

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Vliv tvaru napájecího napětí pro měření
proudu pomocí měřicí cívky proudu
Effect of Supply Voltage Waveform to Measure
the Current through the Coil Current Measurement

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Mikulášek**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy

Téma: **Vliv tvaru napájecího napětí pro měření proudu pomocí měřicí
cívky proudu**
**Effect of Supply Voltage Waveform to Measure the Current through
the Coil Current Measurement**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Proměřit a porovnat naměřené hodnoty proudu neharmonických průběhů měřených přes vzduchovou měřicí cívku a přímo. Předpokládá se zkruslení napětí 100 - 230 V / 50 Hz různými harmonickými.

Body zadání:

1. Provedení teoretického rozboru problematiky použití měřicí cívky pro zvýšení měřeného proudu s ohledem na její tvar, rozměry a umístění měřicího zařízení.
2. Provedení rozboru vlivu neharmonického proudu na výsledky měření s měřicí cívku.
3. Návrh testů pro různě zkruslené průběhy proudu a porovnání měření přes měřicí cívku s přímým měřením.
4. Vyhodnocení výsledků testů a návrh optimálního použití měřicí cívky tak, aby měla minimální vliv na měření s neharmonickými průběhy proudu.
5. Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BARTUŠEK, Karel. *Měření v elektrotechnice*. 2. přeprac. a dopl. vyd. V Brně: VUTUM, 2010, 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [2] DE LA ROSA, Francisco C. *Harmonics and power systems*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006, 184 s. ISBN 0-8493-3016-5.
- [3] ĎAĎO, Stanislav a Miloš SEDLÁČEK. *Měření aktivních elektrických veličin s neharmonickými průběhy*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 267 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Richard Velička, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry

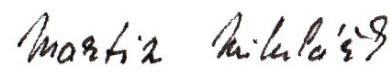


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 28. Dubna 2017

Handwritten signature of Martin Mikulášek in black ink, written in a cursive style. The signature is positioned above a horizontal dotted line.

Martin Mikulášek

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Richardu Veličkovi Ph.D., za vedení, cenné rady a připomínky při psaní bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této práce je porovnat rozdíl mezi měřením proudu přímou a nepřímou metodou při použití vzduchové měřicí cívky proudu.

Jedná se o to, zda měřicí vzduchová cívka způsobuje chyby měření různých harmonických a neharmonických průběhů, a zda se přímo na cívce zvětšuje proud o počet závitů N , nebo při měření vzniká nějaká chyba.

Hlavním úkolem je porovnat, jestli jsou obě metody měření vhodné k měření harmonických a neharmonických proudů.

Klíčová slova

Cívka, měřicí vzduchová cívka, Rogowskiho cívka, proud, harmonický průběh, neharmonický průběh, frekvence, chyba měření, počet závitů, chyba přístroje, měření

Abstract

The aim of this study is to compare the difference between the current measurement, direct and indirect method of measuring air ingestion coil current.

It is about whether measuring air coil causes measurement errors of different harmonic and non-harmonic waveforms, and whether directly on the coil current increases the number of turns N , or when there is an error measurement.

The main task is to compare whether both measurement methods are suitable for measuring harmonic and non-harmonic currents.

Key Words

Coil, Measuring an Air Coil, Rogowski Coil, Current, Harmonic Waveform, Nonharmonic Waveform, Frequency, Measurement Error, Number of Turns, Instrument Error, Measurement

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	9
Seznam ilustrací a grafů	10
Seznam tabulek	11
1. Úvod	12
2. Základní pojmy a druhy průběhů	13
2.1 Základní pojmy	13
2.2 Harmonický průběh	14
2.3 Neharmonický průběh	17
3. Cívky	20
3.1 Měřicí cívka proudu	20
3.2 Rogowskiho cívka	21
4. Měřicí přístroje a jejich vlastnosti	25
4.1 Napájecí zdroj – Agient (HP) 6834B	25
4.2 Wattmetr - Yokogawa WT210	26
4.3 Analyzátor – Dewetron DEWE-571-PNA-1MS	27
4.4 Pružný převodník proudu AmpFLEX A195 / PNA-FLEX-300-45	28
5. Průběhy	29
5.1 Sinusový s 3. harmonickou 5 %	30
5.2 Sinusový s 5. a 7. harmonickou	30
5.3 Obdélník	31
6. Postup měření	32
7. Naměřené hodnoty	33
7.1 Průběh č. 1 – Sinusový	33
7.2 Průběh č. 2 – Sinusový s 3. harmonickou 5 %	34
7.3 Průběh č. 3 – Sinusový s 5. harmonickou 6 %	34
7.4 Průběh č. 4 – Sinusový s 7. harmonickou 5 %	35
7.5 Průběh č. 5 – Sinusový s 5. a 9. harmonickou 7 % a 1 %	36
7.6 Průběh č. 6 – Sinusový s 5. a 7. harmonickou 3 % a 5 %	36
7.7 Průběh č. 7 – Sinusový s 21. a 23. harmonickou 0,5 % a 1,5 %	37
7.8 Průběh č. 8 – Sinusový s 2., 3., 4., a 5. harmonickou 2 %, 2 %, 1 % a 3 %	38
7.9 Průběh č. 9 – Obdélníkový průběh	38
7.10 Průběh č. 10 – Průběh napětí na spínaném zdroji	39
8. Vyhodnocení	40
9. Závěr	41
Seznam použité literatury	42

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol, zkratka	Název	Jednotka
A	průřez jednoho závitů cívk	m
H	intenzita magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
I	efektivní hodnota proudu	A
I_{cp}	proud cívkou $\div 50$	A
I_{pz}	přímý proud	A
M	vzájemná indukčnost mezi vinutím a zp. vinutím	H
N	počet závitů cívk	-
T	délka periody	-
THD	celkové harmonické zkreslení	%
U	efektivní hodnota napětí	V
W	tloušťka jádra	m
\vec{H}	intenzita magnetického toku	Wb
\vec{B}	magnetická indukce	T
a	vnitřní poloměr jádra	m
b	vnější poloměr jádra	m
f	frekvence	Hz
h	řád harmonické	-
k	celé číslo vyjadřující násobek periody	-
l	délka cívk	m
t	čas	s
$I_{stř}$	střední hodnota proudu	A
I_m	maximální hodnota proudu	A
Q_l	efektivní hodnota základní složky	-
Q_n	součet všech harmonických složek	-
U_i	indukované napětí	V
k_v	činitel výkyvu	-
k_t	činitel tvaru	-
k_p	činitel plnění	-
dl	úsek cívk	-
$i(t)$	okamžitá hodnota proudu	A
$u(t)$	okamžitá hodnota napětí	V
δ	Relativní chyba měření	%
ω	úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$
ψ	počáteční fáze	-
φ	úhel posunutí dvou harmonických průběhů	-
$d\Phi$	cívkový tok	Wb
$\Delta\Phi$	změna magnetického toku	Wb
π	konstanta	-
μ_0	permeabilita vakua $4\pi \cdot 10^{-7}$	$H \cdot m^{-1}$

Seznam ilustrací a grafů

Obr. 2.2.1. Střídavý proud sinusového průběhu	14
Obr. 2.2.2. Harmonický proud s počáteční fází ψ	15
Obr. 2.2.3. Dva harmonické proudy posunuté o úhel φ	15
Obr. 2.2.4. Střední hodnota střídavého proudu	16
Obr. 2.3.1 Příklad skládání průběhu při použití dvou harmonických	17
Obr. 2.3.2 Příklad skládání průběhu s více harmonickými	18
Obr. 2.3.3 Hodnoty proudu	19
Obr. 3.1.1 Měřicí cívka proudu	20
Obr. 3.2.1 Rogowskiho cívka navinutá na toroidním jádře, uprostřed měřený vodič	21
Obr. 3.2.2 Znázornění vektoru H	23
Obr. 3.2.3 Znázornění rozměrů Rogowskiho cívky	23
Obr. 3.2.4 Ukázka vinutí RCP	24
Obr. 5.1.1 Deformovaný sinus 3. harmonická 5%	30
Obr. 5.2.1 Deformovaný sinus 5. harmonická a 7. harmonická	30
Obr. 5.3.1 Obdélník	31
Obr. 6.1 Schéma zapojení	32
Obr. 6.2 Pracovní prostředí DEWE-571	32
Graf. 7.1 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – sinus	33
Graf. 7.2 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 3. harmonická.....	34
Graf. 7.3 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 5. harmonická	35
Graf. 7.4 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 7. harmonická	35
Graf. 7.5 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 5. a 9. harm.	36
Graf. 7.6 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 5. a 7. harm.	37
Graf. 7.7 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 21. a 23. harm.	37
Graf. 7.8 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 2., 3., 4., 5. harm. .	38
Graf. 7.9 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – obdélník	39
Graf. 7.10 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – spínaný zdroj	39

Seznam tabulek

Tab. 4.1.1 Specifikace přístroje Agilent 6834B	25
Tab. 4.2.1 Specifikace vstupů přístroje Yokogawa WT210	26
Tab. 4.3.1 Specifikace přístroje Dewe-57	27
Tab. 4.4.1 AmpFLEX A195	28
Tab. 5.1 Úrovně jednotlivých harmonických v procentech pro řady harmonických až do 25	29
Tab. 7.1 Tabulka naměřených hodnot – sinusový průběh	33
Tab. 7.2 Tabulka naměřených hodnot – 3. harmonická 5 %	34
Tab. 7.3 Tabulka naměřených hodnot – 5. harmonická 6 %	34
Tab. 7.4 Tabulka naměřených hodnot – 7. harmonická 5 %	35
Tab. 7.5 Tabulka naměřených hodnot – 5. a 9. harmonická 7 % a 1 %	36
Tab. 7.6 Tabulka naměřených hodnot – 5. a 7. harmonická 3 % a 5 %	36
Tab. 7.7 Tabulka naměřených hodnot – 21. a 23. harmonická 0,5 % a 1,5 %	37
Tab. 7.8 Tabulka naměřených hodnot – 2., 3., 4., a 5. harmonická	38
Tab. 7.9 Tabulka naměřených hodnot – Obdélníkový průběh	38
Tab. 7.10 Tabulka naměřených hodnot – průběh napětí na spínaném zdroji	39

1. Úvod

V dnešní době se elektrické přístroje všeho druhu vyvíjí velmi rychle, a stávají se tak neodmyslitelnou součástí našeho denního života. A i díky tomu jsou na ni kladeny stále větší nároky. To platí i o měřicích přístrojích, u kterých je požadována především přesnost a rychlost měření a v neposlední řadě komfort při ovládání uživatelského rozhraní.

V této práci se však nebudeme zabývat samotnými přístroji, ale cívkami používanými pro měření proudu. Cívka, jako každá součástka má určitý vliv na měření. Mezi běžné a známé vlivy nepatrně ovlivňující měření patří poloha cívky v obvodu, nebo také umístění měřicího ústrojí, popřípadě fázový posun. Tyto chyby však dosahují velmi malých hodnot, a proto je lze při měření zanedbat.

Hlavním úkolem práce je zjistit, jaká chyba vzniká, pokud obvodem protéká harmonický nebo neharmonický proud, v případě, že změříme proud přímo a za pomoci vzduchové měřicí cívky s $N = 50$ závitů. Pokud bude tedy obvodem protékat neharmonický proud o velikosti $I = 1$ A, měl by být proud na vzduchové měřicí cívce $50\times$ větší, tedy roven $I = 50$ A.

Při výskytu chyb se pokusíme nalézt řešení, jak tyto chyby odstranit nebo co nejvíce potlačit, a tím dosáhnout větší přesnosti měření.

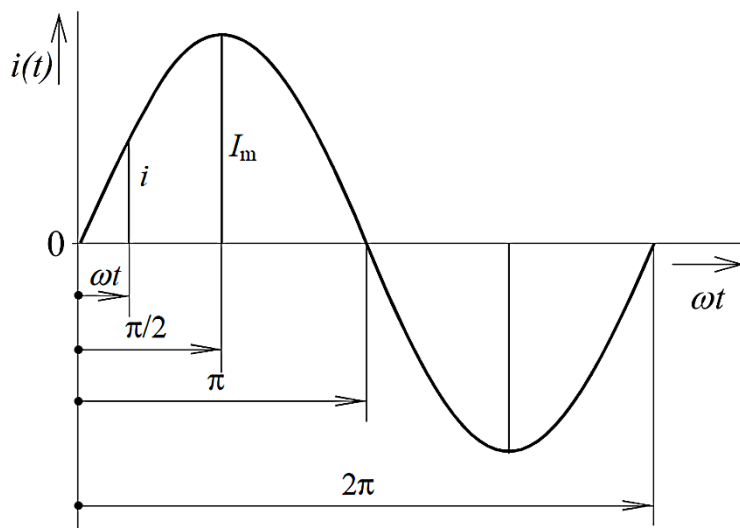
2. Základní pojmy a druhy průběhů

2.1 Základní pojmy

<i>Aktivní elektrické veličiny</i>	jsou veličiny, které můžeme změřit přímo měřicími přístroji (napětí, proud, výkon, náboj...)
<i>Deterministický průběh</i>	mění svoji hodnotu v čase, podle předem známé funkce
<i>Stochastický průběh</i>	nabývá různých hodnot nezávisle na čase
<i>Periodický průběh</i>	je takový, který se opakuje vždy v přesných časových intervalech
<i>Anti-periodický průběh</i>	nastává, pokud je ve druhé periodě průběh zrcadlově obrácen
<i>Střídavý průběh</i>	je zvláštním případem periodického průběhu. Je charakteristický tím, že má nulovou hodnotu stejnosměrné složky
<i>Harmonický střídavý průběh</i>	střídavý průběh, který lze popsat funkcemi $\sin \omega t$ nebo $\cos \omega t$
<i>Převodník</i>	transformuje vstupní veličiny tak, aby je bylo možno změřit. To může být například úpravou velikosti nebo převodem na jiný druh veličiny vhodný k měření
<i>Převodní charakteristika</i>	závislost výstupní veličiny na vstupní v ustáleném stavu a za vztažných podmínek
<i>Citlivost</i>	poměr výstupní veličiny ku vstupní, udává se pouze u přístrojů s lineární převodní charakteristikou
<i>Statická chyba</i>	rozdíl výstupní hodnoty a té, kterou bychom měli skutečně naměřit v ustáleném stavu
<i>Dynamická chyba</i>	odchylka výstupní veličiny od hodnoty, která odpovídá okamžité hodnotě měřené veličiny
<i>Frekvenční charakteristika</i>	závislost poměru amplitudy výstupní veličiny ku vstupní s jejím fázovým posunem v závislosti na frekvenci
<i>Amplitudová charakteristika</i>	závislost poměru amplitud výstupní a vstupní veličiny na frekvenci
<i>Fázová charakteristika</i>	závislost fázového posunu vstupní a výstupní veličiny
<i>Přechodová charakteristika</i>	vyjadřuje časový průběh výstupní veličiny při skokové změně
<i>Crest Factor</i>	poměr špičkových hodnot napětí nebo proudu vůči hodnotě efektivní

2.2 Harmonický průběh

Harmonický průběh se opakuje v pravidelných časových intervalech (periodách). Jeden kmit je délka jedné periody a označuje se písmenem T .



Obr. 2.2.1. Střídavý proud sinusového průběhu [1]

Pro periodický proud platí: [1]

$$i(t) = i(t + T) = i(t + kT) \quad (2.2.1)$$

Kde je:

$i(t)$	okamžitá hodnota,
k	celé číslo vyjadřující násobek periody,
t	čas,
T	délka periody.

Pro okamžitou hodnotu sinusového proudu platí vztah [1] 2.2.2. Veličina ω se nazývá úhlová rychlost, platí pro ni vztah [1] 2.2.3. Obecně ale harmonický průběh nemusí začínat z nulové hodnoty, je to dáno volbou počátku časové osy, která může být zcela libovolná. Průběh má potom počáteční fázový úhel ψ , který může být jak kladný, tak i záporný. Zjednodušeně řečeno, harmonický průběh je jakákoli posunutá sinusovka, a sinusové průběhy jsou podmnožinou harmonických průběhů (začínají z nuly). Pro harmonický proud s počátečním fázovým úhlem ψ platí vztah [1] 2.2.4 a jeho průběh je zobrazen na obr. 2.2.2 [1]

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t) \quad (2.2.2)$$

Kde je:

$i(t)$	okamžitá hodnota,
I_m	maximální hodnota,
ω	úhlová rychlost.

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2.3)$$

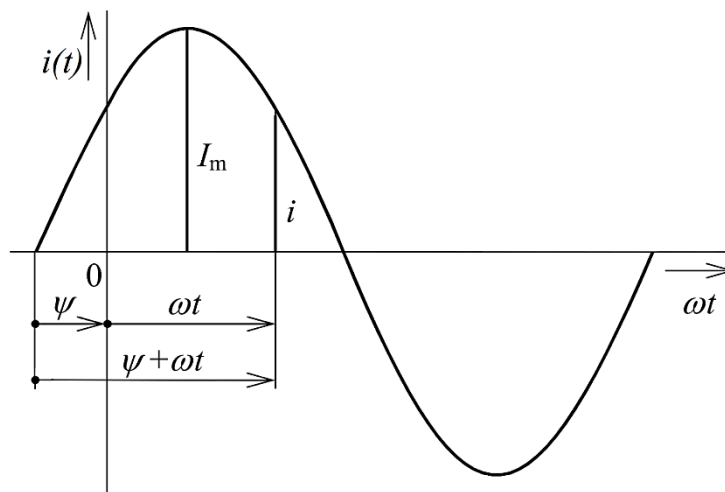
Kde je:

ω úhlová rychlost,
 f frekvence,
 T délka periody.

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad (2.2.4)$$

Kde je:

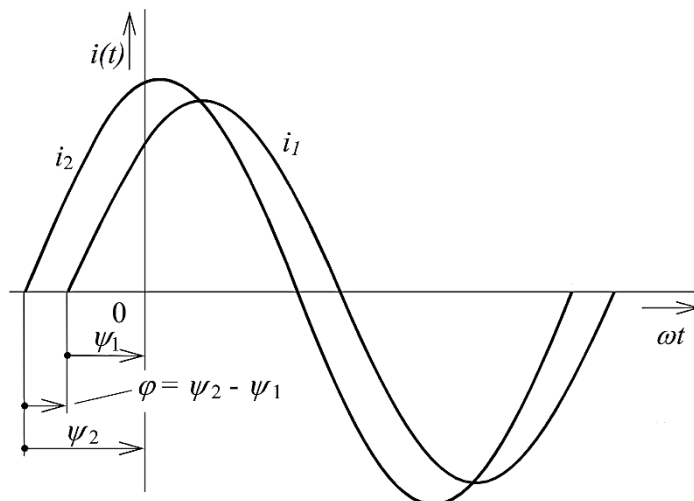
$i(t)$ okamžitá hodnota,
 I_m maximální hodnota,
 ω úhlová rychlost,
 ψ počáteční fáze.



Obr. 2.2.2. Harmonický proud s počáteční fází ψ [1]

Dva harmonické průběhy téhož kmitočtu mohou být vůči sobě vzájemně posunuty o úhel $\Delta\varphi$, kterému říkáme *fázový posuv*. Přitom může jít o různé veličiny, například o proud a napětí. [1]

Pokud se druhý průběh před prvním předbílá, je úhel φ kladný, pokud se zpožďuje, je záporný. [1] Zvláštní situace nastává, pokud mají dva proudy nulový fázový posuv, tady říkáme, že jsou ve fázi. V případě, že posuv fází bude π , jsou v protifázi.

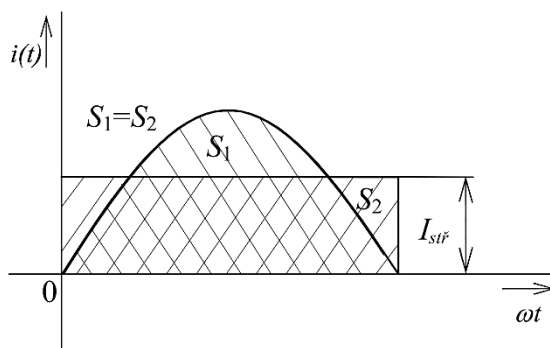


Obr. 2.2.3. Dva harmonické proudy posunuté o úhel φ [1]

Střední hodnota odpovídá velikosti stejnosměrného proudu, který přenese za jednotku času stejný náboj, jako daný střídavý proud. Je to výška obdélníku o stejné ploše, jako je plocha mezi průběhem proudu a nulovou osou, [1] jak je vidět na obrázku 2.2.4.

Pro harmonický průběh počítáme střední hodnotu pouze z jedné půlperrody, protože jsou obě stejné, ale s opačným znaménkem, jinak by nám vyšla nulová hodnota.

V případě průběhů, kde není za celou periodu střední hodnota nulová, počítáme stejnosměrnou složku signálu.



Obr. 2.2.4. Střední hodnota střídavého proudu [1]

Pro výpočet střední hodnoty harmonického proudu platí:

$$I_{stř} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} i(t) dt = \frac{2}{\pi} \cdot I_m \quad (2.2.5)$$

Kde je:

$I_{stř}$	střední hodnota,
T	délka jedné periody,
$i(t)$	okamžitá hodnota,
I_m	maximální hodnota.

Efektivní hodnota střídavého proudu charakterizuje výkon proudu. Značí se velkým písmenem bez indexu. [1] Je to velikost stejnosměrného proudu, který při průchodu rezistorem vykoná stejnou práci, jako střídavý proud za daný čas.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 dt} \quad (2.2.6)$$

Kde je:

T délka periody,
 $i(t)$ okamžitá hodnota.

Jestliže za i dosadíme rovnici harmonického proudu, vyjde nám jako výsledek vztah: [1]

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.2.7)$$

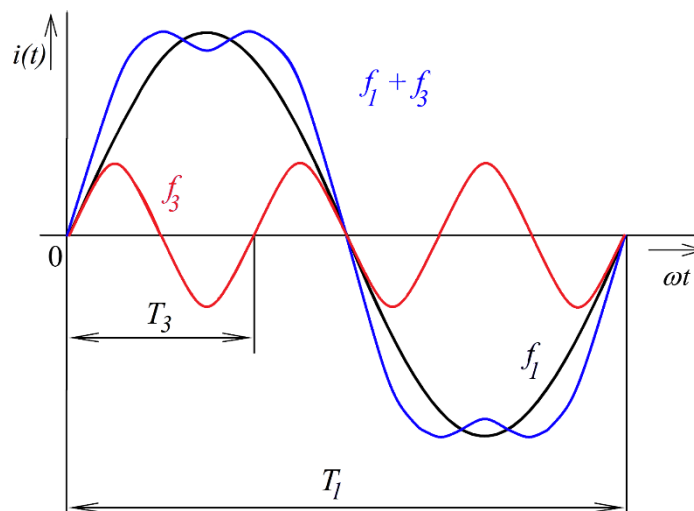
Kde je:

I_m maximální hodnota.

2.3 Neharmonický průběh

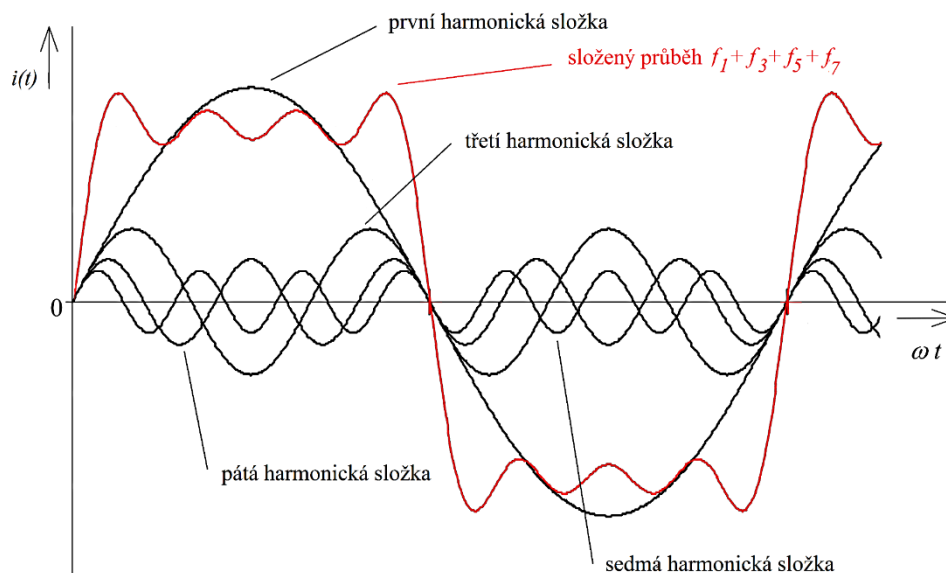
V praxi se kromě harmonických průběhů objevují také průběhy neharmonické. To převážně díky polovodičovým prvkům, které s rozvojem výkonové elektroniky nacházejí uplatnění stále častěji. [1]

Každý periodický průběh s úhlovou rychlostí ω můžeme rozložit na dílčí harmonické složky, těm říkáme vyšší harmonické složky. Jejich úhlové rychlosti jsou násobkem základní úhlové rychlosti ω . Napětí a proud je poté součtem těchto harmonických složek. Z toho plyne, že každý periodický neharmonický průběh můžeme vyjádřit jeho frekvenčním spektrem. [1]



Obr. 2.3.1 Příklad skládání průběhu při použití dvou harmonických složek [1]

Na obrázku 2.3.1 můžeme vidět, jaký průběh vznikne sečtením dvou harmonických složek. Pokud ale sečteme více harmonických, jak je vidět na obrázku 2.3.2, vznikne mnohem přesnější průběh. Dedukcí lze usoudit, že skládáním nekonečného počtu harmonických složek lze dosáhnout přesného obdélníkového průběhu. V praxi však skládáme pouze omezený počet harmonických složek.



Obr. 2.3.2 Příklad skládání průběhu s více harmonickými [2]

Uvedené harmonické (i meziharmonické) a další kmity v síti, kromě toho, že zatěžují například nulový vodič zvýšeným proudem (projevuje se tak nejen třetí harmonická, ale i násobky třetí harmonické), zatěžují i fázové vodiče a k tomu navíc ještě způsobují známé rušení v síti zapojených spotřebičů. [2]

Celkové harmonické zkreslení (zkratka *THD* – z anglického *Total Harmonic Distortion*) je poměr efektivní hodnoty součtu všech harmonických složek (Q_n) do stanoveného řádu (h) a efektivní hodnoty základní složky (Q_1) [2]

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^h \left(\frac{Q_n}{Q_1}\right)^2} \quad (2.3.1)$$

Kde je:

- h řád harmonické,
- Q_n součet všech harmonických složek,
- Q_1 efektivní hodnota základní složky.

Označení Q reprezentuje efektivní hodnotu harmonické složky – podle potřeby se nahrazuje značkou I pro proud nebo U pro napětí. [2]

Kromě celkového harmonického zkruslení charakterizují periodický průběh také poměrné veličiny.

Činitel výkyvu je poměr mezi maximální a efektivní hodnotou

$$k_v = \frac{I_m}{I} \quad (2.3.2)$$

Kde je:

I_m maximální hodnota,
 I efektivní hodnota.

Činitel tvaru je poměr mezi efektivní a střední hodnotou

$$k_t = \frac{I}{I_{stř}} \quad (2.3.3)$$

Kde je:

$I_{stř}$ střední hodnota,
 I efektivní hodnota.

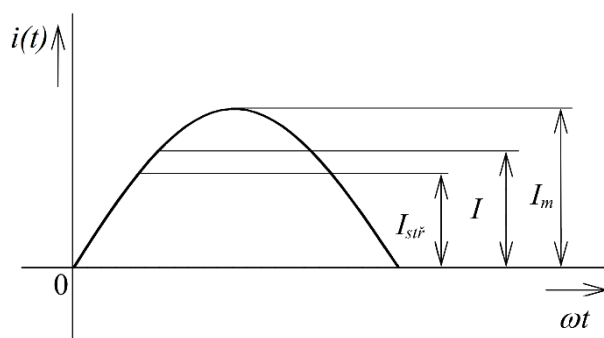
Činitel plnění je poměr mezi střední a maximální hodnotou

$$k_p = \frac{I_{stř}}{I_m} \quad (2.3.4)$$

Kde je:

$I_{stř}$ střední hodnota,
 I_m maximální hodnota.

Pro představu jsou níže uvedeny hodnoty proudů $I_{stř}$, I a I_{max} na sinusovém průběhu



Obr. 2.3.3 Hodnoty proudu [2]

Kde je:

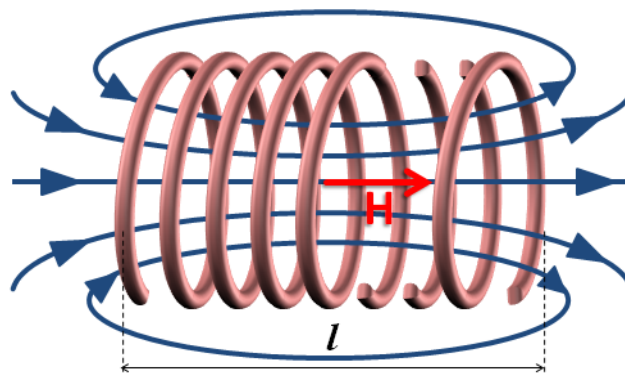
$I_{stř}$ střední hodnota,
 I_m maximální hodnota,
 I efektivní hodnota.

3. Cívky

3.1 Měřicí cívka proudu

Měřicí cívka proudu je součástka, u které je tvořeno magnetické pole v jejím okolí součtem magnetických polí jednotlivých závitů. Díky tomu je možné měřit i velmi malé vstupní proudy.

Magnetické siločáry prochází vnitřkem cívky a uzavírají se ve volném prostoru kolem ní. Pro přibližný výpočet intenzity magnetického pole uvnitř cívky, která má N závitů, stačí uvažovat délku části siločáry v *délce cívky* l , přičemž výsledné pole je dáno součtem polí tvořených jednotlivými závity. [3]



Obr. 3.1.1 Měřicí cívka proudu [3]

Z popsaných vlastností lze odvodit zjednodušený vztah pro výpočet přibližné intenzity magnetického pole:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (3.1.1)$$

Kde je:

N	počet závitů cívky,
I	proud protékající cívkou,
l	délka cívky.

V případě stejnosměrného magnetického pole se magnetický tok $\Delta\Phi$ nemění. Změnu lze dosáhnout otočením cívky umístěné v magnetickém poli o 180° , nebo pohybem uvnitř pole.

Velikost indukovaného napětí určuje Faradayův zákon elektromagnetické indukce:

↓

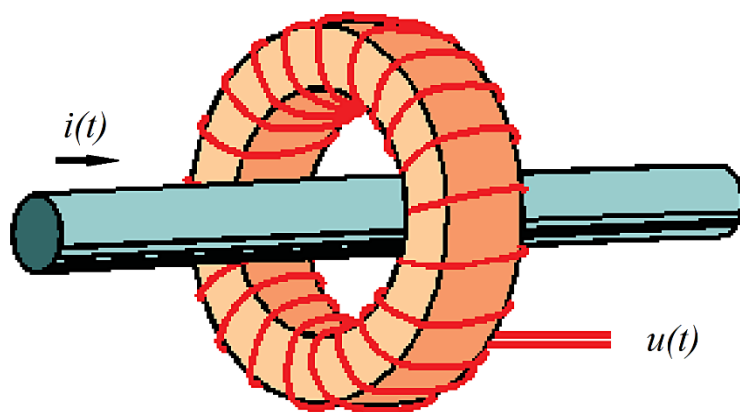
Změní-li se magnetický indukční tok ve vodiči za dobu Δt o $\Delta\Phi$, vzniká ve vodiči indukované napětí U_i , jehož střední hodnota je [4]

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3.1.2)$$

3.2 Rogowskiho cívka

Rogowskiho – Chattockův Potenciometr (RCP) se používá jako senzor magnetického napětí. Při měření střídavých proudů vyniká velkým rozsahem od jednotek mA až do stovek kA o frekvencích desetin Hz až do jednotek MHz. [5]

Cívka je navinuta na nemagnetickém nevodivém toroidním, popřípadě pružném jádru, které obepíná vodič. Střídavé magnetické pole indukuje na cívce napětí úměrné procházejícímu proudu vodičem. [5]



Obr. 3.2.1 Rogowskiho cívka navinutá na toroidním jádře, uprostřed měřený vodič [5]

Výstup cívky je dán vztahem:

$$u(t) = M \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3.2.1)$$

Kde je:

M vzájemná indukčnost mezi vinutím a zpětným vinutím,
 $di(t)/dt$ změna proudu v čase.

Jedna z nejdůležitějších vlastností Rogowskiho cívky je lineární závislost výstupu na vstupu. Díky použitému jádru se u cívky neprojevuje hystereze a ani saturace. Díky linearitě se cívka dá velmi snadno kalibrovat. Cívka má také velmi dobré dynamické vlastnosti a výbornou přechodovou odezvu. [5]

U Rogowskiho cívky je velmi důležité zajistit rovnoměrné navinutí závitů na jádro. Kdybychom uvažovali dokonale rovnoměrné navinutí, tak by podle Ampérova zákona nezáleželo na pozici vodiče, který cívka obepíná. Zároveň ani nezáleží na tvaru cívky, čehož se využívá u cívek s pružným jádrem. [5]

Nevýhodou je závislost přesnosti měření na poloze cívky. Pro ideální cívku bez vzduchové mezery je poloha cívky vůči vodiči nevýznamná. U reálných cívek ale existuje vzduchová mezera, kterou uniká nezměřitelné magnetické pole. Tuto chybu lze vyloučit opakovaným měření při různých polohách cívky a měřeného vodiče a následným stanovením střední hodnoty. [6]

Rogowskiho cívka názorně ukazuje použití Ampérova zákona. Snímá magnetické pole kolem vodiče a Ampérův zákon tvoří vztah mezi tokem proudu a magnetickým polem kolem vodiče.

Ampérův zákon můžeme formulovat tak, že cirkulace vektoru \vec{H} je rovna celkovému proudu, který protíná integrační dráhu. [5]

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_k I_k \quad (3.2.2)$$

Intenzitu magnetického toku vyjádříme jako $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$, takže úpravou vztahu 3.2.2 vznikne:

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = i \quad (3.2.3)$$

Zároveň bude podle obrázku 3.2.2 platit:

$$\oint \vec{H} \cdot \cos\alpha \cdot d\vec{l} = i \quad (3.2.4)$$

Kde je:

$d\vec{l}$ úsek cívky tak krátký, že můžeme zanedbat jeho křivost.

Úsek délky dl má tedy $N dl$ závitů a jeho cívkový tok bude:

$$d\Phi = \mu_0 \cdot H \cdot A \cdot N \cdot \cos\alpha \cdot dl \quad (3.2.5)$$

Kde je:

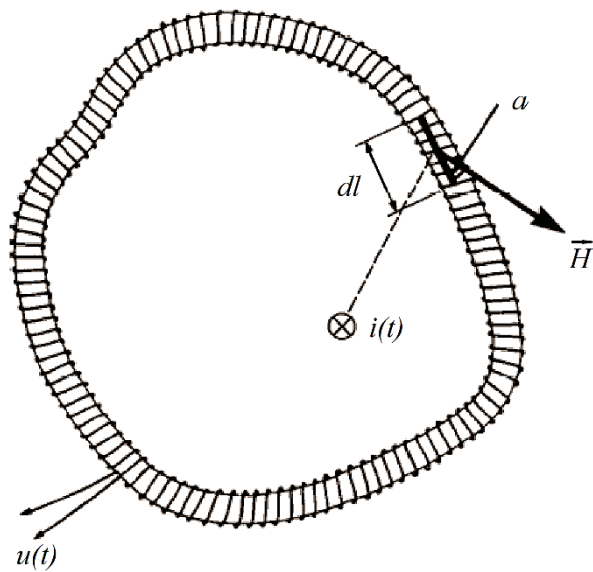
μ_0 permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$),
 H intenzita magnetického pole,
 A průřez cívky (průřez jednoho závitu),
 N počet závitů cívky.

Pro střídavý proud, napětí na výstupu bude dáno změnou magnetického toku v čase. Tedy: [5]

$$u(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{-\mu_0 \cdot N \cdot A}{l} \frac{di(t)}{dt} \quad (3.2.6)$$

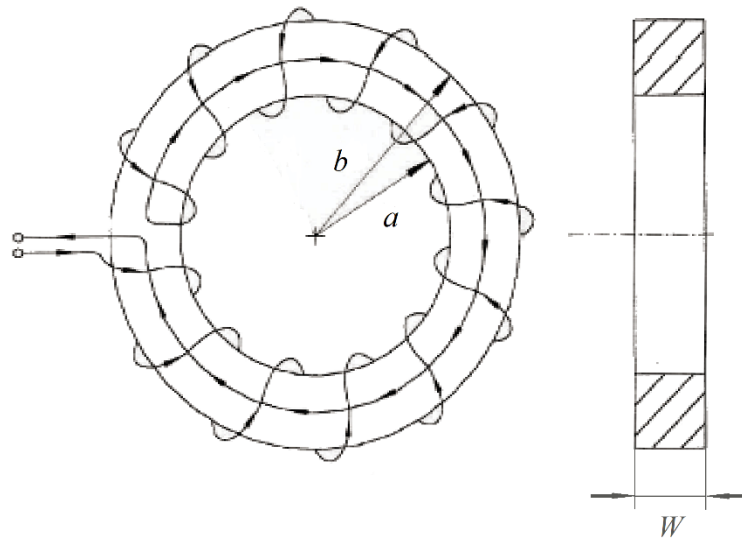
Kde je:

$d\Phi$ cívkový tok,
 μ_0 permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$),
 l délka cívky,
 $di(t)$ okamžitý proud v čase t .



Obr. 3.2.2 Znáznornění vektoru H [5]

Pro cívku jsou důležité její rozměry, ze kterých můžeme určit vzájemnou indukčnost M [5]



Obr. 3.2.3 Znáznornění rozměrů Rogowskiho cívky [5]

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} N \cdot W \cdot \ln \frac{b}{a} \quad (3.2.7)$$

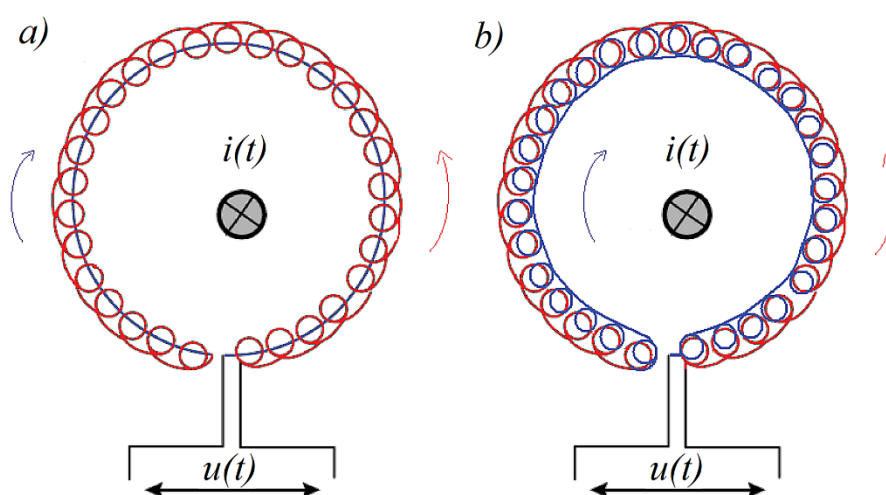
Kde je:

- | | |
|---------|--|
| μ_0 | permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$), |
| N | počet závitů cívky, |
| W | tloušťka jádra, |
| b | vnější poloměr jádra, |
| a | vnitřní poloměr jádra. |

Rogowskiho cívka může být navinuta dvěma způsoby. Prvním způsobem je navinutí závitů v jednom směru po celé délce obvodu cívky a středem vinutí je pak vedena zpětná smyčka, jak je vidět na obrázku 3.2.4a. Zpětná smyčka slouží ke kompenzaci závitů pro kolmé magnetické pole, tímto způsobem může být dosaženo snížení okolního rušení.

Druhý možný způsob navinutí cívky je navíjení na obvod jádra v jednom směru a pak ve stejném směru zpět, jak je znázorněno na obrázku [5] 3.2.4b. Cívka se tedy navíjí tak, aby nevznikal závit pro na ni kolmé magnetické pole. [5]

Pro správné fungování Rogowskiho cívky nejsou zpětné závity nutné, může se tím však potlačit vliv elektromagnetického rušení, a tím zvýšit přesnost.



Obr. 3.2.4 Ukázka vinutí RCP [5]

4. Měřicí přístroje a jejich vlastnosti

4.1 Napájecí zdroj – Agilent (HP) 6834B

Agilent 6834B dříve Hewlett Packard 6834B je třífázový spínaný napájecí zdroj určený ke generování různých druhů harmonických i neharmonických průběhů. Přístroj umí generovat až 50. harmonickou složku, a díky tomu lze například k sinusovému průběhu přidat například 3. harmonickou složku a tím průběh zdeformovat.

Zdroj je možné ovládat buď prostřednictvím ovládacího panelu přímo na přístroji nebo pomocí počítače přes sběrnici GPIB a RS-232. U všech druhů průběhů lze samostatně nastavovat frekvenci, napětí a proudové omezení.

Specifikace přístroje:

Tab. 4.1.1 Specifikace přístroje Agilent 6834B [7]

Fáze	3	1
Maximální výstupní rozsahy:		
Napětí rms	150 V nízký rozsah 300 V vysoký rozsah	
Proud rms	10 A nízký rozsah 5 A vysoký rozsah	30 A nízký rozsah 15 A vysoký rozsah
Špičkový proud	40 A nízký rozsah 20 A vysoký rozsah	120 A nízký rozsah 60 A vysoký rozsah
Crest Factor	4	
Rozsah výstupní frekvence	45 Hz – 5 kHz	
Odstup s/š	-60 dB (20 kHz – 20 MHz)	
Regulace zátěže	0,5 %	
Regulační linka	0,1 %	
Maximální harmonické zkreslení	1 % (45 Hz – 1 kHz) 1 % + 1 % kHz (>1 kHz – 5 kHz)	
Programová přesnost: (25 °C ± 5 °C)		
Napětí rms	0,15 % + 0,3 V (45 – 100 Hz) 0,5 % + 0,3 V (>100 – 500 Hz) 1 % + 0,3 V (>500 Hz – 5 kHz)	
Frekvence	0,01 % + 10 ∞ Hz	
Fáze (třífázový mód)	0,1° (45 – 100 Hz) 1° (>100 – 1 kHz) 1° + 1 % kHz (>1 kHz – 5 kHz)	N/A
Přesnost měření: (25 °C ± 5 °C)		
Napětí rms	0,05 % + 250 mV (45 Hz – 1 kHz) 0,05 % + 0,1 % kHz + 250 mV (>1 kHz – 5 kHz)	
Proud rms	0,1 % + 25 mA	0,1 % + 50 mA
Frekvence	0,01 % + 0,01 Hz	0,01 % + 0,01 Hz
Výkon (VA)	0,15 % + 3 VA	0,15 % + 5 VA
Výkon (W)	0,15 % + 3 W	0,15 % + 5 W

4.2 Wattmetr – Yokogawa WT210

Yokogawa WT210 je stolní digitální měřicí přístroj určený pro měření výkonu různých druhů stejnosměrných i střídavých harmonických i neharmonických průběhů. Měří napětí, proud, výkon i účinník, a je možné ho použít i jako samostatný ampérmetr nebo voltmetr.

K počítači ho lze také připojit přes komunikační rozhraní RS-232 nebo GPIB. Hlavní výhodou tohoto přístroje je, že má *Crest Factor* hodnoty 6. Díky tomu lze změřit i velké špičky v měřeném signálu.

Specifikace vstupů:

Tab. 4.2.1 Specifikace vstupů přístroje Yokogawa WT210 [8]

Měřicí rozsahy						
Napětí (V)	15, 30, 60, 150, 300, 600					
Proud (mA) – crest factor 3	5, 10, 20, 50, 100, 200					
Proud (A) – crest factor 3	0.5, 1, 2, 5, 10, 20					
Proud (mA) – crest factor 6	2.5, 5, 10, 25, 50, 100					
Proud (A) – crest factor 6	0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, 10					
Impedance vstupů						
Napětí	2 M Ω ; 13 pF					
Proud – crest factor 3	max. 16 m Ω ; 0,1 μ H					
Proud – crest factor 6	500 m Ω ; 0,1 μ H					
Přesnost měření						
DC	$\pm 0,2$ % čtení + 0,2 % rozsah					
0,5 Hz \leq f < 45 Hz	$\pm 0,1$ % čtení + 0,2 % rozsah					
45 Hz \leq f < 66 Hz	$\pm 0,1$ % čtení + 0,1 % rozsah					
66 Hz \leq f < 1 kHz	$\pm 0,1$ % čtení + 0,2 % rozsah					
1 kHz \leq f < 10 kHz	$\pm(0,07 \times f)$ % čtení + 0,3 % rozsah					
10 kHz \leq f < 100 kHz	$\pm 0,5$ % čtení + 0,5 % rozsah					
Efektivní vstup	od 1 do 130 % vztažených hodnot k napětí ne proudu (výjimečně vzniká chyba při čtení x 0,5 pro rozmezí 110 % až 130 % měřené veličiny)					
Spodní limit měření frekvence						
Aktualizace displeje	0,1 s	0,25 s	0,5 s	1 s	2 s	5 s
Hranice měření	25 Hz	10 Hz	5 Hz	2,5 Hz	1,5 Hz	0,5 Hz
Účinek síťového filtru	v rozmezí 45 až 66 Hz – 0,2 % z hodnoty méně než 45 Hz – 0,5 % z hodnoty					

4.3 Analyzátor – Dewetron DEWE-571-PNA-1MS

Přístroj DEWE-571 je přenosný analyzátor sítě a kvality energie. Ovládání přístroje je realizováno na dotykové obrazovce v operačním systému Windows se software *DeweSoft*.

S tímto přístrojem lze měřit napětí, proud, frekvenci, různé harmonické složky. V přístroji je možné si vytvořit vlastní uživatelské rozhraní a díky tomu lze zobrazovat potřebné hodnoty a výpočty související s měřením.

Jako měřicí karta je použita karta *ORION-0816-1000* – parametry lze nalézt v příloze.

Specifikace měřicího přístroje:

Tab. 4.3.1 Specifikace přístroje Dewe-57 [9]

Měřicí vstupy	
Napěťové vstupy	4x 200 V – 1400 V
Proudové vstupy	0,3 V – 10 V proudové kleště; 0,7 mV – 0,7 V pro AmpFLEX; 4x 1 A – 10 A proudový vstup
Typické zkreslení	± 0,02 % při čtení
A/D převodník	
Metoda vzorkování	simultánní
Rychlost vzorkování	1 MS/s na kanál
Rozlišení	16 bit
Digitální vstupy a výstupy	
Digitální vstupy a výstupy	2x digitální vstup; 2x konzolový výstup
Ostatní vstupy	CAN, video, pohybový senzor,...
Senzory	AmpFLEX, kleště, kabel na měření proudu
O přístroji	
Výrobní číslo přístroje	40090029
HDD	32 GB Flash HDD
Rychlost čtení/zápis	90 MB/s
Napájení	Externí napájecí zdroj 100 – 240VAC
LCD	10“ TFT, více dotykový, (1024 x 768)
CPU	Intel® Core2Duo™ 2 GHz
RAM	2 GB
Rozhraní	Ethernet, USB, RS-232
Operační systém	Microsoft® Windows® XP
Váha	5kg

4.4 Pružný převodník proudu – AmpFLEX A195 / PNA-FLEX-300-45

AmpFLEX je převodník proudu pracující na principu Rogowskiho cívky. Umístí se do magnetického pole vodiče, kterým prochází proud. Vlivem magnetického pole se začne na výstupu AmpFLEXu indukovat napětí.

Specifikace měřicího přístroje:

Tab. 4.4.1 AmpFLEX A195

Vstupní proud	0,5 – 3 kA
Přesnost měření	$\leq 1 \%$
Frekvenční rozsah	10 Hz – 20 kHz
Posun fáze	$\leq 0,7^\circ$
Výstup	1 mV/A

5. Průběhy

V této kapitole budou názorně popsány některé průběhy, které budou použity při měření. Všechny průběhy vycházejí z normy ČSN EN 50160 o Charakteristikách napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí.

Základem všech průběhů jsou různé poměry složek až do řádu 40 harmonické, které se vyskytují nejčastěji. Zároveň je kladen důraz na to, aby průběhy splňovaly hodnotu celkového harmonického zkreslení *THD*, které dle normy nesmí překročit 8 %. Procentuální úrovně jednotlivých harmonických napětí lze nalézt v tabulce 5.1.

Tyto průběhy mají simulovat napětí v napájecí síti, kde se málokdy vyskytuje jen čistý sinusový průběh. Většinou se při reálném měření v síti setkáme s různě deformovanými průběhy, a to převážně díky přístrojům, které jsou do napájecí sítě zapojeny.

Tab. 5.1 Úrovně jednotlivých harmonických v procentech pro řády harmonických až do 25 [10]

Liché harmonické				Sudé harmonické	
NE násobky 3		Násobky 3			
Řád harmonické h	Harmonické napětí U_h	Řád harmonické h	Harmonické napětí U_h	Řád harmonické h	Harmonické napětí U_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

POZNÁMKA Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné.

Nejčastěji se v praxi setkáme s 3., 5., 7., a 9. harmonickou, tedy hlavně s lichými harmonickými, sudé se objevují jen zřídka. Liché také nejvíce ovlivňují výsledný tvar sinusového průběhu.

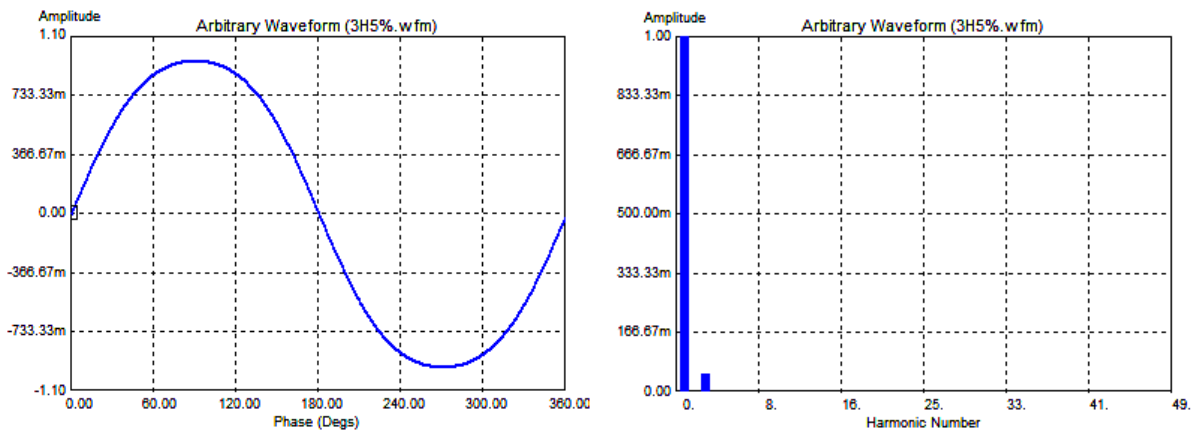
V této práci bude změřeno celkem 10 různých průběhů, z nichž 8 splňuje kritéria daná normou ČSN EN 50160 a dva nikoli. I když tyto průběhy nejspíš v napájecí síti nikdy neměříme, můžeme se s nimi setkat například při měření spínaných zdrojů.

Níže vyobrazené průběhy jsou vytvořeny v programu *AC SOURCE GUI* ve verzi A.01.08, který je součástí spínaného napájecího zdroje Agilent. Pomocí tohoto software lze přístroj i ovládat.

Zbylé průběhy, které nejsou níže uvedeny, ale v práci byly použity, lze nalézt v příloze.

5.1 Sinusový průběh s 3. harmonickou 5 %

Na druhém průběhu je názorně zobrazena deformace sinusového průběhu třetí harmonickou i s jeho spektrem, která dosahuje maximální povolené hodnoty 5 % dle normy ČSN EN 50160. Jak je vidět, průběh má více zakulacené vrcholy, avšak toto zkreslení není tak výrazné, aby ovlivnilo funkčnost přístrojů zapojených do sítě.

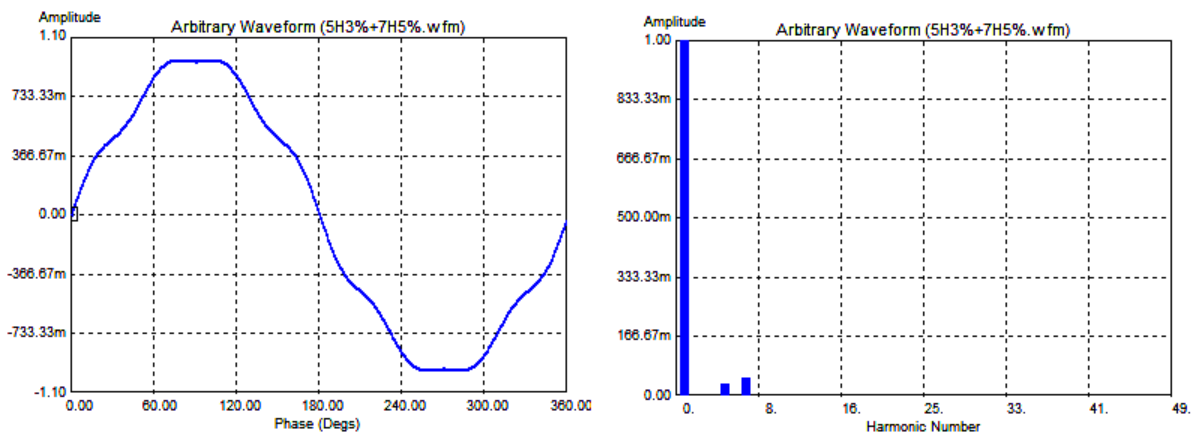


Obr. 5.1.1 Deformovaný sinus 3. harmonická 5 %

5.2 Sinusový průběh s 5. a 7. harmonickou

Na ukázce tohoto průběhu jsou také dvě harmonické složky, které významněji ovlivňují tvar. Jsou to složky páté a sedmé harmonické v poměru 3 % a 5 %. Součtem procentuálních podílů dostaneme přesně hodnotu 8 % THD, což je maximální povolená hodnota celkového harmonického zkreslení.

Ani takovýto průběh by neměl výrazněji ovlivňovat funkčnost přístrojů, které jsou takovým napětím napájeny.



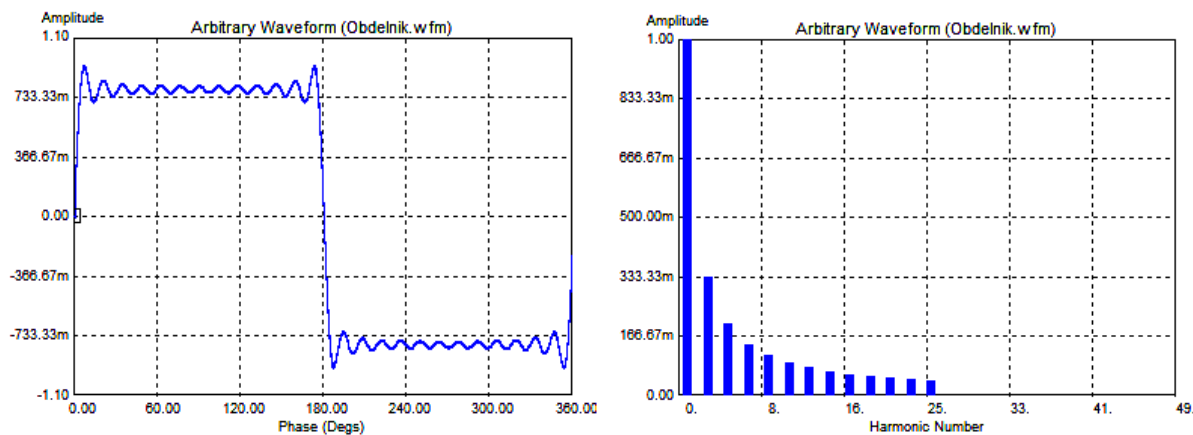
Obr. 5.2.1 Deformovaný sinus 5. harmonická a 7. harmonická

5.3 Obdélník

Tento průběh, ač nespĺňuje podmínky *THD*, je spíše ukázkou, jak lze pomocí skládání několika lichých harmonických dosáhnout kupříkladu obdélníkového průběhu napětí, a zda jsme schopni i takto extrémně deformovaný průběh, který má celkové harmonické zkreslení 126,4 %, změřit s dostatečnou přesností.

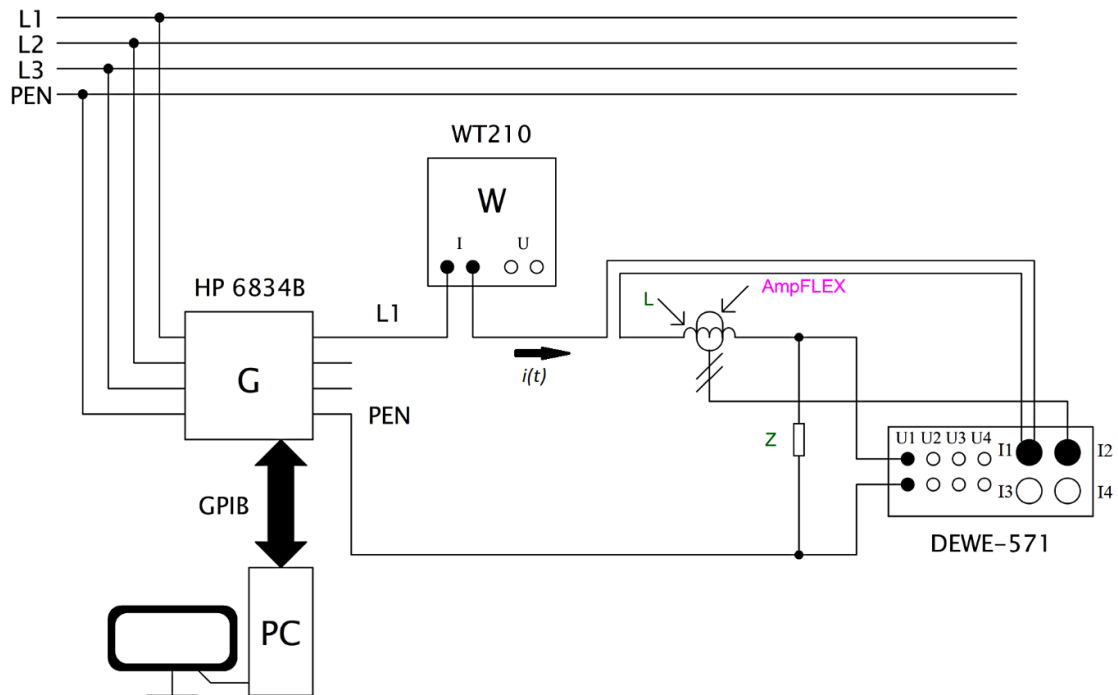
Základní frekvence takového průběhu, tedy 1. harmonické, je 100 % napětí. Třetí harmonická má pak už jen 1/3, pátá harmonická 1/5 atd., až poslední čtyřicátá harmonická 1/40.

V tomto případě postačí k měření jen 25. harmonická. Jak uvádí norma *ČSN EN 50160* „harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné“. [10]



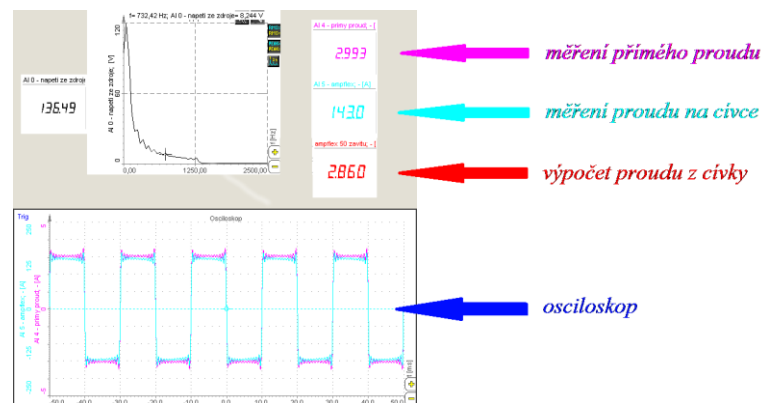
Obr. 5.3.1 Obdélník

6. Postup měření



Obr. 6.1. Schéma zapojení

Hlavní součástí celého zapojení je spínaný napájecí zdroj Agilent, který bude sloužit jako generátor různých harmonických i neharmonických průběhů. Jako referenční přístroj pro nastavování přesného proudu v obvodu posloužil wattmetr Yokogawa, který byl v tomto případě zapojen pouze jako ampérmetr. Vygenerovaný průběh s přesně nastaveným proudem je přiveden na svorku I1 přístroje DEWE-571. Na této svorce je změřen přímý proud protékající obvodem. Dále je v sérii zapojena vzduchová měřicí cívka, na které se díky procházejícímu napětí vytvoří elektromagnetické pole. Toto pole je snímáno převodníkem proudu (*AmpFLEX*) a opět připojeno do přístroje DEWE-571 na proudovou svorku I2, zde jako nepřímá metoda měření. Jako osciloskop pro kontrolu zapojení a funkčnosti obvodu posloužil také přístroj DEWE-571.



Obr. 6.2. Pracovní prostředí DEWE-571

7. Naměřené hodnoty

V této kapitole jsou názorně vyobrazeny grafy a tabulky, které porovnávají přesnosti měření různě deformovaných harmonických a neharmonických průběhů, při použití přímé metody měření a měřením v případě použití vzduchové měřicí cívky.

U všech průběhů byla zvolena jako základní frekvence, frekvence napájecí sítě, tedy 50 Hz. Pro výpočet chyby měření byl použit následující vzorec:

$$\delta = \frac{I_{pz} - I_{cp}}{I_{pz}} \cdot 100 (\%) \quad (7.1.1)$$

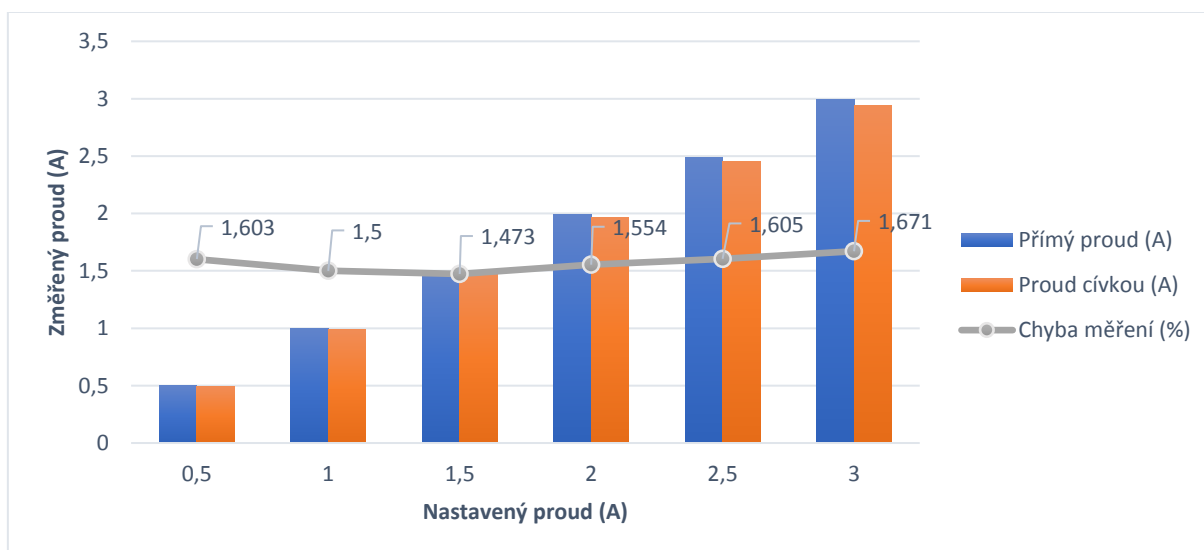
Kde je:

I_{pz} přímý proud změřený,
 I_{cp} proud cívkou ÷ 50.

7.1 Průběh č. 1 – Sinusový

Tab. 7.1 Tabulka naměřených hodnot – sinusový průběh

Yokogawa WT210	Dewetron DEWE-571	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívce s 50 závity		Chyba měření δ (%)
Nastavený proud (A)	Přímý proud změřený (A)	Proud cívkou (A)	Proud cívkou ÷ 50 (A)	
0,5	0,499	24,58	0,491	1,603
1	1,000	49,25	0,985	1,500
1,5	1,496	73,79	1,475	1,473
2	1,993	98,22	1,964	1,554
2,5	2,492	122,40	2,449	1,605
3	2,991	147,05	2,941	1,671

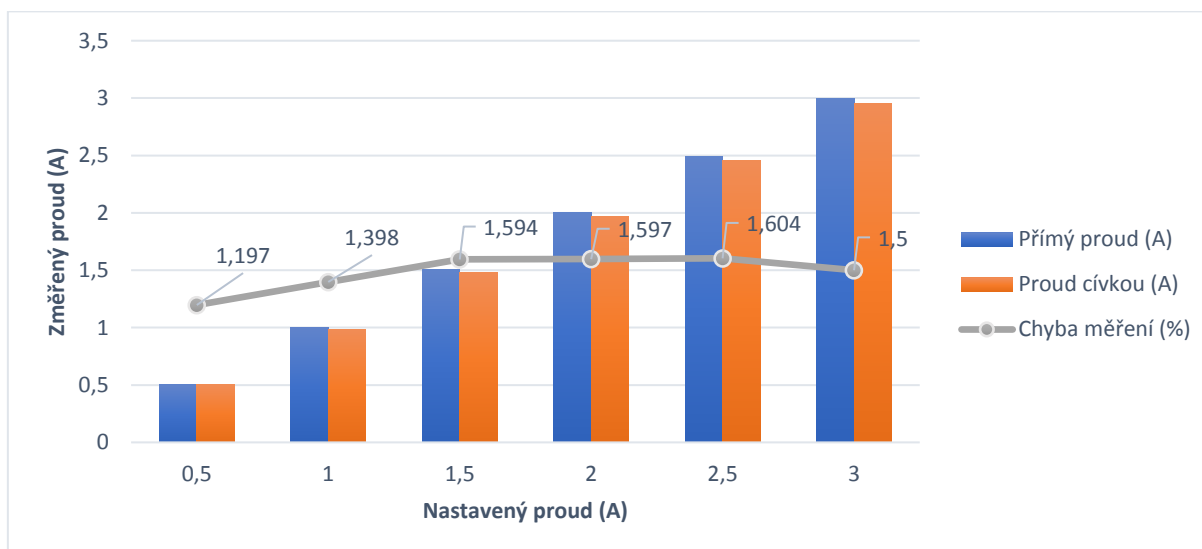


Graf. 7.1 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – sinus

7.2 Průběh č. 2 – Sinusový s 3. harmonickou 5 %

Tab. 7.2 Tabulka naměřených hodnot – 3. harmonická 5 %

Yokogawa WT210	Dewetron DEWE-571	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívce s 50 závitů		Chyba měření δ (%)
		Nastavený proud (A)	Přímý proud změřený (A)	
0,5	0,501	25,35	0,507	1,197
1	1,001	49,33	0,987	1,398
1,5	1,505	74,05	1,481	1,594
2	2,003	98,57	1,971	1,597
2,5	2,493	122,60	2,453	1,604
3	2,999	147,73	2,954	1,500

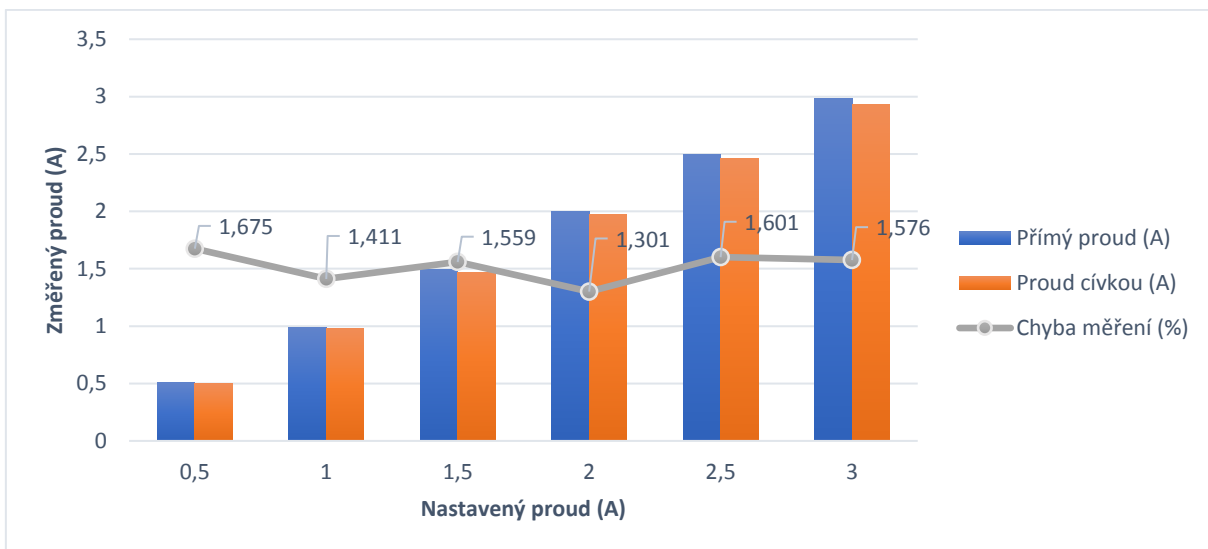


Graf. 7.2 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 3. harmonická

7.3 Průběh č. 3 – Sinusový s 5. harmonickou 6 %

Tab. 7.3 Tabulka naměřených hodnot – 5. harmonická 6 %

Yokogawa WT210	Dewetron DEWE-571	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívce s 50 závitů		Chyba měření δ (%)
		Nastavený proud (A)	Přímý proud změřený (A)	
0,5	0,507	24,91	0,499	1,675
1	0,992	48,89	0,978	1,411
1,5	1,495	73,55	1,471	1,559
2	1,997	98,73	1,975	1,301
2,5	2,498	122,97	2,458	1,601
3	2,986	146,46	2,928	1,576

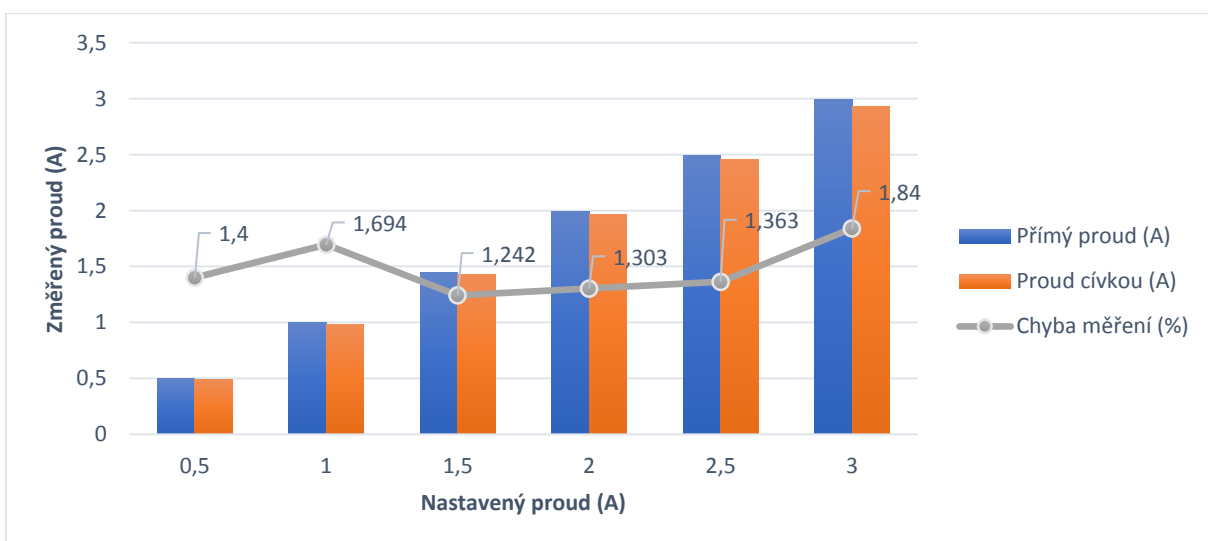


Graf. 7.3 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 5 harmonická

7.4 Průběh č. 4 – Sinusový s 7. harmonickou 5 %

Tab. 7.4 Tabulka naměřených hodnot – 7. harmonická 5 %

Yokogawa WT210	Dewetron DEWE-571	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívce s 50 závitů		Chyba měření δ (%)
		Nastavený proud (A)	Přímý proud změřený (A)	
0,5	0,500	24,61	0,493	1,400
1	1,003	49,38	0,986	1,694
1,5	1,449	71,58	1,431	1,242
2	1,995	98,41	1,969	1,303
2,5	2,493	122,93	2,459	1,363
3	2,988	146,65	2,933	1,840

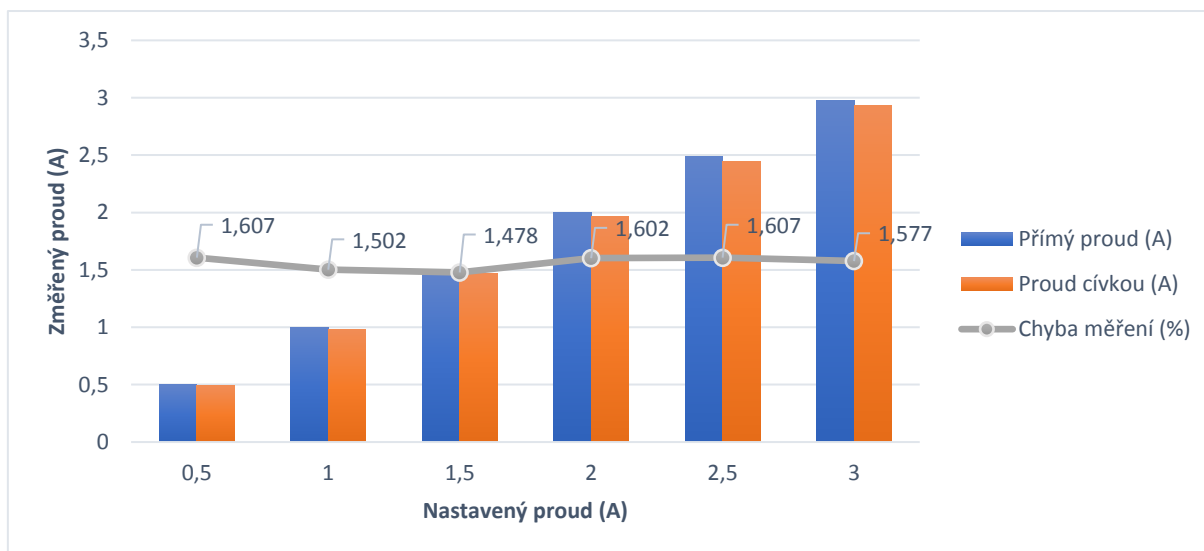


Graf. 7.4 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 7 harmonická

7.5 Průběh č. 5 – Sinusový s 5. a 9. harmonickou 7 % a 1 %

Tab. 7.5 Tabulka naměřených hodnot – 5. a 9. harmonická 7 % a 1 %

Yokogawa WT210	Dewetron DEWE-571	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívkce s 50 závitů		Chyba měření δ (%)
		Nastavený proud (A)	Přímý proud změřený (A)	
0,5	0,498	24,46	0,489	1,607
1	0,998	49,12	0,983	1,502
1,5	1,488	73,34	1,466	1,478
2	1,997	98,24	1,965	1,602
2,5	2,489	122,22	2,444	1,607
3	2,979	146,60	2,932	1,577

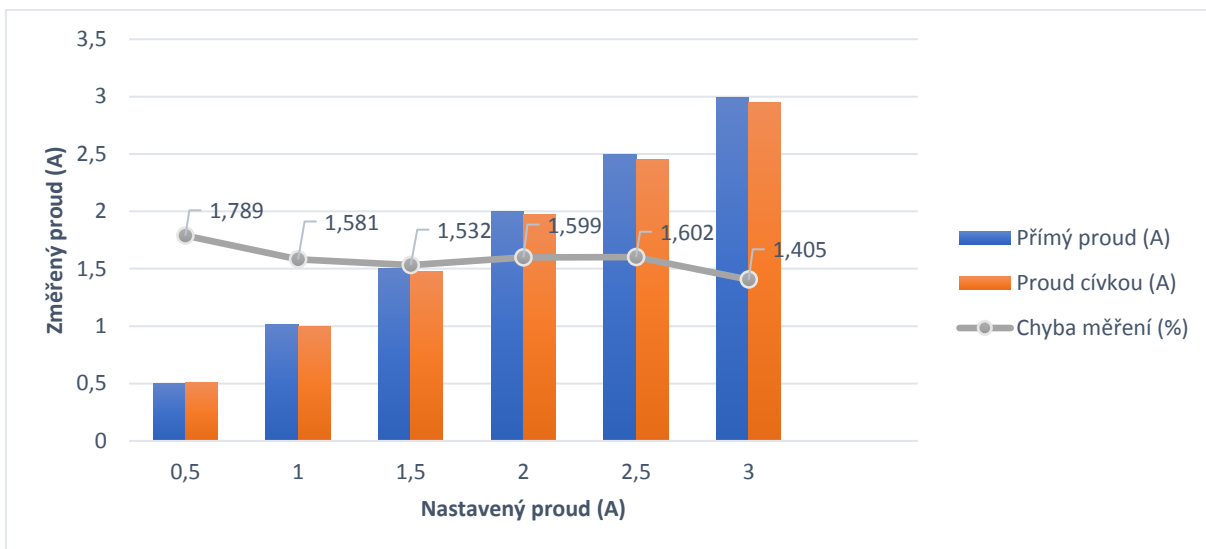


Graf. 7.5 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 5 a 9 harmonická

7.6 Průběh č. 6 – Sinusový s 5. a 7. harmonickou 3 % a 5 %

Tab. 7.6 Tabulka naměřených hodnot – 5. a 7. harmonická 3 % a 5 %

Yokogawa WT210	Dewetron DEWE-571	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívkce s 50 závitů		Chyba měření δ (%)
		Nastavený proud (A)	Přímý proud změřený (A)	
0,5	0,503	25,62	0,512	1,789
1	1,012	49,86	0,996	1,581
1,5	1,501	73,92	1,478	1,532
2	2,001	98,46	1,969	1,599
2,5	2,496	122,83	2,456	1,602
3	2,989	147,35	2,947	1,405

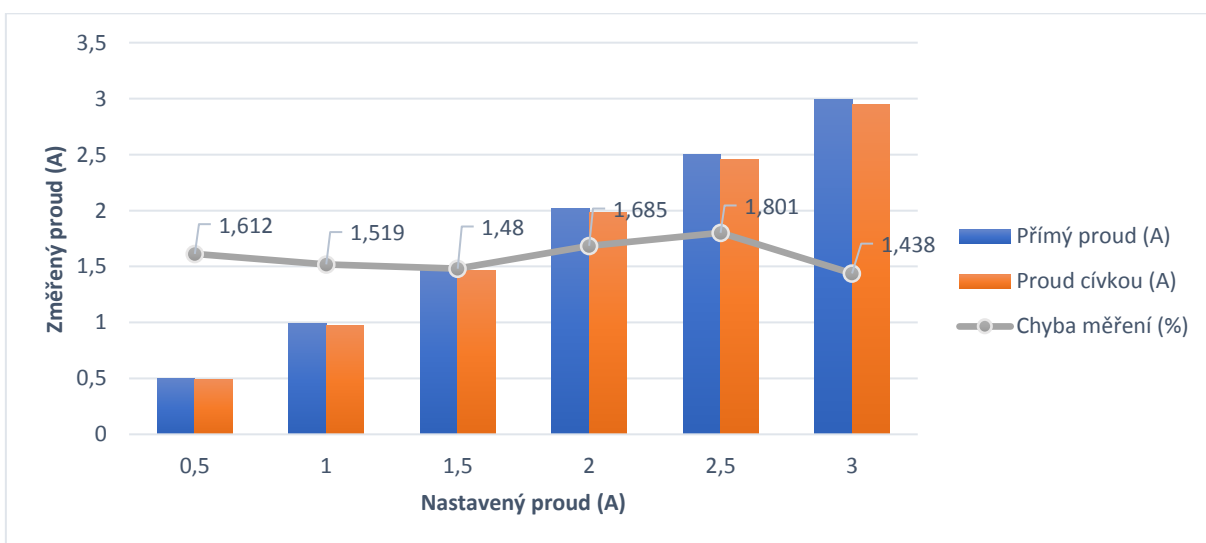


Graf. 7.6 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 5 a 7 harmonická

7.7 Průběh č. 7 – Sinusový s 21. a 23. harmonickou 0,5 % a 1,5 %

Tab. 7.7 Tabulka naměřených hodnot – 21. a 23. harmonická 0,5 % a 1,5 %

Yokogawa WT210	Dewetron DEWE-571	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívce s 50 závitů		Chyba měření δ (%)
		Přímý proud změřený (A)	Proud cívkou (A)	
Nastavený proud (A)				
0,5	0,496	24,44	0,488	1,612
1	0,987	48,59	0,972	1,519
1,5	1,486	73,22	1,464	1,480
2	2,017	99,16	1,983	1,685
2,5	2,498	122,62	2,453	1,801
3	2,990	147,37	2,947	1,438

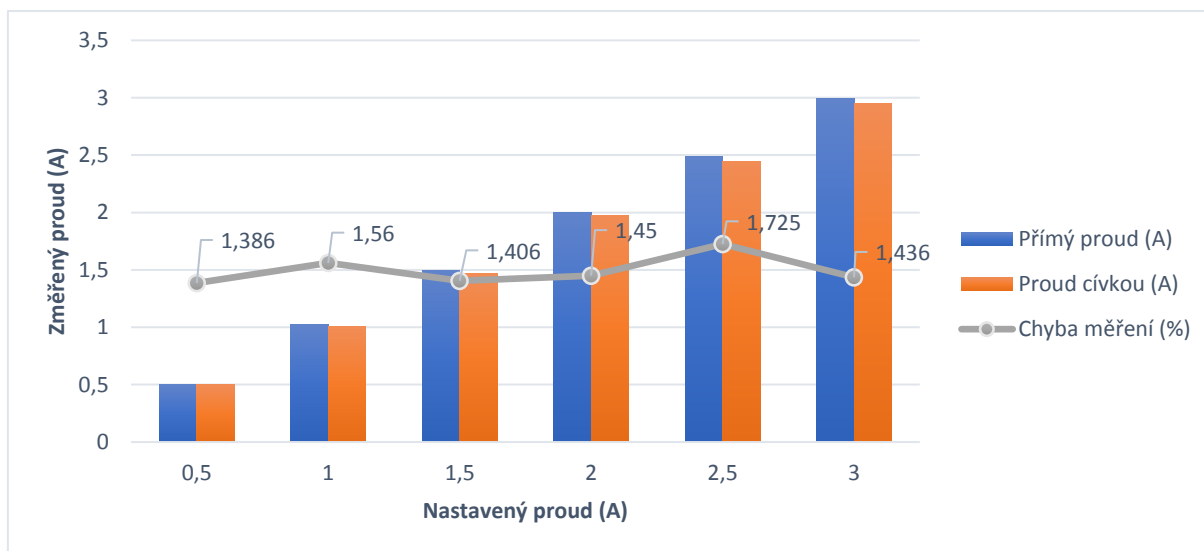


Graf. 7.7 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 21 a 23 harmonická

7.8 Průběh č. 8 – Sinusový s 2., 3., 4., a 5. harmonickou 2 %, 2 %, 1 % a 3 %

Tab. 7.8 Tabulka naměřených hodnot – 2., 3., 4., a 5. harmonická

Yokogawa WT210	Dewetron DEWE-571	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívce s 50 závitů		Chyba měření δ (%)
		Nastavený proud (A)	Přímý proud změřený (A)	
0,5	0,505	24,95	0,498	1,386
1	1,025	50,43	1,009	1,560
1,5	1,493	73,62	1,472	1,406
2	2,000	98,56	1,971	1,450
2,5	2,492	122,42	2,449	1,725
3	2,994	147,55	2,951	1,436

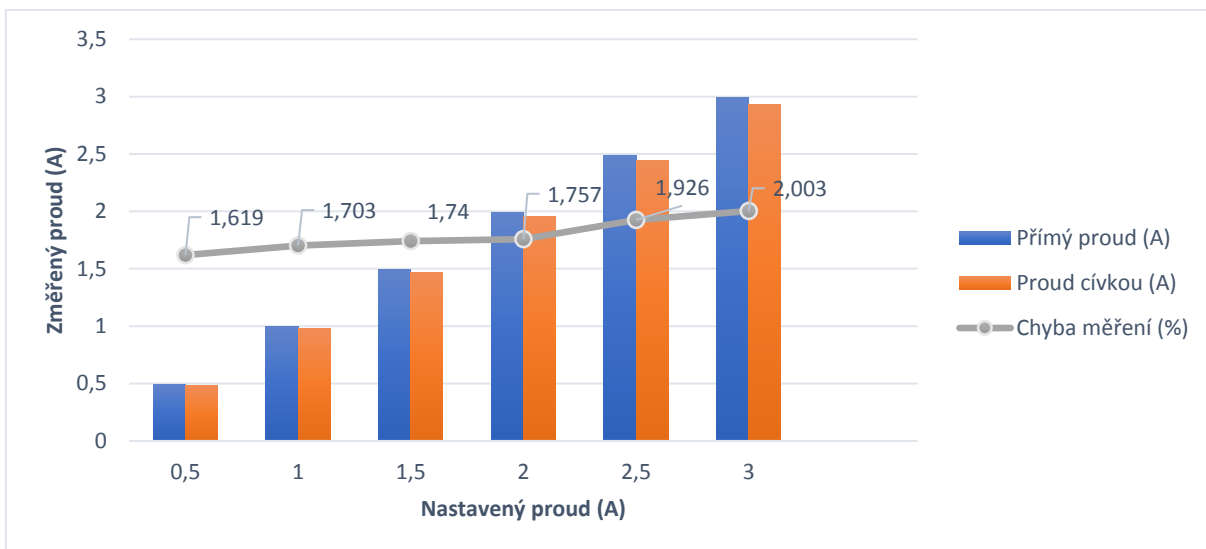


Graf. 7.8 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – 2, 3, 4 a 5 harmonická

7.9 Průběh č. 9 – Obdélníkový průběh

Tab. 7.9 Tabulka naměřených hodnot – Obdélníkový průběh

Yokogawa WT210	Dewetron DEWE-571	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívce s 50 závitů		Chyba měření δ (%)
		Nastavený proud (A)	Přímý proud změřený (A)	
0,5	0,494	24,32	0,486	1,619
1	0,998	49,09	0,981	1,703
1,5	1,494	73,42	1,468	1,740
2	1,991	97,83	1,956	1,757
2,5	2,491	122,15	2,443	1,926
3	2,995	144,75	2,935	2,003

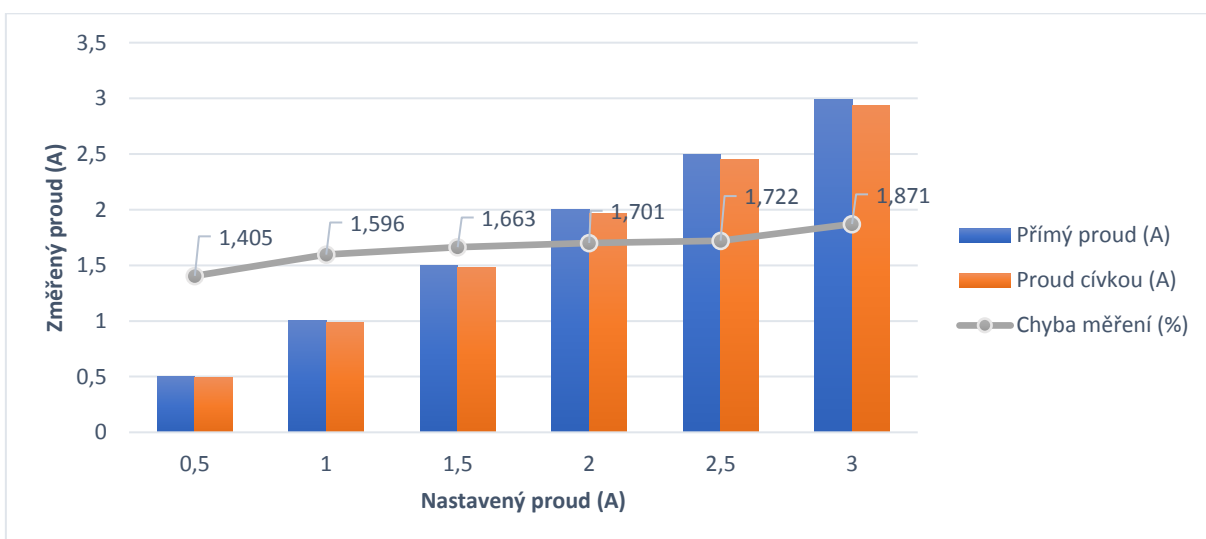


Graf. 7.9 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – obdélník

7.10 Průběh č. 10 – Průběh napětí na spínaném zdroji

Tab. 7.10 Tabulka naměřených hodnot – průběh napětí na spínaném zdroji

Yokogawa WT210 Nastavený proud (A)	Dewetron DEWE-571 Přímý proud změřený (A)	DEWE-571 + AmpFLEX A195 měřeno na cívce s 50 závitů		Chyba měření δ (%)
		Proud cívkou (A)	Proud cívkou \div 50 (A)	
0,5	0,498	24,51	0,491	1,405
1	1,002	49,35	0,986	1,596
1,5	1,503	73,93	1,478	1,663
2	1,998	98,22	1,964	1,701
2,5	2,497	122,74	2,454	1,722
3	2,993	146,89	2,937	1,871



Graf. 7.10 Porovnání naměřených hodnot se zobrazením procentuální chyby – spínaný zdroj

8. Vyhodnocení měření

U všech měřicích přístrojů byly v průběhu měření přepínány rozsahy pro jednotlivá měření tak, aby se minimalizovala chyba měření a bylo dosaženo co nejlepších výsledků.

U prvních čtyř průběhů deformovaných pouze jednou harmonickou složkou dochází k největší chybě měření na hodnotách proudu 0,5 A a 3 A. V případě chyby při měření proudu na 0,5 A to může být způsobeno nedostatečnou citlivostí vzduchové měřicí cívky a tím i náchylností na okolní rušení. Při měření proudu na hodnotě 3 A se může začít projevovat nerovnoměrnost navinutí cívky a tím může docházet k nepatrně větším chybám.

Z řady těchto čtyř průběhů vybočuje druhý průběh, u kterého byla jako u jediného naměřena přes měřicí cívku větší hodnota proudu, v případě měření 0,5 A, než v případě měření přímou metodou.

Další tři průběhy se dvěma harmonickými složkami dosáhly nejlepších výsledků měření při měření proudu 1,5 A, kde chyba jen u jednoho z nich pouze lehce překročila hranici 1,5 %.

Osmý, jako jediný průběh v tomto experimentu obsahuje harmonické složky i sudé, zbylé průběhy obsahují pouze liché. I když se běžně sudé harmonické moc nevyskytují, bylo důležité si ověřit, zda jsou tyto sudé harmonické schopny ve větší míře ovlivnit přesnost měření, což se v našem případě nepotvrdilo.

Zbylé dva průběhy překračují hodnotu *THD* několikanásobně. Jejich úkolem bylo opět zjistit, jestli i takto extrémní průběhy dokáží nějak výrazně ovlivnit měření, což se ani u jednoho nepotvrdilo. U obdélníkového průběhu jsou použity liché harmonické složky, jak je vysvětleno v kapitole 5.3.

Poslední průběh je vytvořen jako čistě napět'ový, bez přesně definovaných harmonických složek, a tedy bez frekvenčního spektra. I zde bylo úkolem ověřit si přesnost měření přes vzduchovou měřicí cívku různých špiček, které lze nalézt na spínaných zdrojích.

9. Závěr

Přesnost měření ovlivňuje více faktorů, v první řadě jmenujme přesnost samotných měřicích přístrojů, rušení, přesnost navinutí vzduchové měřicí cívky nebo třeba i rozsah přístroje v době měření.

Jako základní frekvence u všech navržených průběhů pro měření byla použita, frekvence napájecí sítě, tedy 50 Hz. Proto i v případě obdélníkového průběhu, kde je až 25. harmonická, lze tento průběh bez větších obtíží generovat, protože maximální frekvence, se kterou pracujeme, je 1 250 Hz.

Proud tekoucí obvodem byl nastavován v rozmezí 0,5 A až 3 A v krocích po 0,5 A. Nižšího proudu nebylo prakticky možné dosáhnout z důvodu velkého zvlnění průběhů generovaných napájecím zdrojem. Proto byl jako nejnižší proud, který ještě nebyl zkreslen, zvolen proud 0,5 A.

Důvod, proč byl použit proud 3 A, jako nejvyšší hodnota je ochranná funkce. Pokud by byl použit plný rozsah přístroje, 5 A, mohlo by docházet u průběhů, které nesplňují *THD* k ořezu průběhu a tím pádem k nepřesnostem měření.

Chyby měření se pohybují v rozmezí 1 % až 2 %, v závislosti na tom, jestli je měřen harmonický nebo neharmonický průběh napětí a na proudu protékajícím obvodem. Podíváme-li se na chyby měření u jednotlivých průběhů, zjistíme, že u harmonického průběhu je rozdíl mezi měřením proudu přímo a měřením proudu přes měřicí vzduchovou cívku nejmenší.

Přidáváním většího počtu harmonických složek a tím i deformování neharmonického průběhu narůstá chyba měření více u vyšších proudů než u těch nižších. Navzdory předpokladu, že při použití odpovídajících rozsahů přístrojů a adekvátně vyšších proudů, by měla chyba měření klesat, ale zde nepatrně narůstá.

Z výsledků měření je tedy patrné, že i měření za pomoci vzduchové měřicí cívky má dostatečnou přesnost nejen v případě průběhů splňujících *THD*, ale i průběhů více deformovaných. Vliv měřicí cívky na samotné měření je nepatrný, je na hranici změřitelnosti jednotlivými měřicími přístroji a její vliv lze tedy zanedbat.

Pokud bychom u každého průběhu provedli více opakovaných měření, bylo by možné alespoň z části eliminovat vliv náhodných jevů. Spočtením průměrných hodnot, bychom tak mohli dosáhnout ještě větší přesnosti měření.

Seznam použité literatury

- [1] Ing. Kolář V., Ph.D., Elektrické obvody střídavého proudu [online].
http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/st_obvody_sylab_FAST.pdf
- [2] Kříž M., Vyšší harmonické, jejich vliv na instalace a rozvody, opatření proti jejich působení [online].
<http://elektrika.cz/data/clanky/vyssi-harmonicke-jejich-vliv-na-instalace-a-rozvody-opatreni-proti-jejich-pusobeni/>
- [3] Diviš J., Magnetické pole [online].
<http://www.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>
- [4] Jandora R., Elektromagnetická indukce [online].
<http://radek.jandora.sweb.cz/fl6.htm>
- [5] Musil M., Využití Rogowskiho cívky při měření proudu a analýza dosažených parametrů [online].
http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/BP_2007_Musil_M_arek_locked.pdf
- [6] Rogowského cívka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online].
https://cs.wikipedia.org/wiki/Rogowsk%C3%A9ho_c%C3%ADvka
- [7] User's Guide AC Power Solutions Agilent Models 6814B, 6834B, and 6843A. In: *Agilent: the Power Solutions Systems* [online].
<http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/Agilent/power%20supplies/CD1/Model/6814usra.pdf>
- [8] WT210/WT230 Digital Power Meter, User's Manual. In: *Yokogawa: the Yokogawa Technologies* [online].
http://www.yokogawa.co.jp/ftp/dist/ks/eusers/wt/ked5s/im/IM760401-01E_041.pdf
- [9] DEWE-571 Technical reference manual. In: *Dewetron: the Dewetron Measurment Technics* [online].
http://www.dewetron.co.kr/main_page/pdf/dewe-571_102e.pdf
- [10] ČSN EN 50160. 3. Praha: Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [11] Ďaďo, Stanislav a Miloš Sedláček. *Měření aktivních elektrických veličin s neharmonickými průběhy*. 1. vyd. V Praze: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987, 272 s. ISBN 04-530-87.

Seznam příloh na CD

- Bakalářská práce ve formátu pdf
- Animace
 - Fourier Series Animation – Obdélník
 - Fourier Series Animation – Pila_1
 - Fourier Series Animation – Pila_2
- Uživatelské prostředí pro přístroj DEWE-571
- Obrázky použité v práci
- Elektronické zdroje použité při tvorbě práce
 - Znění normy *ČSN EN 50160*
 - Analýza obvodů s neharmonickými zdroji
 - Elektrické obvody střídavého proudu
- Průběhy vytvořené pro měření
- Technická dokumentace k měřicím přístrojům