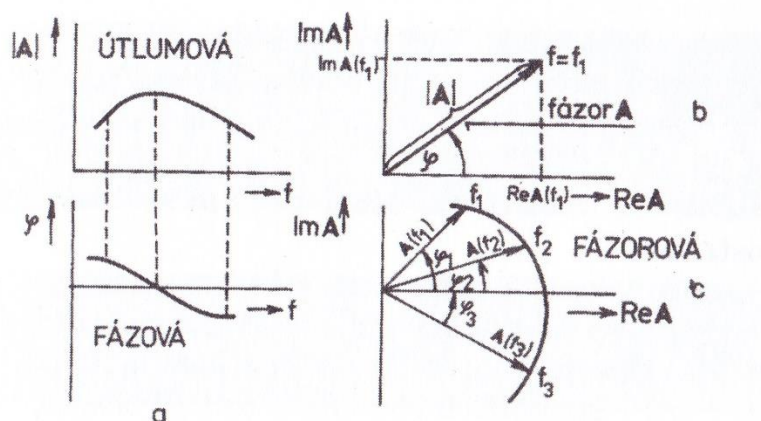
#### b) Exponenciální tvar:

$$A = |A|e^{j\varphi}$$

Absolutní hodnota  $A$ : 
$$|A| = \sqrt{Re^2 A + Im^2 A}$$

Fáze  $\varphi$ : 
$$\varphi = \arctg \frac{Im A}{Re A}$$

Vlastnosti daného filtru se vyjadřují pomocí **útlumové a fázové charakteristiky**.



**Obr. 4-2:** Útlumová a fázová charakteristika. Zdroj[1]

Přenos „a“ se obvykle vyjadřuje v decibelech (dB).  $a = 20 \log \left| \frac{U_2}{U_1} \right|$

Jedná se o logaritmickou jednotku, která je vhodná pro popis značně rozsáhlého frekvenčního pásma, které je vynášeno na vodorovnou osu.

[2]

Základní dělení frekvenčních filtrů

**Analogové:**

- pasivní a aktivní
  - Dělení podle propuštěných frekvencí:
    - dolní propust (lowpass)
    - horní propust (hipass)
    - pásmová propust (passband)
    - pásmová zádrž (notch filter)
    - ◆ Dělení podle řádu filtru

**Digitální:**

- filtr s nekonečnou impulzní odezvou (IIR)
- filtr s konečnou impulzní odezvou (FIR)

[3]

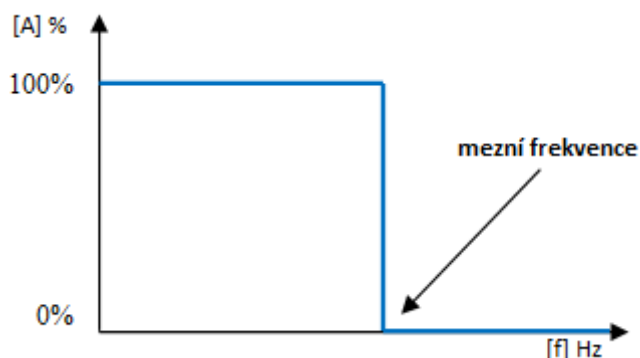
**Pasivní a aktivní analogové frekvenční filtry**

Pasivní frekvenční filtry jsou realizovány pomocí základních součástek rezistoru, cívky a kondenzátoru. Pomocí těchto součástek lze realizovat frekvenční filtry typu LC, LR, RC a RLC.

Aktivní frekvenční filtry využívají stejné principy jako pasivní filtry s tím rozdílem, že jsou doplněny o aktivní prvek nejčastěji operační zesilovač či tranzistor. Tento aktivní prvek musí mít svůj zdroj elektrické energie, aby mohl kompenzovat ztráty, které vznikají na jednotlivých součástkách.

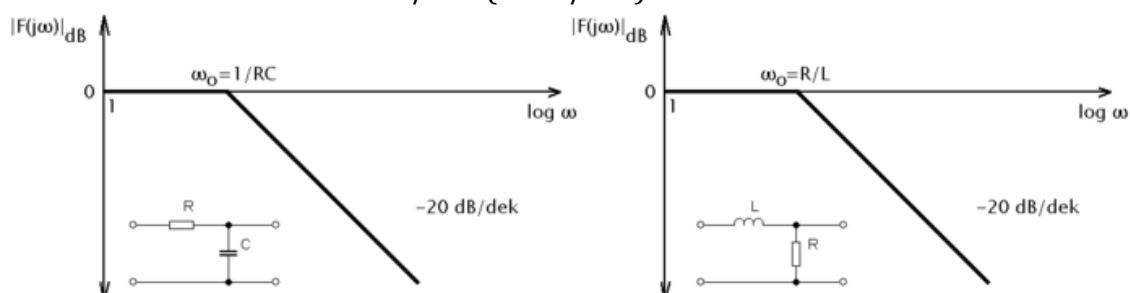
### 3.2 Dolní propust

Jedná se o druh frekvenčního filtru navrženého tak aby propouštěl pouze frekvence nižší než je mezní frekvence. V ideálním případě by měla frekvenční charakteristika tuto podobu.



Obr. 4-3: Frekvenční charakteristika ideální dolní propusti.

U reálných obvodů dolních propustí nedosáhneme takto strmého klesání přenosu v oblasti mezní frekvence. Strmost klesání udává řád filtru. V případě filtru 1. řádu přenos klesá se strmostí 20dB/dec to odpovídá poklesu o 6dB/oct. analogicky filtr 2. řádu klesá se strmostí 40dB/dec (12dB/oct.).



Obr. 4-4: Logaritmicke-amplitudová frekvenční charakteristika dolní propusti 1. řádu (integračního článku). Zdroj[2]

### 3.3 Příklady možných zapojení dolních propustí.

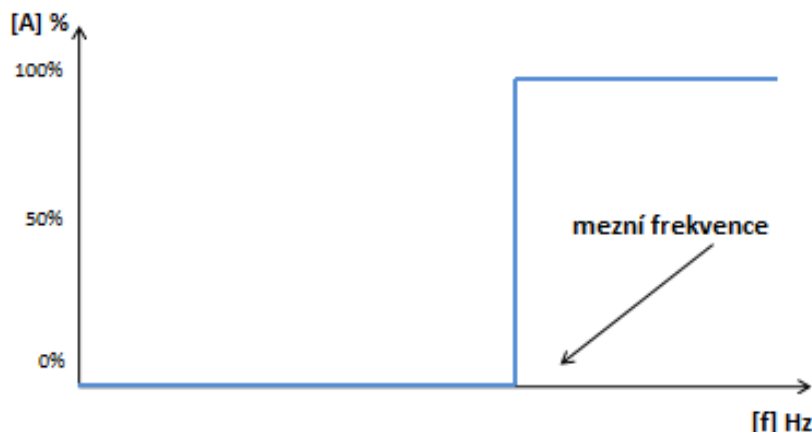
	6 dB / oct.	12 dB / oct.	18 dB / oct.
dolní propust LP			
	$L = \frac{R}{2\pi f_{dd}}$	$L = \frac{R}{\pi f_{dd}}, \quad C = \frac{1}{4\pi f_{dd} R}$	$L_2 = \frac{R}{4\pi f_{dd}}, \quad C = \frac{2}{3\pi f_{dd} R},$ $L_1 = 3L_2$

Obr. 4-5: Zapojení dolních propustí 1. 2. a 3. řádu. Zdroj[3]



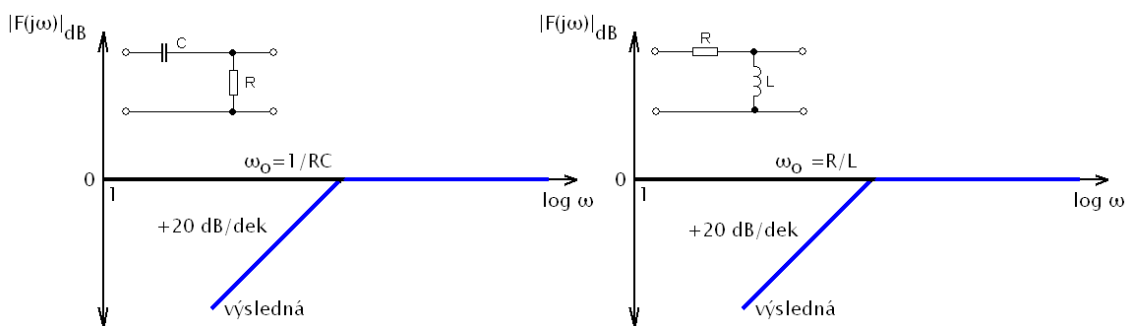
### 3.4 Horní propust

Jedná se o druh frekvenčního filtru navrženého tak aby propouštěl pouze frekvence vyšší než je mezní frekvence. V ideálním případě by měla frekvenční charakteristika tuto podobu.



**Obr. 4-6:** Frekvenční charakteristika ideální horní propusti.

U reálných obvodů horních propustí (stejně jako u dolních propustí) nedosáhneme takto strmého stoupání (klesání) přenosu v oblasti mezní frekvence. Strmost klesání udává řád filtru. Obdobně jako u dolních propustí. V případě filtru 1. řádu přenos stoupá se strmostí 20dB/dek to odpovídá vzestupu o 6dB/oct. analogicky filtr 2. řádu stoupá se strmostí 40dB/dek (12dB/oct.).



**Obr. 4-7:** Logaritmicke-amplitudová frekvenční charakteristika derivačního článku. Zdroj[4]

Mezní frekvence jsou dány vztahy:

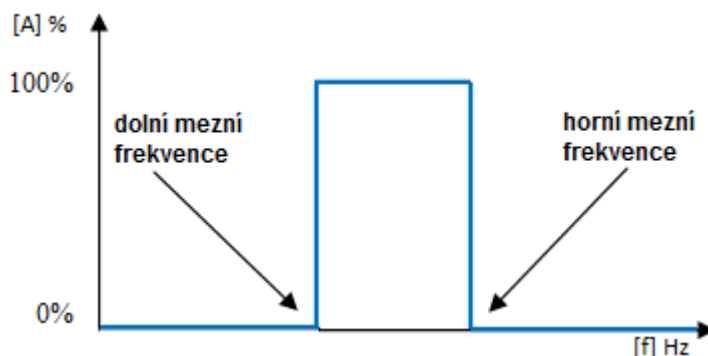
Pro dolní, horní propust tvořenou RC členy-  $f_{d,h} = \frac{1}{2\pi RC}$

Pro dolní, horní propust tvořenou LR členy-  $f_{d,h} = \frac{R}{2\pi L}$

Mezní frekvence je frekvence, při které nastal pokles napěťového přenosu o 3dB.

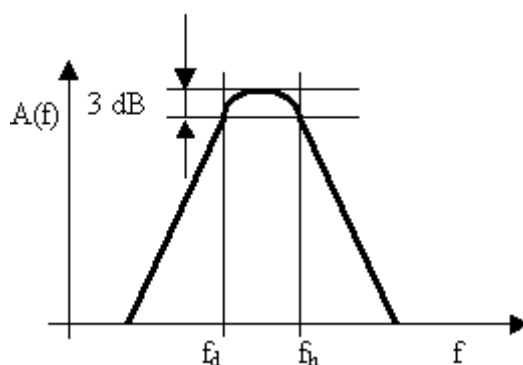
### 3.5 Pásmová propust

Jedná se o druh frekvenčního filtru navrženého tak aby propouštěl frekvenční pásmo mezi dolní mezní frekvencí a horní mezní frekvencí. V ideálním případě by měla frekvenční charakteristika tuto podobu.



**Obr. 4-8:** Ideální frekvenční charakteristika pásmové propusti.

Nejjednodušší pásmová propust je tvořena dvojicí horní propust a dolní propust. U reálných obvodů klesá přenos v oblasti mezní frekvence s danou strmostí, která závisí na řádu daného filtru. Na obrázku (Obr.4-9) je znázorněna frekvenční charakteristika skutečné pásmové propusti.



**Obr. 4-9:** Reálná amplitudově frekvenční charakteristika pásmové propusti.  
Zdroj[5]

### 3.6 Příklady možných zapojení pásmových propustí.

pásmová propust BP			
	$C = \frac{1}{2\pi f_{dd} R}, \quad L = \frac{R}{2\pi f_{dh}}$	$f_3 = f_{dd} \sqrt{\frac{f_{dh}}{f_{dh} - f_{dd}}},$ $f_4 = f_3 \frac{f_{dh} - f_{dd}}{f_{dd}},$ $L_1 = \frac{R}{\pi f_4}, \quad C_2 = \frac{1}{4\pi f_4 R},$ $L_2 = \frac{R}{\pi f_3}, \quad C_1 = \frac{1}{4\pi f_3 R}$	$f_3 = f_{dd} \sqrt{\frac{f_{dh}}{f_{dh} - f_{dd}}},$ $f_4 = f_3 \frac{f_{dh} - f_{dd}}{f_{dd}},$ $L_2 = \frac{R}{4\pi f_4}, \quad L_1 = 3L_2,$ $C_3 = \frac{2}{3\pi f_4 R}, \quad C_1 = \frac{1}{3\pi f_3 R},$ $C_2 = 3C_1, \quad L_3 = \frac{3R}{8\pi f_3}$

Obr. 4-10: Zapojení pásmových propustí 1. 2. a 3. řádu. Zdroj[3]

## 4 Zkreslení harmonických signálů

Zkreslení je zpravidla nežádoucí tvarová změna signálu. Ke zkreslení může docházet nejen v průběhu zpracování signálu ale i během jeho vedení. Je zpravidla způsobeno parazitní kapacitou, indukčností vedení či nedostatečným stíněním vodičů.

Nelineární zkreslení:

- harmonické
- intermodulační
- amplitudové

Lineární zkreslení:

- frekvenční
- fázové
- přechodové

### 4.1 Harmonické zkreslení- THD (Total harmonic distortion)

Je způsobeno nelinearitou voltampérové charakteristiky polovodičových nebo magnetických prvků elektrického obvodu. Na nelineárních prvcích vznikají vyšší harmonické frekvence, které ovlivňují vstupní signál.

THD definuje zkreslení sinusového signálu. Je definována jako poměr součtu výkonů vyšších harmonických frekvencí k výkonu základní harmonické. THD posuzuje rozsah zkreslení původního signálu ovlivněného vyššími harmonickými frekvencemi. Výpočet je založen na rozkladu pomocí Fourierovy řady v amplitudově-fázovém zápisu.

$$THD = \frac{\sum \text{výkon vyšších harmonických}}{\text{výkon základní harmonické}}$$

Činitel harmonického zkreslení můžeme počítat i pro napětí nebo proud.

$$\text{Činitel harmonického zkreslení pro napětí: } THD_u = k_h = \frac{\sqrt{U_2^2 U_3^2 + \dots + U_N^2}}{\sqrt{U_1^2 U_2^2 + \dots + U_N^2}} * 100 [\%]$$

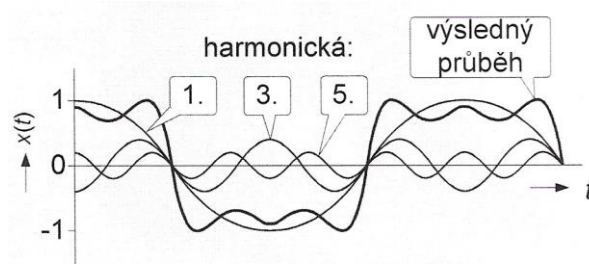
$$\text{Činitel harmonického zkreslení pro proud: } THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 I_3^2 + \dots + I_N^2}}{\sqrt{I_1^2 I_2^2 + \dots + I_N^2}} * 100 [\%]$$

Pokud platí že:  $U_1^2 \gg U_2^2 \gg U_3^2 + \dots + U_N^2$  ; poté platí:

$$k_h = \frac{\sqrt{U_2^2 U_3^2 + \dots + U_N^2}}{U_1} * 100 [\%]$$

kde:  $U_1$ ..... napětí základní harmonické  
 $U_2, U_3, U_4$ ..... napětí vyšších harmonických

Příklad zkreslení sinusového průběhu vlivem vyšších harmonických frekvencí (Obr.5-1).



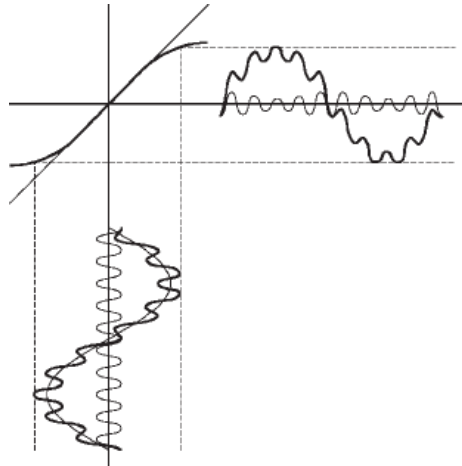
**Obr. 5-1:** Harmonické zkreslení sinusového signálu vlivem 3. a 5. harmonickou frekvencí. Zdroj[6]

[4]

## 4.2 Intermodulační zkreslení

Přivedeme-li na vstup nelineárního prvku současně více sinusových signálů s rozdílnými frekvencemi, vlivem nelinearity přenosové charakteristiky vznikají součty a rozdíly vyšších harmonických frekvencí a základní harmonických frekvencí.

Příklad intermodulačního zkreslení dvou sinusových signálů o různých frekvencích (Obr.5-2).



**Obr. 5-2:** Intermodulační zkreslení dvou vstupních signálů. Zdroj[7]

[5]

### 4.3 Frekvenční zkreslení

Jedná se o lineární zkreslení, vzniká závislostí napětového zesílení  $A_u$  a frekvencí vstupního signálu. Je zobrazováno a amplitudově frekvenční charakteristice.

Činitel frekvenčního zkreslení je definován pomocí vztahu:

$$k_f = \frac{A_{f0}}{A_f}$$

kde:  $A_{f0}$ ..... je zesílení při referenční frekvenci

$A_f$ ..... je zesílení při měřené frekvenci

[6]

### 4.4 Fázové zkreslení

Je to druh zkreslení, které vzniká jako rozdíl mezi fází výstupního a vstupního signálu.

Činitel fázového zkreslení je definován pomocí vztahu:

$$k_\varphi = \varphi_{výst.} - \varphi_{vstup.} \quad [k_\varphi] = ^\circ$$

kde:  $\varphi_{výst.}$ ..... je fáze na výstupu

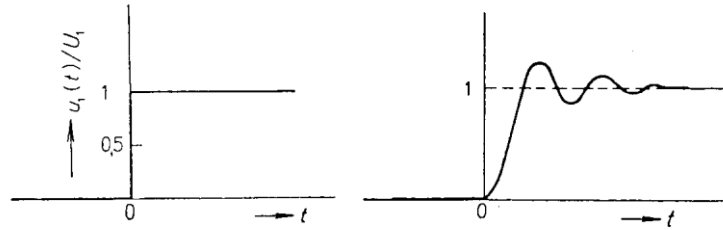
$\varphi_{vstu}$ ..... je fáze na vstupu

[7]

### 4.5 Přechodové zkreslení

Tento druh zkreslení vzniká na náběžných a sestupných hranách. Nejčastěji pravoúhlých průběhu. Obecně u průběhů kde dochází k výrazné napětové změně za krátký okamžik.

Toto zkreslení je převážně způsobeno kapacitami a indukčnostmi v daném obvodu. V levé části obr (Obr.3-13) je pravoúhlý impulz, který byl přiveden na vstup dvojbranu. V pravé části je stejný impulz na výstupu dvojbranu, zde je vidět přechodové zkreslení, které vzniklo na náběžné hraně pravoúhlého pulzu.



**Obr. 5-3:** Odezva obvodu na jednotkový skok-vlevo vstupní signál, vpravo výstupní zkreslený signál. Zdroj[8]

[6]

## 5 Fourierova transformace

### 5.1 Fourierova věta a Fourierův rozvoj

Každá jednoznačně určená, periodická funkce  $F(t)$  (s opakovací periodou  $T$  a s opakovacím kmitočtem  $f_0 = \frac{1}{T}$ ), která má v intervalu  $T$  konečný počet extrémů a nespojností, může být vyjádřena nekonečnou goniometrickou řadou ve tvaru:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + a_3 \cos 3\omega_0 t + \dots + a_n \cos n\omega_0 t + b_1 \sin \omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t + b_3 \sin 3\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t$$

Práva strana rovnice je tzv. Fourierův rozvoj (Fourierova řada) funkce  $F(t)$ . Člen řady  $a_0$  je střední hodnota funkce  $F(t)$  za dobu  $T$  (říká se mu také stejnosměrná složka). V tomto tvaru Fourierův rozvoj obsahuje členy, které nazýváme sinovými a kosinovými složkami. Argumenty goniometrických funkcí obsahují celočíselné násobky první harmonické frekvence  $f_0$  analyzovaného průběhu  $F(t)$ . Členy  $a_1, \dots, a_n$ ;  $b_1, \dots, b_n$  jsou tzv. Fourierovy součinitelé.

Díky platnosti vztahu:

$$a_1 \cos \omega_0 t + b_1 \sin \omega_0 t = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$$

se dvojice členů se stejnou úhlovou frekvencí ( $\omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0, \dots, n\omega_0$ ) spojí do nového členu. Průběh  $A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$  má první úhlovou frekvenci jako průběh  $F(t)$ .

Kde:  $A_1$ ..... je amplituda první harmonické frekvence

$\varphi_1$ ..... je fáze první harmonické frekvence

Pro vyšší harmonické frekvence (2 až n) a platí:

$$a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t = A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n)$$

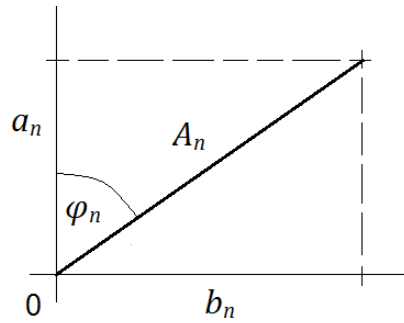
Takto můžeme Fourierův rozvoj zapsat ve tvaru:

$$F(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega_0 t - \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega_0 t - \varphi_2) + A_3 \cos(3\omega_0 t - \varphi_3) + \dots + A_n \cos n \omega_0 t - \varphi_n$$

Kde:  $A_0$ ..... je stejnosměrná složka ( $A_0 = a_0$ )

$A_1 \cos(\omega_0 t - \varphi_1)$ ..... je první harmonická

Přepočítání mezi jednotlivými tvary Fourierovy řady.



**Obr. 5-4:** Vzájemná souvislost mezi:  $\varphi_n, a_n, b_n, A_n$ .

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{a} \quad \varphi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n}$$

Obrácený přepočít:

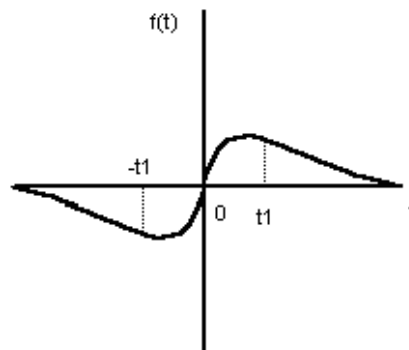
$$a_n = A_n \cos \varphi_n \quad \text{a} \quad b_n = A_n \sin \varphi_n$$

## 5.2 Zjednodušení Fourierova rozvoje

Platí několik pravidel, která slouží ke zjednodušení analyzovaných signálů:

a) Je-li funkce  $F(t)$  lichá ( $F(-t) = -F(t)$ ). Fourierův rozvoj se zjednoduší. Všechny jeho součinitelé obsahující kosinové složky vyjdou nulové, Fourierův rozvoj bude mít v tomto případě tento tvar:

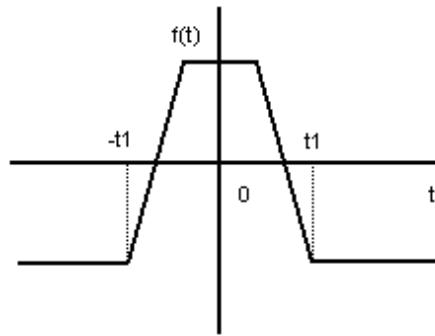
$$F(t) = b_1 \sin \omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t + \dots + b_n \sin n\omega_0 t$$



**Obr. 6-1:** Lichá funkce. Zdroj[9]

b) V případě je-li funkce  $F(t)$  sudá ( $F(-t) = F(t)$ ). Fourierův rozvoj se také zjednoduší v tomto případě součinitelé obsahující sinové složky budou nulové a výsledný tvar Fourierova rozvoje bude:

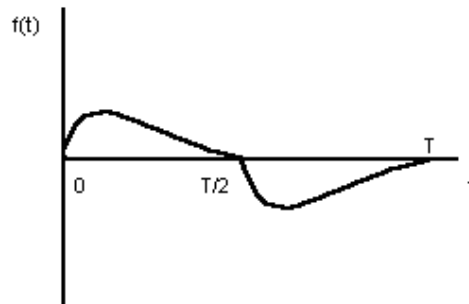
$$F(t) = a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + \dots + a_n \cos n\omega_0 t$$



**Obr. 6-2.** Sudá funkce. Zdroj[9]

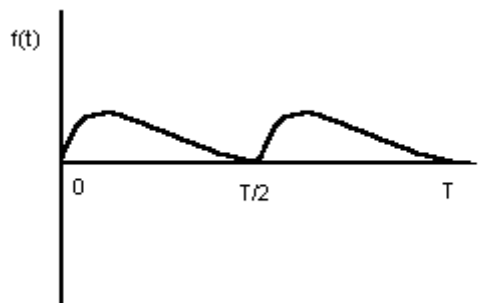
c) Pokud se hodnoty analyzovaného signálu z první poloviny periody opakují v druhé polovině periody s opačným znaménkem  $F\left(t + \frac{T}{2}\right) = -F(t)$ . Bude výsledný Fourierův rozvoj obsahovat pouze liché členy, jeho tvar bude:

$$F(t) = A_1 \cos(\omega_0 t - \varphi_1) + A_3 \cos(3\omega_0 t - \varphi_3) + A_5 \cos(5\omega_0 t - \varphi_5) + \dots$$



**Obr. 6-3.** Zdroj[9]

d) Pro případ kdy se hodnoty analyzovaného signálu opakují v druhé polovině periody se stejným znaménkem  $F\left(t + \frac{T}{2}\right) = F(t)$ . Bude výsledný Fourierův rozvoj obsahovat pouze sudé členy, jeho tvar bude:  $F(t) = A_0 + A_2 \cos(2\omega_0 t - \varphi_2) + A_4 \cos(4\omega_0 t - \varphi_4) + \dots$



**Obr.6-4.** Zdroj[9]



### 5.3 Matematická metoda harmonické analýzy

Pro výpočet součinitelů  $A_0$ ,  $a_n$  a  $b_n$  platí následující vztahy:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos n\omega_0 t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin n\omega_0 t dt$$

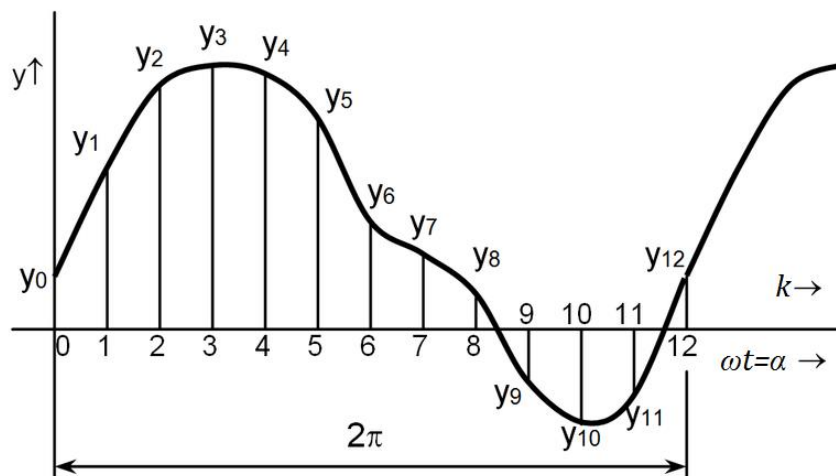
### 5.4 Numerická metoda harmonické analýzy

V případě kdy neznáme analytické vyjádření analyzovaného průběhu. Ale máme k dispozici jeho grafický záznam. Jeho harmonickou analýzu provedeme následovně.

- 1) periodu  $T$  rozdělíme na  $c$  stejných dílků  $\Delta\alpha = \frac{2\pi}{T}$

Abychom zajistili dostatečně přesné zanalyzování i vyšších harmonických, volíme počet dílků “ $c$ ” podle poučky  $c \geq 2n + 2$

Kde:  $n$ ..... je pořadí nejvyšší harmonické, obsažené v analyzovaném signálu



**Obr. 6-5:** Grafické znázornění signálu- pro metodu harmonické analýzy. Zdroj[10]

Velikost svislé úsečky demonstrující amplitudu v daném časovém okamžiku označíme  $y_k$ . Kde  $k$  je přirozené číslo s rozsahem hodnot od 1 do  $c$ .

Z grafického znázornění (Obr.6-5) je patné, že čím větší zvolíme počet dílků  $c$ , tím přesněji zanalyzujeme daný průběh. Pokud zvolíme nízký počet dílků  $c$ , může dojít ke ztrátě informace o vyšší harmonické frekvenci.

Nyní můžeme upravit předchozí integrační vztahy tak abychom je mohli použít pro průběh s diskrétními hodnotami.

$$t \approx \alpha = \omega t$$

$$dt \approx \Delta\alpha \frac{2\pi}{c}$$

$$T \approx \frac{2\pi}{c}$$

$$\int \approx \sum$$

Nyní můžeme přepsat vztahy do pohody:

$$a_n = \frac{2}{c} \sum_{k=1}^{k=c} y_k \cos n\alpha_k$$

$$b_n = \frac{2}{c} \sum_{k=1}^{k=c} y_k \sin n\alpha_k$$

$$a_0 = \frac{2}{c} \sum_{k=1}^{k=c} y_k$$

[8]

## 6 Praktická část:

### 6.1 Záložní zdroj HQ-INV600C/12

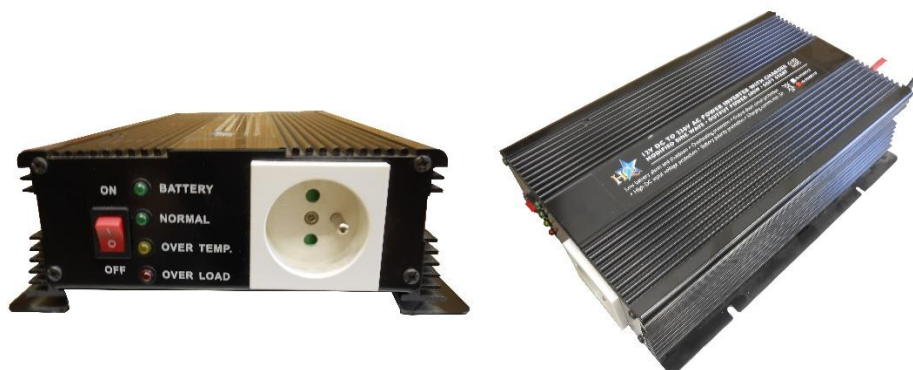
K měření byl použit záložní zdroj HQ-INV600C/12 jedná se o mikropočítačem řízený měnič napětí. Jmenovité výstupní napětí je 230V AC/50Hz. Tvarem výstupního průběhu je tzv. modifikovaný sinus. Trvalý výstupní výkon záložního zdroje je 600W, špičkový výstupní výkon (výkon který dokáže záložní zdroj napětí dodat po krátkou dobu řádově stovek ms) je 1500W. Pracuje se vstupním napětím v rozsahu 10-15V DC, je navržený k napájení z autobaterie, proto má zabudované automatické nabíjení autobaterie. Díky tomu plní funkci záložního zdroje (UPS). Účinnost invertování napětí z baterie je 85-90%.

Dále má měnič napětí následující funkce a ochrany (které jsou blíže popsány na stranách 11 a 12.):

- soft start
- indikaci kritické hranice napětí akumulátoru 10,5V ( $\pm 0,5V$ )
- následné vypnutí při poklesu vstupního napětí pod 10V ( $\pm 0,5V$ )
- tepelnou ochranu nastavenou na teplotu 60°C ( $\pm 0,5^\circ C$ )
- ochranu proti přetížení
- ochrana proti vysokému stejnosměrnému napětí na vstupu: 15.5V ( $\pm 0.5V$ )
- proti zkratovou ochrana střídavého výstupu

- ochrana polariry baterie
- pojistka: 25A x 3
- nabíjecí proud: 3 A
- chlazení: ventilátor
- rozměry: 285x200x70mm (d x š x v)
- hmotnost: 2.6Kg

Výrobce upozorňuje při používání ve vozidle je možné měnič napětí používat pouze ve spojení s dostatečně dimenzovaným alternátorem daného automobilu.



**Obr. 7-1:** Záložní zdroj HQ-INV600C/12.

Záložní zdroj HQ-INV600C/12 může pracovat ve 3 pracovních režimech.

První režim, režim měniče napětí z 12V DC na 230V AC. V tomto režimu je měnič napětí připojen pouze k akumulátoru, který slouží jako zdroj elektrické energie a do výstupní zásuvky je připojen síťový spotřebič.

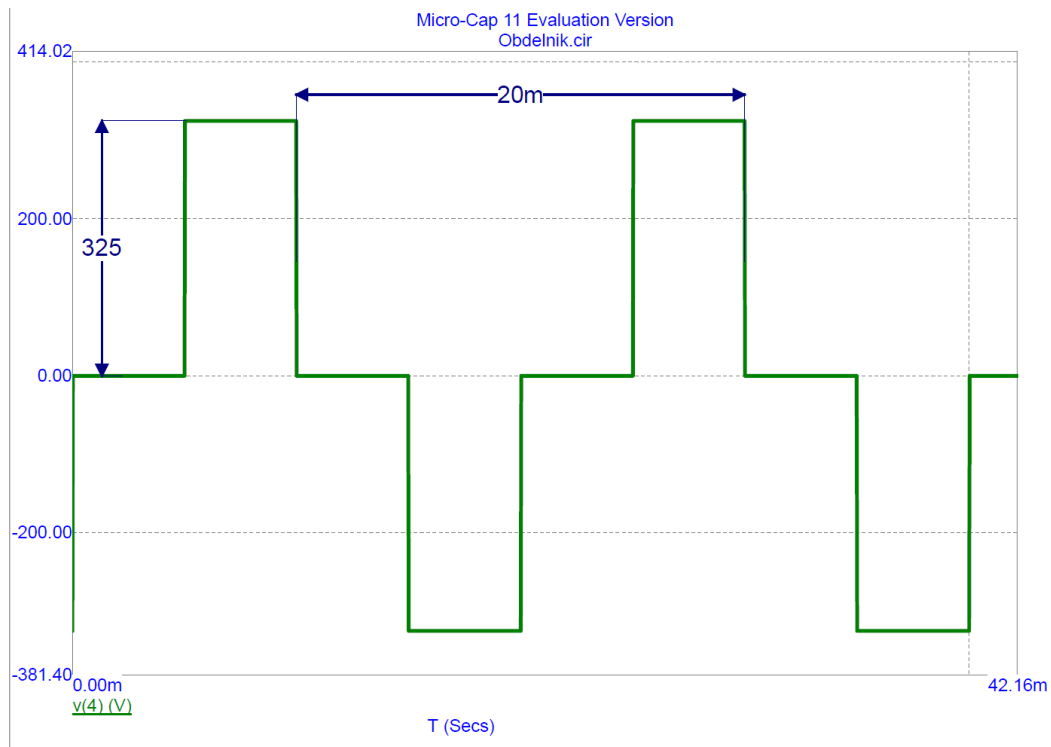
Druhý režim, režim záložního zdroje (UPS). V tomto režimu je měnič napětí připojen k elektrické síti a k akumulátoru, do výstupní zásuvky je opět připojen spotřebič. V tomto režimu je spotřebič napájen z elektrické sítě, akumulátor bude použit pro napájení spotřebiče v případě výpadku elektrické sítě. A to do doby než nebude obnovena dodávka elektrického proudu v síti nebo do doby než klesne napětí akumulátoru pod kritickou hranici 10V.

Třetí režim, měnič napětí může sloužit i jen jako nabíječ připojeného akumulátoru. V tomto případě je měnič napětí připojen k síti elektrické energie a akumulátoru, který je nabíjen a výstupní zásuvka zůstává neobsazena.

## 6.2 Měření na výstupu měniče

Jak již bylo zmíněno výstup záložního zdroje HQ-INV600C/12 průběh výstupního napětí a proudu má tvar modifikované sinusovky.

V ideálním případě má modifikovaný sinus pravoúhlý tvar (viz. Obr7-2).



**Obr. 7-2:** Průběh výstupního napětí s modifikovaným sinusem  $U=f(t)$

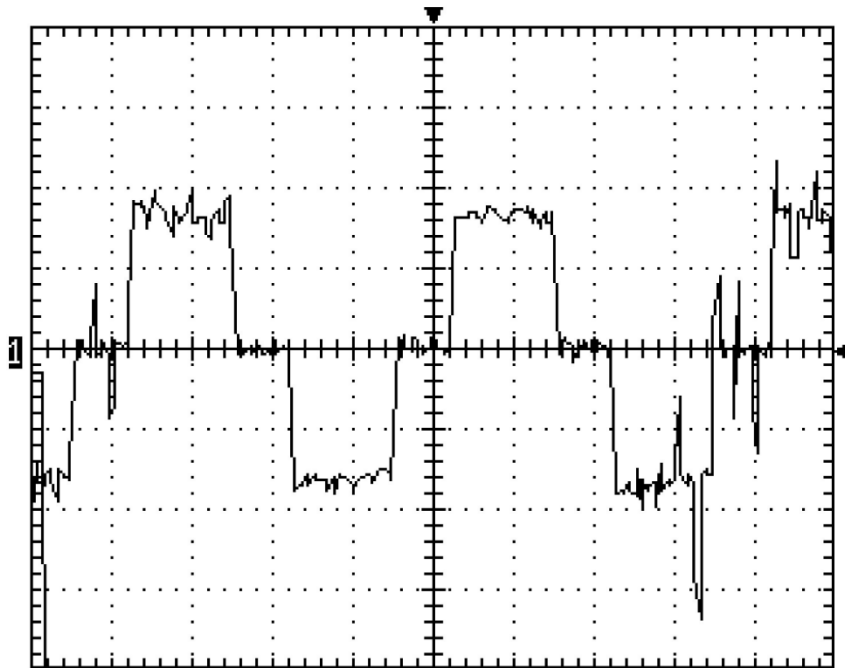
Průběh výstupního napětí na měniči napětí s modifikovaným sinusem (Obr.7-2), tento průběh byl nasimulován v programu Micro-Cap 11.0.1.4. V obrázku je znázorněna hodnota amplitudy, která je shodná s hodnotou sinusového průběhu v elektrické síti tedy 325V a perioda signálu 20ms která odpovídá síťové frekvenci 50Hz.

Naměřený průběh na digitálním osciloskopu

Měření byla prováděna na digitálním osciloskopu typu EZ Digital Oscilloscope DS-1250. Následné zpracování naměřených dat bylo provedeno na počítači v programu SoftView 1.3.

Měření bylo provedeno se zátěží 25W a 100W.

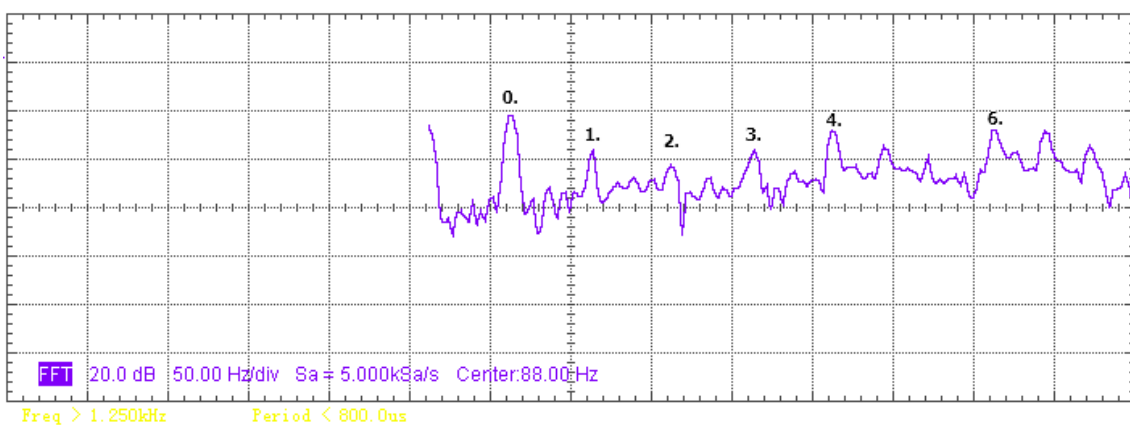
Při zapojené zátěži 25W bylo naměřeno napětí na zátěži:  $U = 201V$ . Z naměřených hodnot je vidět, že skutečný průběh se od ideálního průběhu značně liší. Je zde výrazný vliv šumu s frekvencemi řádově stovky Hz. Tento šum vzniká uvnitř měniče napětí. Jedná se o násobky základní harmonické frekvence měniče napětí.



**Obr. 7-3:** Výstupní průběh měniče napětí se zátěží 25W

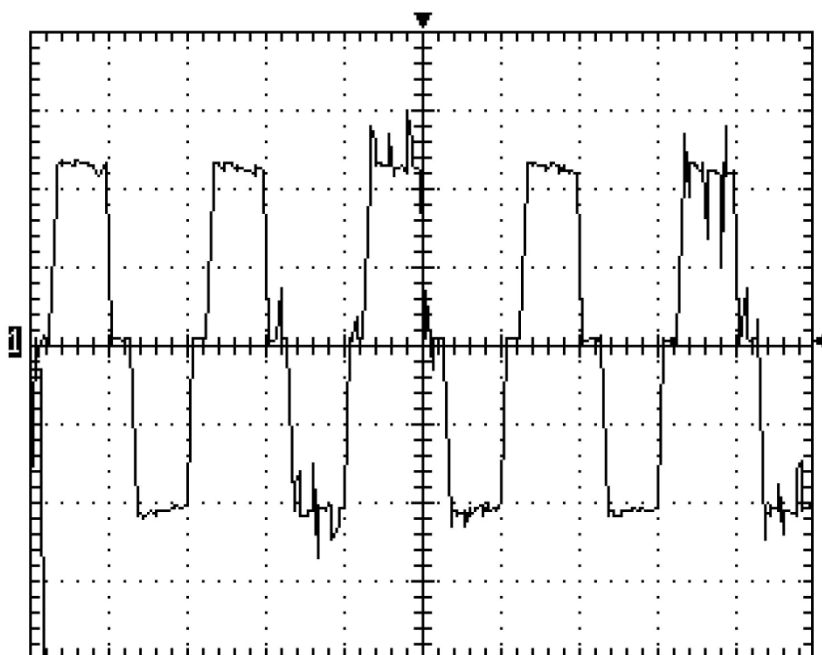
Následně jsem provedl Fourierovu analýzu výstupního signálu při zátěži 25W. K tomuto účelu jsem použil Digitální osciloskop Rigol DS2202A který umožňuje provádět tzv. Rychlou Fourierovu transformaci- FFT (Fast Fourier transform).

Na (Obr.7-4) je zachycen snímek Fourierovy transformace výstupního průběhu měniče napětí při zátěži 25W. Na snímku je patrný nárůst napětí v oblastech, které odpovídají nulté a vyšším harmonickým frekvencím. Vyšší harmonické frekvence jsou označeny v obrázku pořadovými čísly.



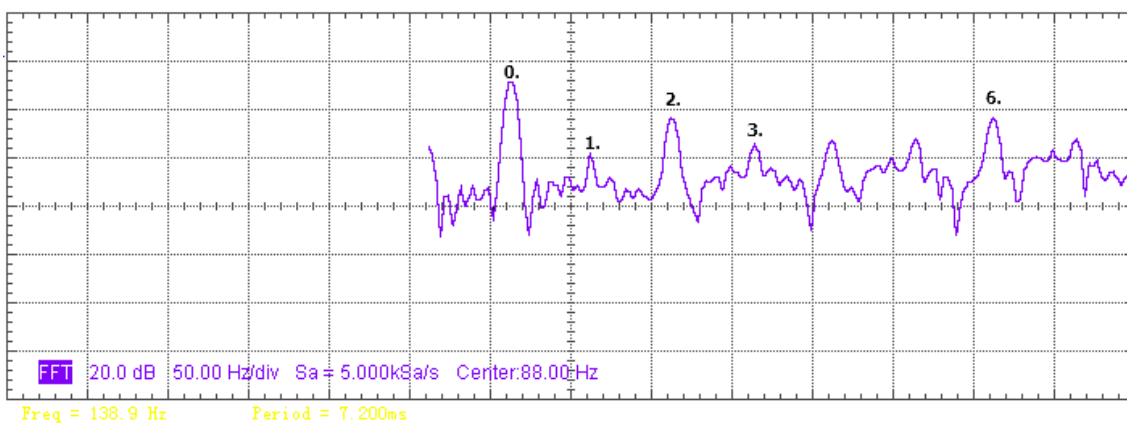
**Obr. 7-4:** Fourierova transformace výstupního průběhu měniče napětí se zátěží 25W

Při zapojené zátěži 100W bylo naměřeno napětí na zátěži:  $U = 213V$ . Vliv šumu je stále velmi výrazný a může mít nežádoucí vliv na citlivou elektroniku. Některé špičky šumového signálu dosahují hodnot přes 100V.



**Obr.7-5:** Výstupní průběh měniče napětí se zátěží 100W

Na (Obr.7-6) je zachycen snímek Fourierovy transformace výstupního průběhu měniče napětí při zátěži 100W. S tímto zatížením je ještě více patrný nárůst napětí v oblasti, které odpovídá 0. harmonické frekvenci. Vyšší harmonické frekvence se zde dají velmi snadno rozpoznat a jsou označeny v obrázku. Nejméně jsou utlumeny po 0. harmonické frekvenci 2. a 6. harmonická frekvence, tedy signál s frekvencí 150Hz a 350Hz.

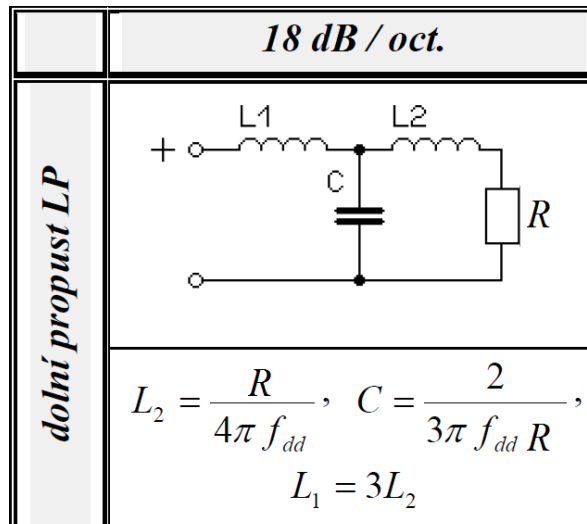


**Obr. 7-6:** Fourierova transformace výstupního průběhu měniče napětí se zátěží 100W

### 6.3 Návrh dolnofrekvenční propusti pro 50Hz

Jedním z cílů mé práce bylo navrhnout dolnofrekvenční propust pro frekvenci 50Hz. Předpoklad byl takový, že by tento filtr měl výstupní signál měniče vyhladit a získaný signál by měl získat tvar sinusového signálu.

Proto jsem zvolil návrh dolní propusti podle následujícího zapojení:



**Obr. 7-7:** Frekvenční filtr- dolní propust. Zdroj[3]

Jedná se dolní propust 3. řádu. Přenos klesá se strmostí 60dB/dek neboli 18dB/oct.

Spočítal jsem hodnoty jednotlivých prvků v tomto obvodu.

Vedoucím mé práce mi bylo zadáno, abych zkonstruoval filtr pro zátěž 100W. Vycházel jsem z předpokladu, že na výstupu dolní propusti bude efektivní hodnota napětí 230V.

Dále jsem spočítal proud procházející obvodem při dané zátěži.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{230} = 0,43A$$

Zátěž jsem považoval čistě reálnou s velikostí:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{230}{0,43} = 535\Omega$$

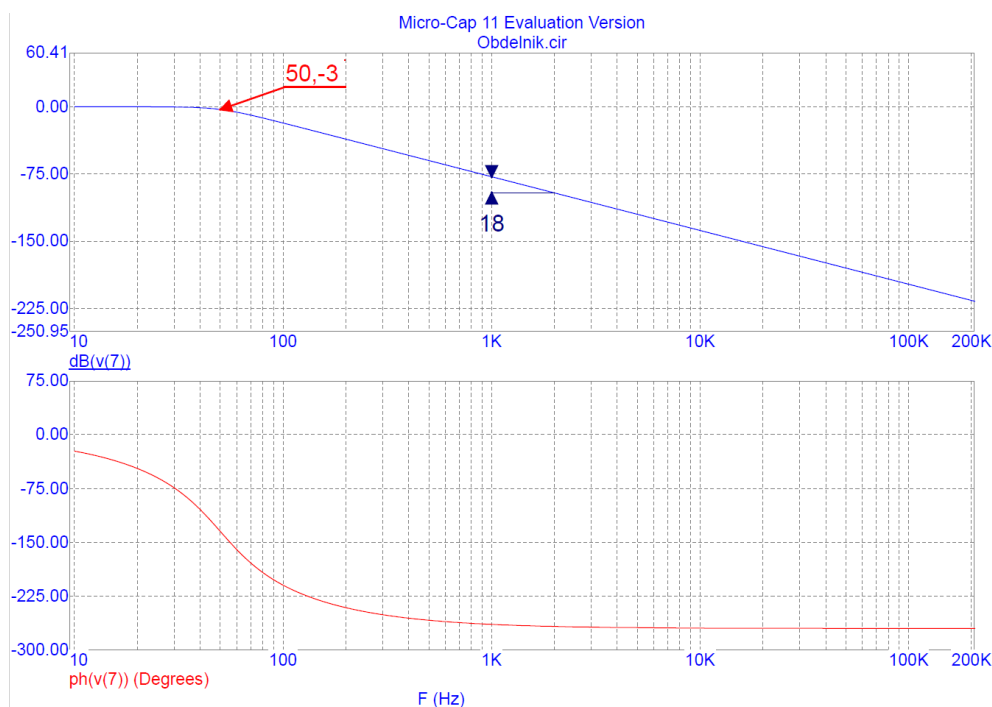
Nyní jsem mohl dopočítat zbylé prvky obvodu podle zadaných vztahů:

$$L_2 = \frac{R}{4\pi f_d} = \frac{535}{4\pi * 50} = 0,85H$$

$$L_1 = 3 * L_2 = 3 * 0,85 = 2,55H$$

$$C = \frac{2}{3\pi * f_d * R} = \frac{2}{3\pi * 50 * 535} = 7,93\mu F$$

Obvod s vypočítanými hodnotami jsem zapojil a simuloval v Micro-Cap 11.



**Obr. 7-8:** Frekvenční a fázová charakteristika dolní propusti 50Hz

Z obrázku je vidět, že dolní propust pracuje podle očekávání. Je zde velmi dobře patrné, že při frekvenci 50Hz napěťový přenos poklesne přesně o 3dB. Také je patrné, že dané zapojení je skutečně filtr 3. řádu a jeho napěťový přenos klesá se strmostí 18dB na oktávu.

## 6.4 Konstrukce

Vypočítané cívky byly nahrazeny tlumivkami. Tlumivky jsou navinuty na železném jádře se vzduchovou mezerou a jádro je složeno z transformátorových EI plechů. Tlumivky  $L_1$  a  $L_2$  byly vyrobeny na zakázku společností TBP-Transformátory spol s.r.o. Písecká 488, 388 01 Blatná.

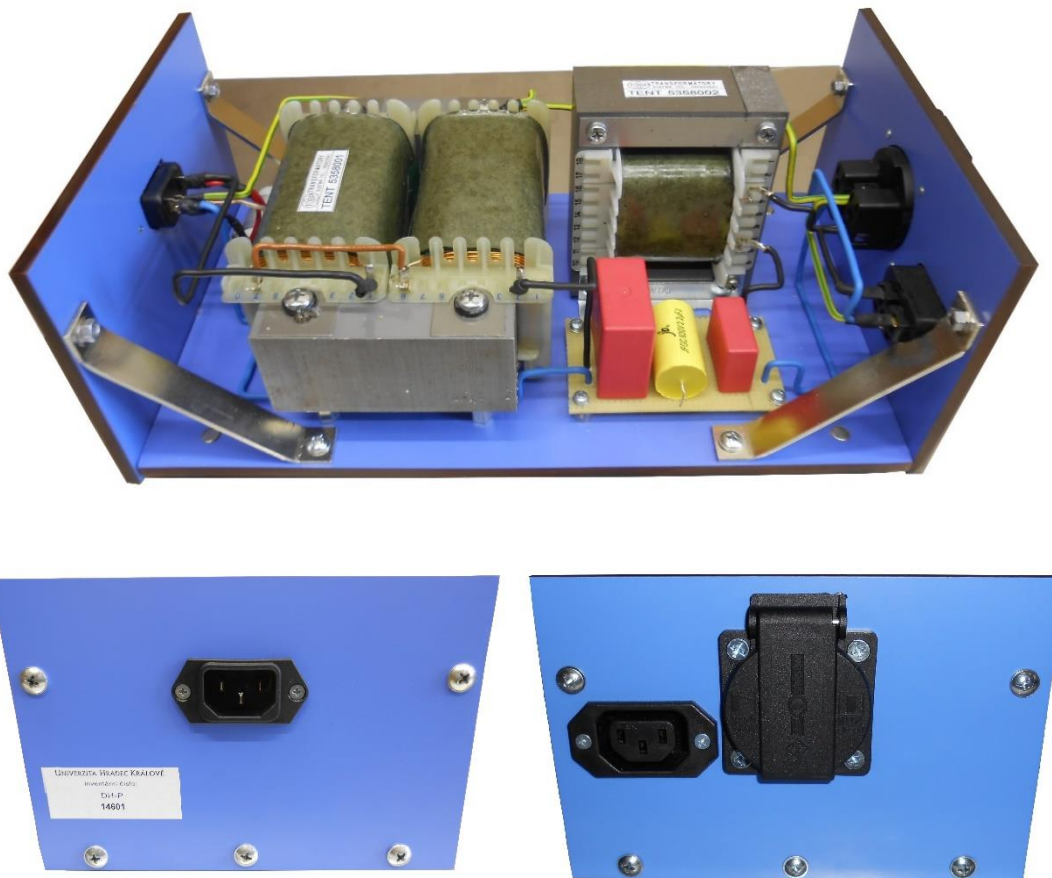
Výrobce zaslal tlumivky bez dokumentace, proto jsem se rozhodl indukčnost tlumivek přeměřit na měřicím přístroji TESLA BM 595 RLCG Meter. Měření bylo provedeno při nastavených parametrech  $U = 1V$  a  $f = 1kHz$ . Naměřená hodnota indukčnosti tlumivky  $L_1$  byla rovna 2,428H. Bohužel z důvodu poruchy měřicího přístroje se nepodařilo druhou tlumivku změřit.

Potřebná kapacita kondenzátoru je dána kombinací kondenzátorů s kapacitami  $4,7\mu F \pm 10\%$ ,  $1\mu F \pm 10\%$ . Jedná se o polypropylenové svitkové kondenzátory určené pro napětí 630V DC. Zakoupené v obchodu TME Czech Republic s.r.o. Dále byl použit kondenzátor  $2,2\mu F \pm 5\%$  jedná se také o svitkový kondenzátor určený pro napětí 630V DC.

Aby mohl být filtr použit jako samostatný funkční celek. Jsou tlumivky společně s kondenzátory připevněny k nosné desce, ke které jsou přidělena dvě čela. Čelo na levé straně je opatřeno vstupním síťovým napájecím EURO konektorem 250V/10A. Tento konektor slouží k připojení výstupu měniče. Protější čelo je opatřeno dvěma výstupními zásuvkami. Uprostřed je umístěna síťová vestavná



zásuvka 230V/16A. Nalevo od ní je umístěn výstupní EURO konektor 250V/10A. Provedení výsledného zapojení je vidět na obrázku (Obr.7-9:).

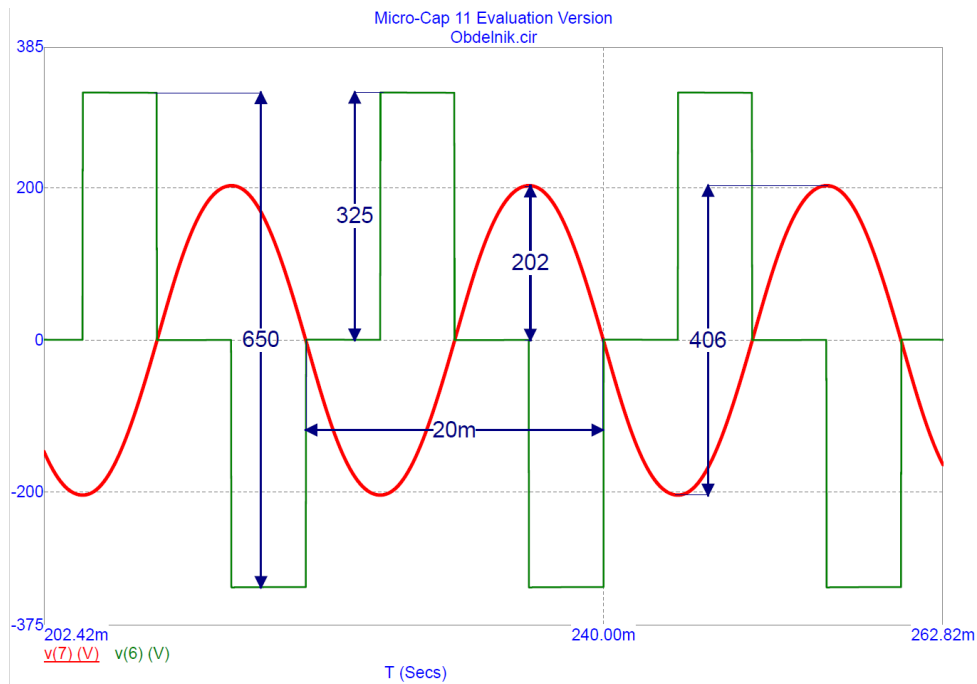


**Obr. 7-9:** Zkonstruovaný frekvenční filtr

## 6.5 Ověření funkce dolnofrekvenční propusti

### 6.5.1 Simulace v programu Micro-Cap 11.0.1.4.

Funkci jsem si ověřil v programu Micro-Cap 11.0.1.4. kde jsem zapojil dolnofrekvenční propust. Na vstup propusti jsem přivedl modifikovaný sinus (zelená křivka), který jsem nasimuloval pomocí 2 zdrojů obdélníkových pulzů tak aby parametry byly shodné se skutečným záložním zdrojem HQ-INV600C/12. Ze simulace je vidět že filtr opravdu plní svoji funkci a z původního tvaru modifikovaného sinu vytváří hladký sinusový průběh (červená křivka). Perioda obou signálů je shodná 20ms. Signály jsou vůči sobě posunuty o  $T/4$ . Jedna z velkých nevýhod tohoto zapojení je, že se jedná o pasivní filtr a tedy ztráty, které na filtru vznikají, nejsou kompenzovány žádným zdrojem elektrické energie. Díky tomu u tohoto simulovaného zapojení amplituda výstupního signálu dosahuje hodnoty pouze 202V, oproti vstupnímu signálu s amplitudou 325V.

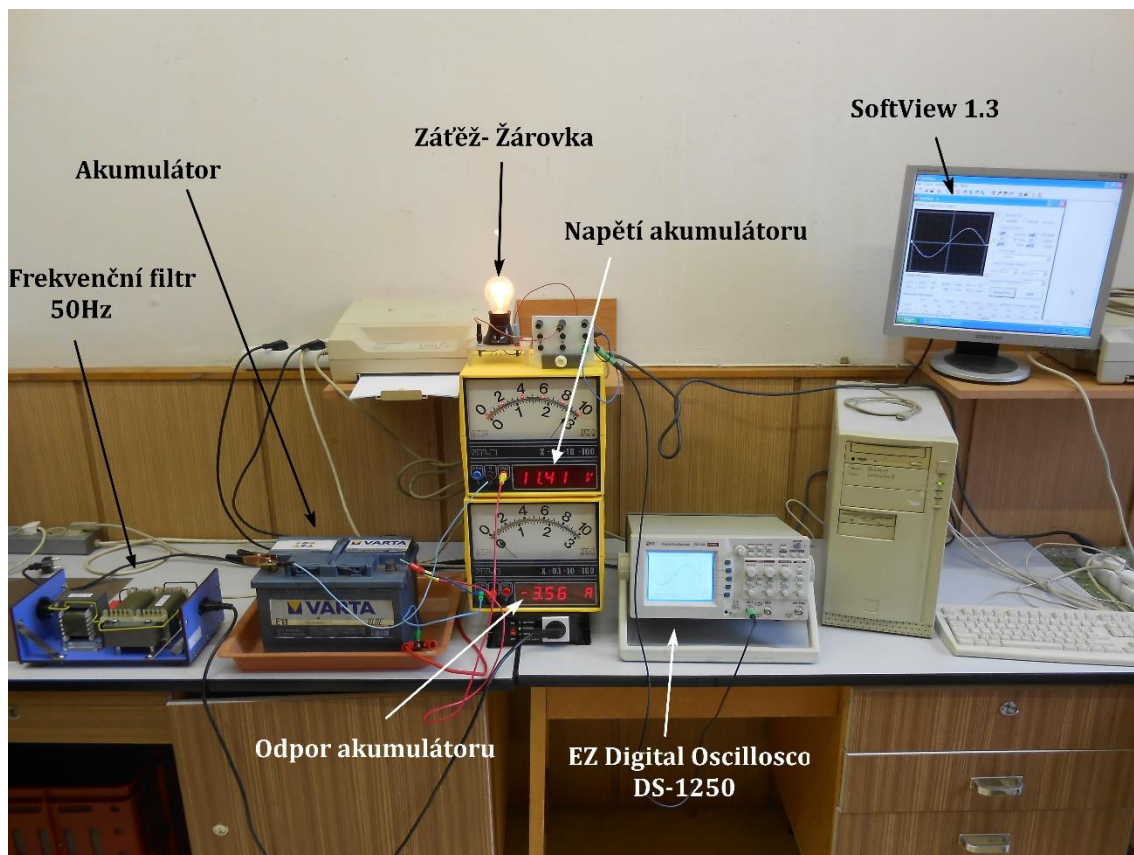


**Obr. 7-10:** Vstupní a výstupní signál dolnofrekvenční propusti.

## 6.5.2 Reálné zapojení dolnofrekvenční propusti

## 6.5.3 Měřicí pracoviště

Veškerá praktická měření byla provedena na učebně LFY2.

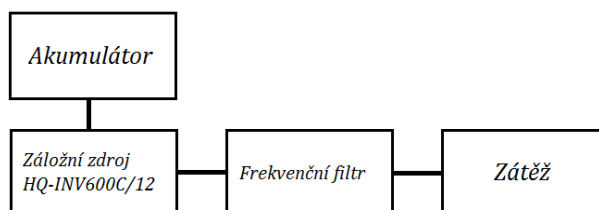


**Obr. 7-11:** Fotografie pracoviště

## 6.5.4 Akumulátor

Použitý akumulátor je značky VARTA typ E11. Jedná se o 12V akumulátor s kapacitou 74Ah, který se schopný dodat startovací proud 680A.

Obvod je zapojen následujícím způsobem:



**Obr. 7-12:** Blokové schéma zapojení

Nyní měnič napětí pracuje v první režimu. V tomto režimu je měnič napětí připojen pouze k akumulátoru, který slouží jako zdroj elektrické energie a do výstupní zásuvky je připojen frekvenční filtr a až za ním následuje zátěž. Následující měření byla měřena při zátěži 25W a 100W.

Měření byla provedena na digitálním osciloskopu typu EZ Digital Oscilloscope DS-1250. Následné zpracování naměřených dat bylo provedeno na počítači v programu SoftView 1.3.

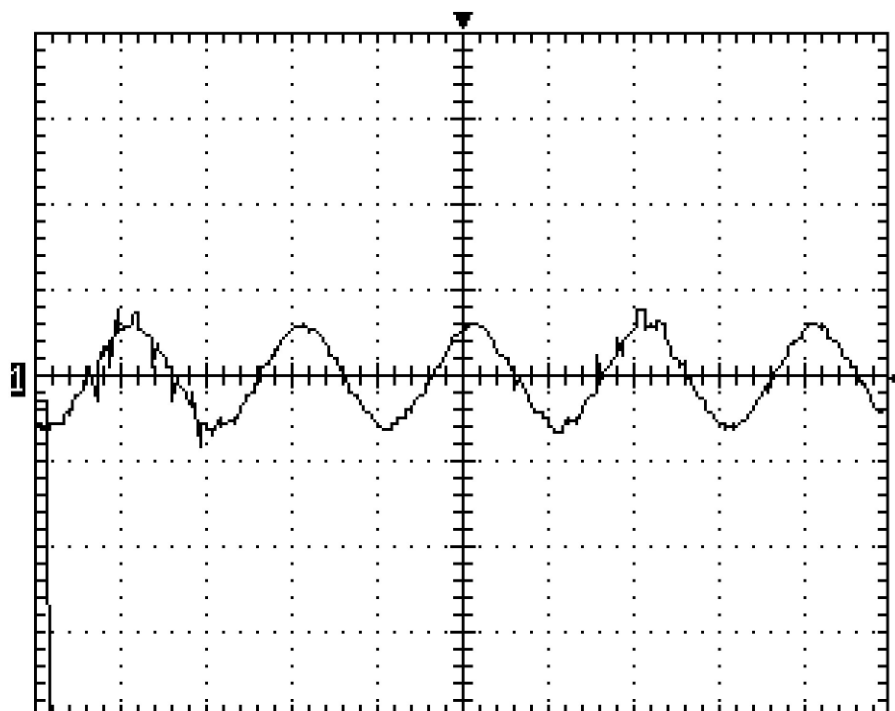
Na obrázku (Obr.7-13) je zobrazen průběh vyfiltrovaného signálu při zátěži 25W. Z obrázku je vidět, že průběh již nemá tvar modifikovaného sinu, ale tvarem už více připomíná čistý sinusový průběh. Avšak rušení, které bylo velmi výrazné při předchozím měření bez filtru, zde není zcela odfiltrováno i přesto že se jedná o filtr 3. řádu. Ze snímku osciloskopu je vidět že v určité míře rušení prochází i filtrem.

Při tomto měření byli naměřeny hodnoty:

Napětí na vstupu filtru  $U_{1vstup} = 203V$   
Napětí na výstupu filtru  $U_{2vystup} = 158V$

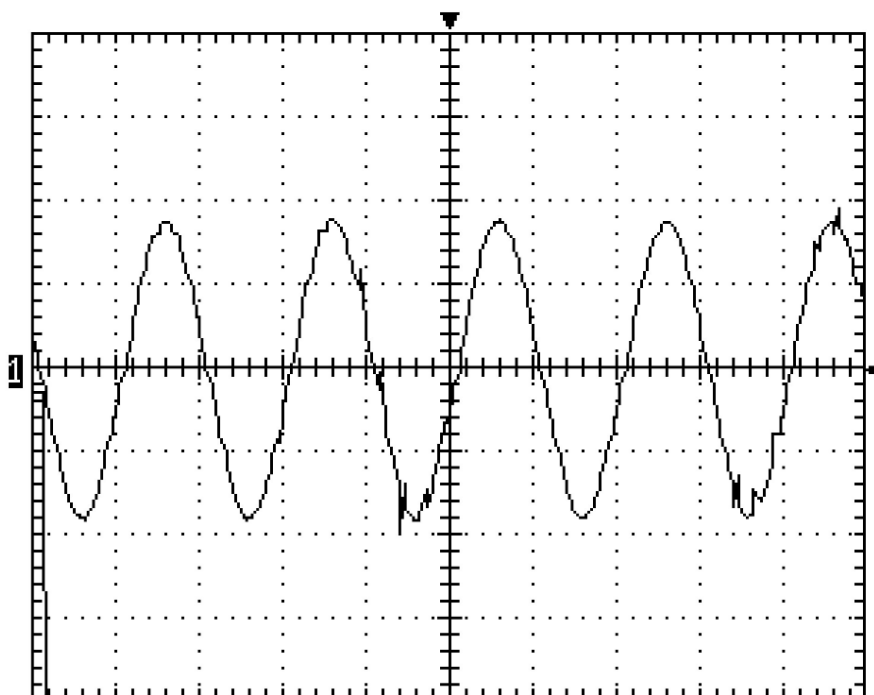
Napět'ový přenos filtru:  $A = \frac{U_2}{U_1} = \frac{158}{203} = 0,778$

SoftView - (23.2.2016) Scope



**Obr. 7-13:** Výstupní průběh se zátěží 25W

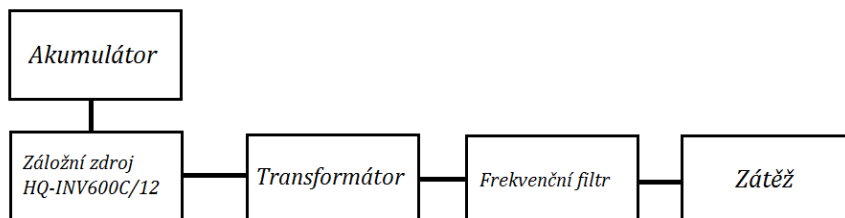
SoftView - (23.2.2016) Scope



**Obr. 7-14:** Výstupní průběh se zátěží 100W

## 6.6 Ověření funkce dolnofrekvenční propusti na signálu zkresleným transformátorem

Pro možnost regulace napětí na výstupu filtru byl za výstup záložního zdroje umístěn autotransformátor.

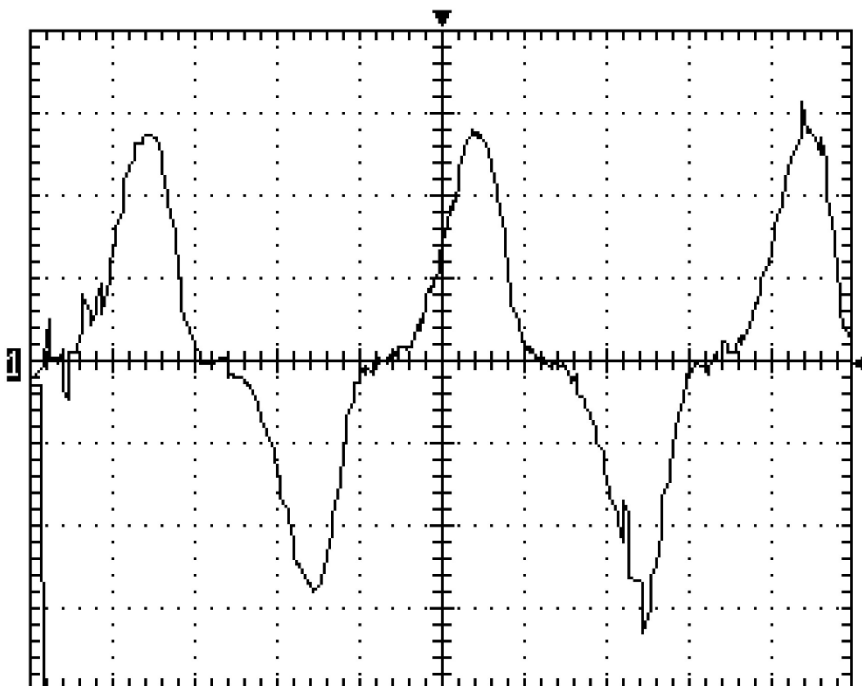


Obr. 7-15: Blokové schéma zapojení

Použití autotransformátoru má výhodnou vlastnost. Výstupní napětí autotransformátoru lze regulovat v širokém rozsahu hodnot. Tímto způsobem je možné upravovat velikost napětí, které je přiváděno k zátěži.

Autotransformátor má i nevýhodu. Nevýhodou je zkreslení výstupního průběhu napětí. Zkreslení je způsobeno nelineární převodní charakteristikou autotransformátoru, tato nelinearita je způsobena hysterezní křivkou jádra cívky autotransformátoru. Ze snímku na osciloskopu je vidět, že výsledný průběh nemá tvar sinusoidy. V oblasti kde dochází ke změně polarity výstupního napětí záložního zdroje, je nárůst napětí pozvolný, to je způsobeno opakovaným přemagnetováním železného jádra autotransformátoru. Výsledný tvar půl periody je zúžený a díky tomu, není přenesen autotransformátorem takový výkon jako by přenesl sinusový průběh o stejné amplitudě.

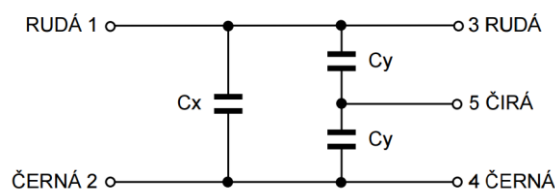
SoftView - (25.2.2016) Scope



Obr. 7-16: Výstupní průběh ovlivněný autotransformátorem

## 6.7 Doplnění dolnofrekvenčního filtru o síťový odrušovací filtr

Protože rušení v signálu je nežádoucí přidal jsem na vstup mého filtru ještě síťový odrušovací filtr TSK27/5. Jedná se o zapojení tří svitkových kondenzátorů z metalizovaného papíru. Zapojení odrušovacího síťového filtru je následující:



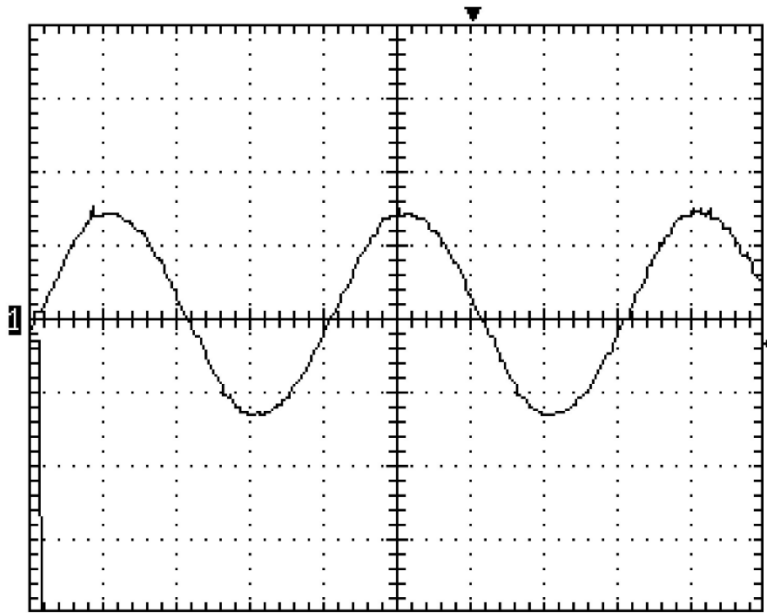
Obr. 7-17: Síťový odrušovací filtr. Zdroj[11]

## 6.8 Průběh na výstupu dolnofrekvenční propusti s odrušovacím filtrem

Pro ověření funkčnosti síťového odrušovacího filtru, jsem postupoval obdobně, jako v případě měření ověření funkce dolnofrekvenční propusti tzn. následující měření byla změřena při zátěži 25W a 100W.

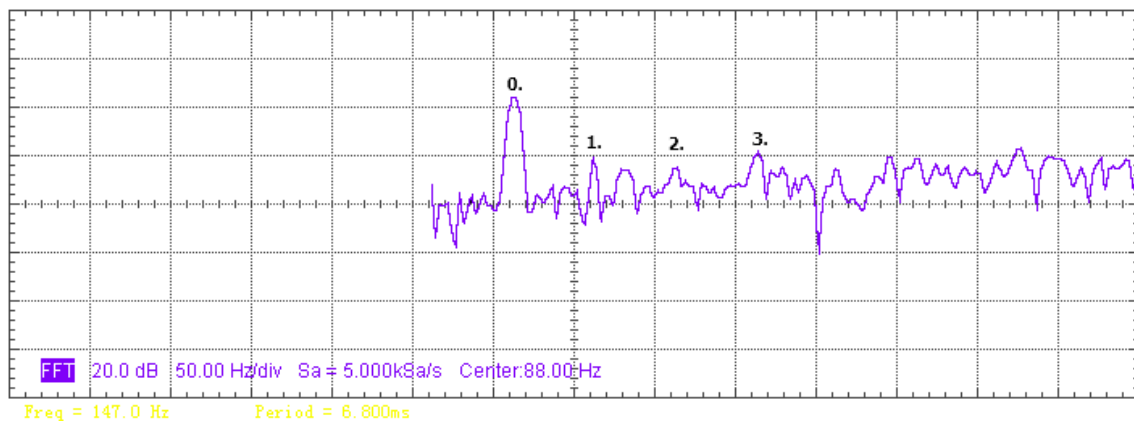
Měření byla znovu provedena na digitálním osciloskopu typu EZ Digital Oscilloscope DS-1250. Následné zpracování naměřených dat bylo provedeno na počítači v programu SoftView 1.3.

Na následujícím obrázku (Obr.7-18) je výstupní průběh po filtraci s dolnofrekvenčním filtrem doplněným o síťový odrušovací filtr. Při porovnání výstupního průběhů bez síťového odrušovacího filtru a výstupního průběhu s odrušovacím síťovým filtrem. Je velmi znatelný rozdíl v množství šumu na výstupu. Na obrázku (Obr.7-18) je vidět že množství šumu, které je nyní na zátěži je velmi nízké. Tím je ověřena funkčnost síťového odrušovacího filtru. Takto získaná křivka je vyhlazená a její tvar se velmi blíží tvaru sinusoidy.



**Obr. 7-18:** Výstupní průběh se zátěží 25W a odrušovacím filtrem

Na (Obr.7-19) je zachycen snímek Fourierovy transformace výstupního průběhu měniče napětí při zátěži 25W. Na snímku je patrný nárůst napětí v oblasti, které odpovídají 0. harmonické frekvenci (50Hz) dále se dají rozeznat 1. 2. a 3. harmonické frekvence. Tím je ověřena funkce dolní propusti i funkce síťového odrušovacího filtru.



**Obr. 7-19:** Fourierova transformace průběhu se zátěží 25W

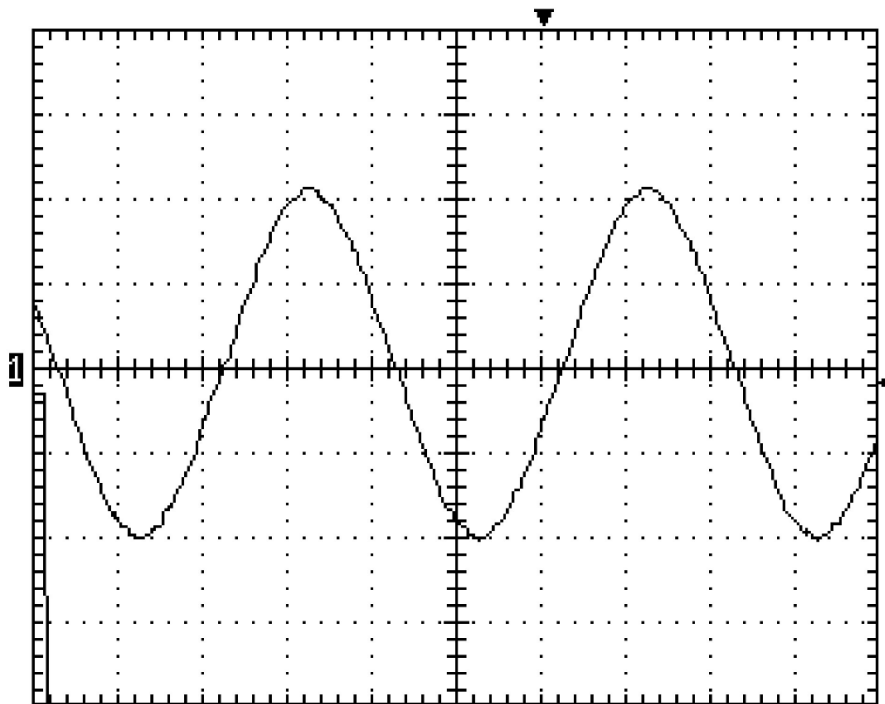
Funkce síťového odrušovacího filtru byla ověřena i pro zátěž 100W. Obdobně jako u měření při zátěži 25W i zde je velmi názorně vidět pokles šumu při měření bez síťového filtru a po připojení síťového filtru.

Na výsledných křivkách se i přes dvojí filtraci v určitých oblastech projevuje vliv šumu, který má nejspíše původ na nelineárních součástkách, které záložní zdroj obsahuje. Tento zbylý šum má velmi nízkou amplitudu a dle mého názoru ho můžeme zanedbat. Při připojení typu spotřebiče, který může být citlivý na šum, bývá



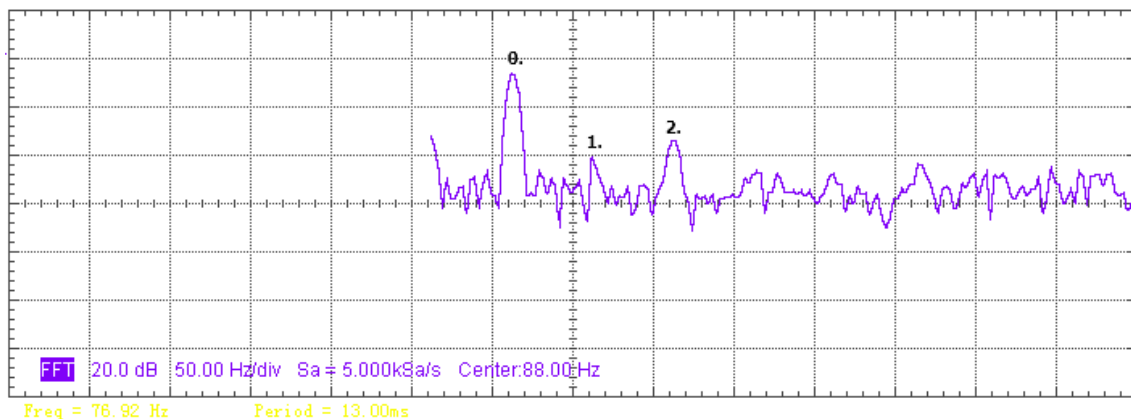
zpravidla v jeho napájecím obvodu umístěn filtr. Tento filtr zajišťuje odolnost spotřebiče na rušení, které může být v elektrické síti.

SoftView - (15.3.2016) Scope



Obr. 7-20: Výstupní průběh se zátěží 100W a odrušovacím filtrem

Na (Obr.7-21) je zachycen snímek Fourierovy transformace výstupního průběhu měniče napětí při zátěži 25W. Na snímku je patrný nárůst napětí v oblasti, které odpovídají 0. harmonické frekvenci (50Hz) dále se dají rozeznat 1. a 2. harmonická frekvence. Při zátěži 100W se více projevil vliv 2. harmonické frekvence ale i přesto můžeme říci, že jsou vyšší harmonické frekvence velmi potlačeny a na výsledný signál nebudou mít téměř žádný vliv, to je způsobeno dolní propustí a odrušovacím filtrem.



Obr. 7-21: Fourierova transformace průběhu se zátěží 100W



## 6.9 Zkreslení harmonického signálu zvonkovým transformátorem

### 6.9.1 Parametry zvonkového transformátoru

Výrobce: Klingeltransformator

Typ zvonkového transformátoru: Tip TR 16-0

Made in Romania

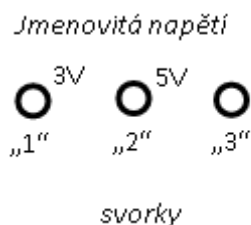
Technické údaje:

Jmenovité vstupní napětí 220V

Výstupní napětí 3V, 5V a 8V

Transformátor je odolný vůči zkratu na výstupu

Krytí IP 4.0.

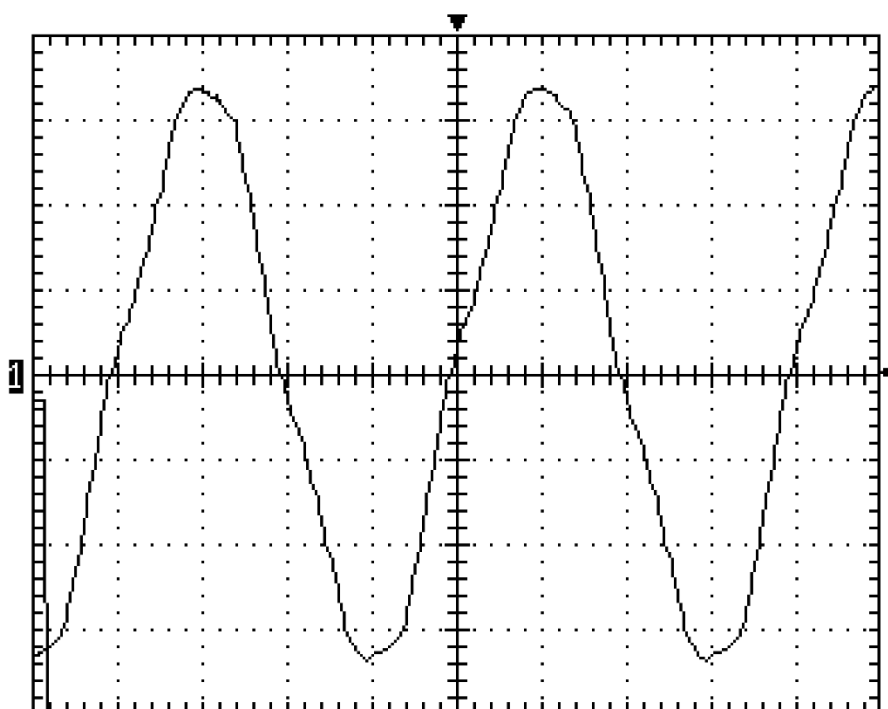


Obr. 7-22: Rozložení výstupních svorek zvonkového transformátoru.

### 6.9.2 Ukázka zkreslení na výstupu nezatíženého zvonkového transformátoru.

Při tomto měření bylo přivedeno na vstup zvonkového transformátoru harmonické síťové napětí. Ze záznamu je patné zkreslení výstupního napětí v oblasti nárůstu a poklesu napětí zdroje. Díky tomuto zkreslení není výstupní harmonický průběh sinusový, ale spíše připomíná „trojúhelníkový průběh se zaoblenou špičkou“. Obdobně jako u autotransformátoru je zkreslení způsobeno nelineární převodní charakteristikou zvonkového transformátoru, tato nelinearita je způsobena hysterezní křivkou jádra cívek zvonkového transformátoru.

Měření bylo provedeno na 3V výstupu, naměřená amplituda výstupního signálu (na prázdko) byla 6,7V.



**Obr. 7-23:** Záznam na výstupu nezatíženého zvonkového transformátoru.

Dále bylo provedeno dvojí měření se zatíženým výstupem zvonkového transformátoru.

Na (Obr.7-24) je zobrazen záznam na 3V výstupu zvonkového transformátoru zatíženém žárovkou s parametry 12V/250mA (3W). Je stále patrný stejný druh zkreslení, které se objevilo při měření naprázdno. Výstupní napětí má amplitudu 6,35V.

Na (Obr.7-25) je zobrazen záznam na 3V výstupu zvonkového transformátoru zatíženém žárovkou s parametry 12V/40W. I zde stále patrný stejný druh zkreslení, které se objevilo i při předcházejících měřeních a je tedy charakteristické pro zvonkový transformátor. Avšak díky zatížení a poklesu výstupního napětí na hodnotu 0,8V výsledný průběh není svým tvarem výrazně odlišný od průběhu sinusového.

Napěťový přenos nezatíženého zvonkového transformátoru:

$$A = \frac{U_2}{U_1} = \frac{6,7}{230} = 0,0291$$

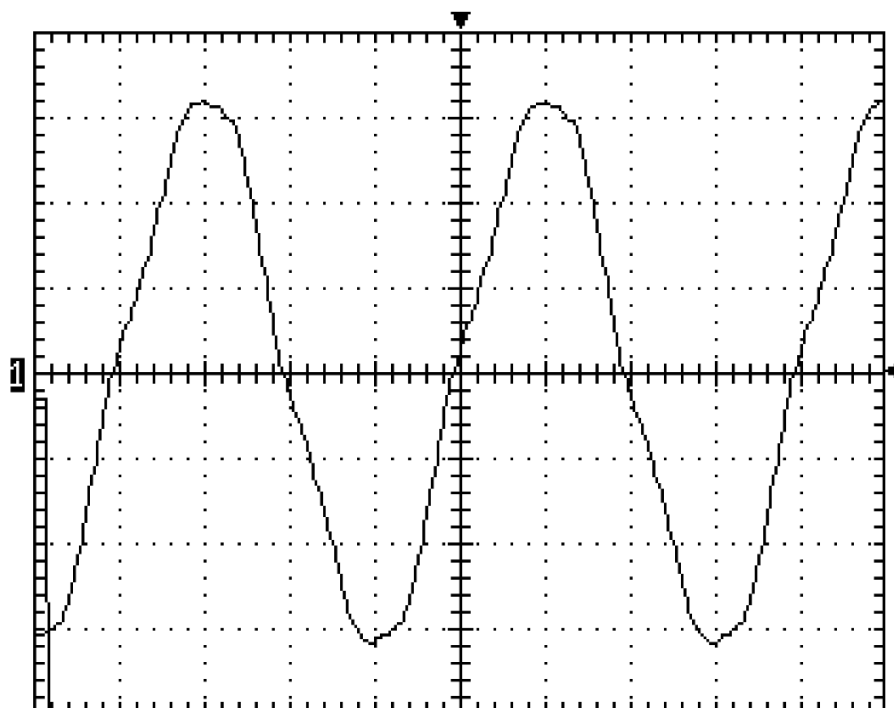
Napěťový přenos zvonkového transformátoru zatížený 3W:

$$A = \frac{U_2}{U_1} = \frac{6,35}{230} = 0,0276$$

Napěťový přenos zvonkového transformátoru zatížený 40W:

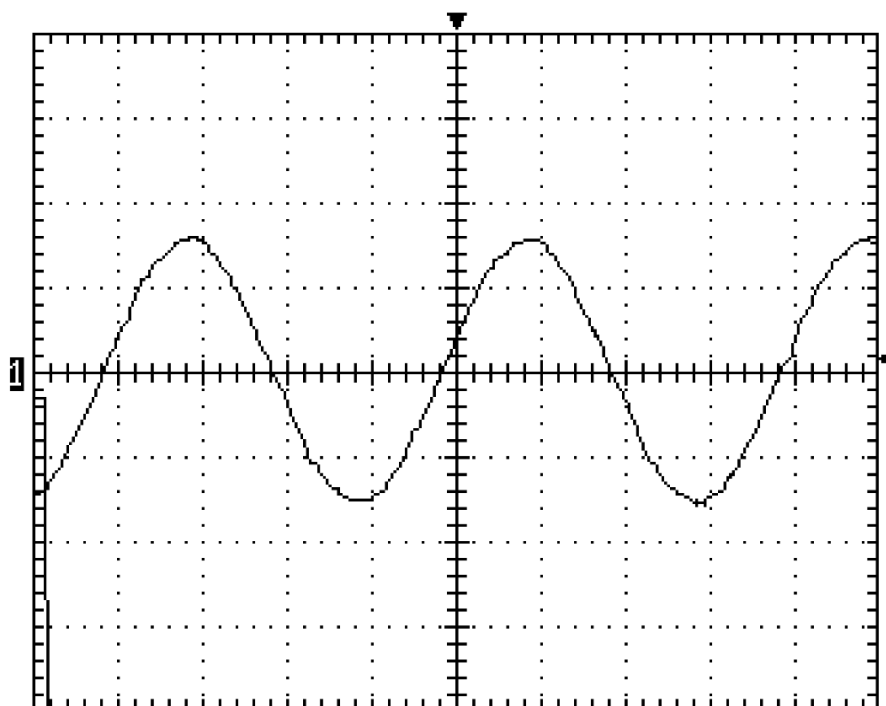
$$A = \frac{U_2}{U_1} = \frac{0,8}{230} = 0,00348$$

SoftView -(25.2.2016) Scope



**Obr. 7-24:** Záznam na výstupu zatíženého zvonkového transformátoru (3W).

SoftView -(25.2.2016) Scope



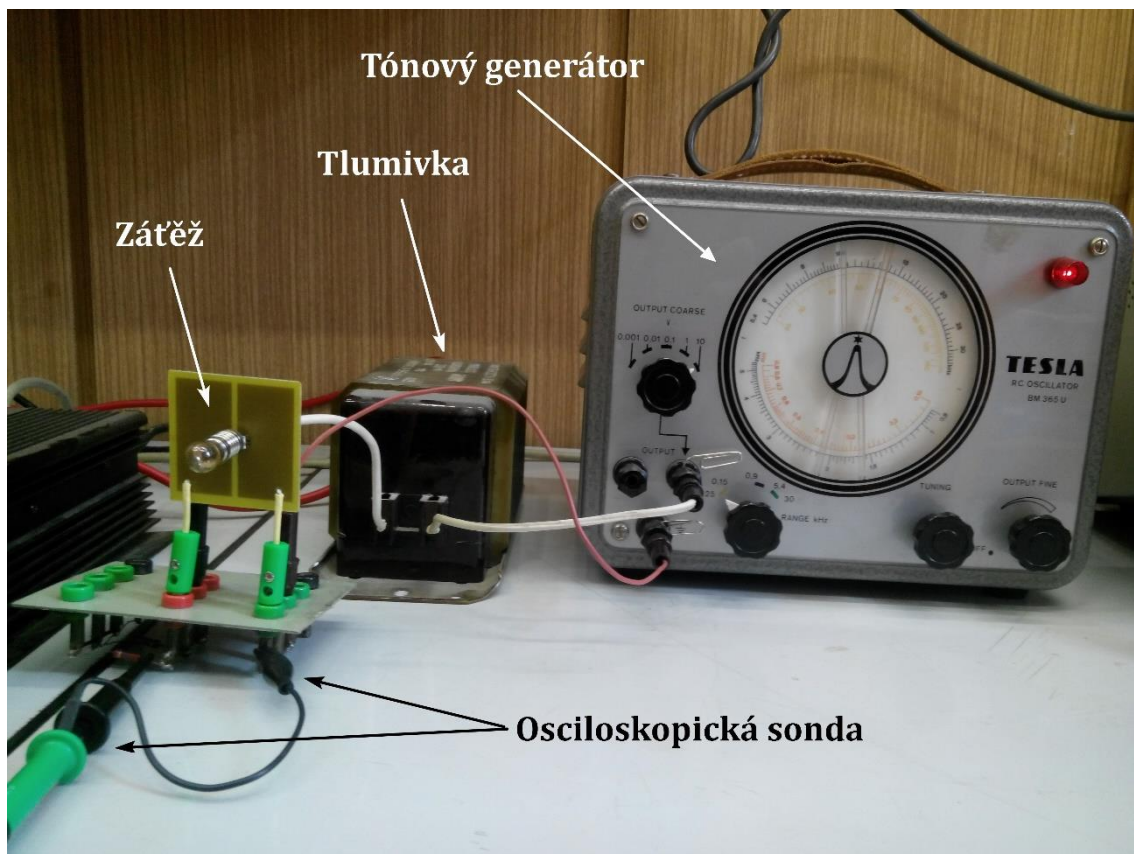
**Obr. 7-25:** Záznam na výstupu zatíženého zvonkového transformátoru (40W).

## 6.10 Zkreslení harmonického signálu tlumivkou

Pro měření zkreslení harmonického signálu tlumivkou byl použit tónový generátor TESLA RC OSCILLATOR BM 365 U. Tónový generátor zde má funkci zdroje harmonického sinusového signálu s parametry  $U_{\text{vystup}} = 10\text{V}/50\text{Hz}$ . Pro měření byla použita tlumivka: TYP SHC-01 SHC400W

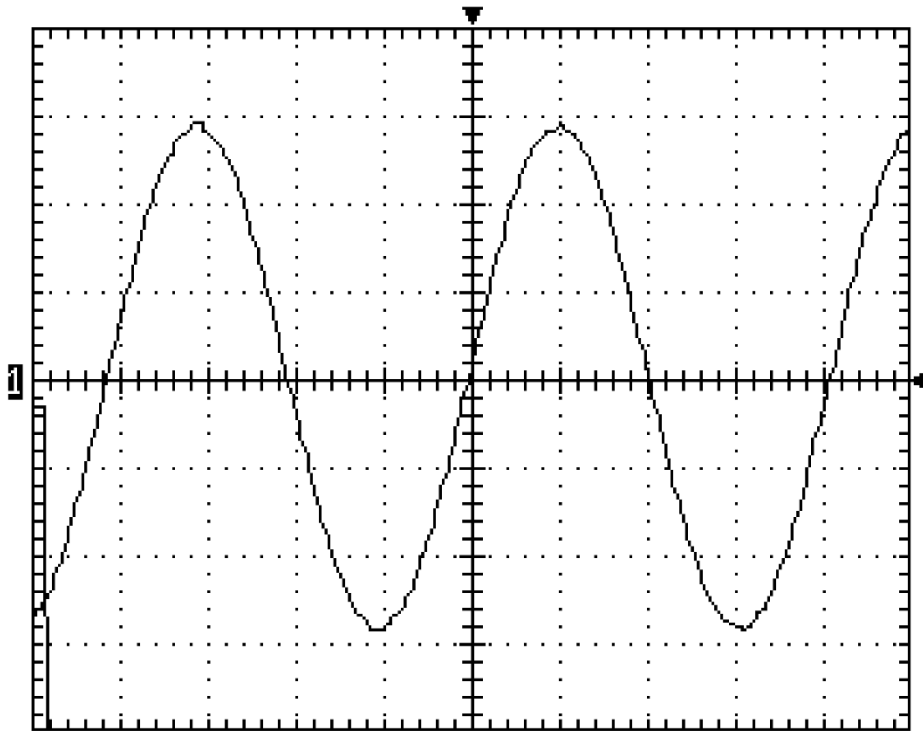
Štítkové hodnoty tlumivky udávané výrobcem jsou:

$U = 220\text{V}$   
 $I = 4,4\text{A}$   
 $\cos \varphi = 0,47$   
 $P = 400\text{W}$



Obr. 7-26: Fotografie měřící sestavy

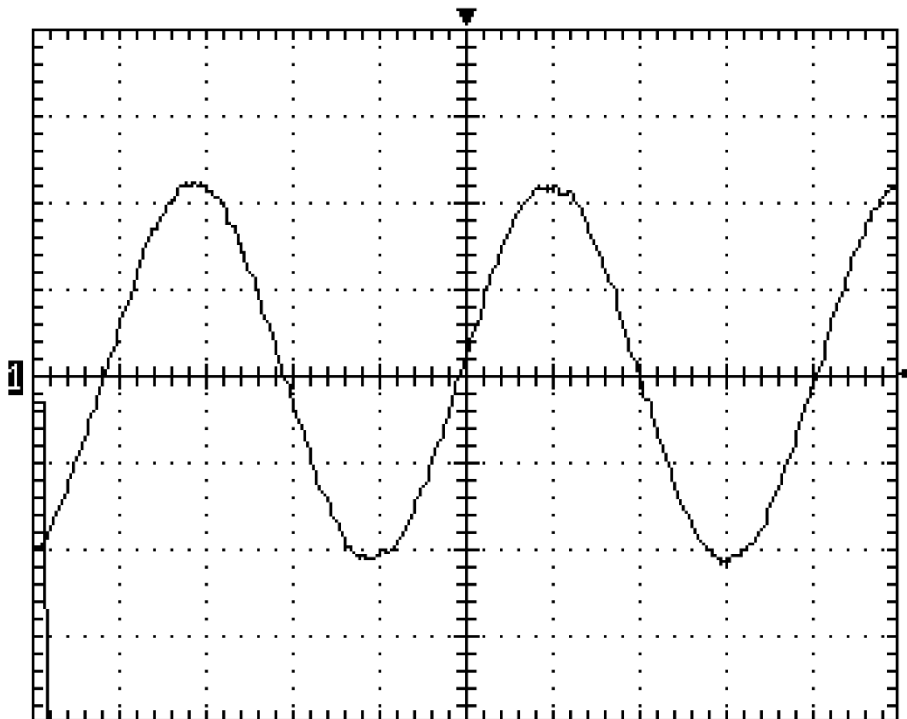
Na (Obr.7-27) je zobrazen záznam měření na obvodu s tlumivkou bez zátěže. Při tomto měření byla neměřená amplituda signálu 14,5V tato amplituda odpovídá střední hodnotě napětí generátoru 10V.



**Obr. 7-27:** Záznam na výstupu nezatížené tlumivky.

Na (Obr.7-28) je zobrazen záznam měření na obvodu se sériovým zapojením tlumivky se zátěží. Zátěží zde byla 3W žárovka, která byla použita při měření na zvonkovém transformátoru. Při tomto měření byla naměřená amplituda signálu na žárovce 44,8mV velikost naměřeného napětí na žárovce je způsobena nelineární V-A charakteristikou žárovky. Dokud není vlákno žárovky rozžhavené, má vlákno relativně malý odpor. Díky relativně vysoké impedanci tlumivky a vnitřnímu odporu tónového generátoru není dosaženo požadovaného výkonu a žárovka se nerozsvítí, úbytek napětí na žárovce je velmi malý.

Z naměřených hodnot je patrné, že při tomto měření nedošlo ke zkreslení sinusového signálu do takové míry, aby bylo možná zkreslení pozorovat na záznamu z osciloskopu.



Obr. 7-28: Záznam na výstupu zatížené tlumivky žárovkou.

## 7 Závěr

Tato práce obsahuje dvě části teoretickou a praktickou.

V teoretické části jsem se seznámil s DC/AC měniči napětí. S principy na kterých je založena jejich funkce, s jednotlivými tvary jejich výstupních signálů. V teoretické části jsem se také seznámil s frekvenčními filtry a s různými druhy zkreslení harmonických signálů. A dále jsem se seznámil s Fourierovou analýzou signálu. Tyto získané znalosti jsem dále aplikoval v praktické části.

Prvním úkolem praktické části, bylo provést měření na výstupu měniče napětí. Dalším úkolem, bylo navrhnout a zkonstruovat frekvenční filtr. Dále následovalo měření na výstupu zkonstruovaného frekvenčního filtru.

Hlavním cílem práce bylo ověřit funkci frekvenčního filtru. Byla provedena dvojice měření při zátěži 25 a 100 W. První z dvojice měření bylo měření bez použití filtru. Při druhém měření byl připojen filtr na výstup měniče napětí. Provedením těchto měření byla ověřena funkce frekvenčního filtru (dolní propusti) pro obě měřené zátěže.

Dalším cílem této práce bylo změřit zkreslení harmonického signálu při transformaci zvonkovým transformátorem a tlumivkou.

Díky této práci jsem se obohatil o celou řadu nových zkušeností jak z teorie, tak i z praxe.

## 8 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Jak vybrat měnič napětí (střídač) a nenapálit se [online] [cit. 02.07.2016]. Dostupné na: <http://www.deramax.cz/jak-vybrat-menic-napeti-stridac-a-nenapalit-se>
- [2] Maťátko, J. Elektronika. M. Horákové 170 00, Praha7:IDEA SERVIS, 2008.
- [3] WIKIPEDIE [online] Mnohojazyčná otevřená internetová encyklopedie, [cit. 02.07.2016]. Dostupné na: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Filtr\\_\(zpracov%C3%A1n%C3%AD\\_sign%C3%A1lu\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Filtr_(zpracov%C3%A1n%C3%AD_sign%C3%A1lu))
- [4] WIKIPEDIE [online] Mnohojazyčná otevřená internetová encyklopedie, [cit. 02.07.2016]. Dostupné na: <https://cs.wikipedia.org/wiki/THD>
- [5] Intermodulační zkreslení [online] AmaPro [cit. 10.07.2016]. Dostupné na: [http://amapro.cz/datove\\_zdroje/knihy/vkv/vkv\\_295.php](http://amapro.cz/datove_zdroje/knihy/vkv/vkv_295.php)
- [6] Zkreslení signálu [online] [cit. 10.07.2016]. Dostupné na: <http://www.sotovo.cz/str/elm.php?id=25>
- [7] Fázové zkreslení vlivem posunu základní harmonické [online] AmaPro [cit. 10.07.2016]. Dostupné na: [http://amapro.cz/datove\\_zdroje/knihy/vkv/vkv\\_296.php](http://amapro.cz/datove_zdroje/knihy/vkv/vkv_296.php)
- [8] Maťátko, J. Elektronika pro 3 ročník SPŠE slaboproudých: Elektronické součástky a základní obvody. 2. vydání. 330s. Foitová, E. Spálená 51, Praha1:SNTL, 1981.

### Seznam obrázků:

- Obr. 2-1:** Porovnání parametrů jednotlivých výstupních průběhů  $U=f(t)$ .
- Obr. 3-1:** Dvojbran
- Obr. 4-1:** Rovina komplexních čísel.
- Obr. 4-2:** Útlumová a fázová charakteristika. Zdroj[1]
- Obr. 4-3:** Frekvenční charakteristika ideální dolní propusti.
- Obr. 4-4:** Logaritmicko-amplitudová frekvenční charakteristika dolní propusti 1. řádu (integračního článku). Zdroj[2]
- Obr. 4-5:** Zapojení dolních propustí 1. 2. a 3. řádu. Zdroj[3]
- Obr. 4-6:** Frekvenční charakteristika ideální horní propusti.
- Obr. 4-7:** Logaritmicko-amplitudová frekvenční charakteristika derivačního článku. Zdroj[4]
- Obr. 4-8:** Ideální frekvenční charakteristika pásmové propusti.
- Obr. 4-9:** Reálná amplitudově frekvenční charakteristika pásmové propusti. Zdroj[5]
- Obr. 4-10:** Zapojení pásmových propustí 1. 2. a 3. řádu. Zdroj[3]
- Obr. 5-1:** Harmonické zkreslení sinusového signálu vlivem 3. a 5. harmonickou frekvencí. Zdroj[6]
- Obr. 5-2:** Intermodulační zkreslení dvou vstupních signálů. Zdroj[7]

**Obr. 5-3:** Odezva obvodu na jednotkový skok-vlevo vstupní signál, vpravo výstupní zkraslený signál. Zdroj[8]

**Obr. 5-4:** Vzájemná souvislost mezi:  $\varphi_n, a_n, b_n, A_n$ .

**Obr. 6-1.** Lichá funkce. Zdroj[9]

**Obr. 6-2.** Sudá funkce. Zdroj[9]

**Obr. 6-3.** Zdroj[9]

**Obr.6-4.** Zdroj[9]

**Obr. 6-5:** Grafické znázornění signálu- pro metodu harmonické analýzy. Zdroj[10]

**Obr. 7-1:** Záložní zdroj HQ-INV600C/12.

**Obr. 7-2:** Průběh výstupního napětí s modifikovaným sinusem  $U=(f)t$

**Obr. 7-3:** Výstupní průběh měniče napětí se zátěží 25W

**Obr. 7-4:** Fourierova transformace výstupního průběhu měniče napětí se zátěží 25W

**Obr.7-5:** Výstupní průběh měniče napětí se zátěží 100W

**Obr. 7-6:** Fourierova transformace výstupního průběhu měniče napětí se zátěží 100W

**Obr. 7-7:** Frekvenční filtr- dolní propust. Zdroj[3]

**Obr. 7-8:** Frekvenční a fázová charakteristika dolní propusti 50Hz

**Obr. 7-9:** Zkonstruovaný frekvenční filtr

**Obr. 7-10:** Vstupní a výstupní signál dolnofrekvenční propusti.

**Obr. 7-11:** Fotografie měřícího pracoviště

**Obr. 7-12:** Blokové schéma zapojení

**Obr. 7-13:** Výstupní průběh se zátěží 25W

**Obr. 7-14:** Výstupní průběh se zátěží 100W

**Obr. 7-15:** Blokové schéma zapojení

**Obr. 7-16:** Výstupní průběh ovlivněný autotransfornátorem

**Obr. 7-17:** Síťový odrušovací filtr. Zdroj[11]

**Obr. 7-18:** Výstupní průběh se zátěží 25W a odrušovacím filtrem

**Obr. 7-19:** Fourierova transformace průběhu se zátěží 25W

**Obr. 7-20:** Výstupní průběh se zátěží 100W a odrušovacím filtrem

**Obr. 7-21:** Fourierova transformace průběhu se zátěží 100W

**Obr. 7-22:** Rozložení výstupních svorek zvonkového transformátoru.

**Obr. 7-23:** Záznam na výstupu nezatíženého zvonkového transformátoru.

**Obr. 7-24:** Záznam na výstupu zatíženého zvonkového transformátoru (3W).

**Obr. 7-25:** Záznam na výstupu zatíženého zvonkového transformátoru (40W).

**Obr. 7-26:** Fotografie měřící sestavy

**Obr. 7-27:** Záznam na výstupu nezatížené tlumivky.

**Obr. 7-28:** Záznam na výstupu zatížené tlumivky žárovkou.

## Seznam zdrojů obrázků:

[1] Mařátko, J. Elektronika. M. Horákové 170 00, Praha7:IDEA SERVIS, 2008.

[2]

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/66/Integracn%C3%AD\\_cl%C3%A1nek\\_LAFCH.png/700px-Integracn%C3%AD\\_cl%C3%A1nek\\_LAFCH.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/66/Integracn%C3%AD_cl%C3%A1nek_LAFCH.png/700px-Integracn%C3%AD_cl%C3%A1nek_LAFCH.png)

[3] [http://www.dexon.cz/data/clanky/popisy/vyhybky\\_vzorce.pdf](http://www.dexon.cz/data/clanky/popisy/vyhybky_vzorce.pdf)



- [4] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Derivacn%C3%AD%20cl%C3%A1nek\\_LAFCH.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Derivacn%C3%AD%20cl%C3%A1nek_LAFCH.png)
- [5] <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/daq/Ka050123.gif>
- [6] <http://www.sotovo.cz/obr/295.jpg>
- [7] [http://www.elektronovinky.cz/sites/default/files/articles/1370345125/ozkresle\\_ni7.png](http://www.elektronovinky.cz/sites/default/files/articles/1370345125/ozkresle_ni7.png)
- [8] [http://hellweb.loose.cz/school/elt/!21\\_soubory/image063.png](http://hellweb.loose.cz/school/elt/!21_soubory/image063.png)
- [9] [www.cesak.com/download.php?id=222](http://www.cesak.com/download.php?id=222)
- [10] [https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/22597/content\\_YwAAAABJRU5.png](https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/22597/content_YwAAAABJRU5.png)
- [11] <http://www.gme.cz/img/cache/doc/806/139/odrusovaci-filtr-tsk27-5-datasheet-1.pdf>