



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

CHRÁNĚNÁ KOMPENZACE A KOMPENZAČNÍ FILTRY

PASSIVE SHUNT FILTRATION AND COMPENSATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Urant

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Tomáš Urant

ID: 155254

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Chráněná kompenzace a kompenzační filtry

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Pasivní filtry a chráněná kompenzace.
2. Vstupní požadavky a postup výpočtu parametrů filtračně-kompenzačního zařízení.
3. Návrh kompenzačně-filtrační parametrizovatelné jednotky.
4. Realizace fyzikálního modelu.
5. Provedení měření a zhodnocení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

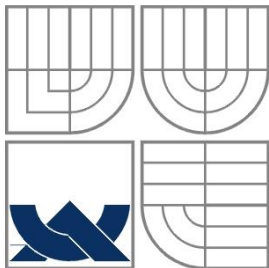
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

URANT, T. *Chráněná kompenzace a kompenzační filtry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 61 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D..

Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (bakalářské) práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií**

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

CHRÁNĚNÁ KOMPENZACE A KOMPENZAČNÍ FILTRY

Tomáš Urant

vedoucí: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and
Communication**

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

PASSIVE SHUNT FILTRATION AND COMPENSATION

by

Tomáš Urant

Supervisor: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Brno University of Technology, 2015

Brno

ABSTRAKT

Cílem této práce je čtenáře seznámit s teoretickým a praktickým návrhem filtračně-kompenzačního zařízení. V teoretické části je popsána problematika kompenzace jalového výkonu a filtrace vyšších harmonických složek. Jsou zde popsány jednotlivé metody i provedení kompenzace a filtračně-kompenzačních zařízení. V praktické části je teoretického základu využito k realizaci laboratorního modelu filtračně-kompenzačního zařízení pro přesně specifikovanou zátěž s přesně specifikovanými požadavky. Na modelu je možno vidět význam filtrace vyšších harmonických složek za pomoci jednoduchého ručního přepojování jednotlivých filtrů.

KLÍČOVÁ SLOVA: kompenzace, filtrace, chráněná kompenzace, filtračně-kompenzační zařízení

ABSTRACT

The aim of this work is to acquaint the reader with the theoretical and practical design filtration-compensation device. The theoretical part describes the problems of reactive power compensation and harmonic filtering components. There are described various methods and implementation of compensation and filtration-compensation devices. In the practical part is the theoretical basis used for the realization of a laboratory model of filtration-compensation device for precisely specified load with precisely specified requirements. In laboratory model can be seen meaning of filtering harmonics by using of simple hand switching individual filters.

KEY WORDS: compensation, filtering, protected compensation, filtering-compensating device

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
1 ÚVOD	13
1.1 JALOVÝ VÝKON	13
1.2 ÚČINÍK	14
2 KOMPENZACE.....	15
2.1 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU SE SÉRIOVÝM KONDENZÁTOREM.....	15
2.2 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU S PARALELNÍM KONDENZÁTOREM	16
2.2.1 PROSTÉ KONDENZÁTORY	17
2.3 ROTAČNÍ KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ	18
2.4 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ KOMPENZAČNÍHO VÝKONU	19
2.4.1 STUPŇOVITĚ ŘÍZENÉ KOMPENZÁTORY	19
2.4.2 PLYNULE ŘÍZENÉ – PASIVNÍ.....	20
2.4.3 PLYNULE ŘÍZENÉ – AKTIVNÍ	21
3 FILTRY	24
3.1 ÚZKOPÁSMOVÉ FILTRY	24
3.2 ŠIROKOPÁSMOVÉ FILTRY	25
3.3 CHRÁNĚNÁ KOMPENZAČNÍ SEKCE.....	27
3.4 KOMPENZAČNÍ FILTRY	29
3.5 URČENÍ NAPĚŤOVÉ HLADINY	29
4 CÍL PRÁCE	31
5 VSTUPNÍ MĚŘENÍ.....	32
5.1 POSTUP MĚŘENÍ	32
5.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	32
6 NÁVRH A REALIZACE.....	36
6.1 PRVNÍ VARIANTA NÁVRHU.....	36
6.2 DRUHÁ VARIANTA NÁVRHU	37
6.3 SIMULACE VÝSLEDKŮ	39
6.4 REALIZACE	41
7 KONTROLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ.....	46
8 ZÁVĚR.....	60
POUŽITÁ LITERATURA	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1-1 Trojúhelník výkonu.</i>	14
<i>Obrázek 2-1 Schéma zapojení seriové kompenzace.</i>	15
<i>Obrázek 2-2 Fázorový diagram seriové kompenzace.</i>	16
<i>Obrázek 2-3 Schéma zapojení paralelní kompenzace.</i>	17
<i>Obrázek 2-4 Fázorový diagram paralelní kompenzace.</i>	17
<i>Obrázek 2-5 V-křivky synchronního stroje.</i>	18
<i>Obrázek 2-6 Závislost jalového výkonu na činném výkonu při osmistupňové kompenzaci [3].</i>	20
<i>Obrázek 2-7 Fázové řízení proudu při indukivní zátěži.</i>	21
<i>Obrázek 2-8 Zapojení plynule řízeného kompenzátoru.</i>	21
<i>Obrázek 2-9 Paralelní aktivní filtr a jeho připojení do sítě [3].</i>	22
<i>Obrázek 2-10 Sériový aktivní filtr a jeho připojení do sítě [3].</i>	23
<i>Obrázek 2-11 Kombinovaný aktivní filtr a jeho připojení do sítě [3].</i>	23
<i>Obrázek 3-1 Zapojení úzkopásmového filtru.</i>	24
<i>Obrázek 3-2 Průběh úzkopásmového filtru [1].</i>	25
<i>Obrázek 3-3 Zapojení širokopásmového filtru druhého řádu.</i>	26
<i>Obrázek 3-4 Průběh široko pásmového filtru [1].</i>	26
<i>Obrázek 3-5 Chráněná kompenzační sekce.</i>	27
<i>Obrázek 3-6 Kmitočtová charakteristika L, C a LC filtru [4].</i>	28
<i>Obrázek 5-1 Schéma měřené zátěže.</i>	32
<i>Obrázek 5-2 Průběh napětí bez připojené zátěže.</i>	33
<i>Obrázek 5-3 Spektrum efektivních hodnot napětí bez zátěže.</i>	33
<i>Obrázek 5-4 Průběh napětí a proudu po připojení zátěže.</i>	34
<i>Obrázek 5-5 Spektrum efektivních hodnot proudu s připojenou zátěží.</i>	34
<i>Obrázek 5-6 Spektrum efektivních hodnot napětí s připojenou zátěží.</i>	35
<i>Obrázek 6-1 Schéma v programu simulink</i>	40
<i>Obrázek 6-2 Závislost frekvence na reaktanci pro jednotlivé filtry.</i>	43
<i>Obrázek 6-3 Závislost frekvence a proudu pro jednotlivé filtry.</i>	43
<i>Obrázek 6-4 Čelní maska.</i>	44
<i>Obrázek 6-5 Vnitřní uspořádání.</i>	45
<i>Obrázek 7-1 Schéma zapojení měření.</i>	46
<i>Obrázek 7-2 Spektrum efektivních hodnot proudu pro 1 kondenzátor.</i>	47
<i>Obrázek 7-3 Spektrum efektivních hodnot napětí pro 1 kondenzátor.</i>	47

<i>Obrázek 7-4 Průběh napětí a proudu pro připojený 1 kondenzátor.</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 7-5 Spektrum efektivních hodnot proudu pro 2 kondenzátory.</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 7-6 Spektrum efektivních hodnot napětí pro 2 kondenzátory.</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 7-7 Průběh napětí a proudu pro 2 kondenzátory.</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 7-8 Spektrum efektivních hodnot proudu pro 3 kondenzátory.</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 7-9 Spektrum efektivních hodnot napětí pro 3 kondenzátory.</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 7-10 Průběh napětí a proudu pro 3 kondenzátory.</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 7-11 Spektrum efektivních hodnot proudu pro rozladěný filtr.</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 7-12 Spektrum efektivních hodnot napětí pro rozladěný filtr.</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 7-13 Průběh napětí a proudu pro rozladěný filtr.</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 7-14 Spektrum efektivních hodnot proudu pro filtr 3. harmonické.</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 7-15 Spektrum efektivních hodnot napětí pro filtr 3. harmonické.</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 7-16 Průběh napětí a proudu pro filtr 3. harmonické.</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 7-17 Spektrum efektivních hodnot proudu pro filtry 3. a 5. harmonické.</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 7-18 Spektrum efektivních hodnot napětí pro filtr 3. a 5. harmonické.</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 7-19 Průběh napětí a proudu pro filtr 3. a 5. harmonické.</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 7-20 Spektrum efektivních hodnot proudu pro všechny filtry.</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 7-21 Spektra efektivních hodnot napětí pro všechny filtry.</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 7-22 Průběh napětí a proudu pro všechny filtry.</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 7-23 Spektrum efektivních hodnot proudu pro všechny filtry s připojeným odporem.</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 7-24 Spektrum efektivních hodnot napětí pro všechny filtry s připojeným odporem.</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 7-25 Průběh napětí a proudu pro všechny filtry s připojeným odporem.</i>	<i>59</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 5-1 Výsledné hodnoty zkreslení napětí a proudu, fázový posun.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 6-1 Výsledky simulací.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 6-2 Naměřené hodnot pro rezonanční kmitočet 150 Hz.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 6-3 Naměřené hodnoty pro rezonanční kmitočet 250 Hz.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 6-4 Naměřené hodnoty pro rezonanci 350 Hz.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 7-1 Naměřené hodnoty zkreslení a fázového posunu pro jednotlivé provozní stavy.....</i>	<i>46</i>

Seznam symbolů a zkratk

S	Zdánlivý výkon	[VA]
P	Činný výkon	[W]
Q	Jalový výkon	[VAr]
Q_L	Jalový induktivní výkon	[VAr]
Q_C	Jalový kompenzační výkon	[VAr]
Q_2	Jalový výkon po kompenzaci	[VAr]
$\cos\varphi$	Účinník	[-]
$\cos\varphi_k$	Účinník po kompenzaci	[-]
f_r	Rezonanční frekvence	[Hz]
f_n	Jmenovitá frekvence	[Hz]
X_0	Reaktance na rezonančním kmitočtu	[Ω]
U	Napětí	[V]
ΔU	Úbytek napětí	[V]
I	Proud	[A]
I_k	Kompenzovaný proud	[A]
I_C	Proud kondenzátorem	[A]
I_L	Proud cívky	[A]
R	Odpor	[Ω]
X_C	Reaktance kondenzátoru	[Ω]
X_L	Reaktance cívky	[Ω]
n_r	Řád harmonické	[-]
p	Činitel ztlumení	[-]
X_{LC}	Reaktance kompenzačního článku	[Ω]
Z	Impedance	[Ω]
N	Počet stupňů	[-]
R	odpor	[Ω]

1 ÚVOD

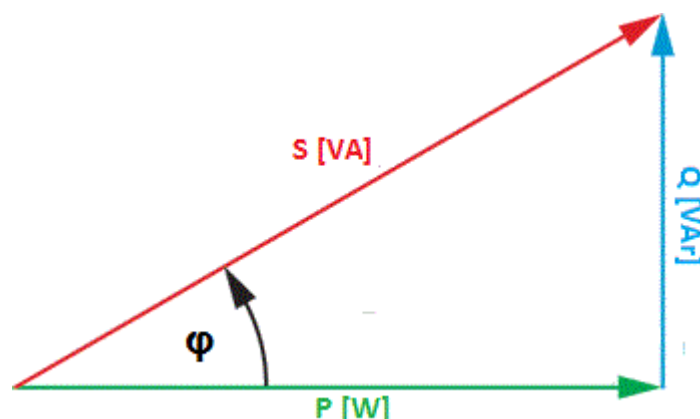
V dnešní době se elektrickou energií setkáváme v každé oblasti lidské činnosti. Je neoddelitelnou součástí každé domácnosti, ale hlavně průmyslového odvětví. Aby byla zajištěna kvalitní dodávka energie všem a beze ztát musí se distribuce elektrické energie jednotlivým odběratelům řídit jistými pravidly, určující kvalitu a vlastnosti elektrické energie. Tyto pravidla slouží hlavně k dosažení hospodárního provozu sítí. Při distribuci elektrické energie se setkáváme s několika problémy, které je potřeba vyřešit. Jedním z nich jalový výkon, který se řeší pomocí tzv. kompenzace. Dále se můžeme setkat s tím, že spotřebiče připojené k síti mohou negativně ovlivňovat síť, a to tak, že zpět do sítě vysílají vyšší harmonické složky. Ty zase eliminujeme pomocí filtrů. Tato práce se zabývá případem, kdy je potřeba kompenzovat jalový výkon, a zároveň filtrovat harmonické signály. K tomu se využívají filtračně-kompenzační zařízení.

Nejdříve se seznámíme s tím co je to jalový výkon a účinník. V druhé kapitole bude rychlé seznámení s kompenzací a základními vztahy potřebnými ke správnému návrhu kompenzace.

Ve třetí kapitole jsou popsány jednotlivé způsoby filtrace. Zároveň jsou tam popsány filtračně-kompenzační zařízení, vztahy a požadavky ke správnému návrhu filtračně-kompenzační jednotky a způsobu jejich řízení a regulace.

1.1 Jalový výkon

Výkon je obecně dán součinem napětí a proudu. To je základní vztah na získání činného výkonu P , který koná práci. Ale u spotřebičů pracujících ve střídavých sítích, které ke své činnosti potřebují generovat magnetické pole nebo elektrické pole, odebírají ze sítě výkon navíc, který potřebují k vygenerování magnetického nebo elektrického pole. Tomuto dodatečnému výkonu se říká výkon jalový Q . Jalový výkon nekoná ve spotřebiči žádnou práci, ale přesto je ke správnému chodu spotřebiče nutný. Tak jak se dynamicky mění střídavé napětí a proudy, tak i dynamicky se generuje a zaniká magnetické a elektrické pole spotřebiče. Při generování magnetické nebo elektrického pole spotřebič ze sítě odebírá jalový výkon, naopak při zániku do sítě jalový výkon dodává. Z toho nám vyplývá, že jalový výkon se nespotřebává jenom neustále koluje mezi zdrojem a spotřebičem. Tímto nám jalový výkon zatěžuje napájecí síť, protože celkový výkon přenášený sítí se skládá z činného a jalového výkonu. Tento celkový výkon nazýváme zdánlivý výkon S . Jeho velikost je dána vektorovým součtem činného a jalového výkonu. Z toho vyplývá, že energetické soustavy musí být dimenzována na přenos zdánlivého výkonu. A proto je potřeba snížit tok jalového výkonu pokud možná na minimum a všechen jalový výkon dodávat spotřebičům. Způsob jak odlehčit síť od jalového výkonu je pomocí kompenzace. Spotřebiče, které ke své činnosti potřebují magnetické pole jsou např. motory, transformátory, zářivková svítidla a spotřebiče potřebující elektrické pole jsou třeba kondenzátory [6].



Obrázek 1-1 Trojúhelník výkonu.

Základní vztahy pro výpočet zdánlivého, činného a jalového výkonu. Všechny výpočty budou uvedeny pro jednofázovou soustavu, kde U_f je fázové napětí a I proud ve fázi. Pokud by jsme chtěli počítat třífázové soustavy, tak by se všechny výkon zvýšili trojnásobně [6].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA, W, VAr]} \quad (1.1)$$

$$S = U_f * I \text{ [VA, V, A]} \quad (1.2)$$

$$P = S * \cos\varphi \quad (1.3)$$

$$Q = S * \sin\varphi \quad (1.4)$$

1.2 Účinit

Účinit nebo-li $\cos\varphi$ je fyzikální veličina, která vyjadřuje podíl činného a zdánlivého výkonu. V obrázku 1-1 můžeme $\cos\varphi$ vidět jako úhel mezi činným a zdánlivým výkonem. Vyjadřuje nám jak velké množství zdánlivého výkonu lze přeměnit na činný výkon. Hodnota účínku se pohybuje v rozmezí 0 až 1 a jedná se o bezrozměrnou jednotku, v praxi se vyžaduje jeho minimální hodnota 0,95. Účinit závisí na vzájemném fázovém posuvu napětí a proudu. Hodnotu nám účínku nám také ovlivňuje obsah vyšších harmonických (nesinusový průběh). Ten způsobuje deformaci napětí a proudu a tedy i snížení hodnoty účínku. Zlepšením hodnot účínku znamená snížit hodnotu jalového výkonu, a proto se provádí kompenzace, protože se jedná o jednoduchý způsob, jak zlepšit hodnotu účínku, a tím zlepšit parametry sítě [6].

Účinit je dána podílem činného na zdánlivého výkonu.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \text{ [-, W, VAr]} \quad (1.5)$$

2 KOMPENZACE

Legislativně jsou určeny minimální požadavky na kvalitu elektrické energie a porušení těchto požadavků hrozí velké finanční postihy, aby jsme zajistili tyto požadavky a splnili všechny parametry je potřeba kompenzovat jalový výkon sítích. Nejednoduším způsobem jak kompenzovat jalový výkon je do sítě vložit další zařízení, obvykle kondenzátor. A to buď seriově nebo paralelně k síti. Kondenzátory připojené seriově ke spotřebiči změni charakter sítě a kondenzátor připojený paralelně ke spotřebiči změni charakter zatížené sítě [3].

2.1 Kompenzace jalového výkonu se sériovým kondenzátorem

Při seriové kompenzaci jsou vloženy kondenzátory do série s kompenzovaným zařízením. Do obvodu se vřazuje kapacita, přes kterou prochází provozní proud. To znamená, že proud v obvodu zůstane stejný a bude se měnit podle zatížení. Kondenzátor tedy nebude měnit proud obvodem, ale bude působit jako samočinný regulátor napětí na spotřebiči [3].

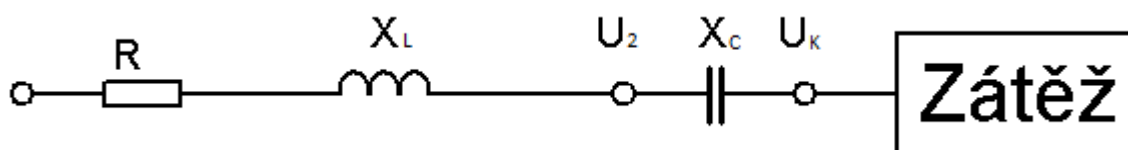
Vztah pro úbytek napětí před seriovou kompenzací je:

$$\Delta U = R * I * \cos\varphi + X_L * I * \sin\varphi [V, \Omega, A, -, \Omega, A, -] \quad (2.1)$$

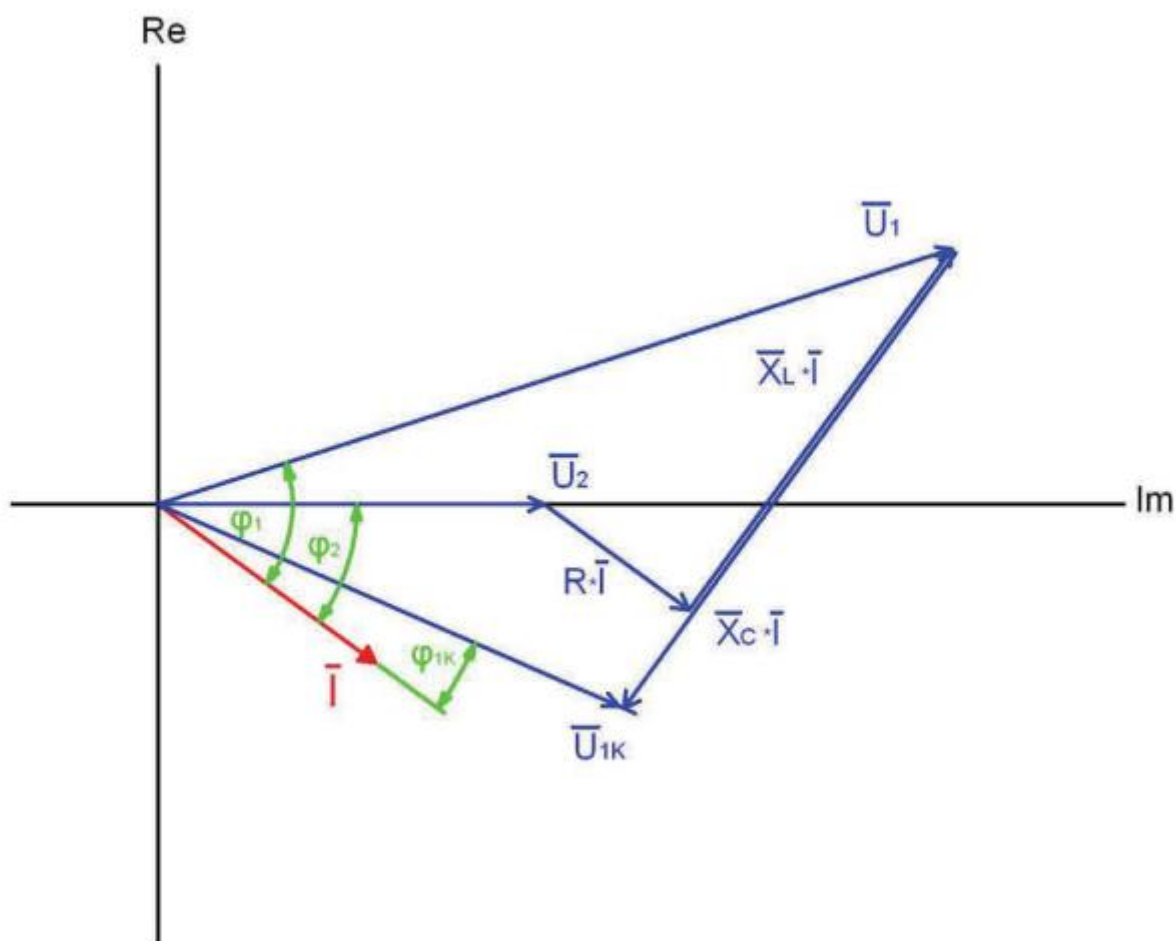
Úbytek napětí se nám po vložení kondenzátoru změni takto:

$$\Delta U = R * I * \cos\varphi + (X_L - X_C) * I * \sin\varphi [V, \Omega, A, -, \Omega, \Omega, A, -] \quad (2.2)$$

ΔU	úbytek napětí
I	proud obvodem
R	odpor vedení
X_L	induktivní reaktance vedení
X_C	kapacitní reaktance kondenzátoru



Obrázek 2-1 Schéma zapojení seriové kompenzace.



Obrázek 2-2 Fázorový diagram seriové kompenzace.

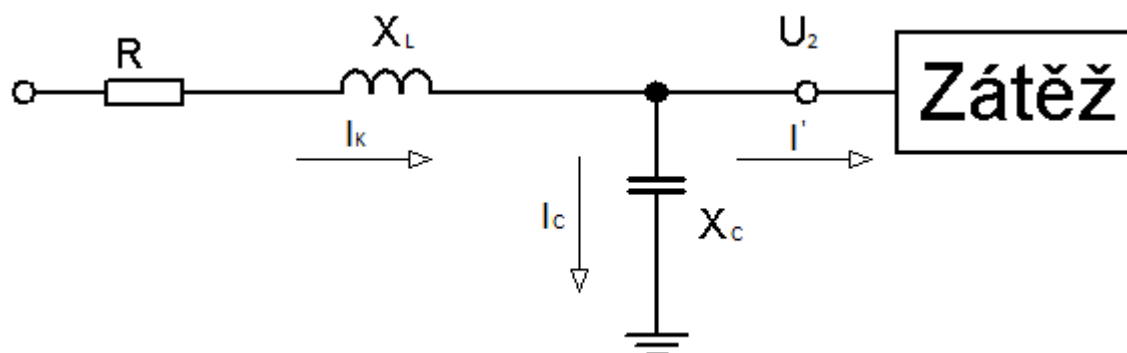
2.2 Kompenzace jalového výkonu s paralelním kondenzátorem

Kondenzátory jsou usmístěny paralelně k místu odběru. Podle místa umístění kondenzátorů rozeznáváme tyto rozdělení:

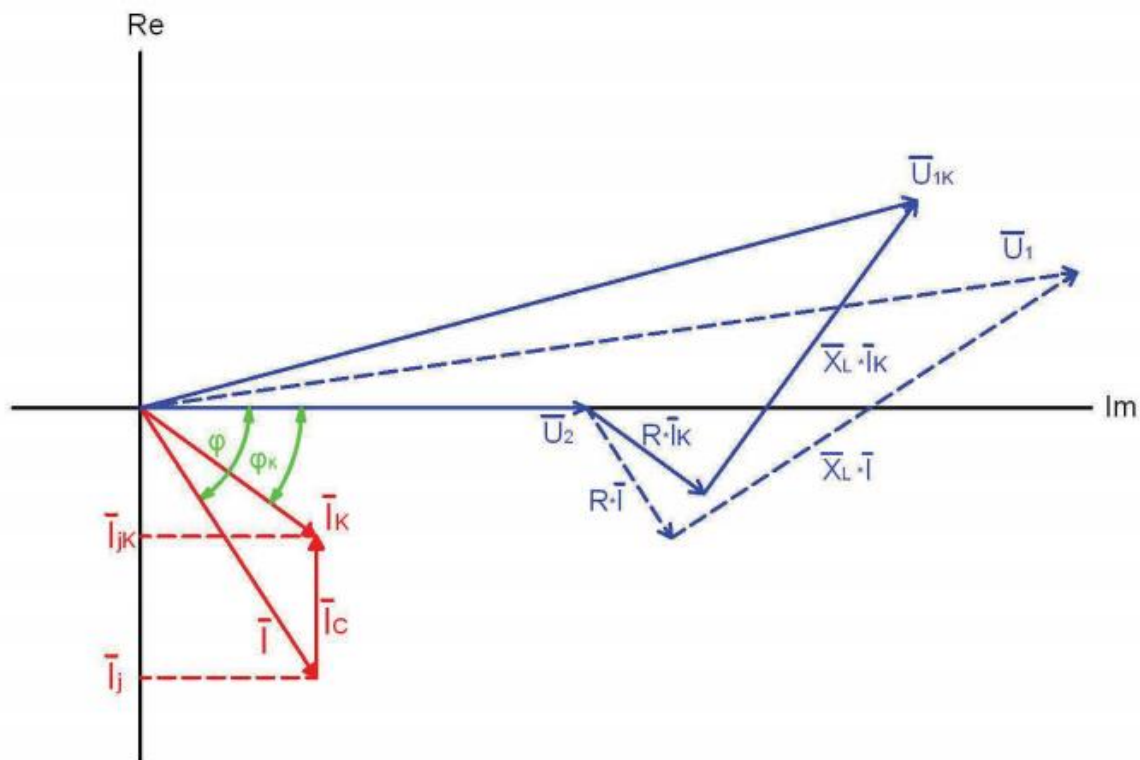
- **Jednotlivá kompenzace** – Kondenzátory jsou umístěny k příslušnému spotřebiči v síti. V tomto případě dochází k přímé kompenzaci účinniku daného strojem, a zároveň k odlehčení jalového výkonu celé soustavy. Nevýhodou toho uspořádání je využití kompenzačního výkonu pouze na jednom místě, pokud by jsme potřebovali kompenzovat více přístrojů museli by jsme použít velký počet kompenzačních kondenzátorů [4].
- **Skupinová kompenzace** – Kondenzátory se připojují k příslušnému rozváděči, který může být společný pro více zařízení. Toto uspořádání nezajišťuje ideální kompenzaci jednotlivých zařízení, ale z ekonomického hlediska je velice výhodná. Kompenzační výkon nedosahuje nižších hodnot. Hlavní využití této metody je hlavně v průmyslových elektroinstalacích [4].
- **Ústřední kompenzace** – Umístění kondenzátoru je podobné jako u skupinové kompenzace. Kondenzátory jsou umístěny v hlavní rozvodně. V rozvodnách bývají rozděleny do několika baterií, to nám umožňuje zvyšovat nebo snižovat kompenzační výkon podle potřeby. Nevýhodou tohoto provedení je připojení kompenzátoru na vysoké napětí z trafostanice. To nám zvyšuje náklady na provedení tohoto řešení [4].

Všechny tyto metody lze spolu kombinovat. V praxi se tyto kombinace často využívají. Jednotlivé kombinace se určuje podle charakteristiky spotřebičů, soudobosti a uspořádání v obvodu[4].

2.2.1 Prosté kondenzátory



Obrázek 2-3 Schéma zapojení paralelní kompenzace.



Obrázek 2-4 Fázorový diagram paralelní kompenzace.

Z fázorového diagramu je patrné, že při paralelní kompenzaci dochází ke změně odebíraného proudu spotřebičem [3].

Pro výpočet celkového proudu platí vztah:

$$\bar{I}_K = \bar{I}' + \bar{I}_C [A, A, A] \quad (2.3)$$

Předpokládáme, že hodnota činného výkonu zůstane stejná a po připojení kondenzátoru se změní pouze jalová složka proudu [3].

Proto platí následující vztah:

$$\frac{I_{JK}}{I} = \frac{tg\varphi_K}{tg\varphi} \quad (2.4.)$$

Pro výkon kondenzátoru platí:

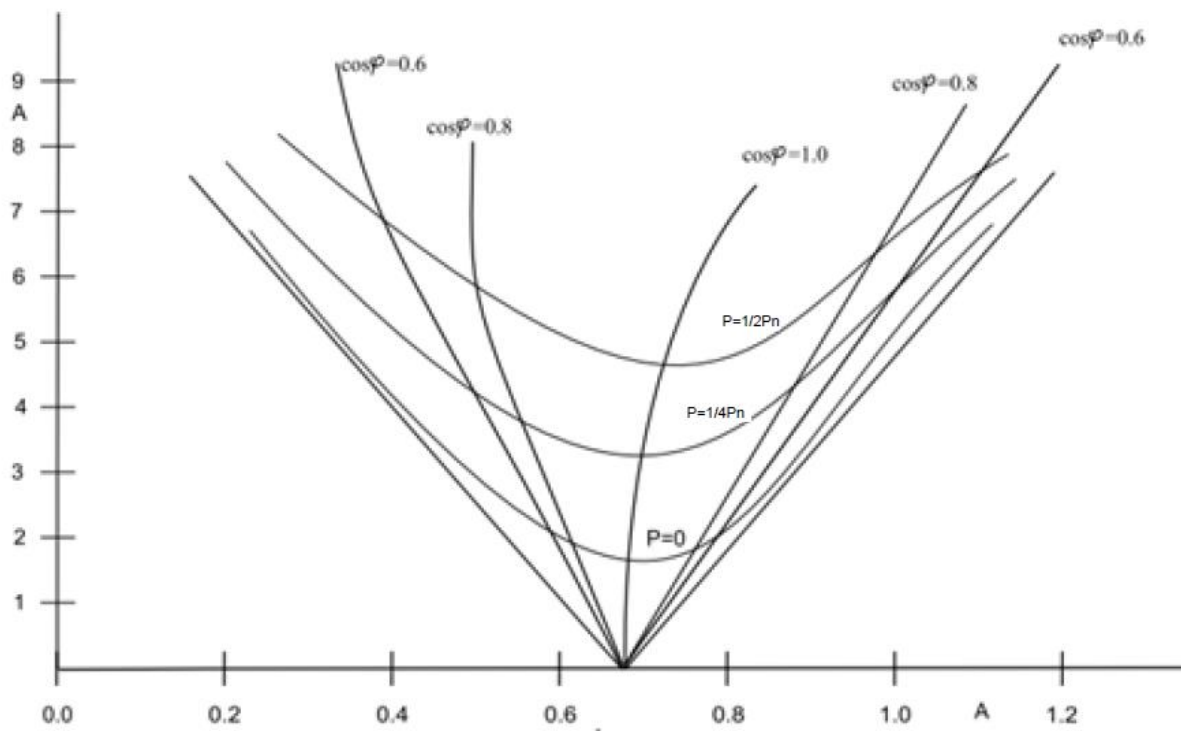
$$Q_C = U * I_C = U_2^2 * \omega * C = P * (tg\varphi - tg\varphi_K) \quad (2.5)$$

Ztráty ušetřené paralelní kompenzací jsou potom:

$$\Delta P_{u\check{s}} = \Delta P - \Delta P_K = \frac{R}{U_s^2} * [(P^2 - Q^2) - P^2 + (Q - Q_C)^2] = \frac{R}{U_s^2} * [Q_C * (2 * Q - Q_C)] \quad (2.6)$$

2.3 Rotační kompenzační zařízení

Ke kompenzaci jalového výkonu také lze využít synchronní motory pracující naprázdno. Motor tak odebírá pouze malý činný výkon, aby pokryl svoje ztráty. Synchronní motory se využívají hlavně v aplikacích, kde lze očekávat stabilní zátěžný moment. To jsou například čerpadla, kompresory, ventilátory, rotační pece apod. Změnou velikosti budícího proudu při stálem napájecím napětí a kmitočtu, je za předpokladu stálého zátěžného momentu stálý i činný výkon motoru. Změnou velikosti budícího proudu, ale můžeme měnit účinek odběru motoru, a to v oblasti induktivní i kapacitní. Závislost proudu statoru na budícím proudu při stálem výkonu má tvar tzv. V-křivek [].



Obrázek 2-5 V-křivky synchronního stroje.

Synchronní motory se často osazují regulátory. Tyto regulátory jsou schopny zajistit chod motoru při změnách činného zatížení s konstantním účínkem, nebo s konstantním jalovým výkonem [5].

Synchronní stroje používané ke kompenzaci jsou převážně konstruovány na hladiny vysokého napětí. Odezva na potřebnou změnu je v případě synchronních strojů zatížena určitým zpožděním. Z toho nám vyplývá, že synchronní stroje nejsou vhodné ke kompenzaci spotřebičů jimž se dynamicky mění potřeba jalového výkonu. Vzhledem k vysokým výkonům synchronních strojů a pomalé regulaci se synchronní stroje pro kompenzaci jalového výkonu využívají jako centrální kompenzace velkých průmyslových sítí [5].

Kompenzace synchronními stroji je v poslední době na ústupu. To protože provoz synchronních strojů je spojen se spotřebou činného výkonu, náklady na údržbu stroje a nároky na obestavěný prostor jeho vybavenost oproti statickým kompenzačním zařízením [5].

2.4 Způsoby řízení kompenzačního výkonu

Řízení, spínání a regulace kompenzačních jednotek je dnes neoddělitelnou součástí každého kompenzačního zařízení a má vliv na kvalitu celkové kompenzace. Toto lze provést několika způsoby, které si teď postupně popíšeme [5].

2.4.1 Stupňovitě řízené kompenzátory

Kompenzační výkon je zde rozdělen do několika stupňů. Důležitou otázkou je zde volba počtu a velikost jednotlivých stupňů. Tato otázka platí pro všechny kompenzátory na hladinách velkého i nízkého napětí. Volba počtu stupňů závisí na velikosti jednoho stupně, potřebném kompenzačním výkonu a žádané hodnotě vykompenzování účinníku. Obvykle se jedná o hodnotu $\cos\varphi_0 \geq 0,95$, nebo také $\operatorname{tg}\varphi_0 \leq 0,33$. Pro stupně se stejným kompenzačním výkonem musí v ideálním případě splněna podmínka [5]:

$$\frac{Q_L - N * Q_{C1}}{P} \leq \operatorname{tg}\varphi_0 [VAr, -, VAr, W, -] \quad (2.7)$$

Q_L Jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu P .

Q_{C1} Jalový výkon kompenzačního stupně.

N Počet stupňů.

Předchozí vztah upravíme tak, aby jsem mohli vypočítat počet stupňů kompenzátoru N [5]:

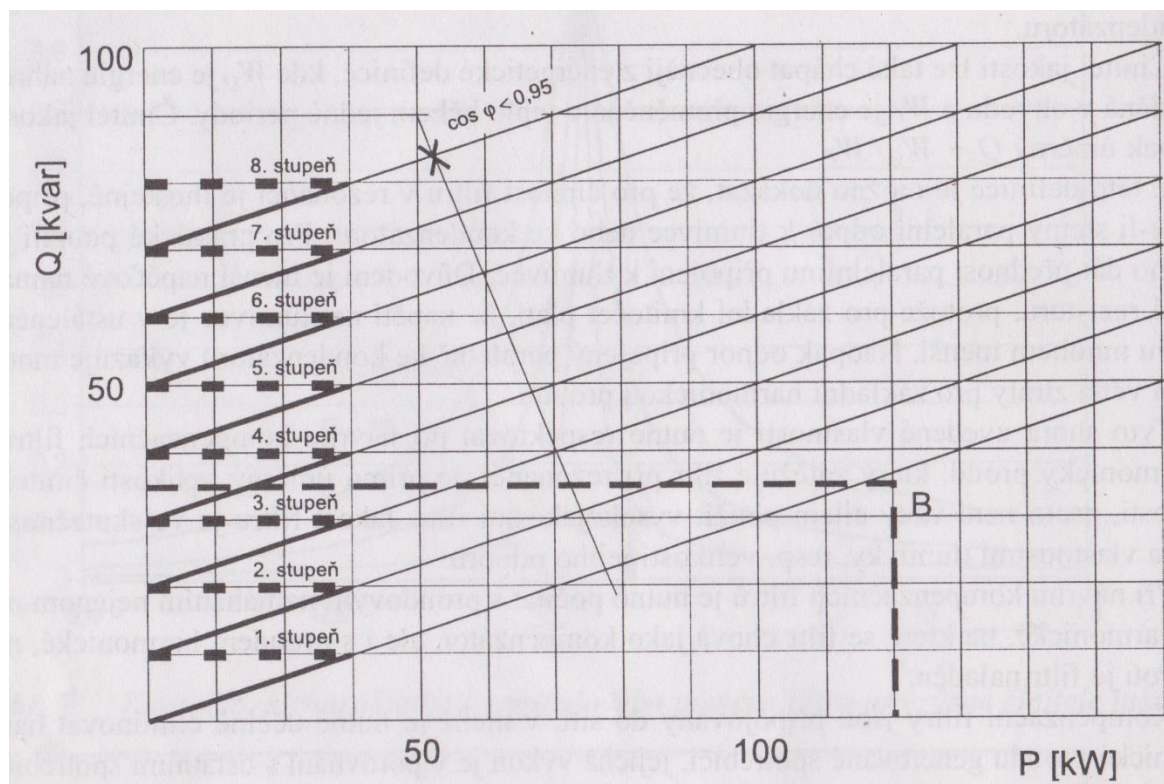
$$N \geq \frac{Q_L - P * \operatorname{tg}\varphi_0}{Q_{C1}} [-, VAr, W, -, VAr] \quad (2.8)$$

Velikost jednoho kompenzačního stupně je možno určit z minimálního průměrného odebíraného činného výkonu [5]:

$$Q_{C1} = P_{min} * \operatorname{tg}\varphi [VAr, W, -] \quad (2.9)$$

Reálně velikost jednotlivých kompenzačních stupňů nemusí být připínávané stupně stejně velké. Uvedené vztah platí pro určení nejmenšího kompenzačního stupně a další stupně jsou nejčastěji jeho násobky [5].

Graficky potom stupňovitě řízené kompenzátory stejné velikosti můžou vypadat takto:



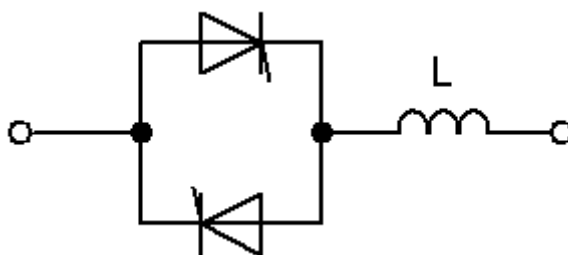
Obrázek 2-6 Závislost jalového výkonu na činném výkonu při osmistupňové kompenzaci [3].

Stupňovitě řízené kompenzátory lze dále rozdělit na:

- **Konstaktní** – Pracují na principu přímého připínání kompenzačních sekcí, případně jejich skupin přímo na kompenzovanou síť podle povelů regulátoru jalového výkonu. Tyto kompenzátory se v praxi nejčastěji vyskytují sítích, kde nejsou kladeny vysoké nároky na rychlost kompenzace. Při použití stykačů je jejich zásadním nedostatkem je vznik přechodových dějů při připojení kompenzátoru k síti. To může způsobit proudové nárazy, které mohou dosáhnout velikosti až třiceti násobku hodnot jmenovitých proudů, nebo vznik rušivých jevů při sepnutí jako zpětný vliv na napájecí síť. Dále mohou způsobit impulzní rušení citlivých elektronických zařízení, měřicí a regulační techniky. Tyto zásadní nevýhody můžeme eliminovat předřazením ochranných tlumivek a stykačů s odporovým spínáním [5].
- **Bezkontaktní** – V aplikacích, kde je kladen vyšší nárok na rychlost změny jalového výkonu, je možné místo běžných stykačů použít bezkontaktní spínače a současně je potřeba použít rychlejší regulátor jalového výkonu. Kondenzátorům se zde předřazují ochranné tlumivky. To z důvodu, aby se zamezilo přechodovým jevům při připojení kondenzátoru. Ty by totiž mohli zničit řídicí polovodičové spínače a tomu je potřeba za všech okolností zabránit. V praxi je bezkontaktní spínač tvořen dvojicí antiparalelních tyristorů. Rychlost regulace závisí na rychlosti algoritmu, který využívá regulátor jalového výkonu [5].

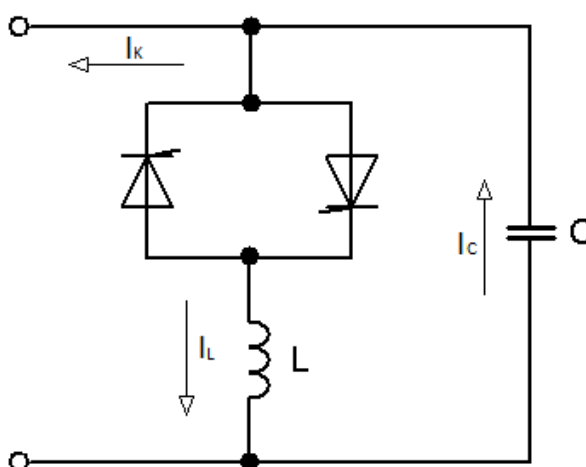
2.4.2 Plynule řízené – pasivní

Řízení jalového proudu plynule je možné řízením procházejícího proudu tlumivkou. Použije se k tomu fázově řízený tryistorový spínač v antiparalelním zapojení. Toto zapojení umožňuje měnit čistě induktivní proud od nulové hodnoty až po plnou hodnotu danou impedancí tlumivky L [5].



Obrázek 2-7 Fázové řízení proudu při indukční zátěži.

Pokud chceme řídit proud kapacitní, nelze pouze vyměnit tlumivku za kondenzátor. Problémem by byli přechodové jevy. Ale na řízení kapacitního proudu nám stačí, když k původním obvodu na obrázku 3-9 se paralelně připojí kondenzátor [5].



Obrázek 2-8 Zapojení plynule řízeného kompenzátoru.

Je-li $I_C \geq I_L$, potom kompenzační proud má vztah:

$$\bar{I}_K = \bar{I}_C - \bar{I}_L [A, A, A] \quad (3.18)$$

V praxi se, ale využívají převážně trojfázové zapojení, a proto se při návrhu musíme rozhodnout jestli použijeme zapojení do hvězdy nebo do trojúhelníku [5].

Pokud použijeme zapojení do hvězdy tak každým fázovým vodičem prochází stejný fázový proud, jaký prochází dekompenzační jednotkou. To znamená, že v celé síti prochází proudy všech harmonických složek, které obsahuje řízený proud tlumivky a další nevýhodou je vyšší hodnota proudu, na kterou je nutno dimenzovat tlumivku a větší ztráty dekompenzačního členu. Z těchto důvodů se proto využije zapojení do trojúhelníku. Jeho zpětný vliv na kompenzovanou síť z hlediska harmonických složek výrazně klesá [5].

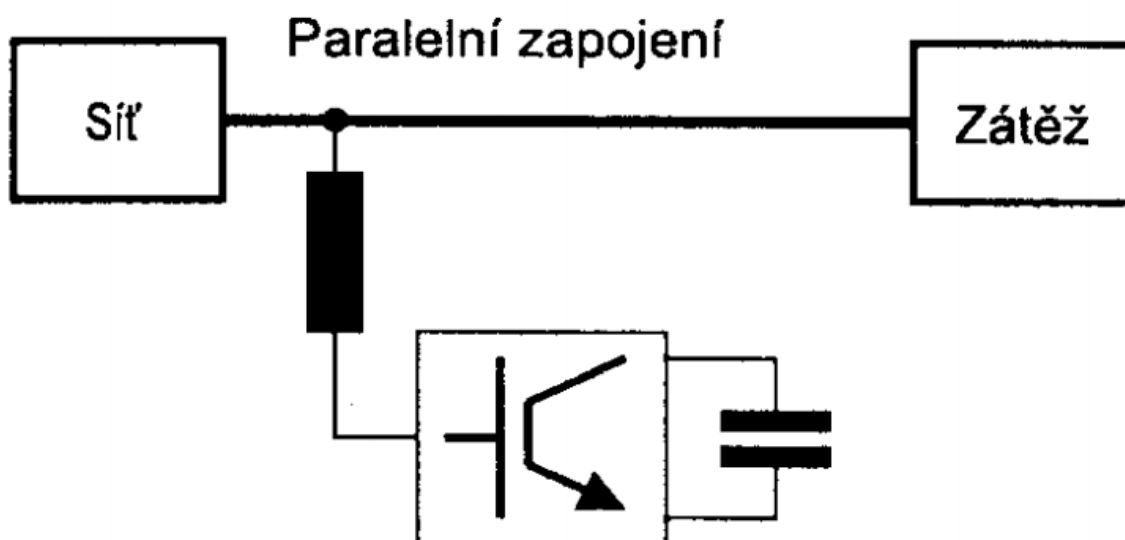
2.4.3 Plynule řízené – aktivní

Aktivní filtry si můžeme představit jako paralelně nebo seriově zapojené generátory. Ty jsou řízeny regulačním systémem tak, aby byl schopen sledovat dynamicky změny v síti a vždy byla zajištěna správná kompenzace nežádáných harmonických složek. Podle typu zapojení aktivního filtru do sítě můžeme dosáhnout zlepšení proudu, napětí nebo obojí. Na základě těchto požadavků můžeme aktivní filtry dělit na paralelní (derivační), sériové a kombinované [5].

2.4.3.1 Paralelní aktivní filtry

Toto zapojení tvoří řízený generátor proudu zapojený paralelně k zátěži. Odstraňuje nežádoucí harmonické složky proudu tak, že generuje stejné harmonické složky, ale opačného směru, a ty zavádí do sítě. Díky tomu je zvlněný proud zbaven zvolených harmonických složek a tímto způsobem se filtruje proud odebíraný ze sítě a tím se také upravuje deformace napětí způsobená zátěží. Takto je možné v čase podle výskytu harmonických složek provádět selektivní kompenzaci bez nebezpečí, že dojde k rezonanci [5].

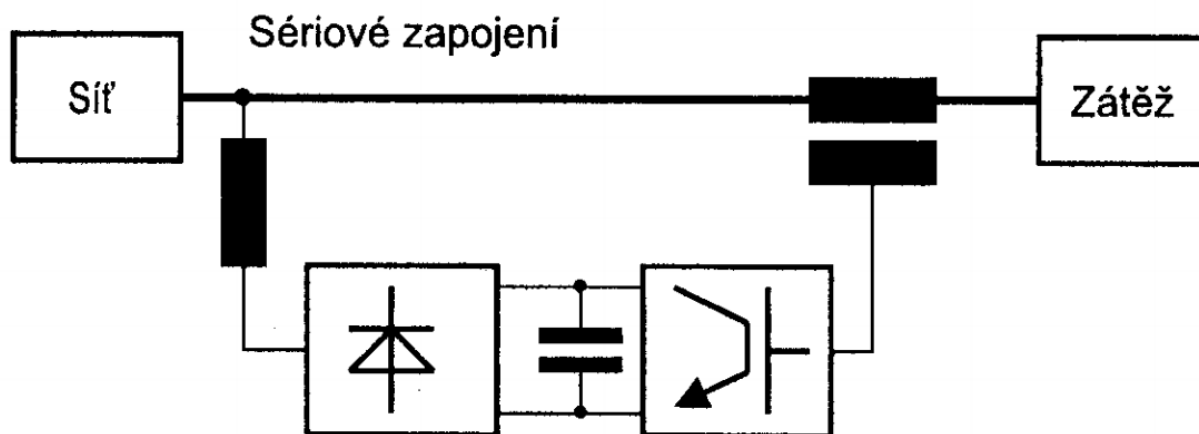
Tento generátor lze provést tak, že bude tvořen můstkovým zapojením polovodičových spínačů. Jedná se o tranzistory IGBT. Třífázové provedení tohoto filtru obsahuje šest spínačů a zdroj napětí nebo proudu. Vhodným spínáním jednotlivých tranzistorů dosáhneme požadovaného tvaru proudu tekoucího do filtru, ale tento proud obsahuje velké množství harmonických složek v oblasti spínací frekvence (jednotky až desítky Hz), a proto je potřeba umístit mezi vývody aktivního filtru a napájecí síť pasivní filtr pracující jako dolní propust. To eliminuje všechny nežádoucí vyšší harmonické složky vycházející z aktivního filtru [5].



Obrázek 2-9 Paralelní aktivní filtr a jeho připojení do sítě [3].

2.4.3.2 Sériové aktivní filtry

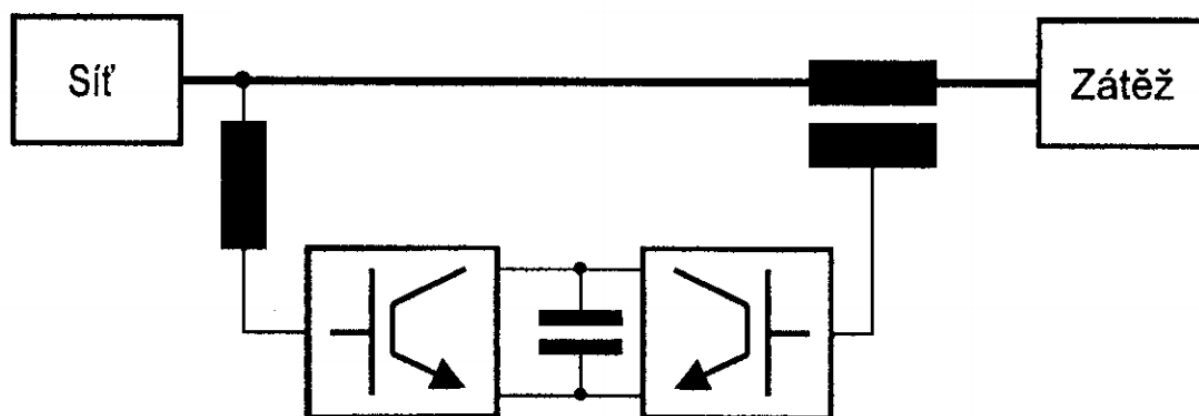
Generátor napětí je připojen mezi svorky sítě a svorky zátěže. Toto zapojení nám umožňuje upravit přiváděné napětí do spotřebiče na požadovaný tvar. Tento filtr upravuje napětí stejně jako předem popsáný paralelní filtr upravuje proud. Tím se myslí, že je schopen udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, eliminovat vyšší harmonické. Dále je schopen zajišťovat dodávky energie i při výpadku napájení. Aktivní sériové filtry tedy upravují síť od napájení ke spotřebiči. To znamená, že dodává zátěži kvalitnější napětí [5].



Obrázek 2-10 Sériový aktivní filtr a jeho připojení do sítě [3].

2.4.3.3 Kombinované aktivní filtry

Výše popsané principy lze také vhodně zkombinovat v jeden funkční celek. Tím vzniká systém, který je schopen nám zajistit vhodné napětí dodávané spotřebiči, tak i definovaný průběh odebíraného proudu [5].



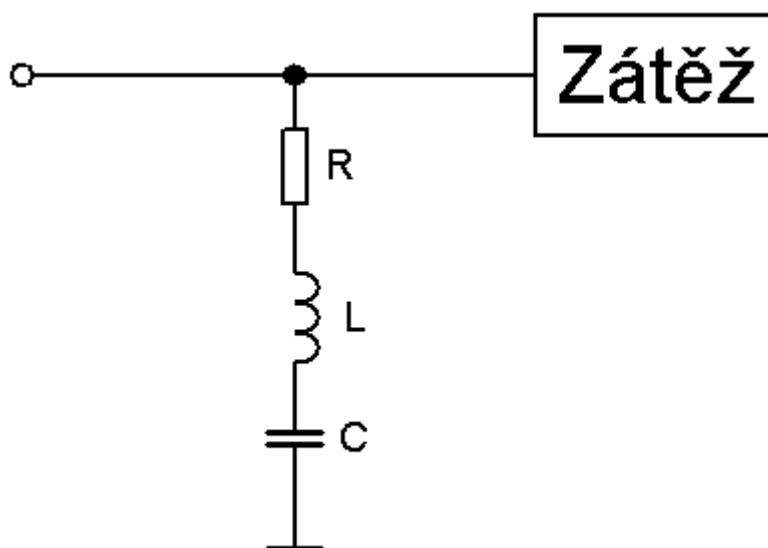
Obrázek 2-11 Kombinovaný aktivní filtr a jeho připojení do sítě [3].

3 FILTRY

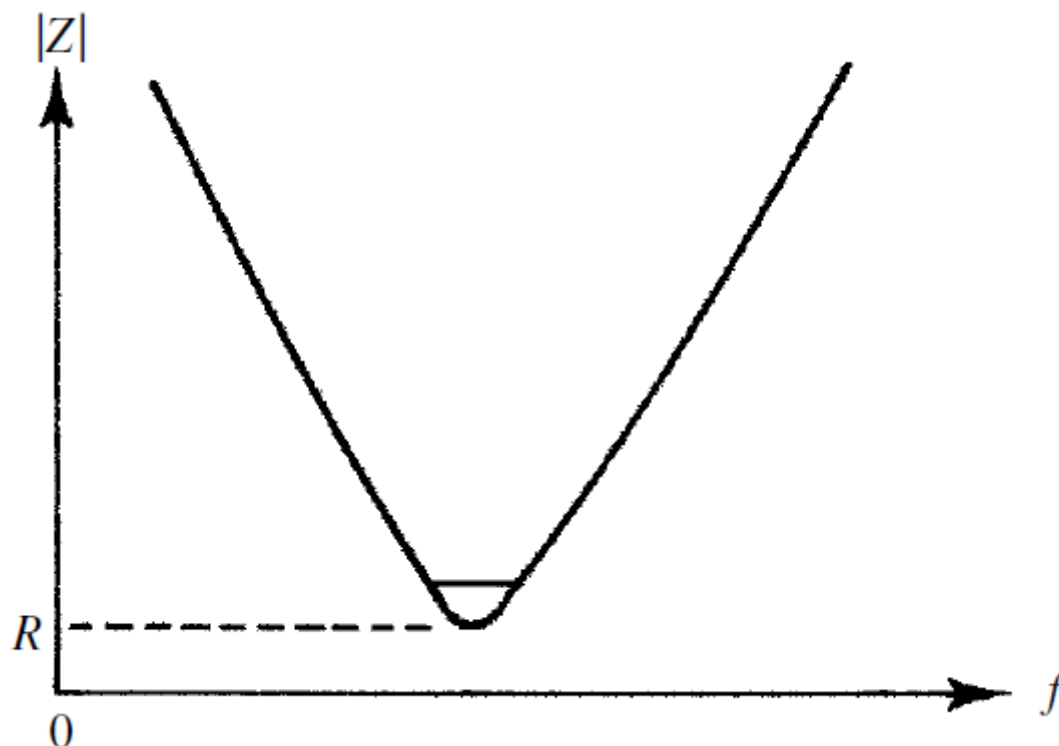
S rostoucím využitím výkonových spínačů a převodníku nastaly také problémy se zkreslením průběhu v síti. To protože proud polovodičových spínačů obsahuje velké množství harmonických složek v okolí jejich spínacích frekvencí. Z toho důvodu je nutné tyto harmonické složky eliminovat. K eliminaci harmonických složek využívají filtry. V této práci se seznámíme se základními pasivními filtry [1].

3.1 Úzkopásmové filtry

Pasivní filtry se skládají z jednoduchého RLC obvodu. Jsou navrženy vždy na jednu určenou rezonanční frekvenci. Rezonance je stav, kdy indukční a kapacitní impedance je si rovna. To znamená, že se indukční a kapacitní reaktance navzájem vyruší a celkové impedance je daná pouze velikostí odporu. Filtry můžeme rozdělit na úzkopásmové (jsou naladěny na jednu určitou frekvenci) nebo širokopásmové (filtrují široké pásmo frekvencí). Nejčastěji se používá kaskáda paralelně k sobě zapojených filtrů tak, aby každý fungoval na jednu frekvenci [1].



Obrázek 3-1 Zapojení úzkopásmového filtru.

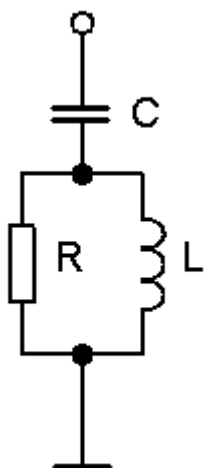


Obrázek 3-2 Průběh úzkopásmového filtru [1].

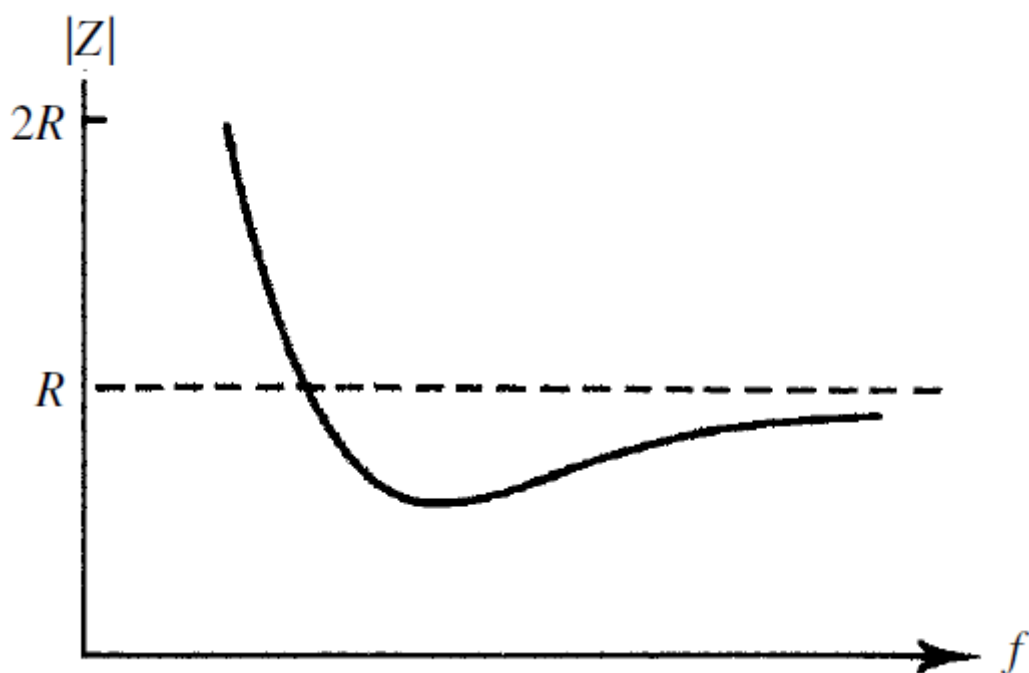
3.2 Širokopásmové filtry

Hlavní výhodou širokopásmových filtrů je ta, že při rezonanci způsobuje nízké hodnoty impedance pro široké spektrum vyšších harmonických. Máme čtyři základní druhy širokopásmových filtrů:

- Širokopásmový filtr prvního řádu – Normálně se tento filtr nepoužívá, protože vyžaduje vysoké kapacity a má velké ztráty na základní frekvenci.
- Širokopásmový filtr druhého řádu – je znázorněn na obrázku 3-3. Poskytuje nejlepší filtrační výkon, ale v porovnání s filtrem třetího řádu má větší ztráty na základní frekvenci.
- Širokopásmový filtr třetího řádu – Hlavní výhodou toho typu filtru jsou menší ztráty na základním kmitočtu. To je způsobeno přidáním malé kapacity do série s odporem.
- Širokopásmový filtr C-typu – Jeho filtrační výkon je mezi filtrem druhého řádu a filtrem třetího řádu. Jeho hlavní výhodou je snížení ztrát na základním kmitočtu.



Obrázek 3-3 Zapojení širokopásmového filtru druhého řádu.



Obrázek 3-4 Průběh široko pásmového filtru [1].

U všech pasivních filtrů je rezonance daná vztahem [2]:

$$f_r = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} \text{ [Hz, H, F]} \quad (3.1)$$

A reaktance kapacity a indukčnosti na rezonančním kmitočtu [2]:

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ } [\Omega, \text{H, F}] \quad (3.2)$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f_r * X_0} \text{ [F, Hz, } \Omega] \quad (3.3)$$

$$L = \frac{X_0}{2 * \pi * f_r} [H, \Omega, Hz] \quad (3.4)$$

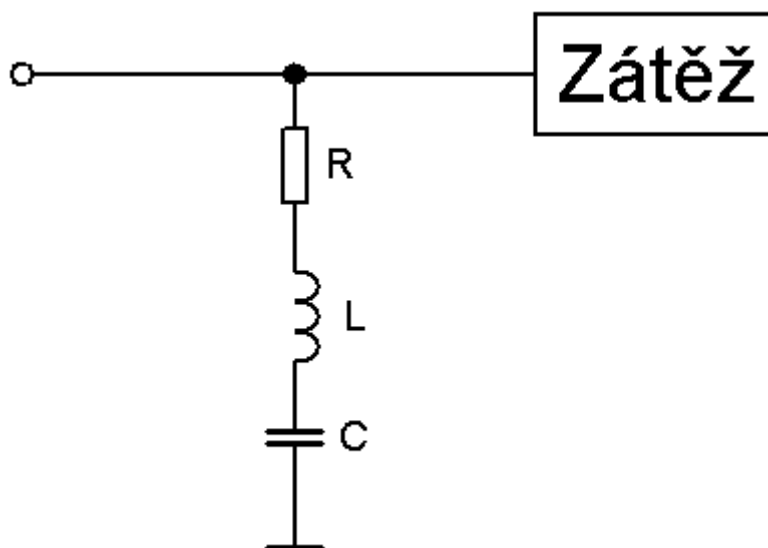
Pro širokopásmové filtry je také třeba určit velikost odporu, který bude vřazen paralelně k indukčnosti. Pro širokopásmový filtr druhého řádu platí následující vztah [1]:

$$f_n = \frac{1}{2 * \pi * C * R} \quad (3.5)$$

Úpravou toho vztahu je možné vypočíst velikost potřebného odporu pro širokopásmový filtr druhého řádu.

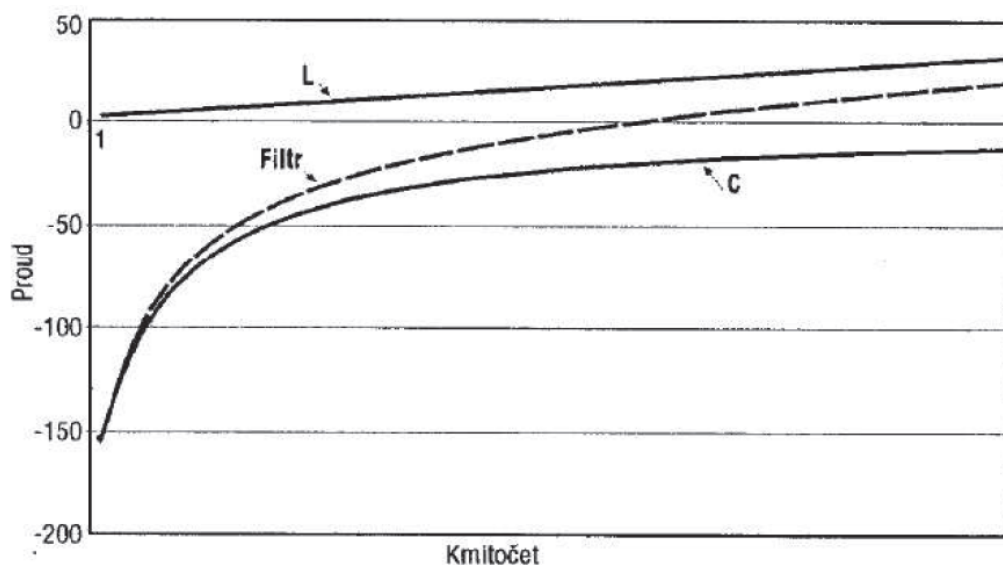
3.3 Chráněná kompenzační sekce

Jedná se o vřazení indukčnosti do série s kondenzátorem určeným ke kompenzaci, a tak vzniká jednoduchý sériový RLC článek. Chráněná kompenzační sekce se v praxi využívá tam, kde je velký výskyt nelineární zátěže, které způsobují, že se vsítí objevují vyšší harmonické signály. Také se aplikuje do obvodů, kde hrozí rezonance kondenzační kapacity s indukčností zátěže. Jeho zapojení je stejné jako u filtrů, ale v tomto případě nás zajímá nejenom filtrace vyšších harmonických složek, ale také kompenzace výkonu, proto je třeba při návrhu myslet na potřebný kompenzační výkon[3].



Obrázek 3-5 Chráněná kompenzační sekce.

Reaktance kondenzátoru je závislá na kmitočtu a to tak, že v rostoucím kmitočtem se reaktance zmenšuje. V tomto případě by celková impedance klesla a došlo by k navýšení proudu v důsledku vyšších harmonických. To by způsobilo přetížení kondenzátoru. Proto je do obvodu zařazena tlumivka, protože s rostoucím kmitočtem její reaktance naopak roste. Tlumivka všechny vyšší harmonické potlačí, a tím nedochází k přetěžování kondenzátoru. To je důvod proč se tomuto zapojení říká chráněná kompenzační sekce, protože tlumivka v tomto případě slouží k ochraně kondenzátoru před přetěžováním [3].



Obrázek 3-6 Kmitočtová charakteristika L , C a LC filtru [4].

Rezonanční kmitočet chráněné kompenzační sekce musí být zvolen tak, aby se nacházel pod kmitočtem nejnižší harmonické vyskytující se v síti, a aby zároveň neohrožoval signál dálkového ovládání HDO, který se vyskytuje na frekvencích 183 1/3 Hz, 216 2/3 Hz a 283 1/3 Hz. Nejčastěji se, ale vyskytuje signál 216 2/3 Hz. Proto se používají rezonanční frekvence 189 Hz [3].

Pro správný návrh kompenzační sekce použijeme následující vztahy:

Poměrem rezonančního kmitočtu f_r a jmenovitého pracovního kmitočtu f_n dostaneme řád harmonické n_r při, které nastává rezonance [3].

$$n_r = \frac{f_r}{f_n} [-, Hz, Hz] \quad (3.6)$$

Činitel zatlumení:

$$p = \frac{1}{n_r^2} = \left(\frac{f_N}{f_r} \right)^2 [-, Hz, Hz] \quad (3.7)$$

Reaktance kondenzátoru:

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_C} [\Omega, V, VA] \quad (3.8)$$

U_{CN} optimalizované napětí kondenzátoru

Q_C Výkon kondenzátoru

Ochranná tlumivka za aplikuje za podmínky $X_L \ll X_C$:

$$X_L = -p * X_C [\Omega, -, \Omega] \quad (3.9)$$

Reaktance kompenzačního článku:

$$X_{LC} = (1 - p) * X_C [\Omega, -, \Omega] \quad (3.10)$$

Výkon kondenzátoru při fázovém napětí:

$$Q_c = 3 * U_F^2 * \frac{1}{X_c} [VAr, V, \Omega] \quad (3.11)$$

Výkon při jiném kmitočtu ω_2 a jiném napětí U_2 :

$$Q_2 = Q_1 * \frac{(U_2)^2 * \omega_2}{(U_1)^2 * \omega_1} = Q_1 * \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 * \frac{f_2}{f_1} [VAr, V, Hz] \quad (3.12)$$

3.4 Kompenzační filtry

Kompenzační filtry se využívají k filtraci harmonických proudů a současně pro kompenzaci účinniku. Kompenzační filtry tvoří výkonové sériové LC filtry. Jedná se tedy o stejné zapojení jako u chráněné kompenzační sekce a úzkopásmových filtrů. Princip funkce můžeme vidět v obrázku 3-6. Tlumivka L a kondenzátor C jsou čistě reaktivní části. Ohmická část, která je ztrátová složka obvodu je tvořené odporem R [3].

Kompenzační filtry jsou schopny pracovat v širokém pásmu kmitočtů. Při rezonanční frekvenci f_r , nastane rezonance, a to znamená, že vyruší kapacitní a induktivní reaktance a celková impedance obvodu je určena pouze odporem. To znamená, že proud je pouze činné povahy a tím dochází k filtraci harmonických složek, a také ke zlepšení účinniku [3].

Impedance je daná vztahem:

$$\bar{Z} = R + j * \left(\omega * L - \frac{1}{\omega * C} \right) [\Omega, \Omega, H, F] \quad (3.13)$$

Samotné provedení filtrace spočívá ve více paralelně k sobě připojených kompenzačních filtrů, které jsou každý naladěny na charakteristické harmonické a ty se řídí regulátorem. Kompenzační filtry se standardně nevyrábí, a proto je potřeba každý filtr navrhnout a vyrobít pro konkrétní požadavky. Využívají se hlavně v sítích, kde je rušení vyššími harmonickými vysoké a je potřeba harmonické generované spotřebiči eliminovat, protože jejich výkon je v síti dominantní [3].

3.5 Určení napěťové hladiny

Při návrhu je potřeba určit napěťovou hladinu kondenzátoru. Tím, že jsou kondenzátory v sérii s indukčností může dojít k tomu, že napěťová hladina bude vyšší než navrhovaná hodnota napětí. V případě, že by napěťová hladina byla vyšší než jsem přepokládali mohlo by dojít k selhání systému s katastrofálními následky, protože by došlo k destrukci kondenzátoru. Napěťovou hladinu na kondenzátoru a na tlumivce lze určit ze znalosti napětí zdroje a impedance kondenzátoru a tlumivky tak, že se nejprve určí jalový výkon [2]:

$$Q = \frac{U_n^2}{(X_c - X_l)} [VAr, V, \Omega, \Omega] \quad (3.14)$$

Z vypočteného jalového výkonu se určí proud protékající obvodem:

$$I = \frac{Q}{U_n} [A, VAr, V] \quad (3.15)$$

Výsledná hodnota napětí na kondenzátoru a tlumivce se určí vztahem:

$$U_C = I * X_C [V, A, \Omega] \quad (3.16)$$

$$U_L = I * X_L [V, A, \Omega] \quad (3.17)$$

4 CÍL PRÁCE

Cílem práce je kromě teoretického seznámení se s problematikou filtrace a kompenzace, také aplikace získaných teoretických znalostí.

Nejprve je potřeba si určit zátěž pro kterou se bude dané filtračně-kompenzační zařízení navrhovat. Bude se jednat o jednofázovou střídavou indukční zátěž. Efektivní hodnota napětí bude 230 V a efektivní hodnota proudu bude maximálně 1 A. Na vstupu zátěže bude diodový můstek a dále za ním bude indukčnost o velikosti 760 mH a odpor o velikosti 180 Ω . Schéma zátěže je znázorněno v obrázku 5-1.

Po určení zátěže je potřeba si stanovit funkční požadavky na filtračně-kompenzační zařízení. Hlavním cíem praktické části práce je navrhnout kompenzaci účinniku zátěže a filtry pro 3., 5. a 7. harmonickou. Bude požadováno, aby zařízení fungovalo pouze jako paralelní kompenzace a nebo jako chráněná kompenzace. Toho se docílí tak, že bude možné odpojit/připojit tlumivky ke kondenzátorům.

Dalším požadavkem na zařízení je, aby bylo možné měnit filtr 7. harmonické z úzkopásmového filtru na širokopásmový filtr druhého řádu. Toto bude řešeno tak, že k tlumivce paralelně připojíme odpor a přes propojku bude možné připojit/odpojit odpor.

Návrh těchto požadavků se provede výpočtem jednotlivých požadavků ze znalosti vstupních hodnot, které budou zjištěny vstupním měřením. Výpočty budou vloženy do simulačního programu a porovnájí se výsledky výpočtu a simulace. Pokud budou zjištěny značné odchylky bude třeba provést analýzu chyb.

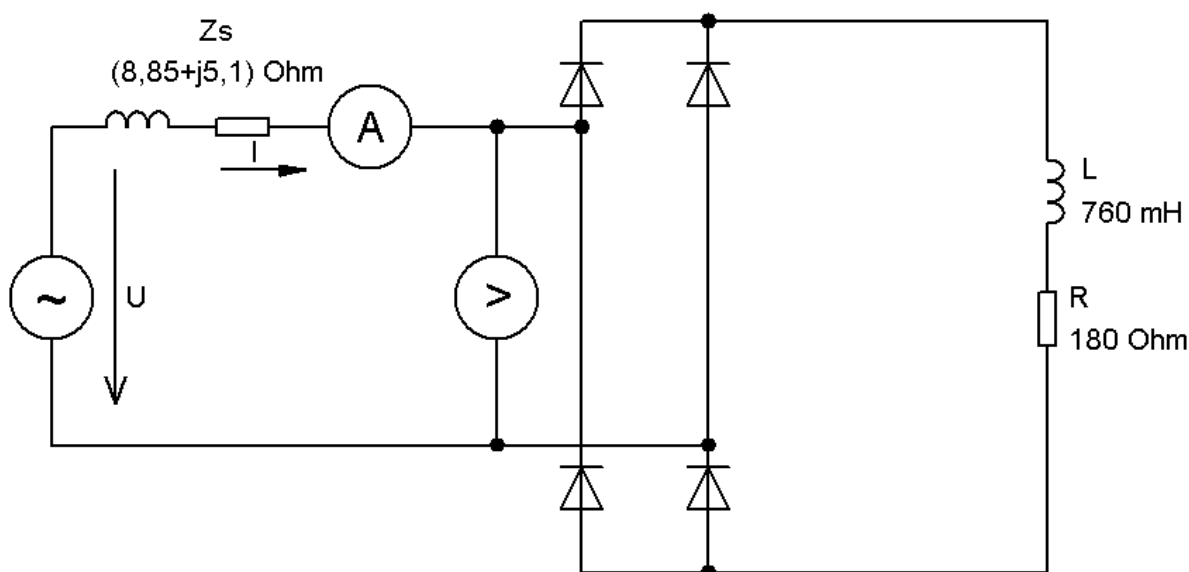
Posledním krokem bude sestavení zařízení a ověření jeho správné funkčnosti pomocí kontrolního měření. V kontrolním měření se vyzkoušejí všechny požadované funkční stavy jak byli popsány výše. Naměřené hodnoty kontrolního měření se vyhodnotí zda-li zařízení funguje, jak bylo od něj na začátku požadováno a zda-li hodnoty měření jsou stejné jako hodnoty výpočtů a simulací.

5 VSTUPNÍ MĚŘENÍ

Filtračně-kompenzační zařízení se navrhuje a vyrábějí pro přesně určenou zátěž. Proto je potřeba před samotným návrhem provést vstupní měření dané zátěže a podle naměřených výsledků provést návrh filtračně-kompenzačního zařízení.

5.1 Postup měření

V této práci jsem se zabýval indukční zátěží. Schéma měření dané zátěže a její hodnoty jsou znázorněné v obrázku 5-1.



Obrázek 5-1 Schéma měřené zátěže.

Měření jsem provedl ve dvou fázích. První bylo měření hodnot napětí a jeho skreslení bez připojené zátěže, měření jeho spektrální analýzu efektivních hodnot a fáze na jednotlivých harmonických složkách. Tím jsem zjistil jaký průběh a tvar má napětí odebírané přímo ze sítě.

Ve druhé fázi měření jsem připojil zátěž a znovu jsem změřil velikost napětí, jeho skreslení a spektrální analýzu. Dále jsem měřil velikost, skreslení, průběh a spektrální analýzu proudu. Odečetl jsem hodnoty zkreslení a úhel posunutí.

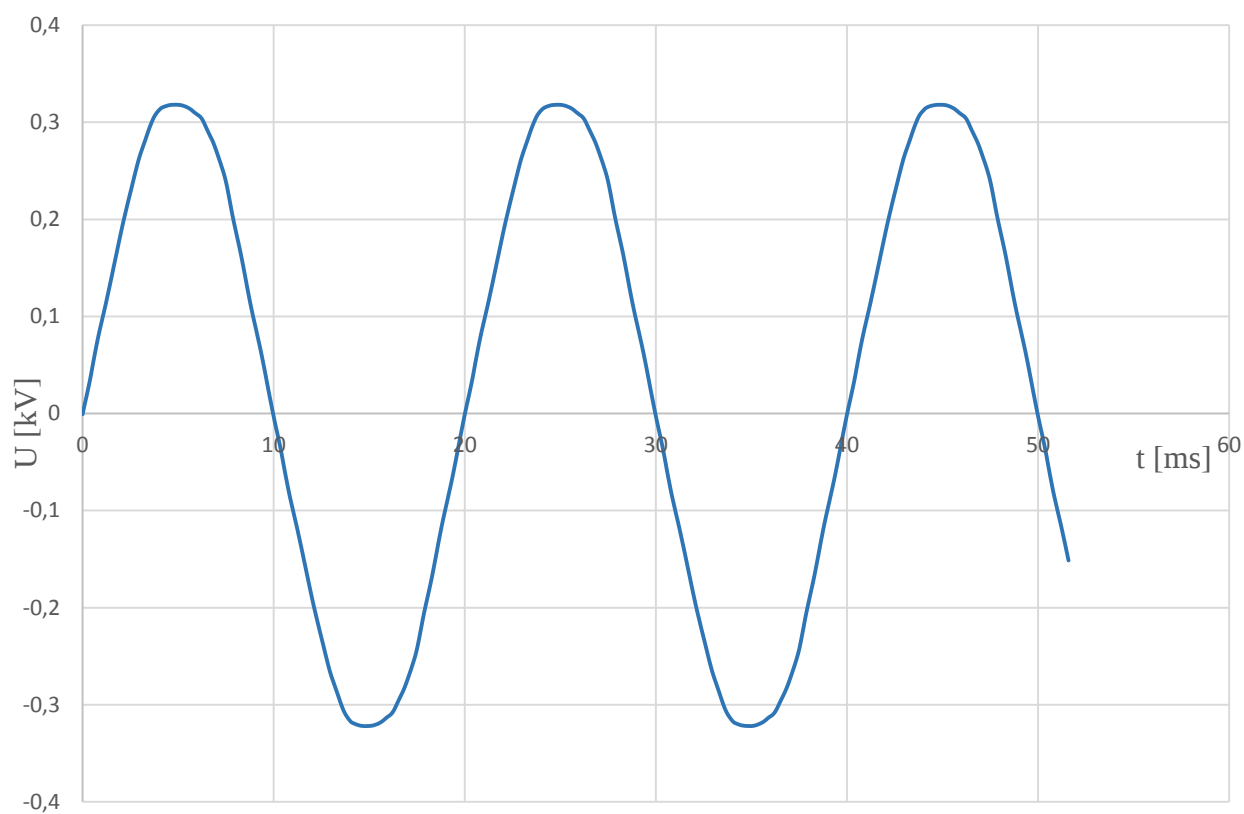
Jednotlivé průběhy a spektra jsou graficky vyneseny v obrázcích 5-2 až 5-6.

5.2 Výsledky měření

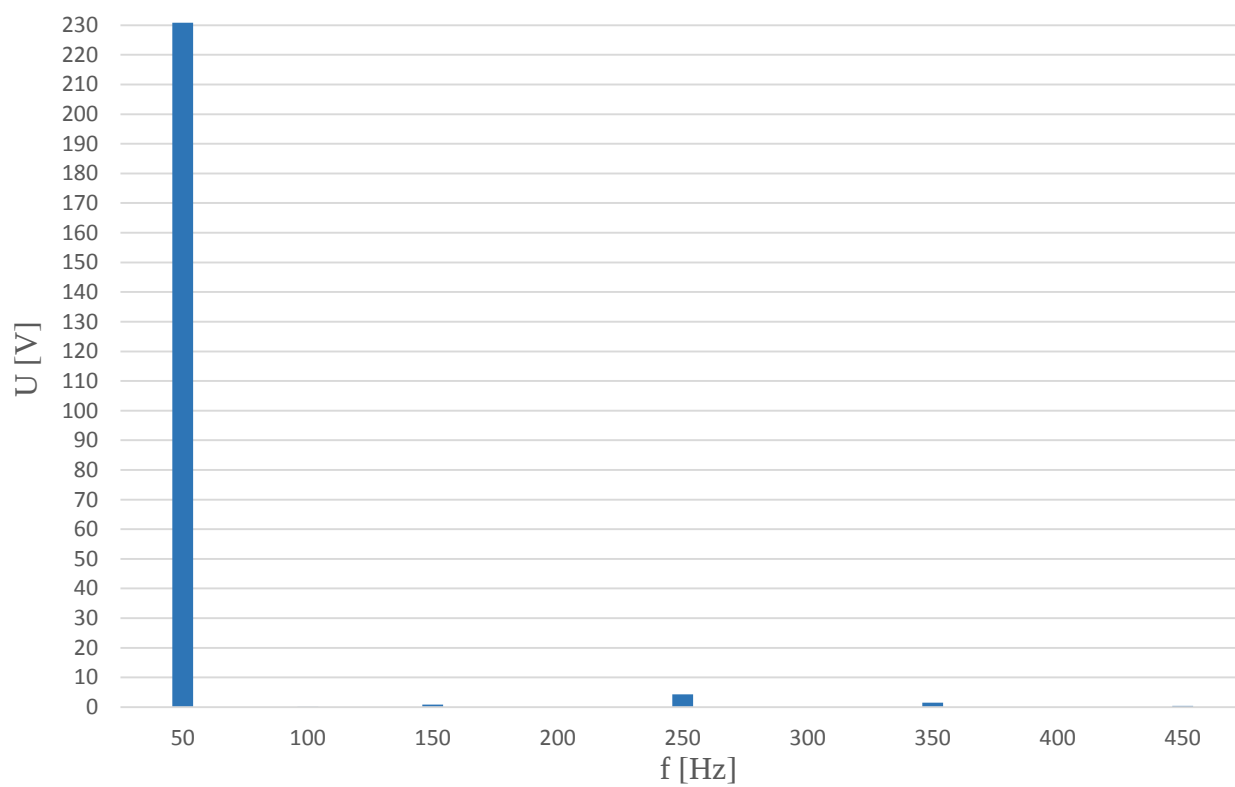
Z výsledných průběhů a hodnot jde vidět, že průběh proudu po připojení na indukční zátěž je značně zkreslený. Jeho fázový posun, ale není velký, pouze $13,2^\circ$.

Tabulka 5-1 Výsledné hodnoty zkreslení napětí a proudu, fázový posun.

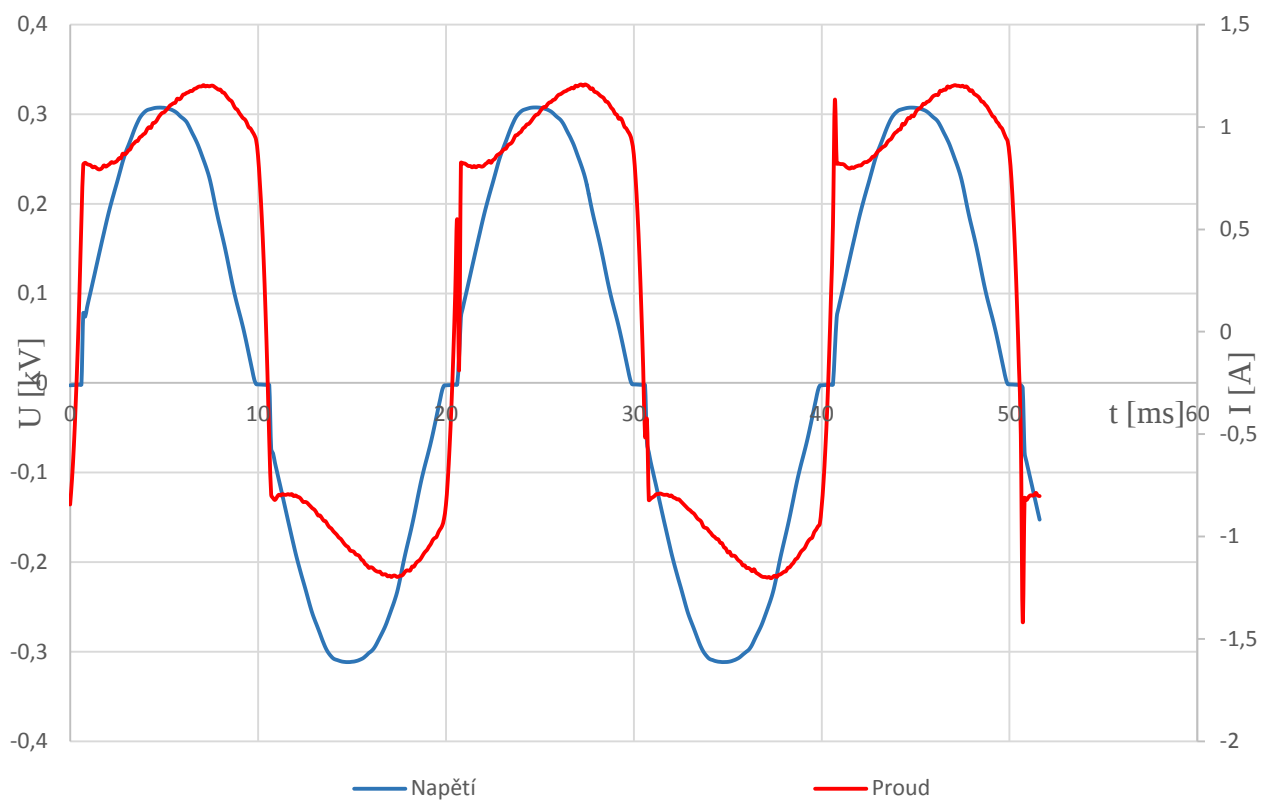
THDI [%]	THDU [%]	φ [°]
34	5,5	13,2



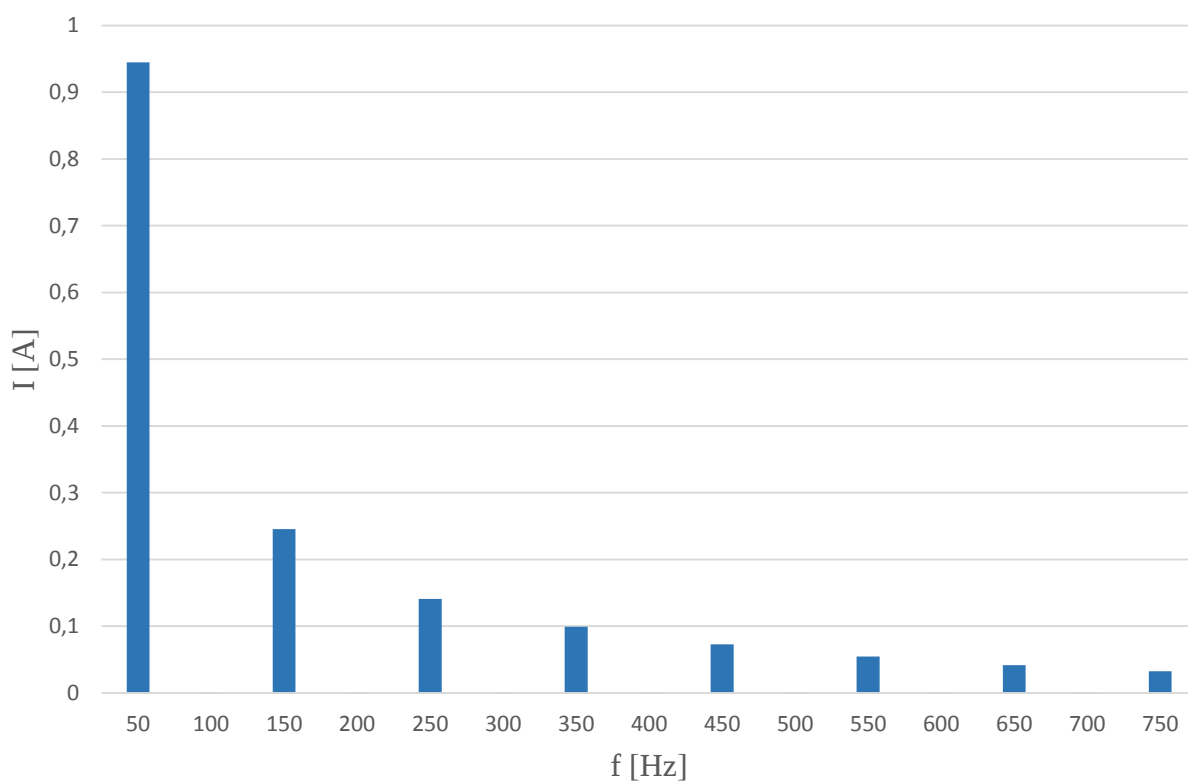
Obrázek 5-2 Průběh napětí bez připojené zátěže.



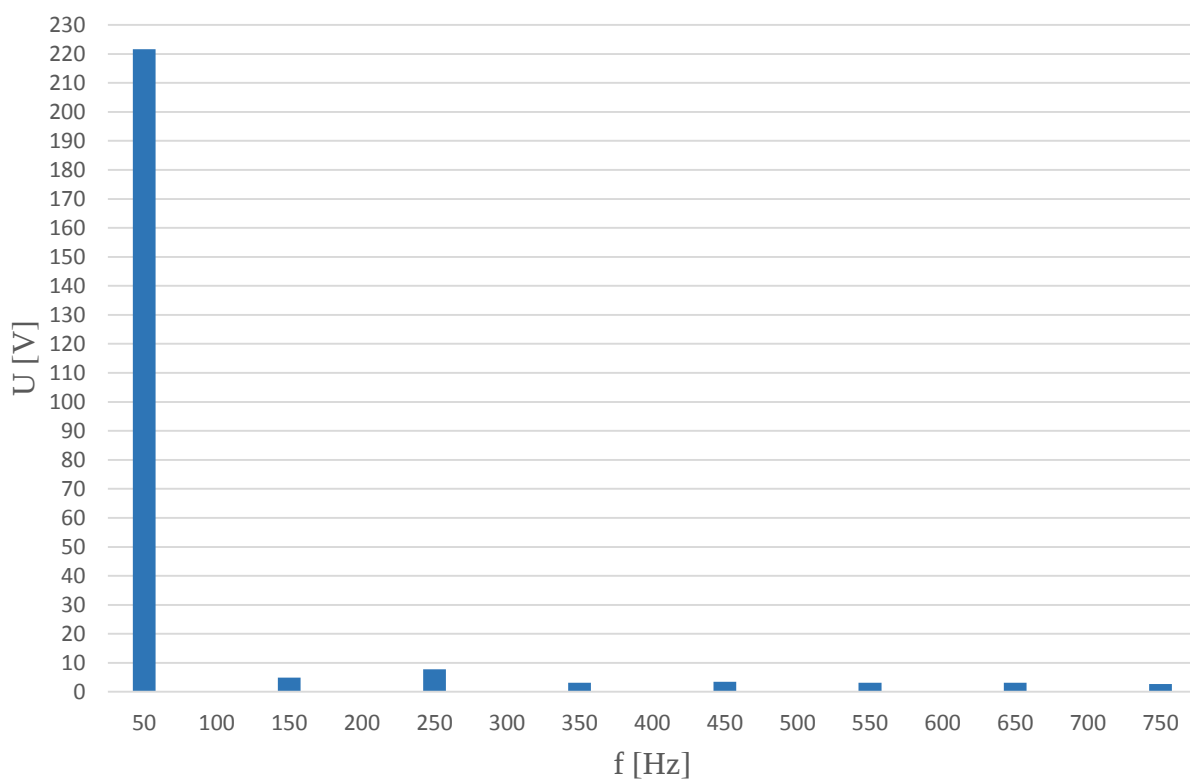
Obrázek 5-3 Spektrum efektivních hodnot napětí bez zátěže.



Obrázek 5-4 Průběh napětí a proudu po připojení zátěže.



Obrázek 5-5 Spektrum efektivních hodnot proudu s připojenou zátěží.



Obrázek 5-6 Spektrum efektivních hodnot napětí s připojenou zátěží.

6 NÁVRH A REALIZACE

Před samotným výpočtem je potřeba si předem stanovit požadavky na filtračně-kompenzační zařízení. Přesnou specifikací na výrobek je schopnost filtrovat 3., 5. a 7. harmonickou složku. Dále je požadavek na úplnou kompenzaci fázového posunu.

Nejprve je potřeba určit celkový zdánlivý výkon. To se vypočte pomocí vztahu (1.2):

$$S = U * I = 221,5 * 0,9445 = 209,2 \text{ VA}$$

Ze znalosti fázového posunu a zdánlivého výkonu pomocí vztahu (1.4) lze vypočíst jalový výkon:

$$Q = S * \sin\varphi = 209,2 * \sin(13,2^\circ) = 47,725 \text{ Var}$$

Tento vypočtený jalový výkon je celkový potřebný výkon ke kompenzaci. Ze znalosti celkového potřebného kompenzačního výkonu lze pomocí úpravy vztahu (2.5) určit celkovou potřebnou velikost kapacity:

$$C = \frac{Q_c}{\omega * U_{CN}^2} = \frac{47,725}{2 * \pi * 50 * 221,5^2} = 3,1 \mu\text{F}$$

Díky znalosti velikosti celkové kapacity a potřebném počtu filtrů lze teď provést návrh samotného zařízení. V následující kapitole si projdeme výpočet jednotlivých komponent pro navrhované filtračně-kompenzační zařízení.

6.1 První varianta návrhu

Z hlediska kompenzace by bylo nejvhodnější rozdělit celkovou kapacitu na tři stejně velké kapacity. To nám zajistí, že v případě připojování a odpojování jednotlivých filtrů bude kompenzace jalového výkonu probíhat po stejně velkých krocích. Proto se počítat s velikostí kapacity 1 μF pro každý filtr. Z toho vyplývá, že reaktance kondenzátoru bude pro všechny filtry stejný.

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f_N * C} = \frac{1}{2 * \pi * 50 * 1 * 10^{-6}} = 3183 \Omega$$

Pro výpočet velikosti jednotlivých indukčností, které budou vřazeny seriově ke kapacitorům využijeme vztahy (3.6) až (3.8).

Nejprve je třeba určit řád jednotlivých harmonických složek:

$$n_3 = \frac{f_3}{f_N} = \frac{150}{50} = 3$$

$$n_5 = \frac{f_5}{f_N} = \frac{250}{50} = 5$$

$$n_7 = \frac{f_7}{f_N} = \frac{350}{50} = 7$$

Následně se určí činitel zatlumení:

$$p_3 = \frac{1}{n_3^2} = \frac{1}{3^2} = 0,1111$$

$$p_5 = \frac{1}{n_5^2} = \frac{1}{5^2} = 0,04$$

$$p_7 = \frac{1}{n_7^2} = \frac{1}{7^2} = 0,0204$$

Ze znalosti reaktance kondenzátoru a činitele zatlumení se určí reaktanci jednotlivých indukčností:

$$X_{L3} = p_3 * X_C = 0,1111 * 3183 = 353,63 \, \Omega$$

$$X_{L5} = p_5 * X_C = 0,04 * 3183 = 127,32 \, \Omega$$

$$X_{L7} = p_7 * X_C = 0,0204 * 3183 = 64,93 \, \Omega$$

Z reaktancí indukčností se určí potřebná velikost indukčností pro jednotlivé tlumivky:

$$L_3 = \frac{X_{L3}}{2 * \pi * f_N} = \frac{353,63}{2 * \pi * 50} = 1,125 \, H$$

$$L_5 = \frac{X_{L5}}{2 * \pi * f_N} = \frac{127,32}{2 * \pi * 50} = 0,405 \, H$$

$$L_7 = \frac{X_{L7}}{2 * \pi * f_N} = \frac{64,93}{2 * \pi * 50} = 0,206 \, H$$

Z vypočtených hodnot vyplývá, že pro filtr třetí harmonické bude potřeba nejvyšší hodnota indukčnosti. Vypočtená hodnota je 1,125 H, to je poměrně velká hodnota. Pro realizaci tak velké indukčnosti by bylo potřeba postavit relativně velkou tlumivku. Protože filtračně-kompenzační zařízení bude umístěno v krabici ZPS 16 od firmy Abtech bylo od této varianty, vzhledem k předpokládané velikosti tlumivky upuštěno, protože hrozilo, že by nebylo možné realizovat všechny filtry do prostoru této krabice.

Z tohoto důvodu je potřeba přijít s jiným, přijatelnějším řešením návrhu. Toto řešení je popsáno v kapitole 6.2 druhá varianta návrhu.

6.2 Druhá varianta návrhu

Jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole, vzhledem k vysoké hodnotě indukčnosti třetí harmonické bylo od možnosti, že by jsme měli pro každý filtr kapacitu 1 μF upuštěno. Proto je nyní potřeba přijít s jiným řešením, které by indukčnosti vyrovnal a přesto výsledná kapacita byla 3 μF . Protože vím, že rostoucí velikosti kapacity klesá potřebná indukčnost je tedy nutné zvýšit hodnotu kapacity pro třetí harmonickou. To nám ale zase navýšit indukčnost pro zbylé filtry. S přihlédnutím k výsledkům z minulé kapitoly je možné toto bez obav realizovat, protože výsledné indukčnosti pro filtry 5. a 7. harmonické nedosahovaly vysokých hodnot.

Pro určení správné velikosti kapacity je potřeba také vycházet z reálných hodnot kondenzátorů. Proto byli zvoleny kondenzátory o velikosti 0,68 μF . Jejich konfigurace bude tři paralelní kondenzátory s výslednou kapacitou 2,04 μF pro třetí harmonickou složku. Jeden kondenzátor o velikosti 0,68 μF pro pátou harmonickou složku a dva seriově spojené kondenzátory o výsledné kapacitě 0,34 μF pro sedmou harmonickou složku. Touto konfigurací bylo možné dosáhnout snížení indukčnosti i filtru pro třetí harmonické a nenavýšit indukčnosti pro zbylé filtry a zároveň celková kapacita bude pořád v potřebné velikosti blízké 3 μF .

Pro ověření správnosti řešení je samozřejmě potřeba znovu provést výpočty pro jednotlivé indukčnosti. Pro výpočet lze využít tentokrát upravený vztah (3.1):

$$L_3 = \frac{\left(\frac{1}{2 * \pi * f_3}\right)^2}{C_3} = \frac{\left(\frac{1}{2 * \pi * 150}\right)^2}{2,04 * 10^{-6}} = 0,552 \text{ H}$$

$$L_5 = \frac{\left(\frac{1}{2 * \pi * f_5}\right)^2}{C_5} = \frac{\left(\frac{1}{2 * \pi * 250}\right)^2}{0,68 * 10^{-6}} = 0,596 \text{ H}$$

$$L_7 = \frac{\left(\frac{1}{2 * \pi * f_7}\right)^2}{C_7} = \frac{\left(\frac{1}{2 * \pi * 350}\right)^2}{0,34 * 10^{-6}} = 0,608 \text{ H}$$

V tomto případě jsou jednotlivé indukčnosti co se hodnot týče velice podobné. Toho jsem se snažili dosáhnout. Nyní je potřeba určit, jaké napětí vznikne na kondenzátorech díky těmto indukčnostem. Tento výpočet je z hlediska návrhu důležitý, protože pokud by byli použity kondenzátory pro nižší napěťové hladiny hrozilo by, že dojde k jejich destrukci. Pro výpočet napětí na kondenzátoru využijeme vztahů (3.14) až (3.16). Nejprve se vypočtou impedance jednotlivých kondenzátorů a tlumivek:

$$X_{3C} = \frac{1}{2 * \pi * f_n * C_3} = \frac{1}{2 * \pi * 50 * 2,04 * 10^{-6}} = 1560 \text{ } \Omega$$

$$X_{3L} = 2 * \pi * f_n * L_3 = 2 * \pi * 50 * 0,552 = 173,4 \text{ } \Omega$$

$$X_{5C} = \frac{1}{2 * \pi * f_n * C_5} = \frac{1}{2 * \pi * 50 * 0,68 * 10^{-6}} = 4681 \text{ } \Omega$$

$$X_{5L} = 2 * \pi * f_n * L_5 = 2 * \pi * 50 * 0,596 = 187,24 \text{ } \Omega$$

$$X_{7C} = \frac{1}{2 * \pi * f_n * C_7} = \frac{1}{2 * \pi * 50 * 0,34 * 10^{-6}} = 9362 \text{ } \Omega$$

$$X_{5L} = 2 * \pi * f_n * L_7 = 2 * \pi * 50 * 0,608 = 191 \text{ } \Omega$$

Díky znalosti pracovního napětí a impedancí jednotlivých prvků je možné si určit kompenzační výkon:

$$Q_3 = \frac{U^2}{(X_{C3} - X_{L3})} = \frac{230^2}{(1560 - 173,4)} = 38,15 \text{ VAr}$$

$$Q_5 = \frac{U^2}{(X_{C5} - X_{L5})} = \frac{230^2}{(4681 - 187,24)} = 11,77 \text{ VAr}$$

$$Q_7 = \frac{U^2}{(X_{C7} - X_{L7})} = \frac{230^2}{(9362 - 191)} = 5,768 \text{ VAr}$$

Nyní je potřeba si určit proud protékající filtrem:

$$I_3 = \frac{Q_3}{U} = \frac{38,15}{230} = 0,1658 \text{ A}$$

$$I_5 = \frac{Q_5}{U} = \frac{11,77}{230} = 0,0511 \text{ A}$$

$$I_7 = \frac{Q_7}{U} = \frac{5,768}{230} = 0,025 \text{ A}$$

Pomocí znalosti právě vypočteného proudu a impedance kondenzátoru je možné dopočítat hodnoty napětí na kondenzátoru:

$$U_{C3} = I_3 * X_{C3} = 0,1658 * 1560 = 258,65 \text{ V}$$

$$U_{C5} = I_5 * X_{C5} = 0,0511 * 4681 = 239,2 \text{ V}$$

$$U_{C7} = I_7 * X_{C7} = 0,025 * 9362 = 234,05 \text{ V}$$

Z výsledků, hlavně pro filtr 3. harmonické složky, je patrné, že pro realizaci budou potřeba kondenzátory pro napěťové hladiny 400V a vyšší.

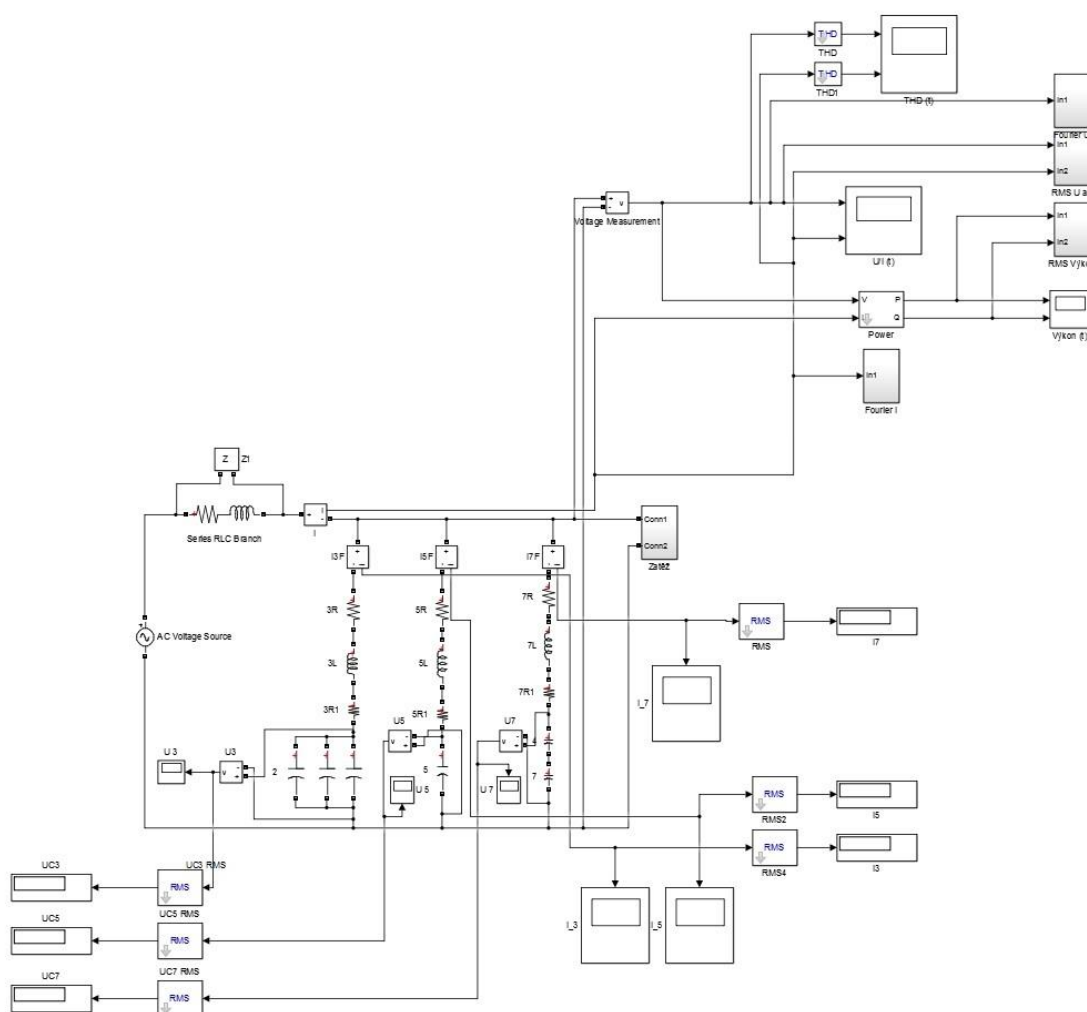
Pro filtr sedmé harmonické také požaduje, aby nefungoval jenom pro danou frekvenci, ale aby se z něho stal tlumený filtr. Proto paralelně k tlumivce přiřadíme odpor. Hodnotu potřebného odporu určíme úpravou vztahu (3.5):

$$R_7 = \frac{1}{2 * \pi * f_n * C_7} = \frac{1}{2 * \pi * 50 * 0,34 * 10^{-6}} = 9362 \Omega$$

Protože odpor o velikosti 9362 Ω se nevyrábí, tak se použije nejvyšší vyšší odpor a to 10 k Ω .

6.3 Simulace výsledků

Před samotnou realizací je, ale potřeba provést simulaci návrhu pro ověření správnosti jednotlivých výpočtů. Pro simulaci celého obvodu jsem použil program simulink. Zde jsem provedl návrh schématu s danými filtry a provedl měření na jednotlivých prvcích, které byli pro samotnou realizaci podstatné. Jednalo se o napětí a proud obvodem, jejich spektrum na jednotlivých harmonických a efektivní hodnoty, napětí na kondenzátorech a proud protékající jednotlivými filtry a zkusím napětí a proudu. Z těchto hodnot jsem byl schopný si ověřit správnost předchozích výpočtů. Použité schéma v simulinku je v obrázku 6-1. Výsledné hodnoty simulací jsou v tabulce 6-1.



Obrázek 6-1 Schéma v programu simulink

Tabulka 6-1 Výsledky simulací.

U [V]	221,1
I [A]	1,03
P [W]	223,4
Q [Var]	5
THD U [%]	4,05
THD I [%]	19,17
Uc3 [V]	266
Uc3peak [V]	463
Ic3 [A]	0,2422
Uc5 [V]	251,5
Uc5peak [V]	455
Ic5 [A]	0,119
Uc7 [V]	243,8
Uc7peak [V]	438
Ic7 [A]	0,0735

6.4 Realizace

Filtračně-kompenzační zařízení bylo vloženo do krabice ZPS-16 od firmy Abtech. Pro realizaci bylo použito šest kondenzátorů MKP1J036806F00KSSD, které mají velikost kapacity 680 nF a jsou pro napětíovou hladinu 400 V AC. Jednotlivé tlumivky byly zhotoveny na zakázku o potřebné velikosti indukčnosti a rozměrech. Jednalo se o tlumivky s železným jádrem. Řešení filtru sedmé harmonické je provedeno, tak že odpor bude možno připojit přes propojku. Takže filtr sedmé harmonické bude fungovat v případě odpojeného odporu jako přesně úzkopásmový filtr a v případě připojeného odporu jako širokopásmový filtr druhého řádu.

6.4.1.1 Ověření rezonančního kmitočtu

Před samotným sestavením bylo potřeba tlumivky přesně naladit, proto bylo potřeba změřit jejich indukčnost a přimotat případně odmotat několik závitů, aby jsme zvýši případně snížili jejich indukčnost. Následně se k jednotlivým tlumivkám připojily potřebné kondenzátory a ověřilo se zda-li jejich rezonanční kmitočet je na správných hodnotách. Výsledky měření jsou zapsány v tabulce 6-2 až 6-4. Závislosti frekvence na reaktance a frekvence na proudu jsou vyneseny do grafů v obrázcích 6-2 a 6-3. V těchto grafech jde vidět, kde nastává rezonanční kmitočet a jak velká reaktance v daný okamžik je.

Tabulka 6-2 Naměřené hodnot pro rezonanční kmitočet 150 Hz.

f [Hz]	X [Ω]	U [V]	I [mA]
50	1395	7	9,83
100	452,5	21,812	9,84
140	70,42	117,95	9,81
145	9,77	173,4	9,77
148	8,76	202,35	9,75
149	1,83	204,4	9,74
150	5,09	201	9,75
151	11,64	195	9,75
152	18,16	185,8	9,75
155	36,85	154,6	9,77
160	66	114,83	9,8
170	120,37	73,4	9,82

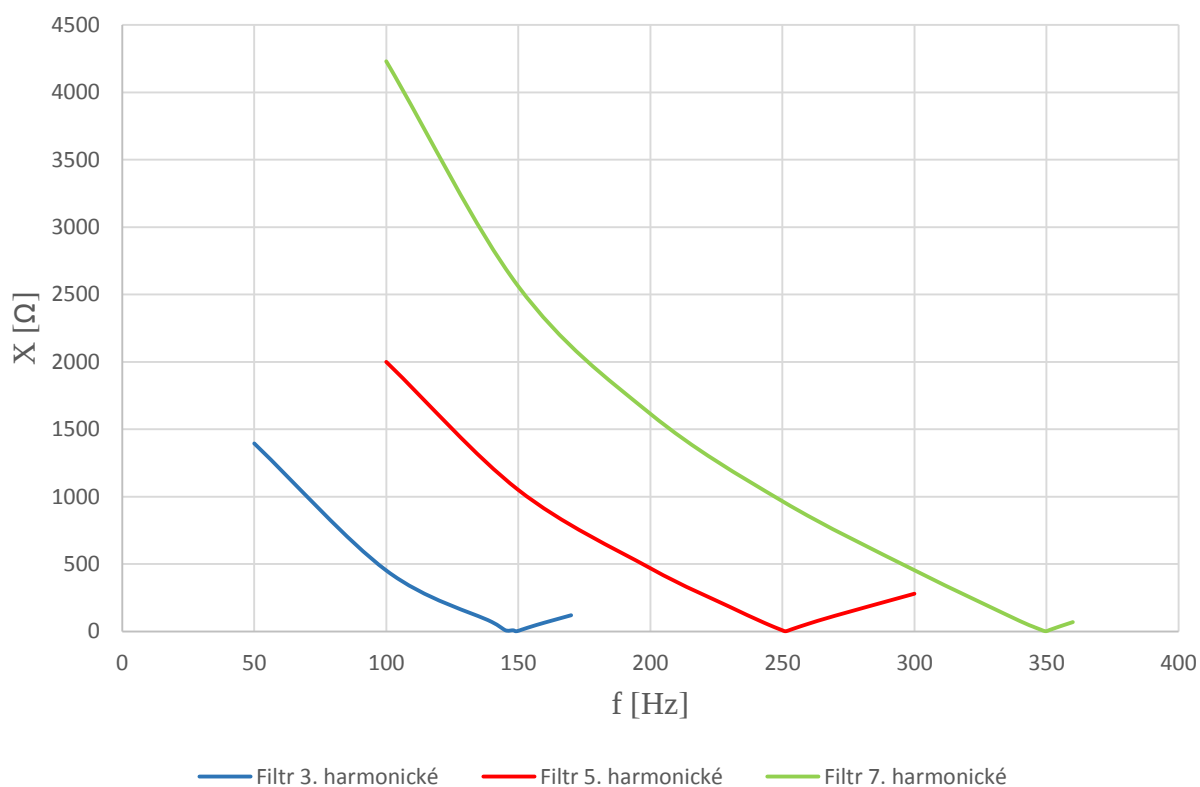
Tabulka 6-3 Naměřené hodnoty pro rezonanční kmitočet 250 Hz.

f [Hz]	X [Ω]	U [V]	I [mA]
50	0	-	9,83
100	2,00E+03	4,9	9,84
150	1,05E+03	9,35	9,84
200	469,28	20,7	9,84
230	183,47	48,04	9,82
240	92,05	74,187	9,81
245	48,6	90,5	9,78
248	24,22	97,46	9,77
249	16,55	98,62	9,77
250	8,78	99,1	9,78

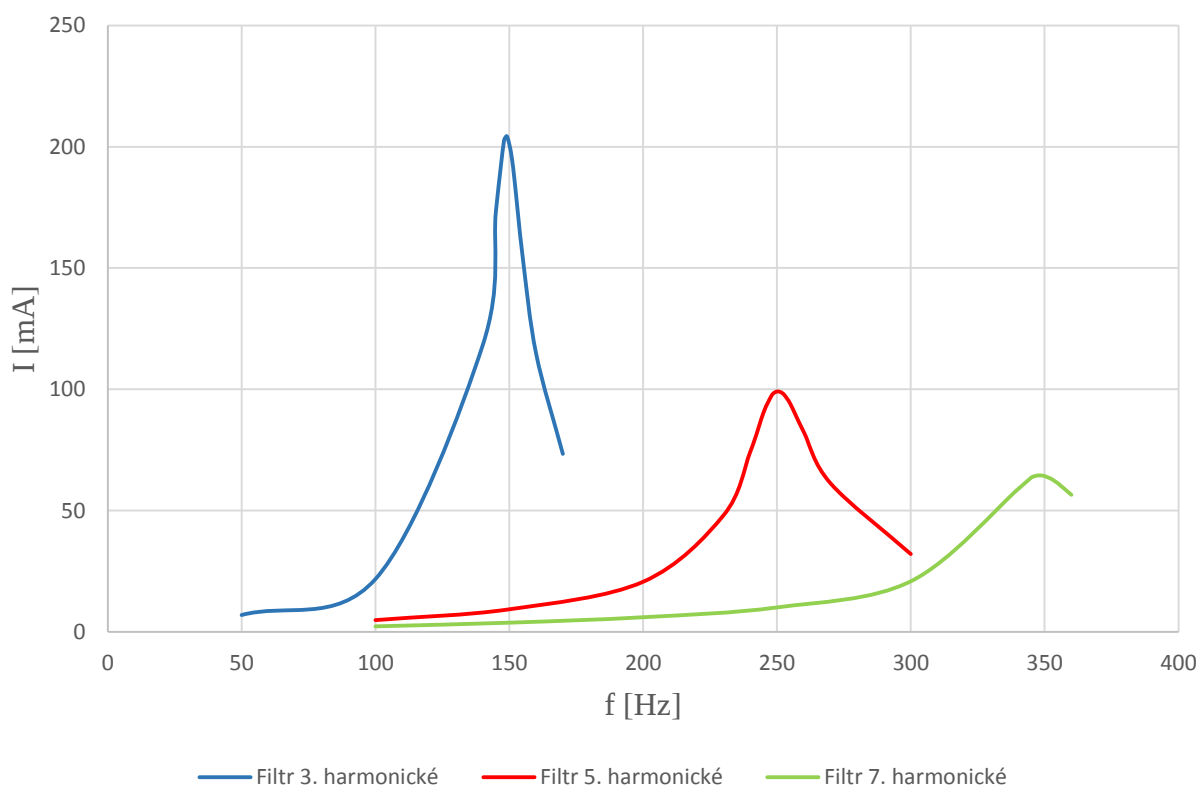
251	1,8	99	9,77
252	5,5	98,45	9,77
253	12,5	97,35	9,77
255	25,92	94	9,77
260	58,02	82,45	9,79
270	117,111	61,29	9,8
300	280,2	32,13	9,82

Tabulka 6-4 Naměřené hodnoty pro rezonanci 350 Hz.

f [Hz]	X [Ω]	U [V]	I [mA]
50	-	9,83	-
100	4230	9,83	2,32
150	2560	9,84	3,84
200	1615	9,84	6,08
250	966,4	9,83	10,13
300	454,4	9,83	20,89
340	77,14	9,79	58,81
345	35,41	9,8	63,65
346	27,55	9,8	64,13
347	19,82	9,799	64,43
348	12,26	9,798	64,54
349	4,9	9,79	64,48
350	2,5	9,798	64,27
351	9,77	9,79	63,8
352	16,78	9,78	63,37
353	23,7	9,785	62,75
354	30,5	9,78	62
355	37,26	9,78	61,24
360	69,6	9,78	56,54



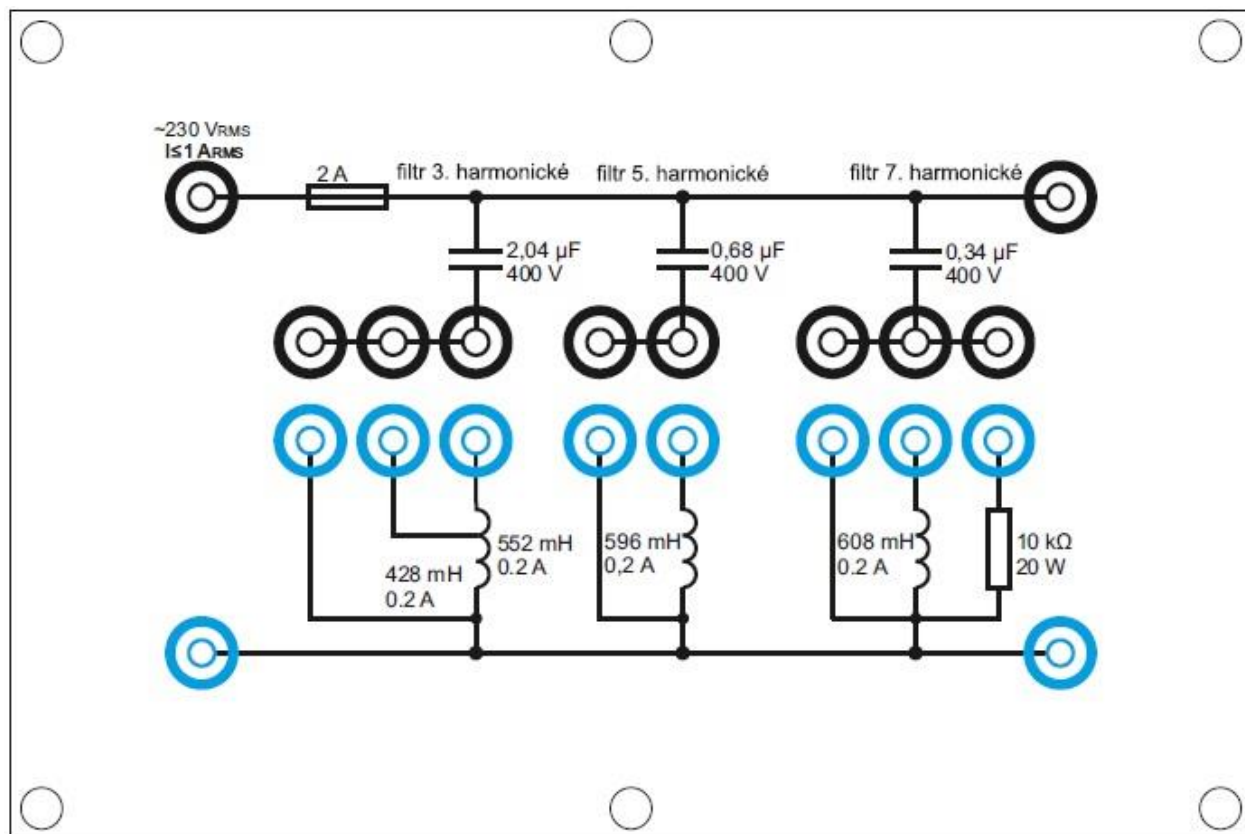
Obrázek 6-2 Závislost frekvence na reaktanci pro jednotlivé filtry.



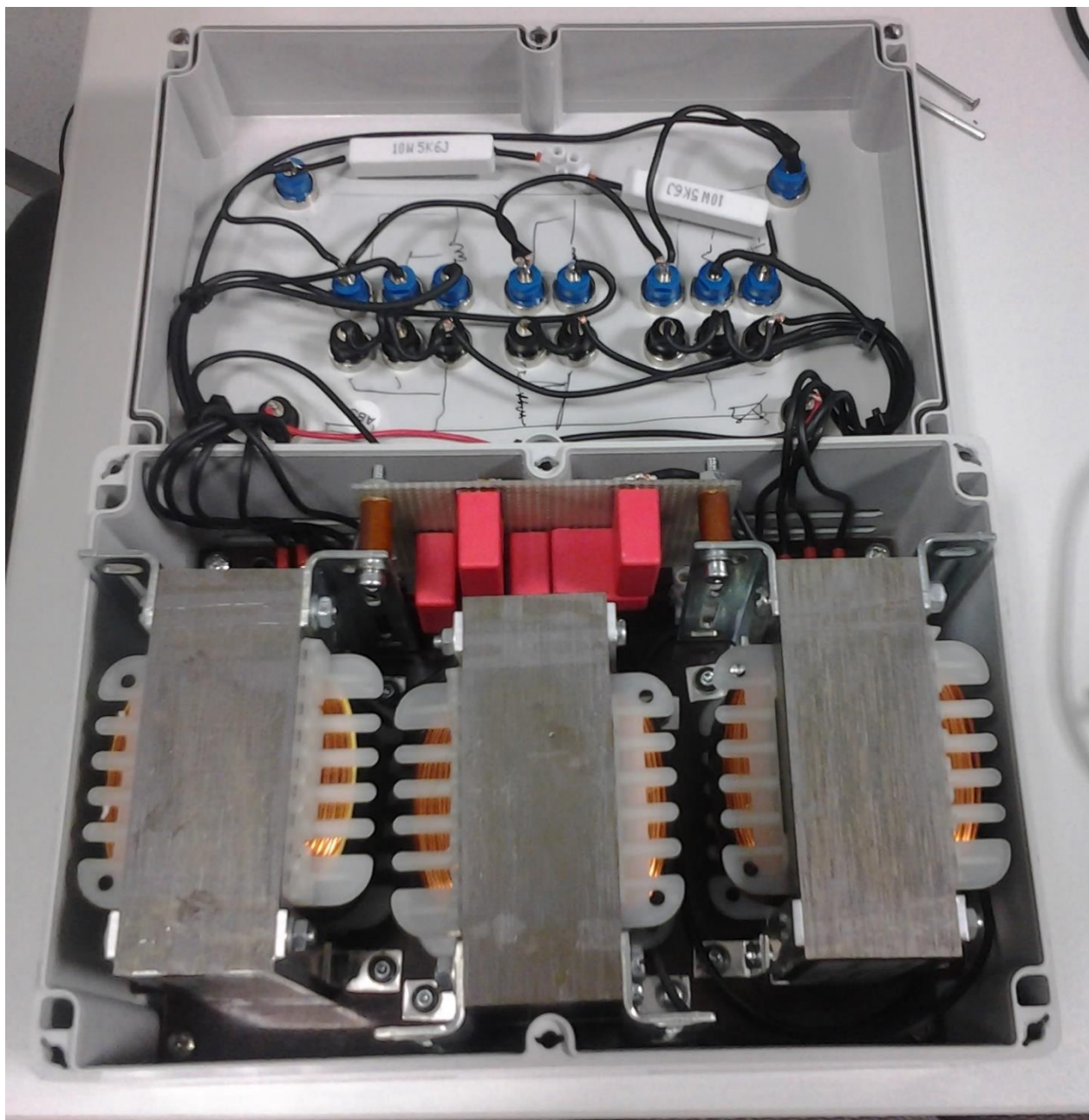
Obrázek 6-3 Závislost frekvence a proudu pro jednotlivé filtry.

6.4.1.2 Čelní maska a montáž

Čelní maska a tedy i vnitřní propojení bylo navrženo tak, aby splnilo všechny předem stanovené požadavky. To je možnost odpojení jednotlivých filtrů, odpojení jednotlivých tlumivek a práce pouze s kondenzátory. Možnost připojit a odpojit paralelně řazený odpor k filtru 7. harmonické. Výslednou realizaci čelní masky i samotného vnitřního uspořádání je možno vidět na obrázcích 6-4 a 6-5.



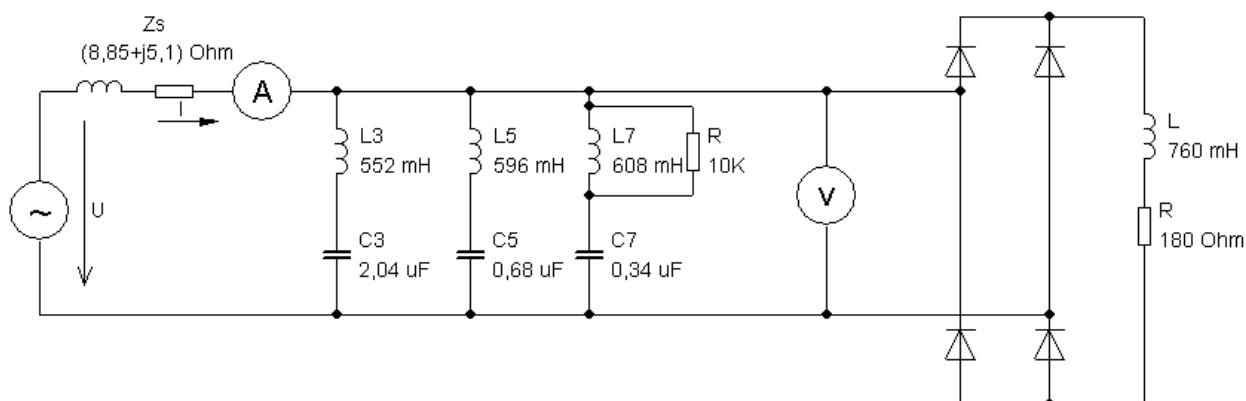
Obrázek 6-4 Čelní maska.



Obrázek 6-5 Vnitřní uspořádání.

7 KONTROLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Kontrolní měření bylo připojeno ke stejné zátěži jako při vstupním měření. Před danou zátěží bylo připojeno filtračně-kompenzační zařízení. Měření se provádělo pro několik pracovních stavů. Jednotlivé pracovní stavy a naměřené hodnoty v nich je v tabulce 7-1. Zajímaly nás tyto výstupy měření: průběh napětí a proudu, jejich spektra, zkreslení napětí a proudu a fázový posun.



Obrázek 7-1 Schéma zapojení měření.

Tabulka 7-1 Naměřené hodnoty zkreslení a fázového posunu pro jednotlivé provozní stavy.

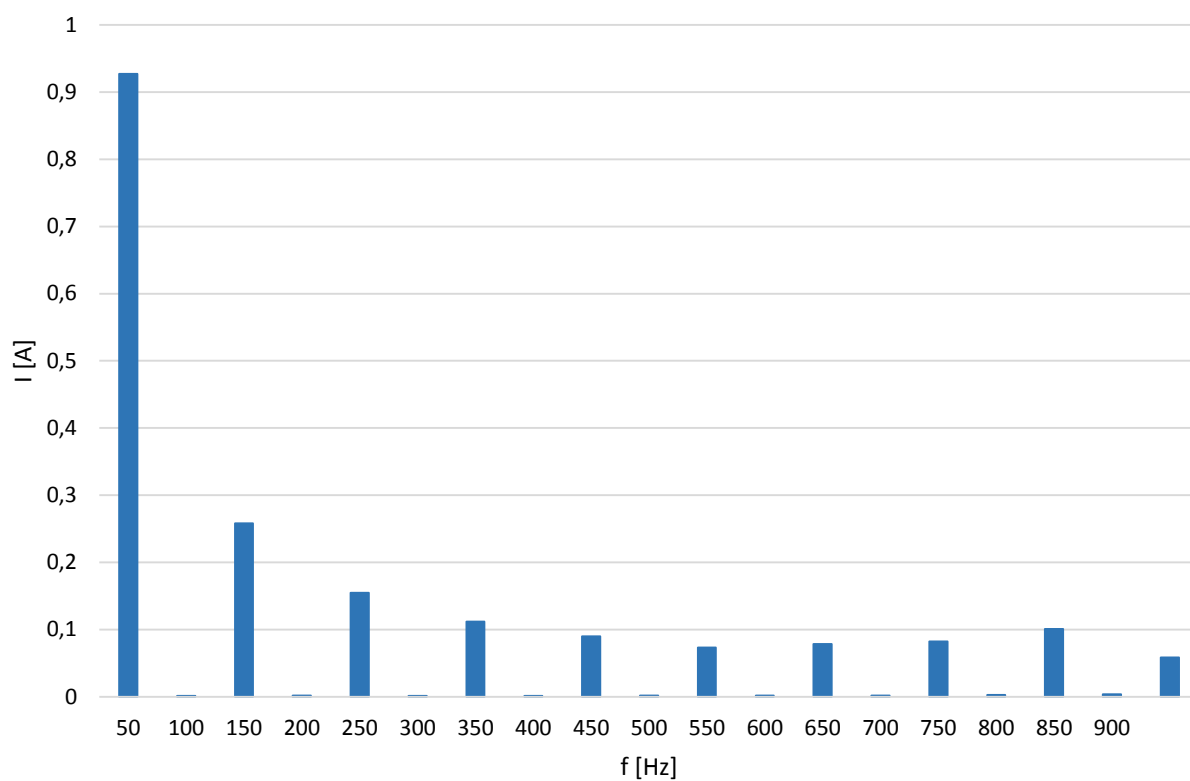
	THDI [%]	THDU [%]	φ [°]
1. kondenzátor	42	8,7	3,8
1. a 2. kondenzátor	44	9	0
1., 2. a 3. kondenzátor	44,78	9,04	-1,8
Rozladěný filtr 3. harmonické	35,78	5,76	3,7
Filtr 3. harmonické	29,72	5,72	3,1
Filtr 3. a 5. harmonické	27,23	5,49	0
Filtr 3., 5. a 7. harmonické	27,2	5,32	-1,2
Filtr 3., 5. a 7. harmonické s připojeným odporem	27,61	5,3	-1,6

Z naměřených hodnot je patrné, že v případě pouze připojených kondenzátorů úspěšně kompenzujeme zátěž, ale zároveň dochází ke značnému zkreslení. Toto zkreslení je způsobeno samotnými kondenzátory.

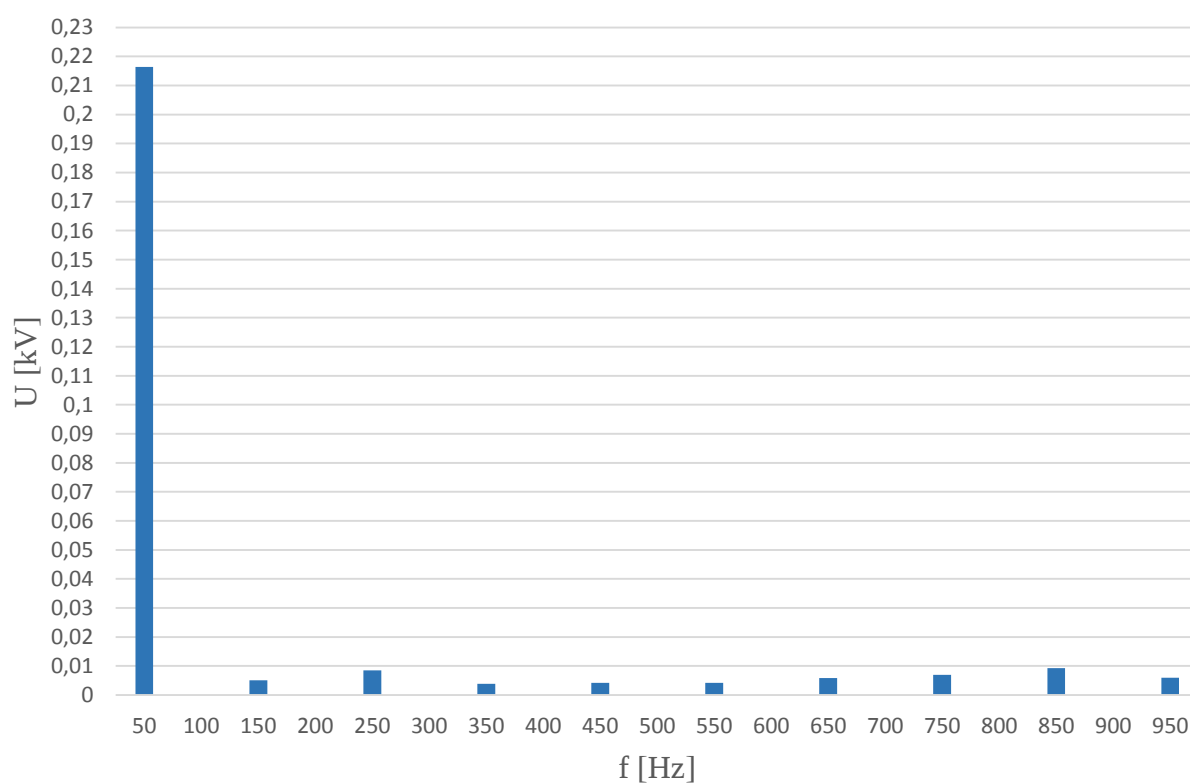
V případě připojených jednotlivých filtrů dochází jak ke kompenzaci tak se zlepšení zkreslení, hlavně zkreslení proudu, které je na začátku 34 %. Teď si popíšeme blíže jednotlivé pracovní stavy a jejich výsledky měření.

1. kondenzátor

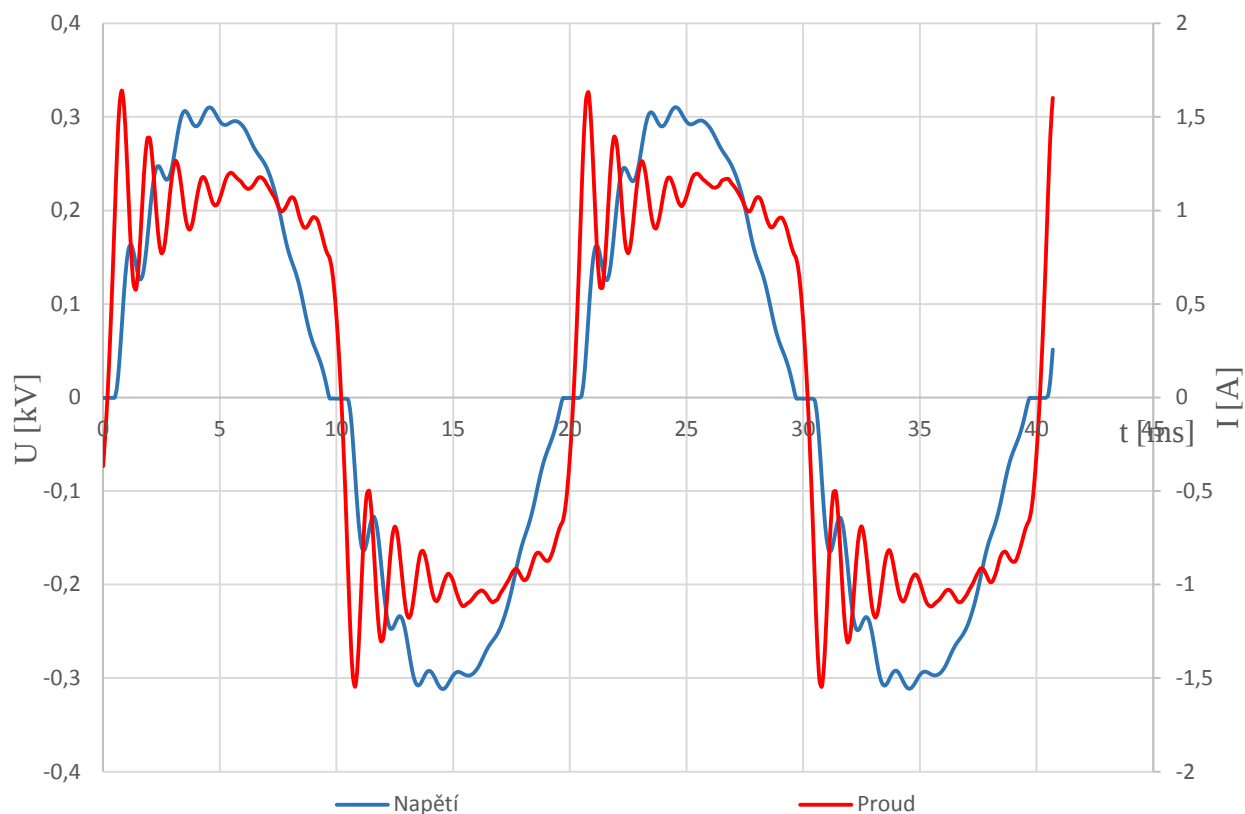
Zde je připojena kapacita o velikosti 2,04 μF . Již zde jde vidět, že ke kompenzaci sice dochází, ale značně nám zhoršuje průběh napětí a proudu. To je způsobeno nabíjením a vybíjením samotného kondenzátoru. Špička proudu zde dosahuje 1,6 A. Ze spektra efektivních hodnot je vidět, že zvyšují hodnoty napětí a proudu na vyšších harmonických složkách.



Obrázek 7-2 Spektrum efektivních hodnot proudu pro 1 kondenzátor.



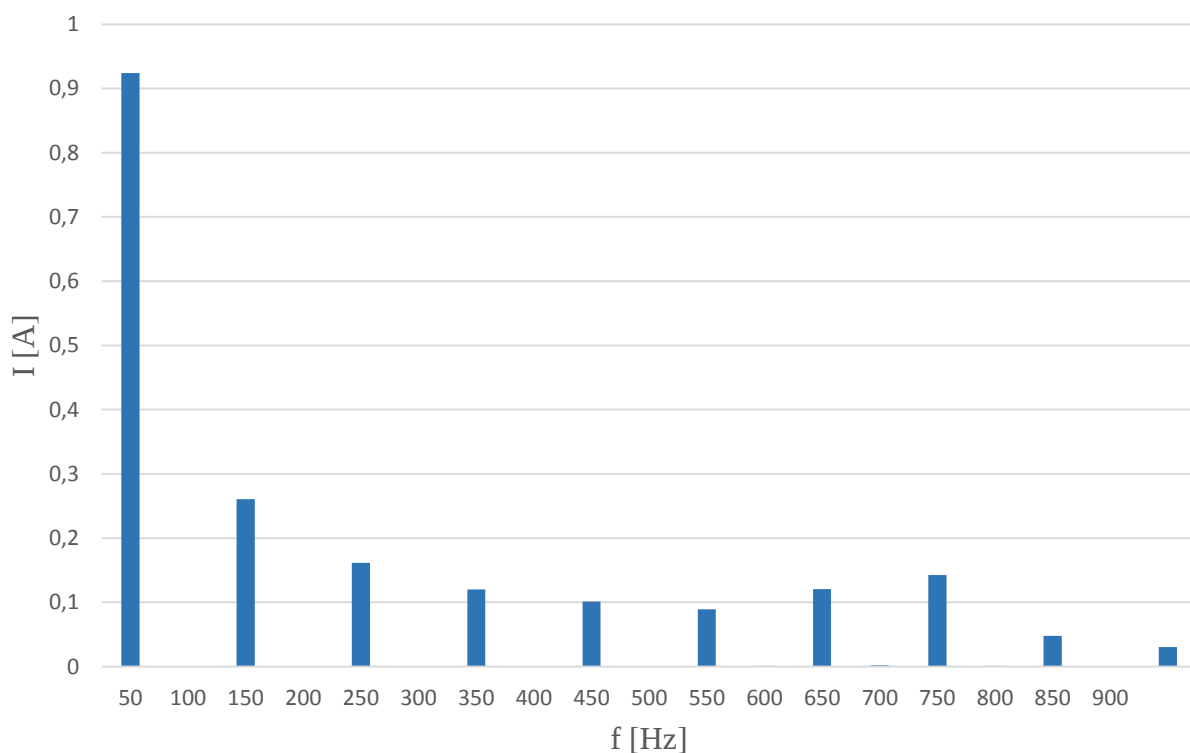
Obrázek 7-3 Spektrum efektivních hodnot napětí pro 1 kondenzátor.



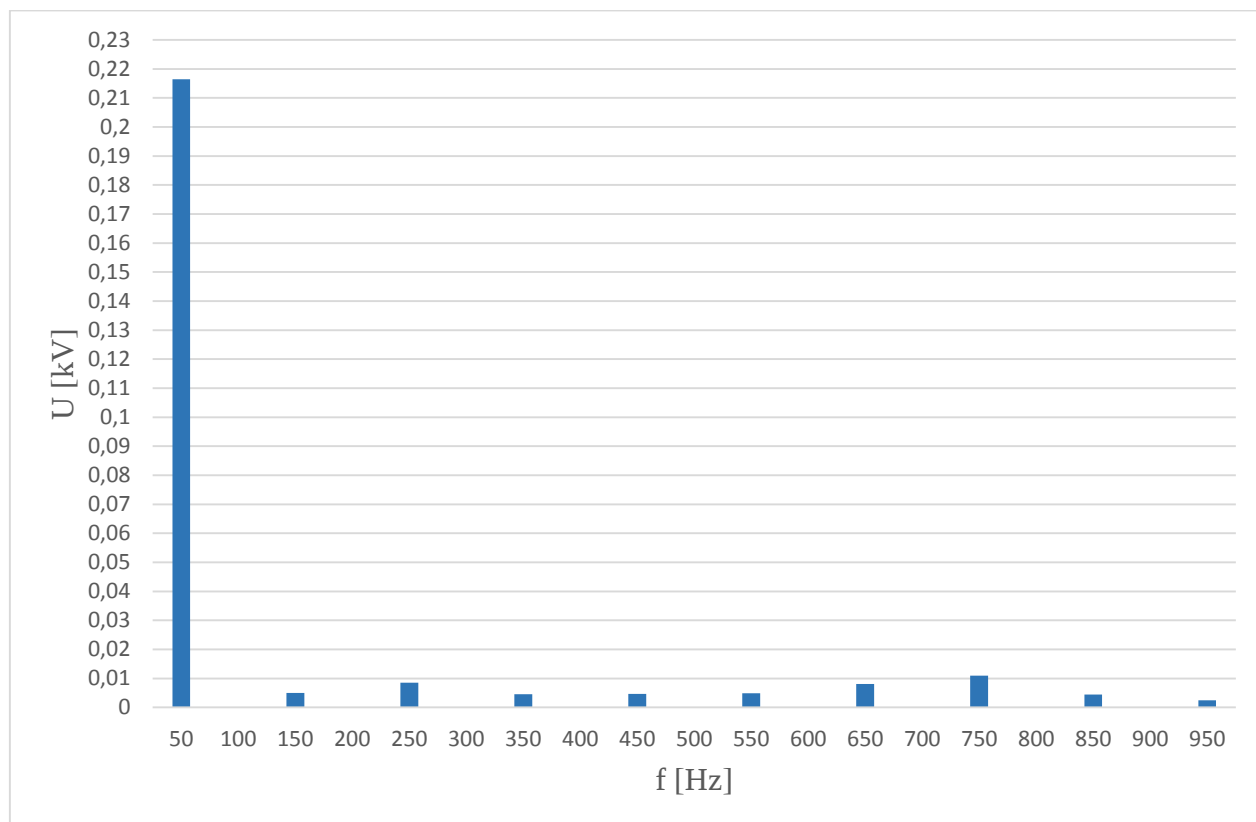
Obrázek 7-4 Průběh napětí a proudu pro připojený 1 kondenzátor.

1. a 2. kondenzátor

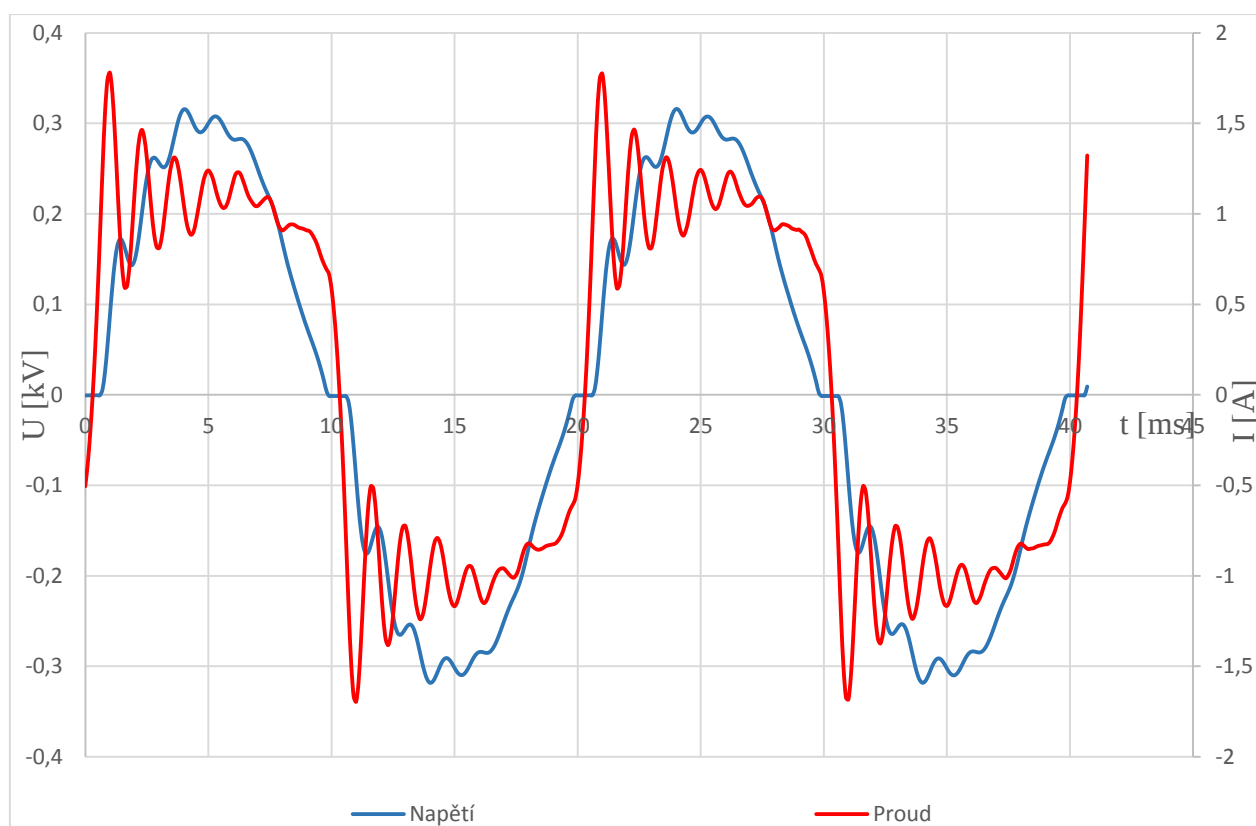
Při připojení dalšího kondenzátoru vidíme stejnou reakci jako v předchozím stavu pouze jen s vyššími hodnotami. Amplituda proudu zde dosahuje 1,78 A.



Obrázek 7-5 Spektrum efektivních hodnot proudu pro 2 kondenzátory.



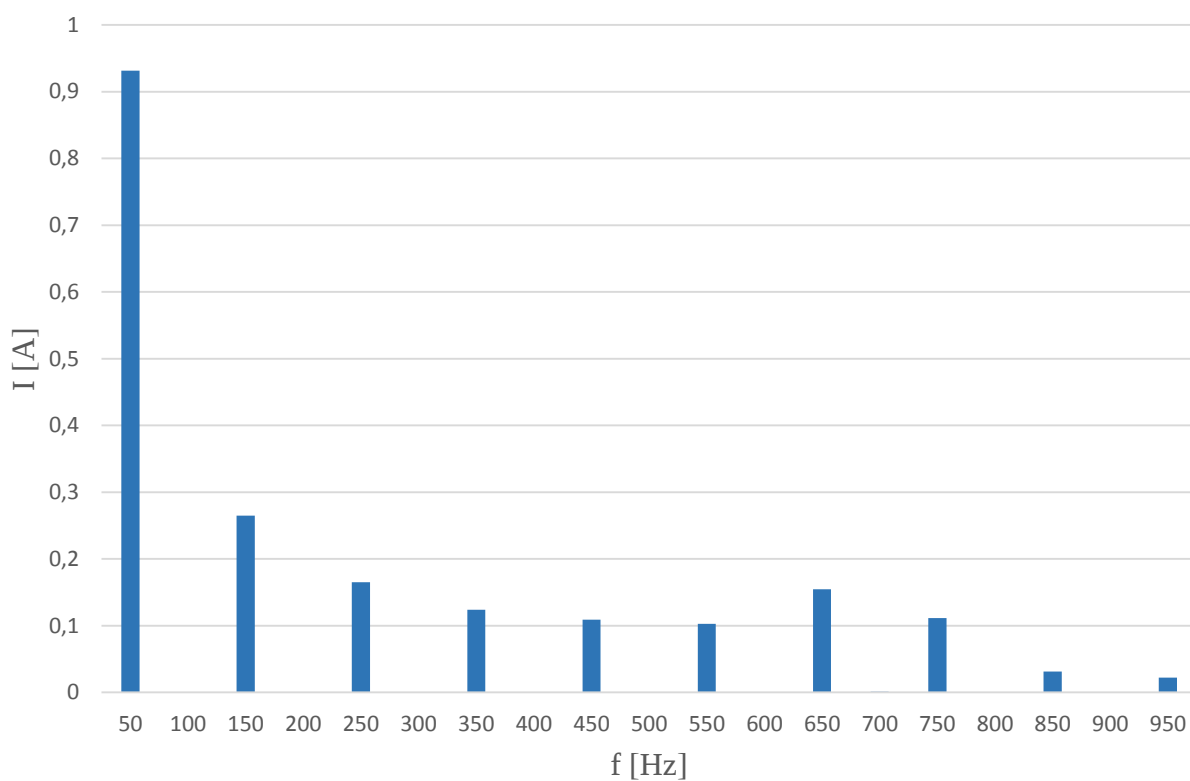
Obrázek 7-6 Spektrum efektivních hodnot napětí pro 2 kondenzátory.



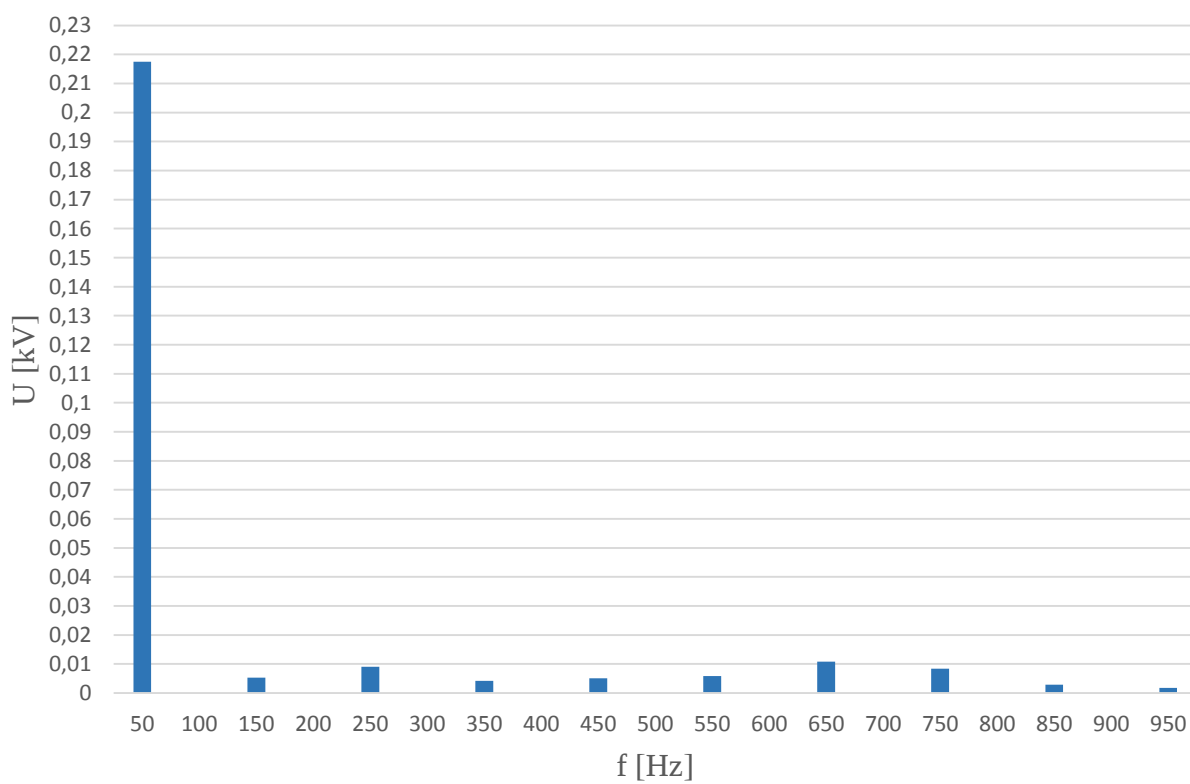
Obrázek 7-7 Průběh napětí a proudu pro 2 kondenzátory.

1., 2. a 3. kondenzátor

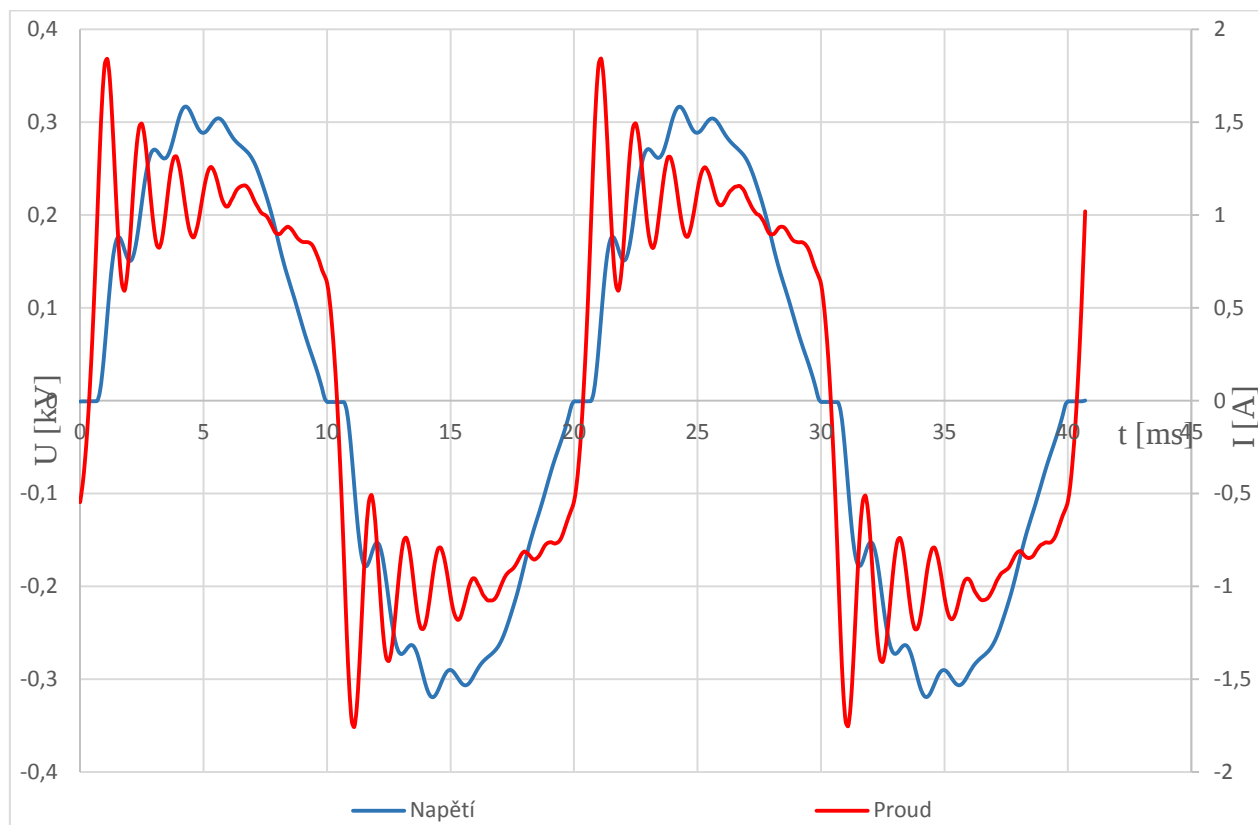
V tomto případě se jedná o nejhorší možnost amplituda proudu zde dosahuje 1,84 A.



Obrázek 7-8 Spektrum efektivních hodnot proudu pro 3 kondenzátory.



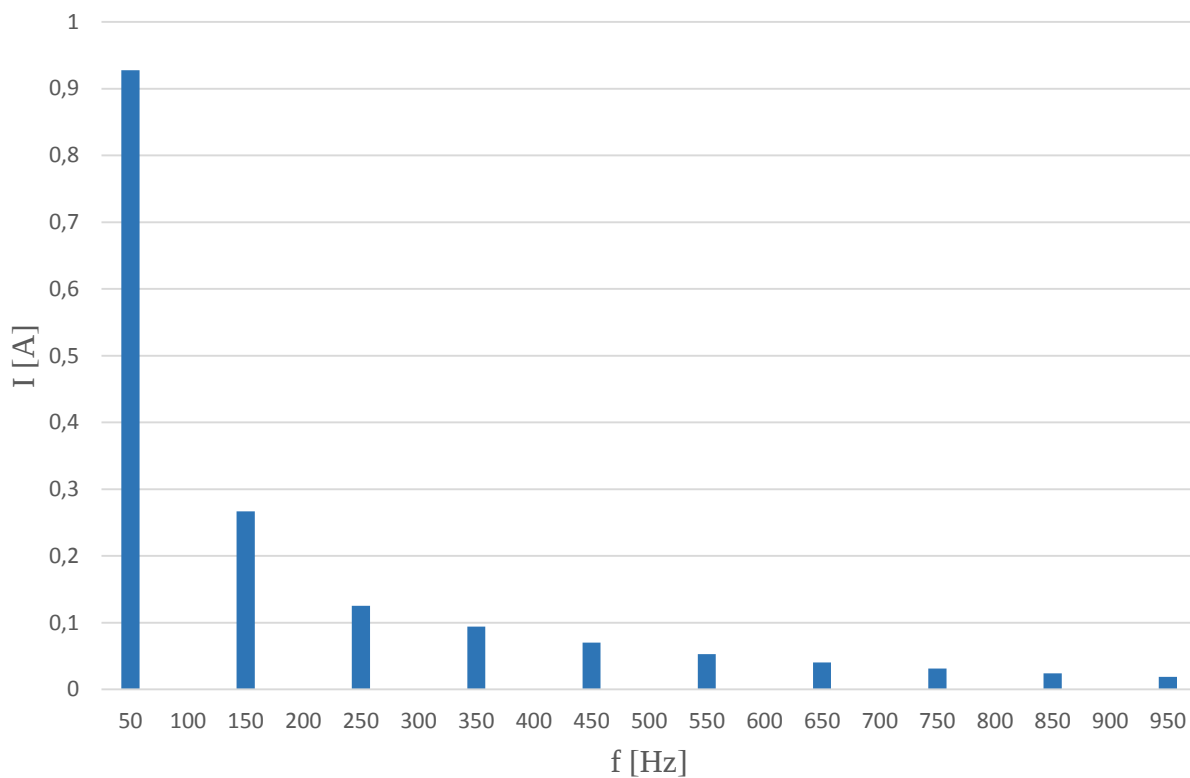
Obrázek 7-9 Spektrum efektivních hodnot napětí pro 3 kondenzátory.



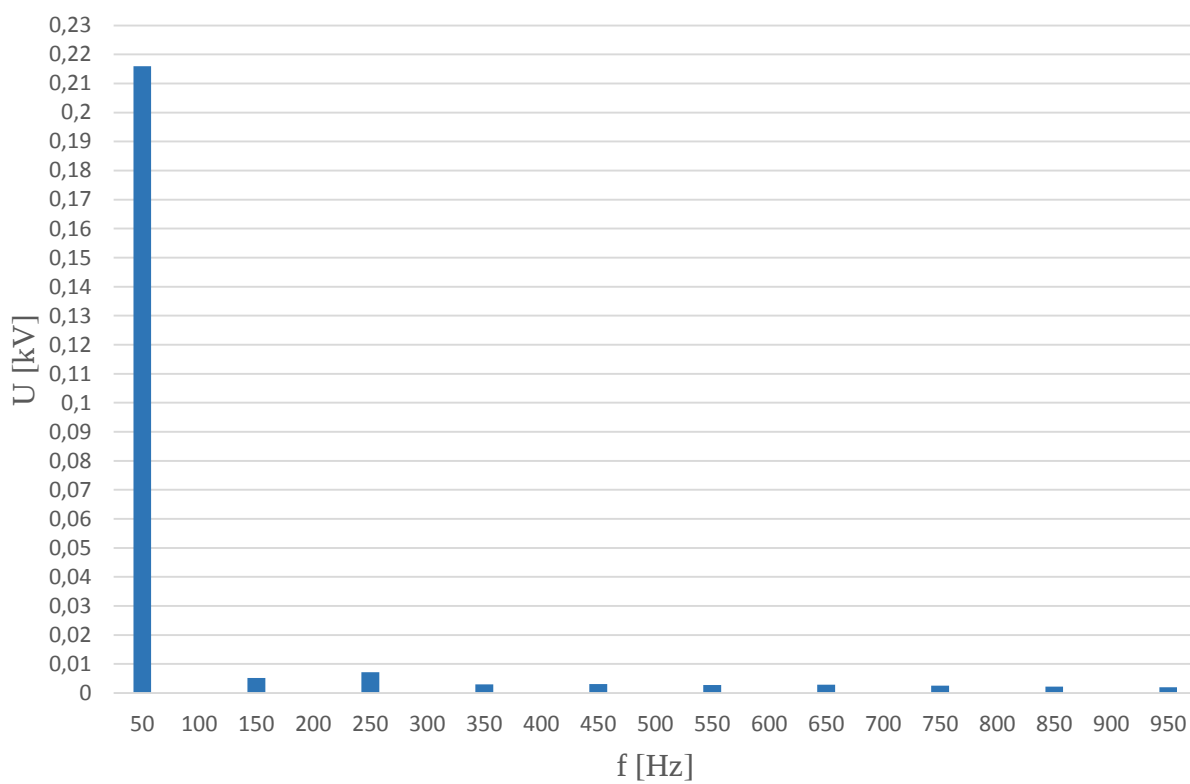
Obrázek 7-10 Průběh napětí a proudu pro 3 kondenzátory.

Rozladěný filtr

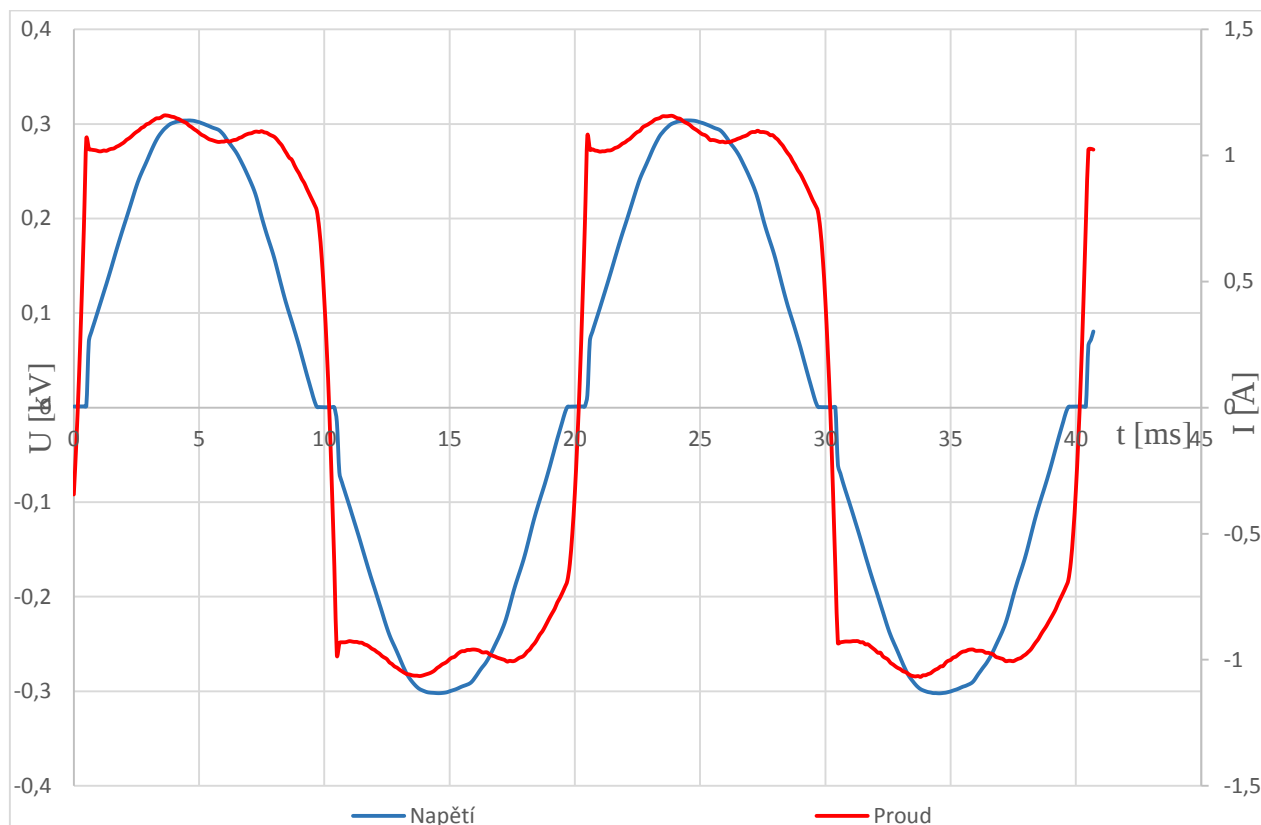
Rezonanční frekvence u rozladěného filtru nastává při kmitočtu 170 Hz. Z toho vyplývá, že filtr nebude fungovat správně. Z grafů spekter jde vidět, že v porovnání se vstupním měřením nedochází téměř k žádné změně. Ale v porovnání se samotným kondenzátorem nedochází k nárustu amplitudy proudu a zároveň dochází ke kompenzaci. Takže i když filtr nefunguje správně nedochází ke zhoršení zkreslení průběhu napětí a proudu.



Obrázek 7-11 Spektrum efektivních hodnot proudu pro rozladěný filtr.



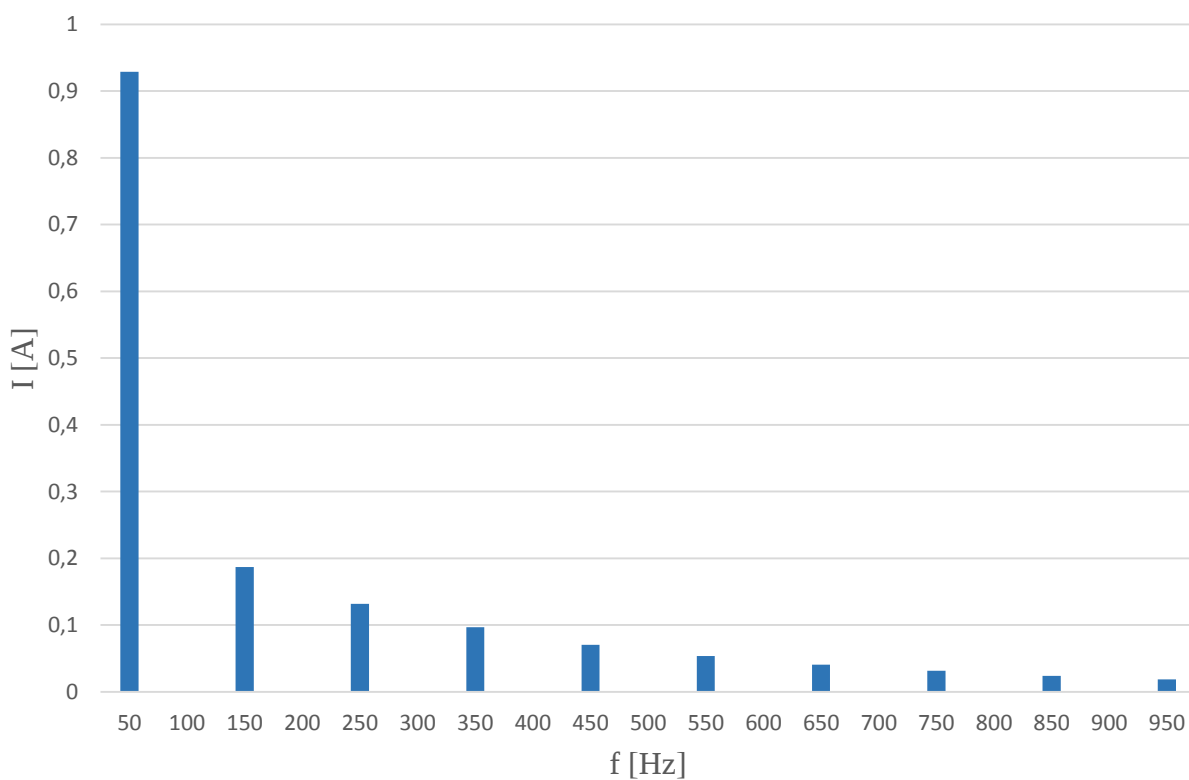
Obrázek 7-12 Spektrum efektivních hodnot napětí pro rozladěný filtr.



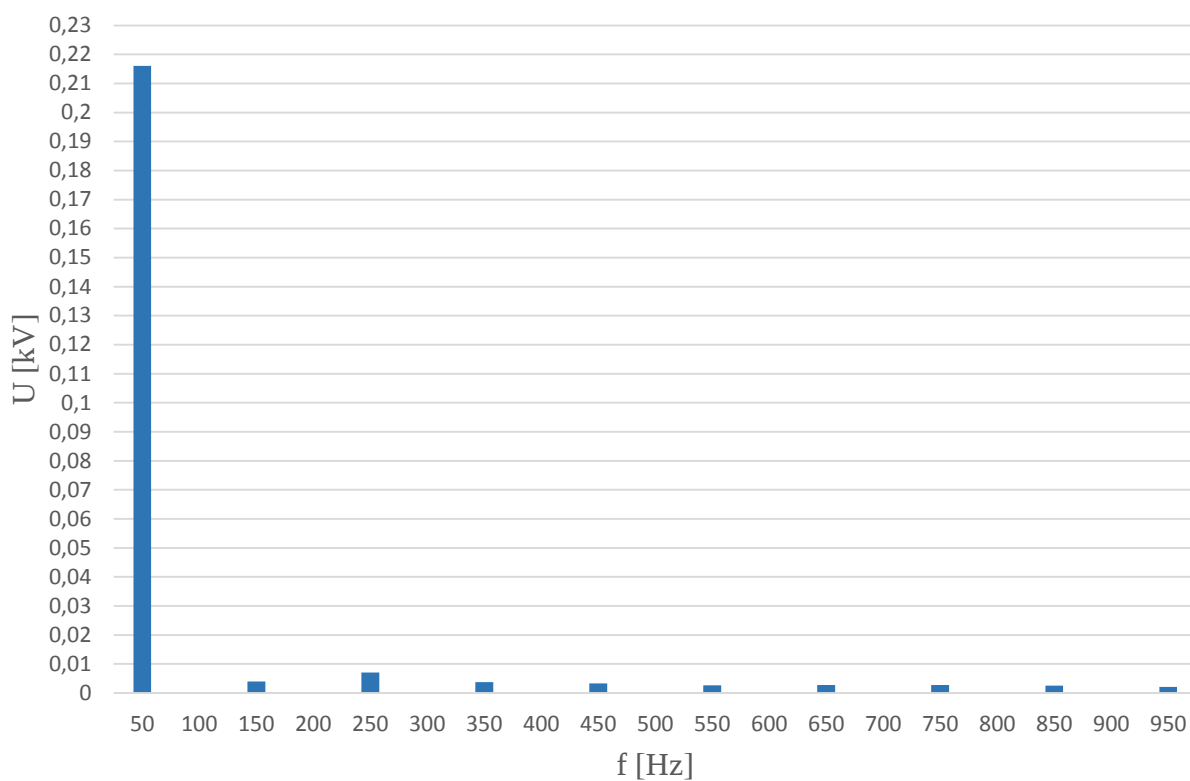
Obrázek 7-13 Průběh napětí a proudu pro rozladěný filtr.

Filtr 3. harmonické

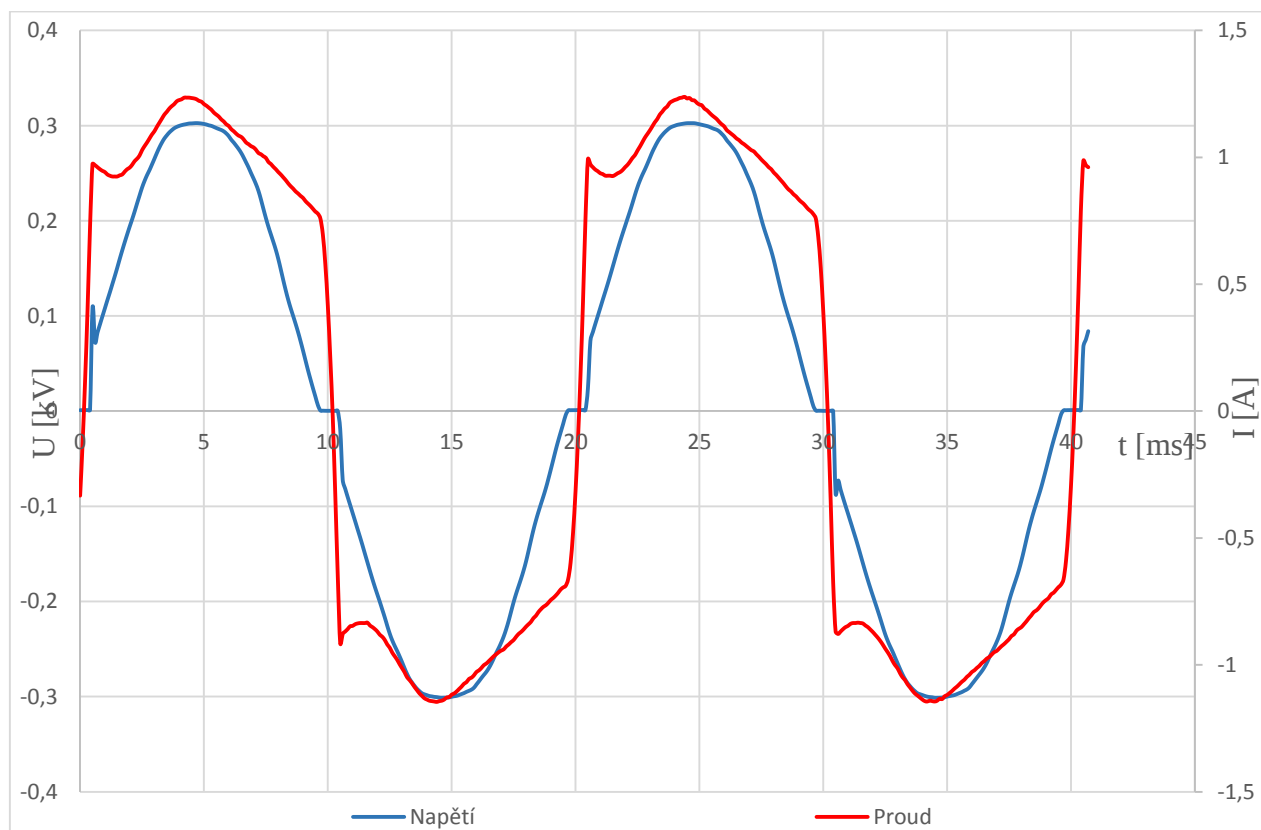
Zde už z průběhu spektra je patrné, že hodnota proudu na 3. harmonické je menší než v případě bez filtru. Průběh je kompenzovaný a z pohledu zkreslení mnohem čistší.



Obrázek 7-14 Spektrum efektivních hodnot proudu pro filtr 3. harmonické.



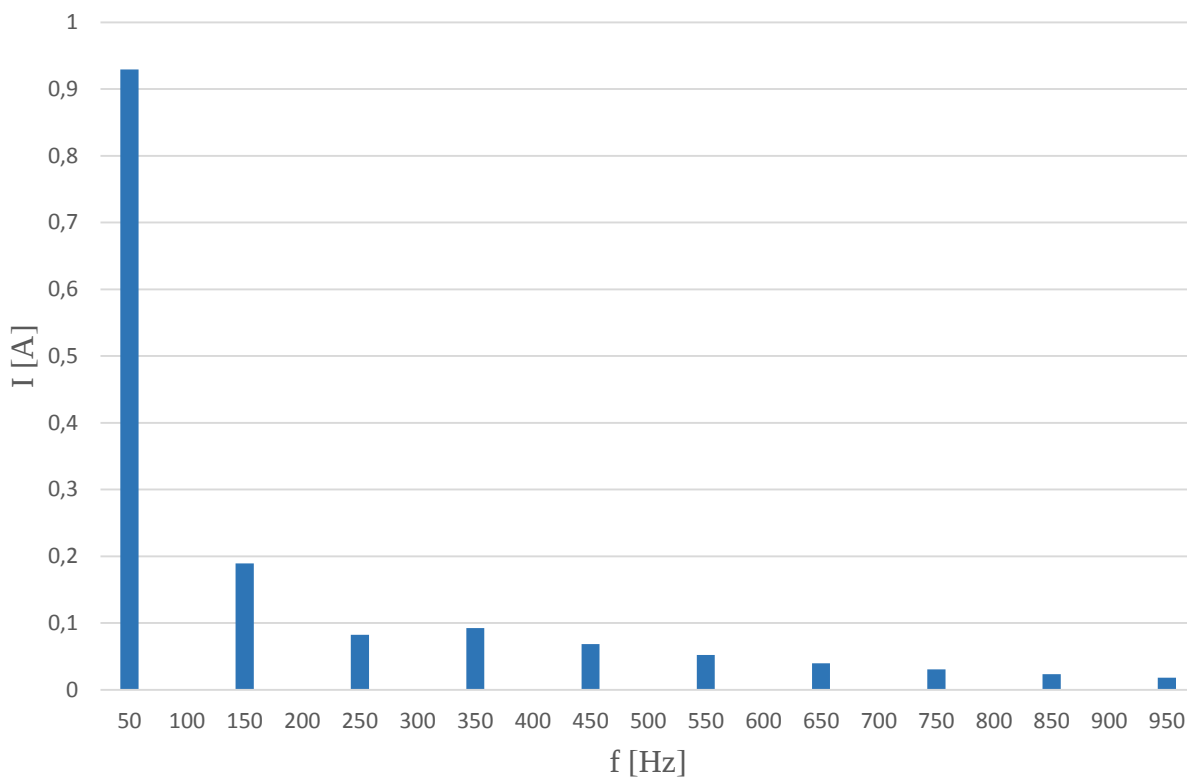
Obrázek 7-15 Spektrum efektivních hodnot napětí pro filtr 3. harmonické.



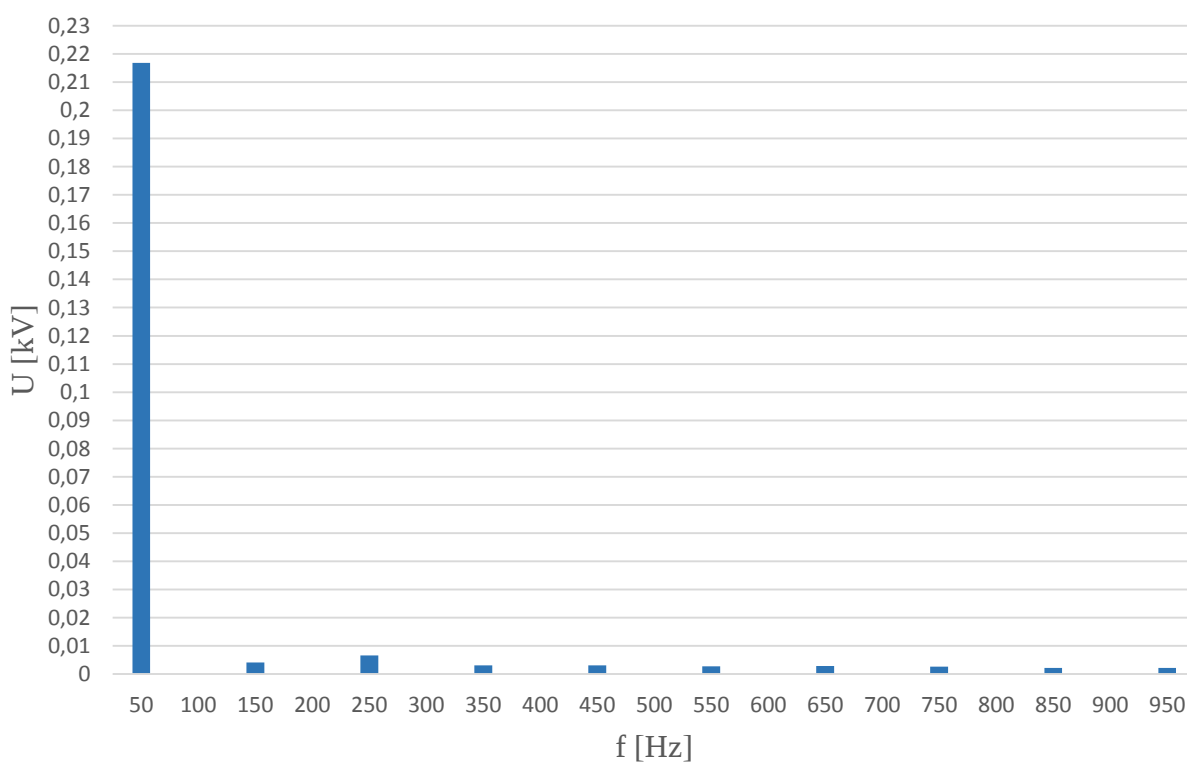
Obrázek 7-16 Průběh napětí a proudu pro filtr 3. harmonické.

Filtr 3. a 5. harmonické

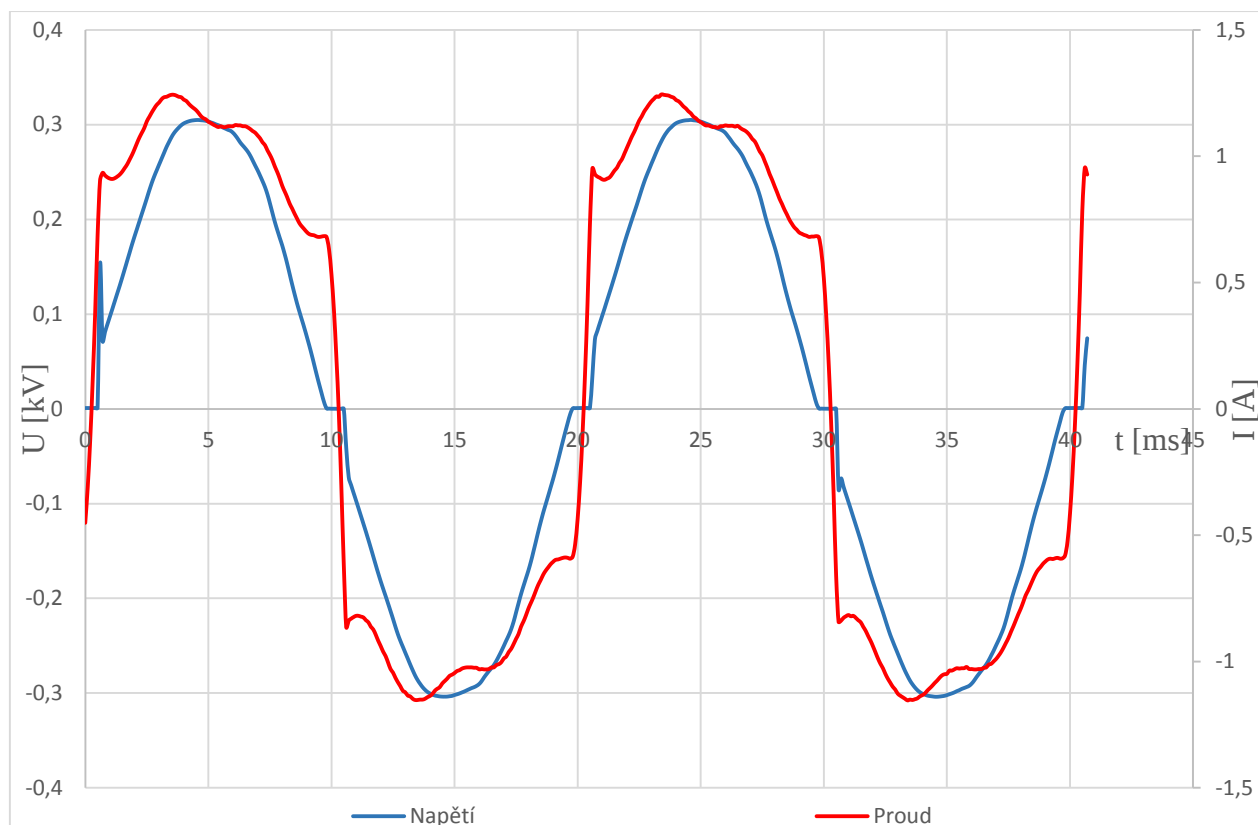
Při připojení filtru 5. harmonické se sníží proud při 250 Hz. To znamená, že se celkový průběh vyčistí a o tuto složku a jeho celkové skreslení bude menší než v případě pouze filtru 3. harmonické.



Obrázek 7-17 Spektrum efektivních hodnot proudu pro filtry 3. a 5. harmonické.



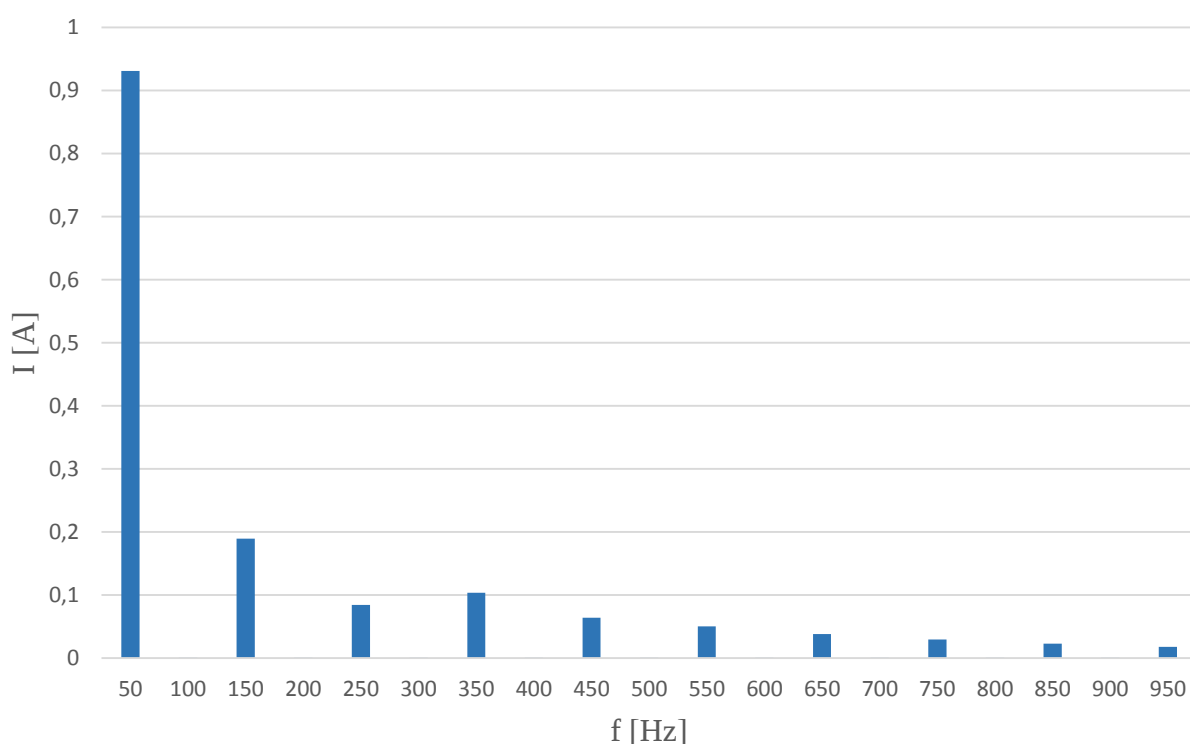
Obrázek 7-18 Spektrum efektivních hodnot napětí pro filtr 3. a 5. harmonické.



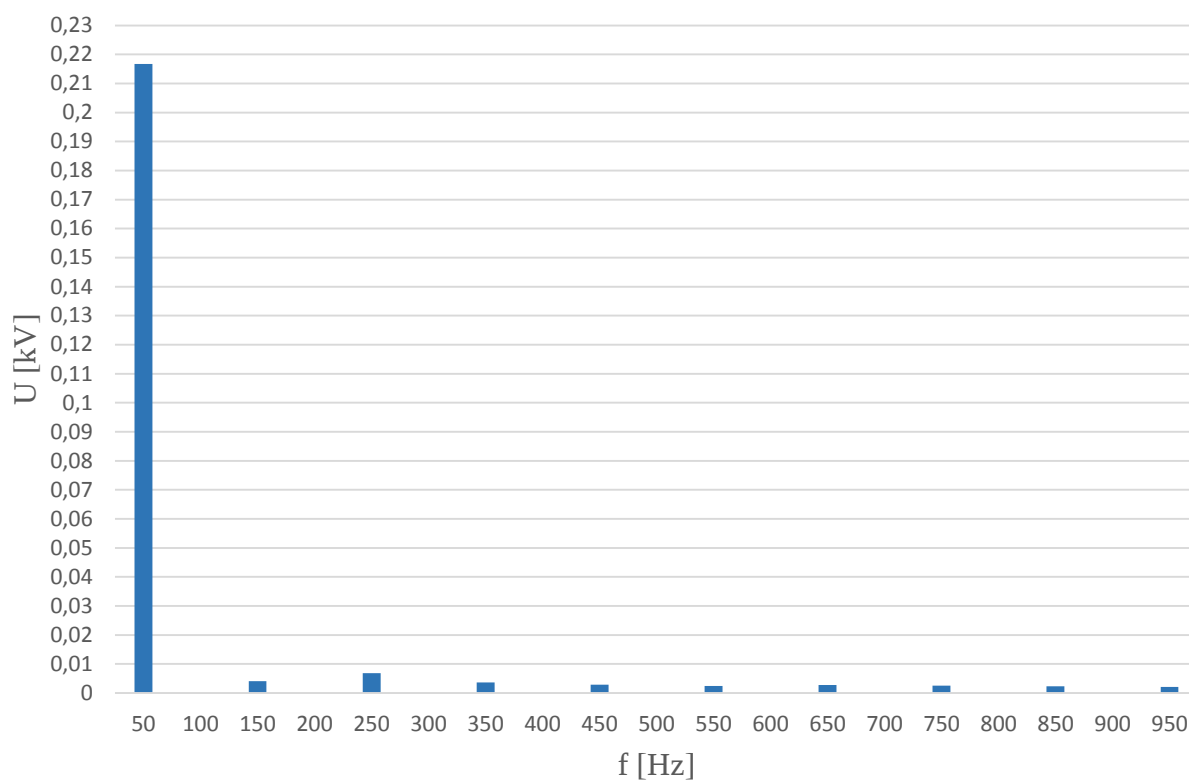
Obrázek 7-19 Průběh napětí a proudu pro filtr 3. a 5. harmonické.

Filtr 3., 5. a 7. harmonické

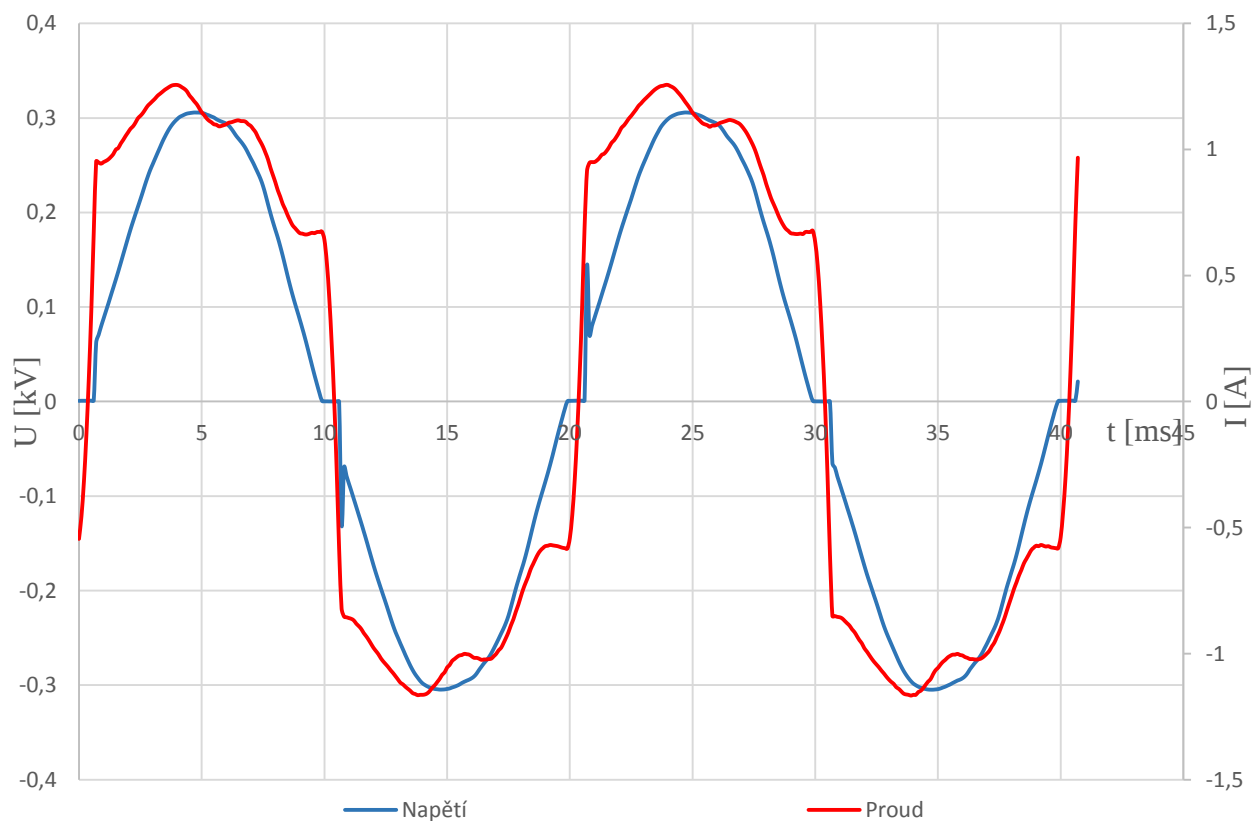
Při připojení posledního stupně, a to filtru 7. harmonické dochází k vyčištění signálu o všechny tři hlavní harmonické složky. To je 3., 5. a 7. harmonické složky. Průběh napětí i proudu je tedy zde nejčistší a jeho zkreslení je minimální.



Obrázek 7-20 Spektrum efektivních hodnot proudu pro všechny filtry.



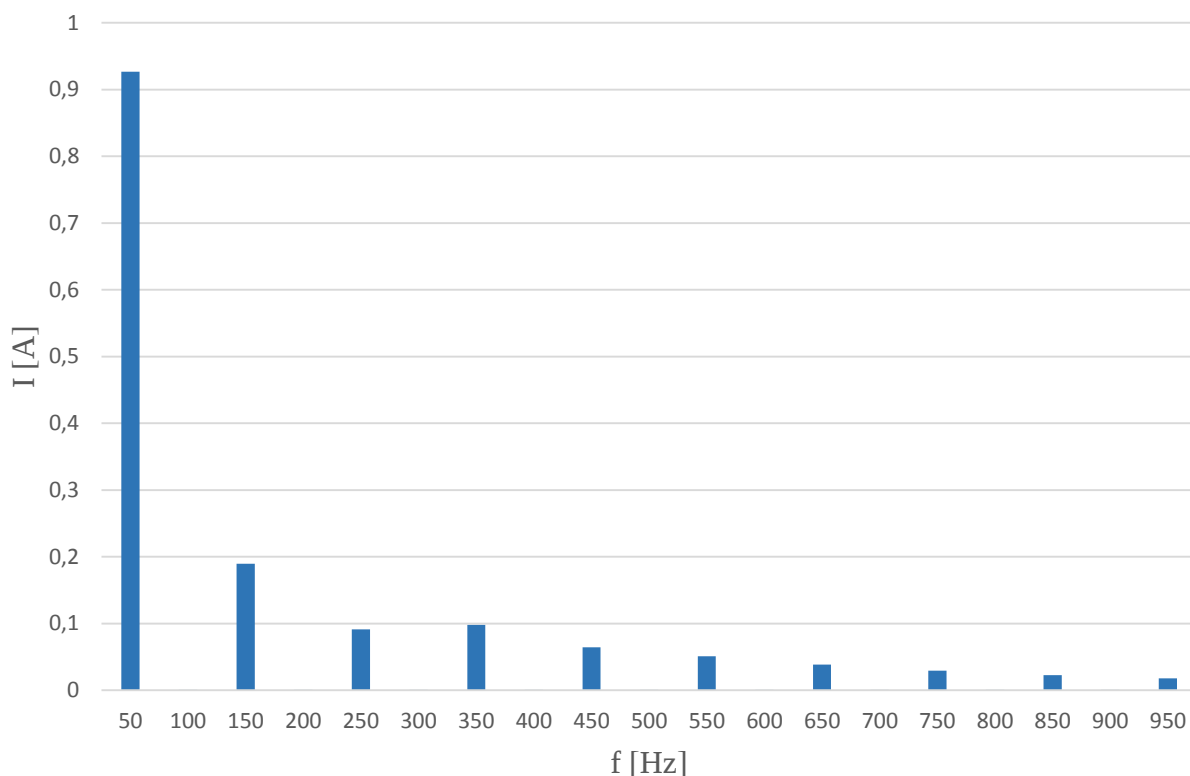
Obrázek 7-21 Spektra efektivních hodnot napětí pro všechny filtry.



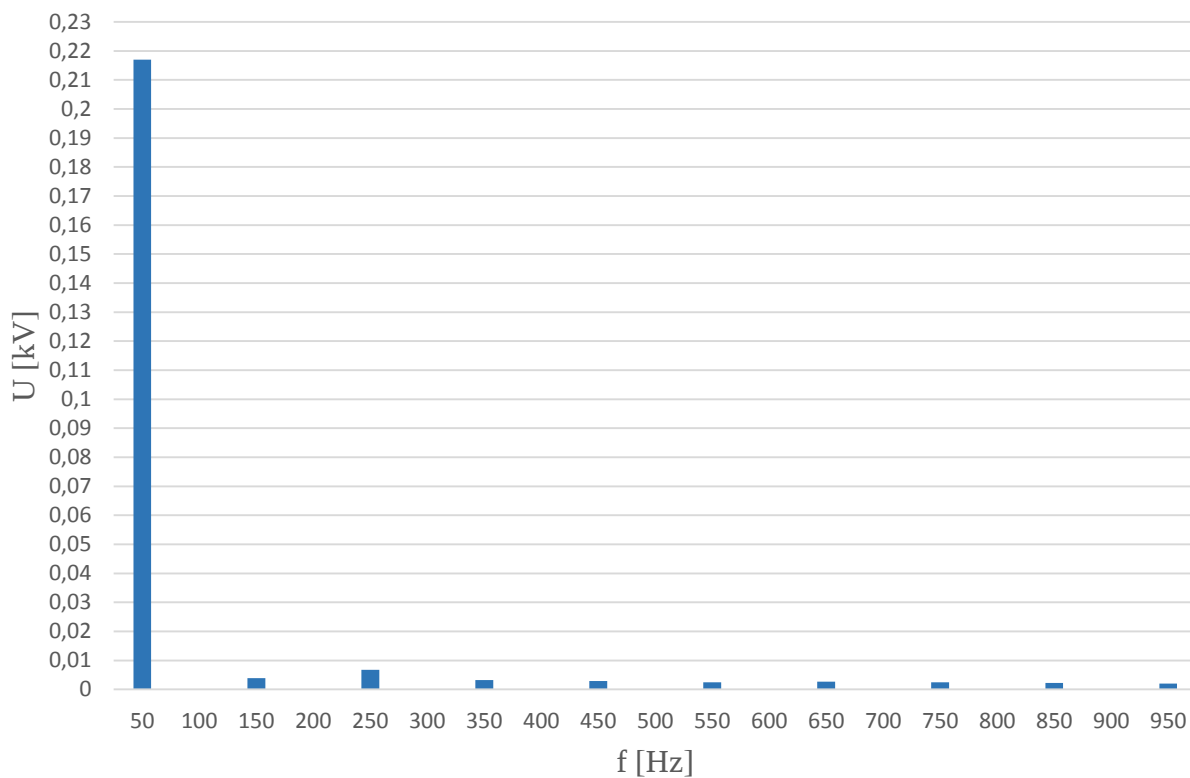
Obrázek 7-22 Průběh napětí a proudu pro všechny filtry.

Filtr 3., 5. a 7. harmonické s připojeným odporem

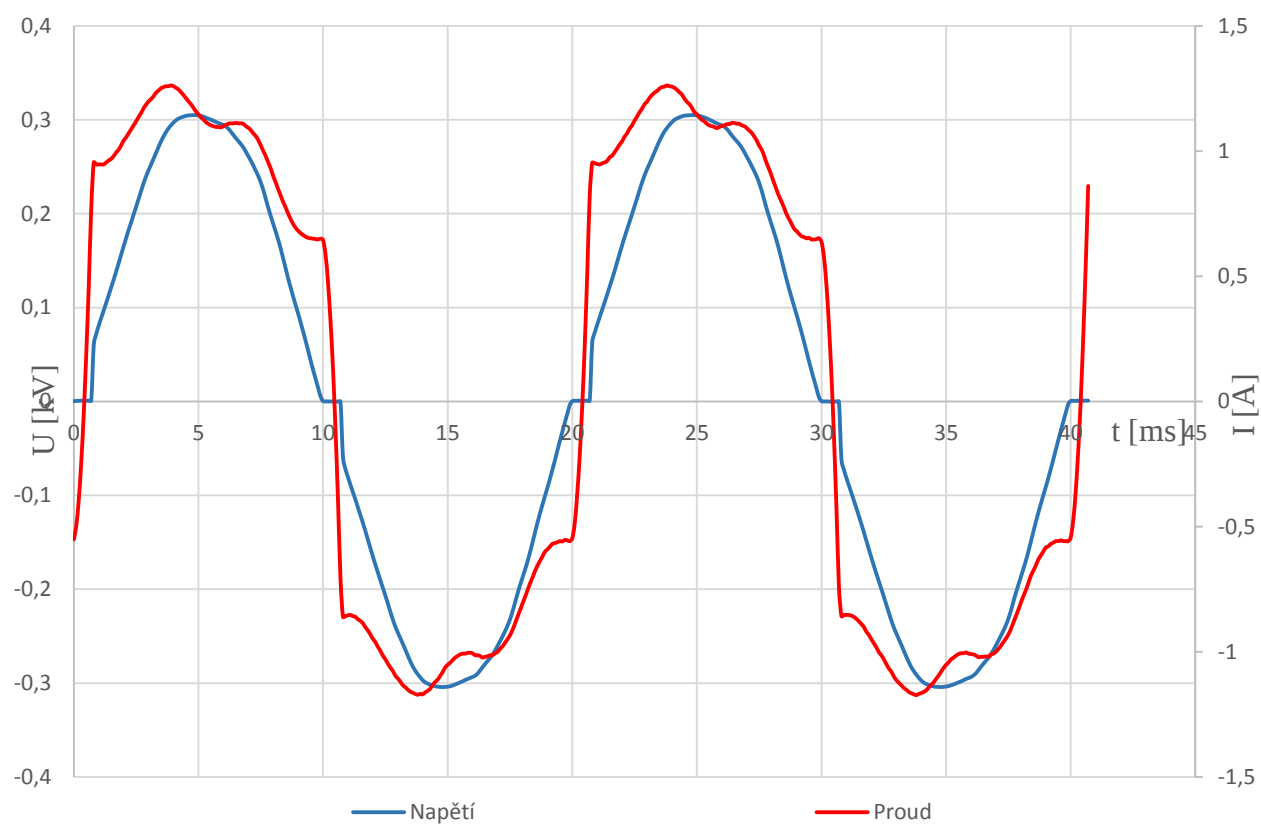
S připojením odporu dochází ke změně z přesně naladěného filtru pro 7. harmonickou na širokopásmový filtr s rezonancí na 7. harmonické složce. To znamená, že dochází ke zhoršení filtrace na 7. harmonické, ale ke zlepšení filtrace na dalších vyšších složkách. Filtrace, ale není tak účinná, jako v předchozím stavu, a proto dojde k mírnému zhoršení zkreslení průběhu napětí a proudu. Výsledný průběh je, ale stále velice čistý.



Obrázek 7-23 Spektrum efektivních hodnot proudu pro všechny filtry s připojeným odporem.



Obrázek 7-24 Spektrum efektivních hodnot napětí pro všechny filtry s připojeným odporem.



Obrázek 7-25 Průběh napětí a proudu pro všechny filtry s připojeným odporem.

8 ZÁVĚR

Úvodní částí této práce bylo představeny teoretické základy kompenzace a, chráněné kompenzace a filtrace. Je zde vysvětlen důvod kompenzace a filtrace a možné postupy návrhu a řešení možných problémů.

V další část práce se zabývá návrhem a realizací filtračně-kompenzačního zařízení pro přesně určenou a předem změřenou zátěž. Cílem toho zařízení není pouze zlepšit průběhy napětí a proudu, ale hlavně prakticky ukázat význam a funkčnost těchto zařízení.

Ze vstupního měření a jeho vyhodnocení se nejprve počítalo s využitím stejně velkých kondenzátorů pro každý stupeň filtrace, ale při následném výpočtu indukčností je zjistilo, že realizace filtru 3. harmonické by byla nerealizovatelné v potřebných rozměrech. Proto se přešlo k řešení, první filtr má nejvyšší hodnotu a poslední nejnižší. To proto, že se zvyšující se hodnotou kapacity klesá potřebná hodnota indukčnosti. Tím jsem docílili vyrovnání indukčností na hodnoty realizovatelné v potřebných rozměrech.

S prací na samotném zařízení může uživatel pomocí ručního propojování jednotlivých stupňů a možnosti vypojení indukčností vidět jaký vliv na průběhy napětí a proudu mají jednotlivé sekce.

V případě odpojených indukčností dochází ke kompenzaci zátěže, ale nedochází k vyčištění vyšších harmonických složek, a tedy k jeho zlepšení. Spíše naopak dochází k jeho zhoršení, protože kondenzátory dodávali další rušení do obvodu.

V případě připojené rozladěné indukčnosti jde vidět, jak dochází k zlepšení účinníku a zároveň nedochází ke zhoršení, ale ani zlepšení průběhů. To je proto, že indukčnost v serii s kondenzátorem zabraňuje k rychlým nabíjení a vybíjení kondenzátoru a tedy nedochází k proudovým špičkám.

V případě správně naladěných indukčností dochází jak ke správné kompenzaci zátěže, tak k filtraci vyšších harmonických složek, a tedy k vyčištění průběhu. Původní zkreslení průběhu proudu bylo 34 %. Po připojení všech filtrovacích sekcí došlo se zlepšení zkreslení na 27,2 %. To je zlepšení o 6,8 % oproti původnímu stavu a fázový posun je z původních 13,2° posunut na 1,6°.

Výsledky jsou tedy přesně takové jaké se na začátku práce předpokládaly a jejich praktické využití jde vidět na modelu filtračně-kompenzačního zařízení.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ARRILLAGA, J a N WATSON. Power system harmonics. 2nd ed. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2003, x, 399 p. ISBN 04-708-5129-5.
- [2] NATARAJAN, Ramasamy a N WATSON. Power system capacitors. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor, 2005, xxii, 552 p. Power engineering series. ISBN 15-744-4710-6.
- [3] KORENC, Vladimír a Jiří HOLOUBEK. Kompenzace jalového výkonu v praxi. Vyd. 1. Praha: IN-EL, 1999, 127 s. Knižnice Elektro. ISBN 80-862-3007-4.
- [4] Kompenzace účinníku v průmyslových sítích [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap7.pdf>
- [5] Teoretický rozbor kompenzace jalového výkonu. [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/_pred_web/10_Pred10MR.pdf
- [6] Kompenzace elektrického jalového výkonu [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/kompenzace-elektrickeho-jaloveho-vykonu--11073>