

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Ovlivnění snímačů proudu vnějším magnetickým
polem

Influencing of Current Sensors by External
Magnetic Field

2017

Jan Hurta

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Hurta**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Ovlivnění snímačů proudu vnějším magnetickým polem**
Influencing of Current Sensors by External Magnetic Field
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Teorie měření elektrického proudu
Testování snímačů proudu na bázi měřicích transformátorů proudu
Vyhodnocení vybraných klešťových snímačů proudu

Seznam doporučené odborné literatury:


FAKTOR, Zdeněk. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 243 s. ISBN 80-86056-91-0
PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
KUBICA, Libor. Elektrotechnická měření. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 255 s. ISBN 80-7300-022-9

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


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 28.04.2017


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
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. 7. 2017

Podpis: 

Poděkování:

Poděkování patří mému vedoucímu Ing. Tadeuszi Sikorovi, Ph.D., který mi dokázal vysvětlit problematiku a pomohl mi s tvorbou mé bakalářské práce.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá různými způsoby měření proudů a praktickým testováním vybraných klešťových ampérmetrů na sestaveném modelu přípojníc. V práci jsou uvedeny metody měření pomocí Rogowského cívky a měřícího transformátoru proudu. Dále jsou uvedeny magnetické vlastnosti jádra a různé druhy hysterezních smyček. V praktické části bylo provedeno měření pomocí digitálních multimetrů, kleští bez elektroniky, které byly připojeny na stolní multimetr a taky pomocí Rogowského cívky - AmpFlex. Na základě naměřených hodnot je vyhodnoceno, které přístroje byly nejvíce ovlivněny vnějším polem.

Klíčová slova:

Měření proudu, klešťový multimetr

Abstract:

This Bachelor thesis deals with different ways of measuring current and practical testing of selected clamp meters on a assembled busbar model. The work mentioned measuring methods using a Rogowski coil, current transformer. The following are the magnetic properties of the cores and various types of hysteresis loops. In the practical part measurements were taken using digital multimeters, clamps without electronics that were attached to the table multimetr and also using Rogowski coil - AmpFlex. Based on the measured values is evaluated which devices has been most affected by external field.

Keywords:

Current measurement, clamp multimeter

Seznam použitých symbolů a zkratek

δ_1	(\circ)	chyba převodu měřicího transformátoru
μ_0	($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)	permeabilita vakua
ϕ	(Wb)	magnetický tok
B	(T)	magnetická indukce cívky
H	($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)	intenzita magnetického pole
I_1	(A)	primární proud
I_2	(A)	sekundární proud
I_s	(A)	řídící stejnosměrný proud
I_k	(A)	celkový proud
i_{ch}	(A)	poměrná chyba proudu
k	(-)	konstanta
L	(H)	vlastní indukčnost
l	(m)	délka Rogowského cívky
M	(H)	vzájemná indukčnost
N	(-)	počet závitů
N_1	(-)	počet závitů primárního vnutí
N_2	(-)	počet závitů sekundárního vnutí
P_n	(VA)	jmenovité zatížení
S	(mm^2)	průřez jádra cívky
U_H	(V)	Hallovo napětí
u_i	(V)	indukované napětí
Z_n	(Ω)	jmenovitá impedance
Z	(Ω)	impedance

Seznam tabulek a obrázků

Obrázek 1 Rogowského cívka.....	2
Obrázek 2 Znázornění vektoru H	3
Obrázek 3 Zapojení transformátoru pro měření proudu.....	5
Obrázek 4 Fázorový diagram úhlové chyby.....	6
Obrázek 5 Klešťový analogový multimetr HC-640AB.....	7
Obrázek 6 Klešťový multimetr Chauvin Arnoux F205.....	8
Obrázek 7 Využití principu Hallova jevu [2].....	10
Obrázek 8 Schéma zapojení Hallovy sondy [2].....	11
Obrázek 9 Magnetizační charakteristika feromagnetika a vzduchu[10].....	12
Obrázek 10 Hysterezní smyčka [13].....	13
Obrázek 11 Tvary hysterezní smyčky [7].....	14
Obrázek 12 Statická magnetizační charakteristika transformátoru a závislost diferenciální indukčnosti na proudu [8].....	14
Obrázek 13 Linearizovaná magnetizační charakteristika [8].....	15
Obrázek 14 Zapojení prvního měření.....	16
Obrázek 15 Schéma zapojení.....	17
Obrázek 16 Pozice multimetru X.....	17
Obrázek 17 Pozice multimetru Y.....	18
Obrázek 18 Pozice multimetru Z.....	18
Obrázek 19 Použité měřicí multimetry (zleva MN 71, Mastech M266F, Range RE9030, Prova 23, Chauvin Arnoux F205).....	19
Obrázek 20 Přepočtené hodnoty v pozici X.....	20
Obrázek 21 Zapojení kleští MN 71 a multimetru ESCORT.....	21
Obrázek 22 Přepočtené hodnoty v pozici Y.....	22
Obrázek 23 Přepočtené hodnoty v pozici Z.....	22
Obrázek 24 Zapojení měření s analyzátelem ENA330.....	23
Obrázek 25 Pozice X převodníku AmpFlex A106.....	24
Obrázek 26 Pozice Y převodníku AmpFlex A106.....	24
Obrázek 27 Pozice Z převodníku AmpFlex A106.....	25
Obrázek 28 Přepočtené hodnoty pro AmpFlex A106 (560 A).....	26
Obrázek 29 Přepočtené hodnoty pro AmpFlex A106 (300 A).....	26
Obrázek 30 Přepočtené hodnoty pro MN 71 (550 A).....	27
Obrázek 31 Přepočtené hodnoty pro MN 71 (300 A).....	27
Obrázek 32 Přepočtené hodnoty pro Chauvin Arnoux F205.....	28
Obrázek 33 Přepočtené hodnoty pro multimetr Prova 23.....	28
Obrázek 34 Přepočtené hodnoty pro multimetr Range RE9030.....	29
Obrázek 35 Přepočtené hodnoty pro multimetr Mastech M266F.....	29
Obrázek 36 Přepočtené hodnoty pro kleště Chauvin Arnoux MN 71.....	30

Tabulka 1 Technické parametry klešťového multimetru Chauvin Arnoux F205[9].....	9
Tabulka 2 Použité měřicí přístroje a jednotlivé nastavené rozsahy.....	19
Tabulka 3 Změřené a přepočtené hodnoty multimetru Chauvin Arnoux F205.....	20
Tabulka 4 Použité měřicí přístroje a nastavené rozsahy.....	25
Tabulka P5 Naměřené hodnoty pro Chauvin Arnoux F205.....	33
Tabulka P6 Naměřené hodnoty pro Prova 23.....	33
Tabulka P7 Naměřené hodnoty pro Range RE9030.....	34
Tabulka P8 Naměřené hodnoty pro Mastech M266F.....	34
Tabulka P9 Naměřené hodnoty pro MN 71 (výstupem bylo napětí).....	35
Tabulka P10 Naměřené hodnoty pro AmpFlex A106.....	35
Tabulka P11 Naměřené hodnoty pro Chauvin Arnoux MN 71 (převedeny na proud pomocí analyzátoru).....	36

Obsah

1	ÚVOD	1
2	METODY MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU	2
2.1	ROGOWSKÉHO CÍVKY	2
2.1.1	<i>Ampérův zákon</i>	3
2.1.2	<i>Výhody a nevýhody Rogowského cívky</i>	4
2.2	MĚŘÍCÍ TRANSFORMÁTOR PROUDU	5
2.3	KLEŠŤOVÉ AMPÉRMETRY.....	7
2.3.1	<i>Příklad digitálního klešťového multimetru</i>	8
2.4	HALLOVA SONDA	10
2.5	MAGNETICKÉ VLASTNOSTI JÁDRA	11
2.5.1	<i>Magneticky měkké a tvrdé materiály</i>	13
3	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	16
3.1	PRVNÍ MĚŘENÍ POMOCÍ ZVOLENÝCH MULTIMETRŮ	16
3.1.1	<i>Zapojení stanoviště</i>	16
3.1.2	<i>Použité měřicí přístroje</i>	17
3.1.3	<i>Naměřené hodnoty prvního měření</i>	19
3.2	DRUHÉ MĚŘENÍ POMOCÍ SÍŤOVÉHO ANALYZÁTORU	23
3.2.1	<i>Zapojení měření</i>	23
3.2.2	<i>Použité měřicí přístroje</i>	24
3.2.3	<i>Naměřené hodnoty druhého měření</i>	25
4	ZÁVĚR	31
5	LITERATURA	32
	PŘÍLOHY	33
	PŘÍLOHA 1 NAMĚŘENÉ HODNOTY PRVNÍHO MĚŘENÍ.....	33
	PŘÍLOHA 2 NAMĚŘENÉ HODNOTY DRUHÉHO MĚŘENÍ	35

1 Úvod

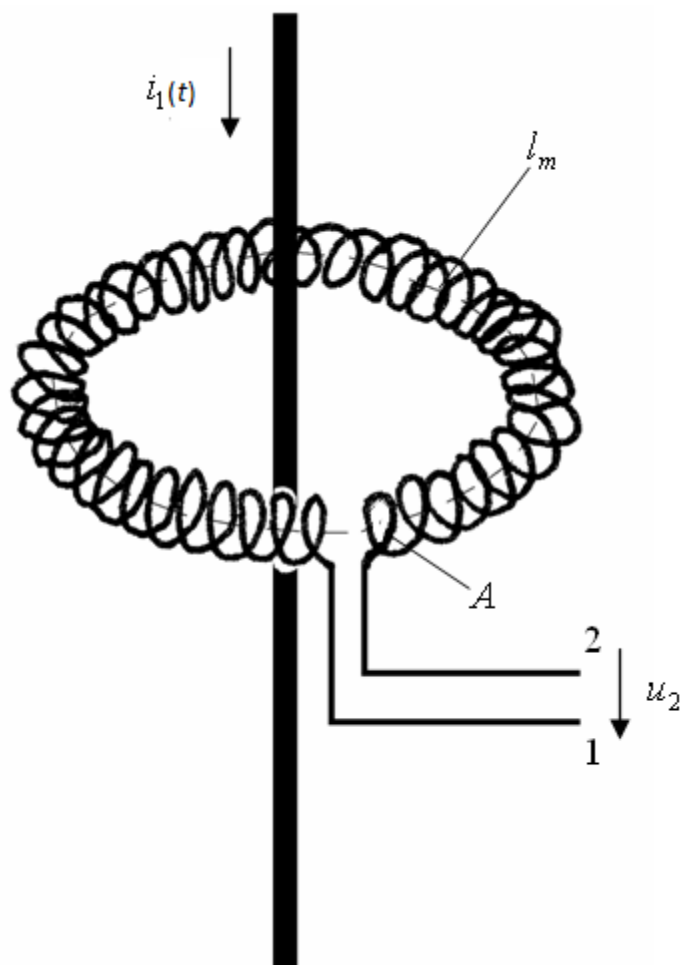
V elektroenergetických soustavách se provádí měření stejnosměrného, střídavého a impulzního proudu na všech hladinách napětí, tj. nízké napětí, vysoké napětí a velmi vysoké napětí. Pro měření elektrického proudu se v dnešní době téměř vždy používají nepřímé metody, tedy měření transformovaného obrazu měřeného proudu. V praxi se velice často využívají klešťové multimetry, kvůli jejich jednoduchosti. Měřený obvod se nemusí složitě rozpojovat, čelisti se snadno rozevřou a obepnou měřený vodič.

V této práci jsou popsány různé metody měření elektrického proudu. Od měřících transformátorů proudu po digitální klešťové multimetry, na které se zaměřuje praktické měření. Konkrétně se zaměřuje na ovlivnění snímačů proudu vnějším polem a porovnáním jednotlivých vybraných multimetrů, jak moc na ně vnější magnetické pole působí.

2 Metody měření elektrického proudu

2.1 Rogowského cívky

Je to cívka ve tvaru toroidu bez feromagnetického obvodu, která se používá jako část elektrických měřících přístrojů k měření střídavého proudu. Díky tomu, že tato cívka nemá jádro, patří mezi vzduchové cívky.



Obrázek 1 Rogowského cívka

Pro změření proudu $i_f(t)$, který protéká vodičem (Obr. 1), musí Rogowského cívka tento vodič obepínat. Protékající proud vodičem vytváří magnetické pole, které v cívce vytváří napětí u_2 . Výsledné napětí je úměrné změně magnetického toku, a tak i hodnotě elektrického proudu, který ho vyvolal. [1]

Výstup cívky je dán rovnicí:

$$u = M \cdot \frac{di}{dt} \quad (1)$$

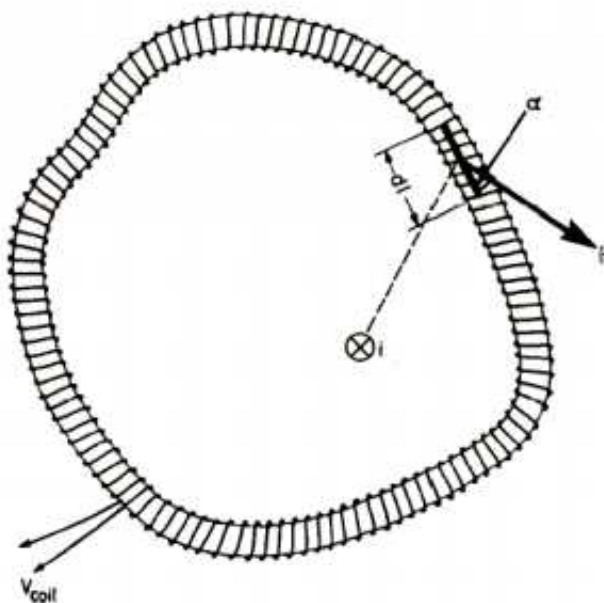
kde M je vzájemná indukčnost.

Sekundární vinutí cívky je vzduchové, aby neovlivňovalo magnetické pole tvořené primárním vinutím. Rogowského cívky lze zhotovit různě citlivé, pro proudy několika ampér až po stovky kiloampér. Magnetizační charakteristika vzduchového jádra Rogowského cívky je lineární v širokém rozsahu proudů.[1]

2.1.1 Ampérův zákon

Rogowského cívka snímá magnetické pole kolem vodiče a Ampérův zákon vyjadřuje vztah mezi magnetickým polem kolem vodiče a tokem proudu. Ampérův zákon je možno formulovat tak, že cirkulace vektoru \vec{H} je rovna celkovému proudu, který protíná integrační dráhu.

Při změně magnetického toku v závitech cívky se indukuje na jeho výstupu napěťový impuls, který může být měřen pomocí elektronického integrátoru.



Obrázek 2 Znáznornění vektoru \vec{H}

Zákon celkového proudu můžeme zapsat rovnicí:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_k I_k \quad (2)$$

Pro intenzitu magnetického toku platí:

$$\vec{H} = \vec{B} / \mu_0 \quad (3)$$

Takže ve vztahu bude:

$$\frac{1}{\mu_0} \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = I \quad (4)$$

Zároveň podle obrázku 2 bude platit:

$$\oint \vec{H} \cdot \cos\alpha \cdot \vec{dl} = I \quad (5)$$

kde \vec{dl} je úsek cívky, který je tak krátký, že můžeme zanedbat jeho křivost. Úsek délky dl má tedy n závitů a jeho cívkový tok bude:[1]

$$d\Phi = \mu_0 \cdot \vec{H} \cdot S \cdot N \cdot \cos\alpha \cdot \vec{dl} \quad (6)$$

\vec{H} je intenzita magnetického pole cívky, která svírá s úsekem cívky \vec{dl} a úhel α . Celkový tok je pak dán integrací podél cívky:

$$\Phi = \int d\Phi = \mu_0 \cdot N \cdot S \int \vec{H} \cdot \cos\alpha \cdot \vec{dl} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot S \cdot i}{l} \quad (7)$$

Napětí na výstupu bude dáno změnou magnetického toku v čase:[1]

$$u_i(t) = \frac{-d\Phi}{dt} = \frac{-\mu_0 \cdot N \cdot S}{l} \cdot \frac{di}{dt} \quad (8)$$

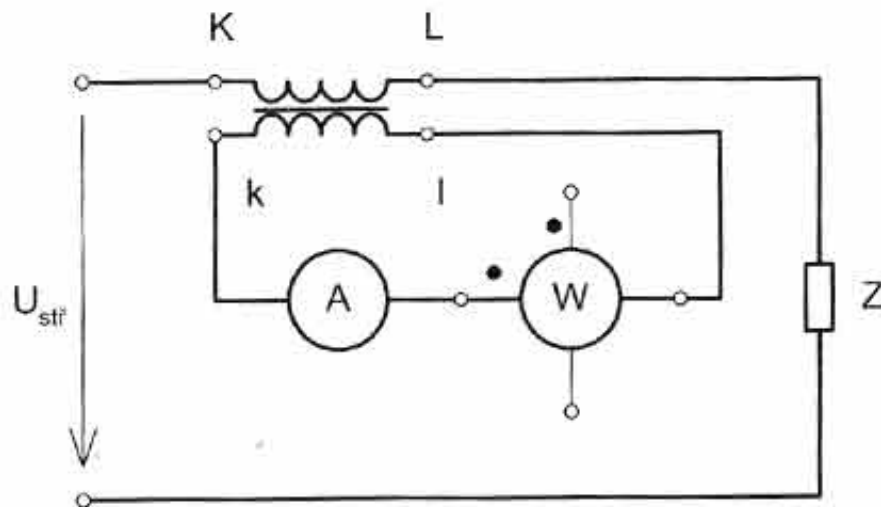
Pro praxi je pak důležitá vzájemná indukčnost:

$$M = \frac{L}{N_2} \quad (9)$$

2.1.2 Výhody a nevýhody Rogowského cívky

Jedna z předních výhod této cívky je dobrá odolnost konstrukce. Měřit je možné ve velkém rozsahu, skoro až do zkratových proudů, bez nějakého poškození měniče. Lze je konstruovat různě citlivé, pro proudy několika ampér až po stovky kiloampér. Také se dá měřit až v megahertzovém rozsahu. Neprojevuje se ani hystereze nebo trvalé zmagnetování. Na rozdíl od měřicích transformátorů nepředstavují žádné nebezpečí pro obsluhu a nezničí se, když jsou odpojené. Pro měření však potřebují pomocné přístroje, jako jsou zesilovače a napájecí zdroje. Nevýhodou je také závislost přesnosti měření na poloze cívky. U skutečných cívek existuje vzduchová mezera, kde uniká nezměřitelné magnetické pole. Chybu lze odstranit opakováním měření při různých polohách cívky a vodiče a výpočtem střední hodnoty. [11]

2.2 Měřicí transformátor proudu



Obrázek 3 Zapojení transformátoru pro měření proudu

Měřicí transformátory proudu se používají ke změně rozsahů střídavých ampérmetrů (buď ke zvýšení, nebo někdy ke snížení). Zapojení se provádí podle Obr. 3, kdy se primární vinutí (malý počet závitů, zpravidla jeden) zapojí do série se zátěží, kudy protéká měřený proud a na sekundární vinutí (velký počet závitů) se připojí jednotlivé přístroje do série (ampérmetr s co nejmenším vnitřním odporem R_i , proudová cívka wattmetru nebo elektroměr, ...).[2]

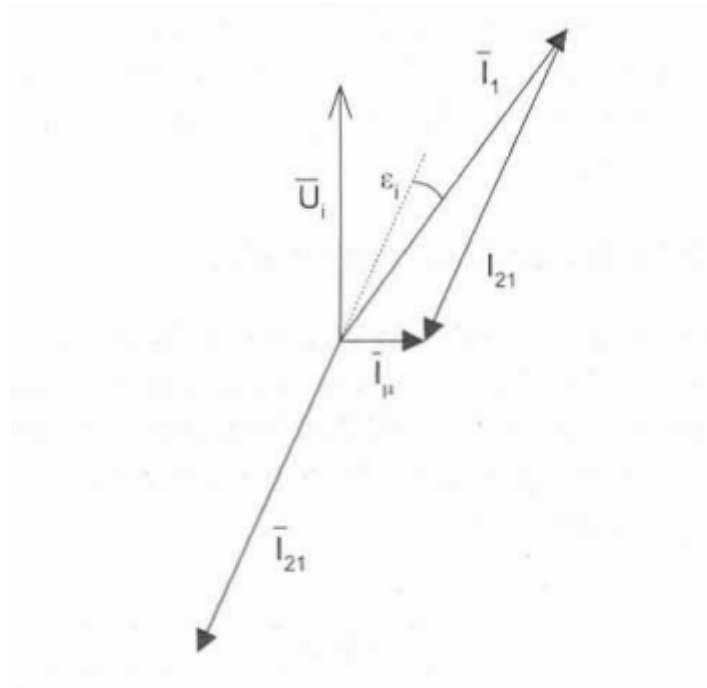
Převod měřicího transformátoru:

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (10)$$

Chyba převodu:

$$\delta_1 = \frac{I_{21} - I_1}{I_1} = \frac{pI_1 - I_2}{I_1} \cdot 10 \quad (11)$$

Úhlová chyba je dána mezi fázory \bar{I}_1 a \bar{I}_{21} . Udává se v minutách. Ze vztahu pro výpočet chyby převodu a z fázorového diagramu na Obr. 4, je vidět, že aby byla chyba měřicího transformátoru co nejmenší, je nutné, aby magnetizační proud \bar{I}_μ byl co nejmenší (u měřicích transformátorů proudu lze proud \bar{I}_{Fe} zanedbat). Proto musí být sekundární zatěžovací impedance co nejmenší, aby se při daném sekundárním proudu I_2 vystačilo s malým indukovaným napětím na sekundární straně. Malému indukovanému napětí odpovídá malý magnetický tok jádra a tím i malý potřebný magnetizační proud. Rovněž odpor a indukčnost sekundárního vinutí musí být co nejmenší. Protože je napětí indukované do sekundárního vinutí velmi malé, pracuje měřicí transformátor proudu trvale v blízkosti stavu nakrátko, tj. s co nejmenší impedancí připojenou na sekundární svorky. [2]



Obrázek 4 Fázorový diagram úhlové chyby

Aby malý magnetizační proud vytvořil potřebný magnetický tok, musí být magnetický odpor jádra co nejmenší. Proto musí mít magnetický obvod dostatečný průřez, musí být z kvalitního feromagnetického materiálu s velkou permeabilitou a nesmí mít vzduchové mezery. Jádra skládaná z dělených plechů mají vždy určité vzduchové mezery, které zmenšují magnetickou vodivost, proto se obvykle používají prstencová jádra vinutá z pásku. [2]

U měřicích transformátorů nesmí nikdy dojít k rozpojení sekundárního obvodu. Při normálním chodu tvoří magnetizační proud jen velmi malou část primárního proudu (maximálně několik %). Pokud se sekundární obvod rozpojí, dojde k tomu, že celý proud primárního vinutí (je to proud vinutí vnucený) se stane proudem magnetizačním a v sekundárním vinutí se bude indukovat značně vysoké napětí, které může způsobit poškození izolace nebo způsobit úraz obsluhy. Proto jsou všechny měřicí transformátory proudu vybaveny tzv. spojovačem nakrátko, který při manipulaci s přístroji v sekundárním obvodu měřicího transformátoru spojí sekundární svorky nakrátko. [2]

Doporučené hodnoty sekundárního proudu pro měřicí transformátory je 1 nebo 5A. Hodnoty primárních proudů bývají libovolné, výrobci většinou volí dekadické násobky 1, 2 a 5. Převod měřicího transformátoru proudu se udává stejně jako převod měřicího transformátoru napětí ve tvaru zlomku, např. 20/5 nebo 100/5. [2]

Celková spotřeba všech měřicích přístrojů připojených na sekundární vinutí nesmí přesáhnout dovolené zatížení měřicího transformátoru proudu. Pokud toto zatížení překročíme, přestane transformátor pracovat v blízkosti stavu nakrátko, změní se převod a v měření nastane značná chyba. [2]

Jmenovité zátěže měřícího transformátoru proudu jsou:

2,5 - 5 - 10 - 15 - 30 - 60 - 120 VA

Jmenovitá zátěž je uvedena na štítku daného transformátoru.

Pro jmenovité zatížení platí:

$$P_n = Z_N \cdot I_{2n}^2 \quad (12)$$

kde Z_n - jmenovitá impedance, kterou lze měřící transformátor zatížit, aniž by byla překročena dovolená chyba.

Přesnost měřících transformátorů proudu se udává stejně jako přesnost měřících transformátorů napětí. Podle ČSN EN 61869-2 jsou stanoveny třídy přesnosti: [5]

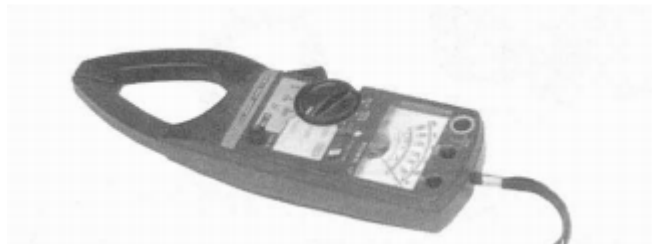
0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3 - 5 %

Číslo udává dovolenou relativní chybu převodu při jmenovitém napětí a zatížení.

2.3 Klešťové ampérmetry

V praxi se klešťové ampérmetry používají velmi často, protože mají výhodu v tom, že se při měření proudu nemusí rozpojovat měřený obvod. Skládají se z měřícího transformátoru proudu, jehož magnetický obvod je možné pomocí izolovaných rukojetí rozevřít jako čelisti kleští a obepnout jimi vodič, kterým protéká náš měřený proud. Na magnetickém obvodu je navinuto sekundární vinutí, které je přímo spojeno s malým magnetoelektrickým ampérmetrem a usměrňovačem, který má stupnice přímo v proudech jednotlivých rozsahů měřícího transformátoru. Změna rozsahů se provádí přepínáním odboček na sekundárním vinutí. Sekundární vinutí bývá rozloženo po celé délce magnetického obvodu, aby se snížil nepříznivý vliv rozptylu, který se mění polohou primárního vodiče uvnitř čelistí. [3]

Moderní klešťové ampérmetry jsou vybaveny analogově - číslicovým převodníkem a displejem. Výstupem je tedy číslicový údaj. [3]



Obrázek 5 Klešťový analogový multimetr HC-640AB

Díky tomu, že rozevíratelný magnetický obvod klešťových transformátorů má určité vzduchové mezery (i přesto, že jsou dosedací plochy pečlivě broušeny). Moderní přenosné multimetry mají přesnost kolem $\pm 1-0,25\%$. Chyba fáze klešťových ampérmetrů se pohybuje od 60 do 200°. Klešťové ampérmetry se obvykle doplňují dvojicí svorek, na které se napojují vodiče pro měření napětí. [2]

V praxi se tento měřicí přístroj používá velice často, protože mají obrovskou výhodu v tom, že při měření proudu není třeba rozpojovat daný obvod. Hlavní oblastí jejich použití je silnoproudá elektrotechnika. Měřit se s nimi dá do stovek kA. [3]

2.3.1 Příklad digitálního klešťového multimetru



Obrázek 6 Klešťový multimetr Chauvin Arnoux F205

Tabulka 1 Technické parametry klešťového multimetru Chauvin Arnoux F205[9]

Rozsah měření odporu	0.1 - 59.99 k Ω	Rozsah rozevření pro proudové kleště	34 mm
Rozsah měření frekvence	5 Hz - 20 kHz	Max. měřená hodnota A/AC	600 A
Rozhraní	Žádné	Vnitřní odpor DC	10 M Ω
Napájení	Baterie 9 V	Max. měřená hodnota V/AC	1000 V
Hmotnost	340 g	Měření proudu	AC/DC
Kalibrace možná podle	ISO / DAkkS	Max. měřená hodnota A/DC	900 A
Typ měření	True RMS	Vnitřní odpor AC	10 M Ω
Max. měřená hodnota V/DC	1000 V	Typ (výrobce)	F205
Typy multimetrů (kategorie)	Proudové kleště · multimetr	Kategorie měření	CAT III 1000 V · CAT IV 600 V
Min. měřená hodnota A/DC	0.1 A	Min. měřená hodnota V/DC	0.1 V
Měření napětí	AC/DC	Základní přesnost (\pm)	1%
Displej (counts)	6000	Frekvenční rozsah	5 Hz - 3 kHz
Displej (digitální / mechanický)	Digitální	Šířka	78 mm
výška	222 mm	Min. měřená hodnota V/AC	0.15 V
Min. měřená hodnota A/AC	0.15 A		

2.4 Hallova sonda

Hallova sonda se používá pro měření a automatickou regulaci magnetických polí, ovládání velkých elektromotorů, měření součinnu veličin, bezkontaktní tlačítka mechanické snímače, ale také i na měření stejnosměrného i střídavého proudu. [2]

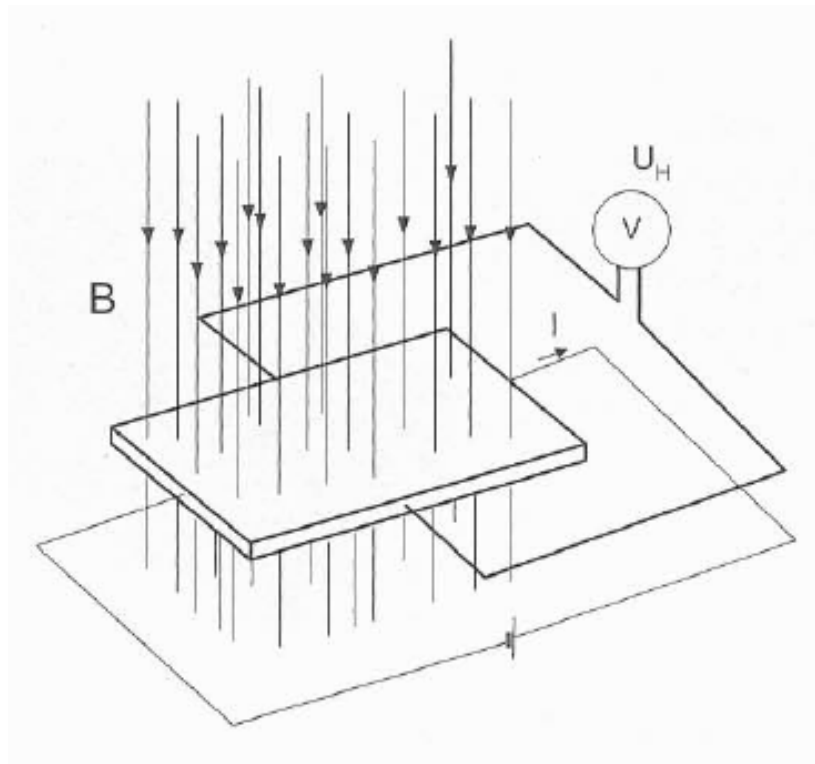
Vložíme-li destičku polovodiče do magnetického pole a necháme-li jí příčně protékat stejnosměrný proud, objeví se na opačných hranách destičky tzv. Hallovo napětí, jehož velikost je dána vztahem:[4]

$$U_H = k \cdot I \cdot B \quad (13)$$

kde k - konstanta závislá na materiálu, tloušťce a struktuře polovodičové destičky,

I - stejnosměrný proud protékající destičkou,

B - indukce magnetického pole, v němž se destička nachází.[4]



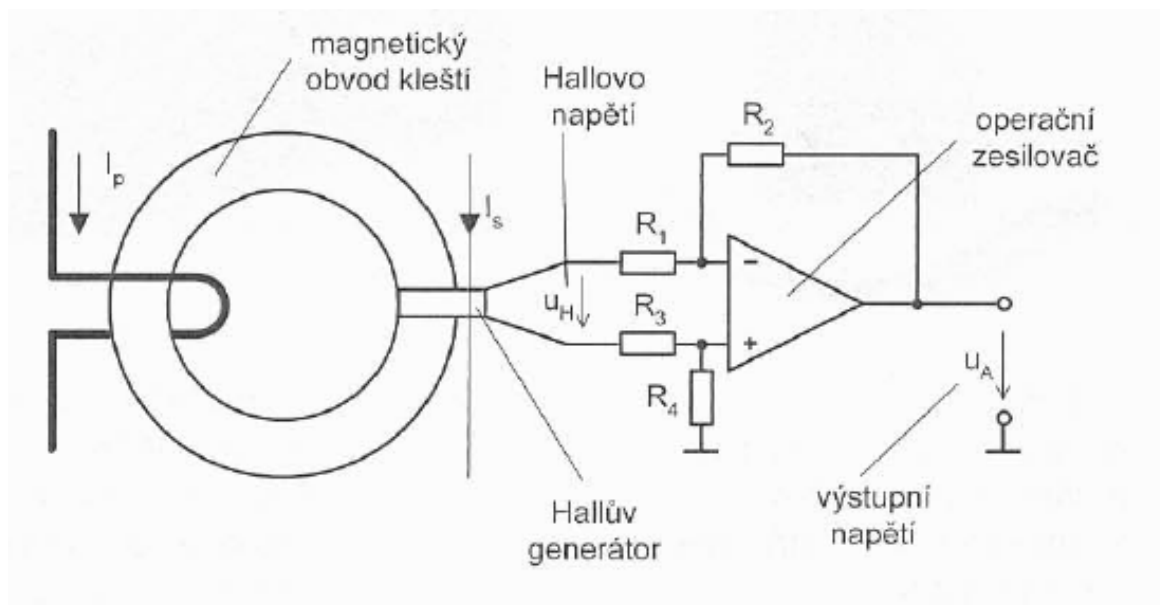
Obrázek 7 Využití principu Hallova jevu [2]

Hallovy sondy se používají zejména při měření magnetické indukce, ale své využití našly i při měření proudu. Praktické řešení zapojení Hallovy sondy pro měření proudu je na Obr. 7. Vodič, kterým protéká měřený proud I_p (je jedno, jestli je stejnosměrný nebo střídavý) obemkneme kleštěmi magnetického obvodu (magnetický obvod je podobný kleštím běžných klešťových ampérmetrů). Ve vzduchové mezeře je zasunut Hallův generátor, kterým protéká řídicí stejnosměrný proud I_s . Zároveň s velikostí měřeného proudu I_p roste i velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tedy i jí

odpovídající Hallovo napětí. Toto napětí se zesiluje pomocí operačního zesilovače na výstupní napětí U_A . Velikost napětí U_A je přímo úměrná velikosti měřeného elektrického proudu I_p . [2]

Tímto způsobem lze tedy snadno měřit efektivní hodnoty periodických i neperiodických střídavých proudů i proudy stejnosměrné. Dosažitelná přesnost je asi 1%, přístroje lze použít pro měření proudu do kmitočtu asi 25 kHz. [2]

Klešťové ampérmetry s Hallovým generátorem lze použít pro měření proudů 1 mA až 1 MA. Výstup přístrojů bývá v digitální formě, některé přístroje však mívají i analogový výstup. [2]



Obrázek 8 Schéma zapojení Hallovy sondy [2]

2.5 Magnetické vlastnosti jádra

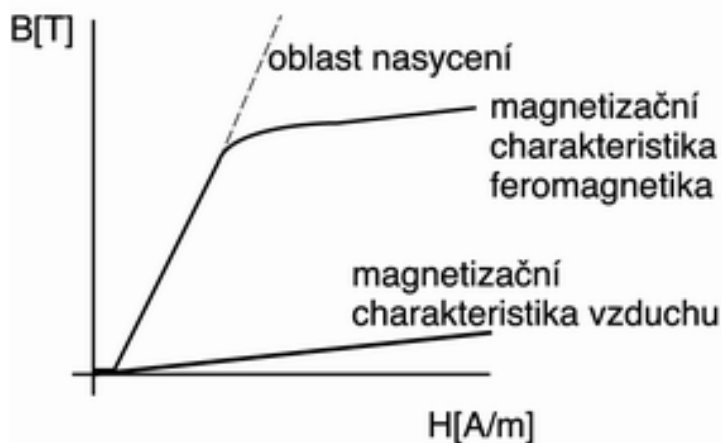
Základní vlastností feromagnetických materiálů je možnost vybudit v nich i poměrně slabým magnetickým polem silnou magnetizaci. Tu jsou si schopny udržet i po odstranění vnějšího magnetického pole. [6]

Feromagnetismus je vlastností pevných kovových i nekovových látek. Feromagnetismus vykazuje železo, kobalt, nikl, oxidy železa a některé slitiny. Všechny feromagnetické látky obsahují tzv. domény. Jsou to mikroskopické oblasti, v nichž jsou magnetické momenty jednotlivých částic souhlasně orientovány. [6]

V nezmagnetovaných materiálech jsou domény orientovány nahodile, a proto je výsledná magnetizace nulová. Působením vnějšího magnetického pole dojde k orientaci domén a k jeho zesílení. Tím je původní slabé magnetické pole vybudované primárním vodičem v transformátoru zesíleno a je schopné v sekundárním vinutí indukovat potřebný proud. [1]

Pokud pozorujeme zmagetování materiálu, který nebyl dosud zmagetován, můžeme sledovat rychlý růst magnetizace do okamžiku nasycení (saturace). Čas, který uběhl od počátku

magnetizace do saturace, nazýváme doba nasycení. Při dalším zvyšování intenzity magnetického pole narůstá magnetizace jen pomalu a v okamžiku, kdy dojde k orientaci všech domén, se její růst úplně zastaví. Tím je zapříčiněn nelineární průběh magnetizační charakteristiky feromagnetika. [6]



Obrázek 9 Magnetizační charakteristika feromagnetika a vzduchu[10]

Vlivem saturace dochází ke zkrácení výstupních hodnot, což zapříčiňuje chyby během měření nebo nesprávnou činnost ochranných zařízení.

K nasycení jádra dochází při nadproudech a především při zkratech, kdy je jádro zatíženo velkým magnetickým tokem, který je vzbuzován poruchovým proudem. Problémy s přesycením jádra také vznikají vlivem zbytkové magnetické indukce (remanentní indukce), která je jednou z dalších nezanedbatelných vlastností feromagnetických materiálů.[1]

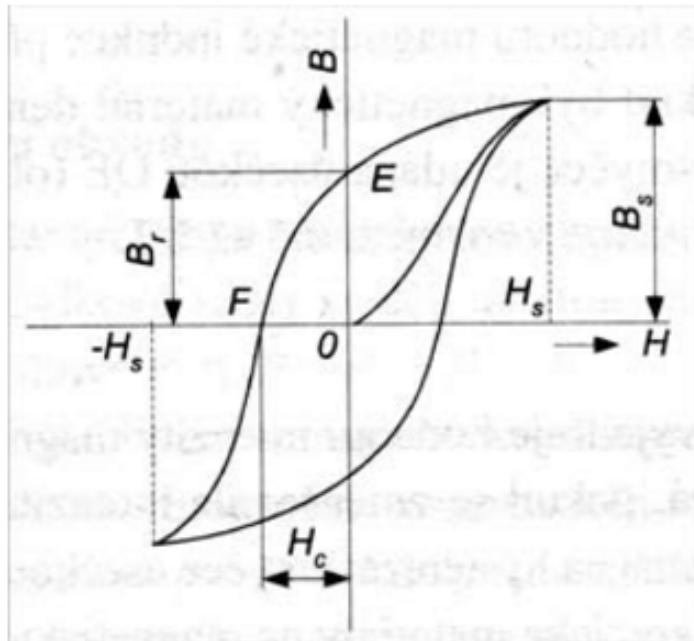
Zbytková magnetická indukce zkracuje dobu nasycení jádra transformátoru, pokud poruchový proud vytvoří magnetické pole ve stejném směru jako remanentní indukce. Jestliže však je magnetické pole vytvořeno poruchovým proudem v opačném směru než remanentní indukce, doba nasycení se naopak prodlouží. Velikost zbytkové magnetické indukce vyjadřuje kvalitu magnetického obvodu. Má na ní vliv druh materiálu feromagnetika a konstrukce magnetického obvodu, především pak velikostí vzduchových mezer. Při nulovém magnetizačním proudu bude každý transformátor proudu s feromagnetickým jádrem obsahovat zbytkový magnetický tok, který se sečte s magnetickým tokem jádra při opakovaném zmagnetování. Když se hodnota zbytkové magnetické indukce stabilizuje na určité hodnotě, zůstává tato hodnota v jádře skoro beze změn, dokud nedojde k jeho odmagnetování. V praxi se zbytkové magnetické indukce pohybuje mezi hodnotami 0 až 80% saturační hodnoty.[12]

Možností jak redukovat velikost zbytkové magnetické indukce v přístrojových transformátorech proudu je použití jader se vzduchovými mezerami. Vzduchové mezery velikosti 0,0001 až 0,0003 délky magnetické cesty sníží hodnotu zbytkové magnetické indukce na snesitelnou úroveň. Velkou předností těchto transformátorů jsou menší rozměry a menší průřez jádra potřebný k zabránění saturace. Nevýhodou je nabývání chyby úhlu při transformaci.

2.5.1 Magneticky měkké a tvrdé materiály

Magneticky tvrdé materiály se nesnadno přemagnetují. Jejich B-H křivka je široká. Používají se pro permanentní magnety. [1]

Magneticky měkké materiály mají malé hysterzní ztráty, a proto se používají pro magnetické obvody se střídavým napájením (transformátory, elektrické točivé stroje na střídavý proud). Jejich BH křivka je úzká. [1]

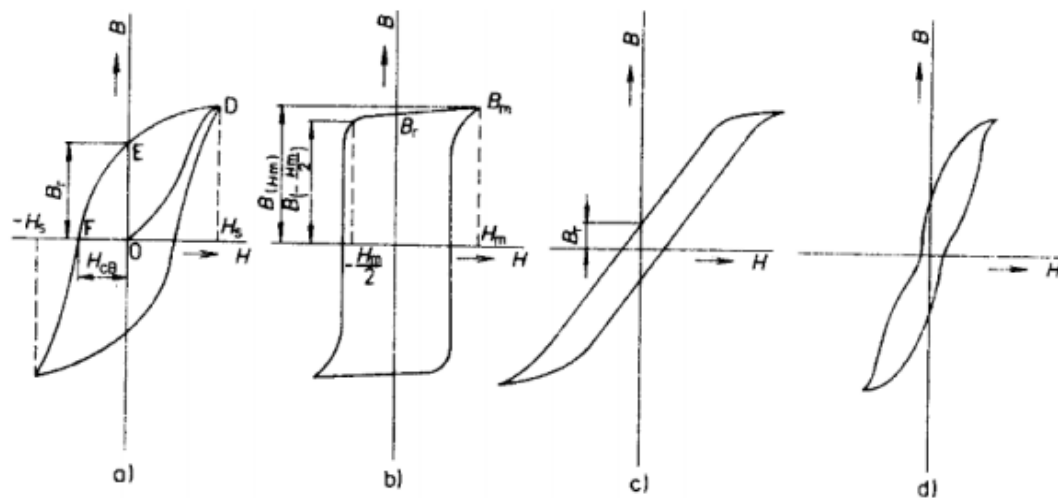


Obrázek 10 Hysterezní smyčka [13]

Hysterezní smyčka se získává provedením jednoho tzv. cyklu magnetování. Úsek hysterezní smyčky OE se nazývá remanence B_r , úsek OF koercivita H_c . Hysterezní smyčka, která vychází z pracovního bodu odpovídajícího magnetické indukci v magnetickém nasycení B_s se nazývá hraniční (maximální) hysterezní smyčka. [7]

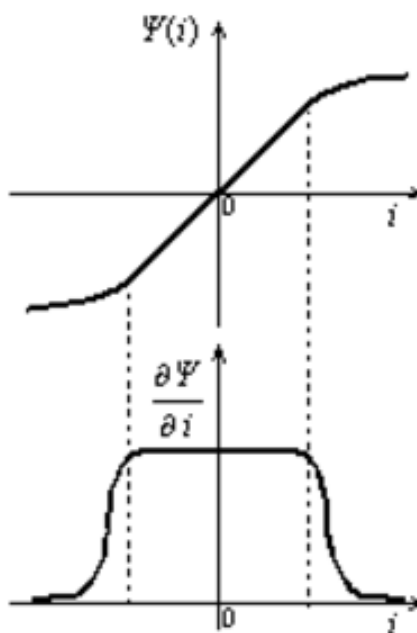
Podle tvaru rozlišujeme několik typů hysterezních smyček:

- a) normální - poměr $B_r/B_s = 0,5$ až $0,8$
- b) pravoúhlý - poměr B_r/B_s se blíží jedné
- c) plochý - poměr $B_r/B_s = 0,1$ až $0,2$
- d) permivarový - smyčka se ve střední části zužuje



Obrázek 11 Tvary hysterezní smyčky [7]

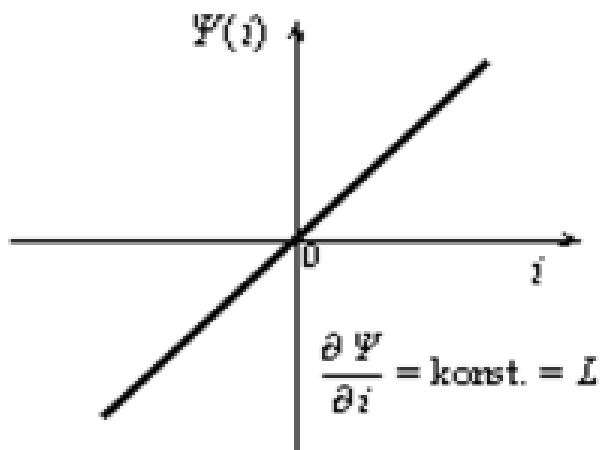
Na Obr. 11 je zobrazena statická magnetizační charakteristika a její derivace, která ukazuje průběh diferenciální indukčnosti vinutí v závislosti na proudu. Je vidět, že pro malé proudy je indukčnost největší, s rostoucím proudem ale prudce klesá. Nastává tzv. přesycení magnetického obvodu transformátoru. Tomuto režimu se snažíme vyhnout. [8]



Obrázek 12 Statická magnetizační charakteristika transformátoru a závislost diferenciální indukčnosti na proudu [8]

Často se v technické praxi zavádí zjednodušení, při kterém se reálný magnetický obvod linearizuje. Diferenciální indukčnost je považována za konstantní (nezávislá na proudu cívky).

Mluvíme pak o lineárních magnetických obvodech. Toto zjednodušení se dá použít pouze v případě, pokud se reálný magnetický obvod provozuje v určitých mezích magnetického proudu, kdy se skutečná indukčnost příliš nemění. [8]



Obrázek 13 Linearizovaná magnetizační charakteristika [8]

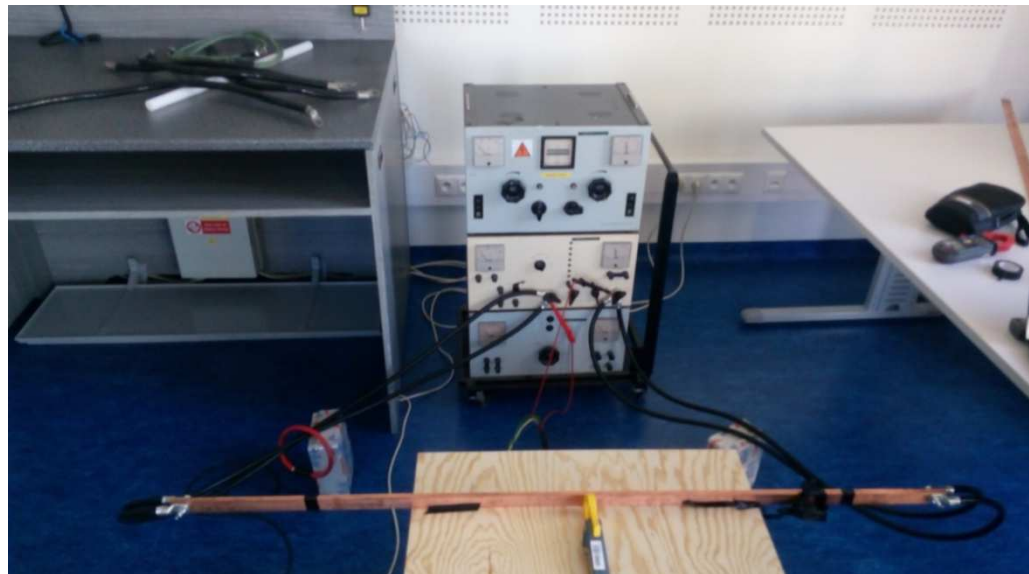
3 Praktické měření

Toto měření se bude zabývat měřením střídavého proudu pomocí pěti vybraných klešťových multimetrů. Druhé měření bude provedeno pomocí jednoho klešťového měřicího přístroje a pomocí Rogowského cívky - AmpFlex.

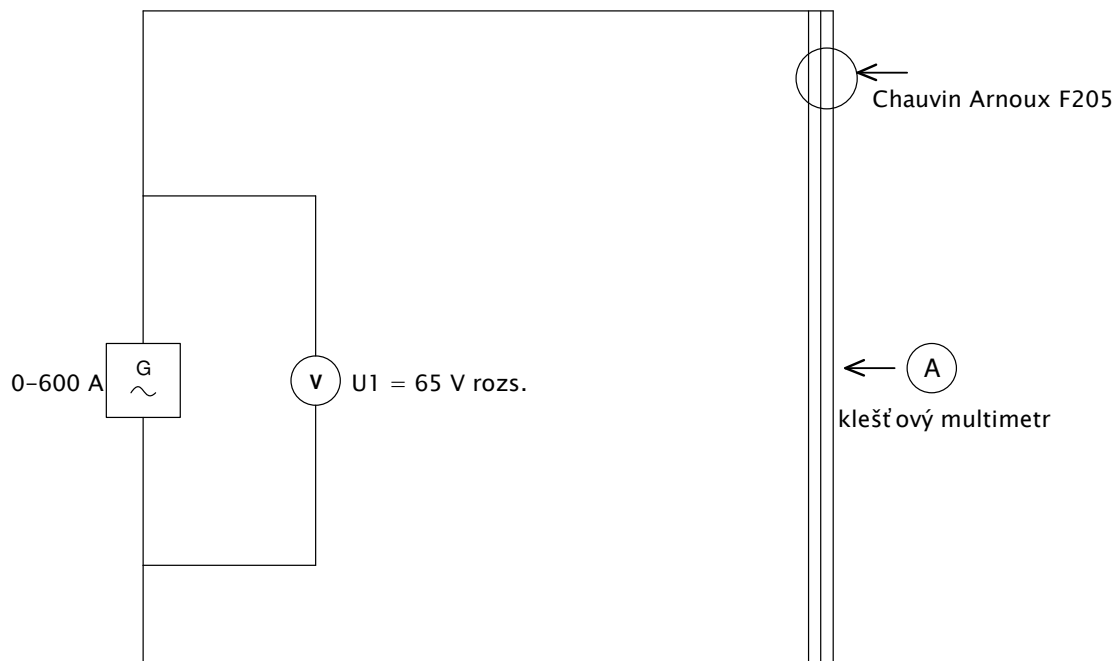
3.1 První měření pomocí zvolených multimetrů

3.1.1 Zapojení stanoviště

Pro měření byl použit zdroj s maximálním proudem 600 A. Ten byl připojen na dvě spojené měděné přípojnice pomocí čtyř 150 centimetrových kabelů. Přípojnice byly položeny na dřevěné dýze a uchyceny. Měření probíhalo na hodnotách 100, 300 a 590A. Bylo použito pět různých klešťových ampérmetrů.



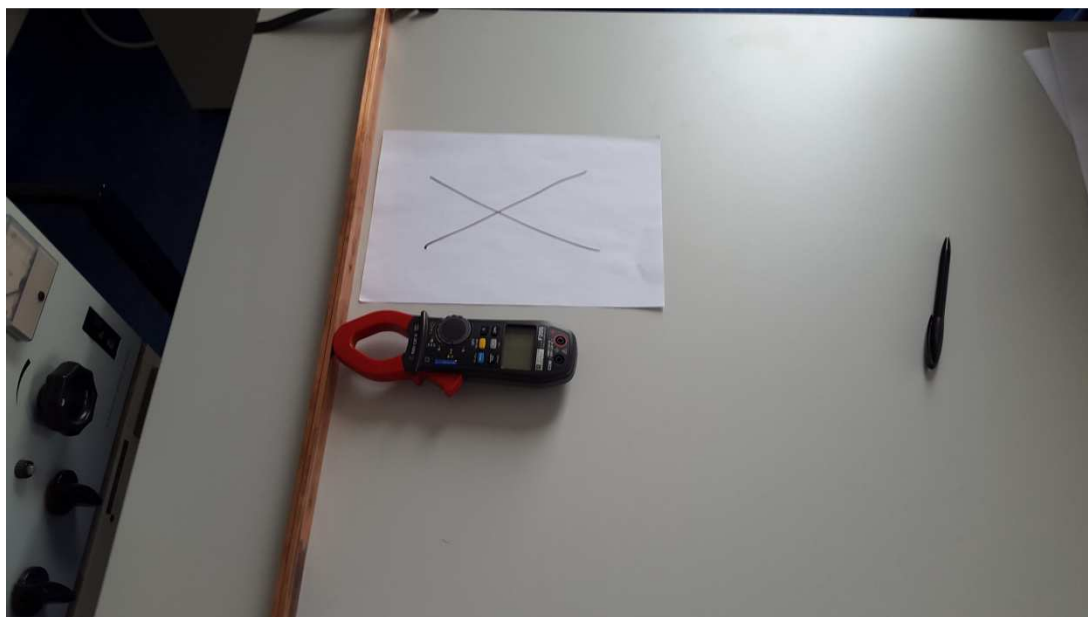
Obrázek 14 Zapojení prvního měření



Obrázek 15 Schéma zapojení

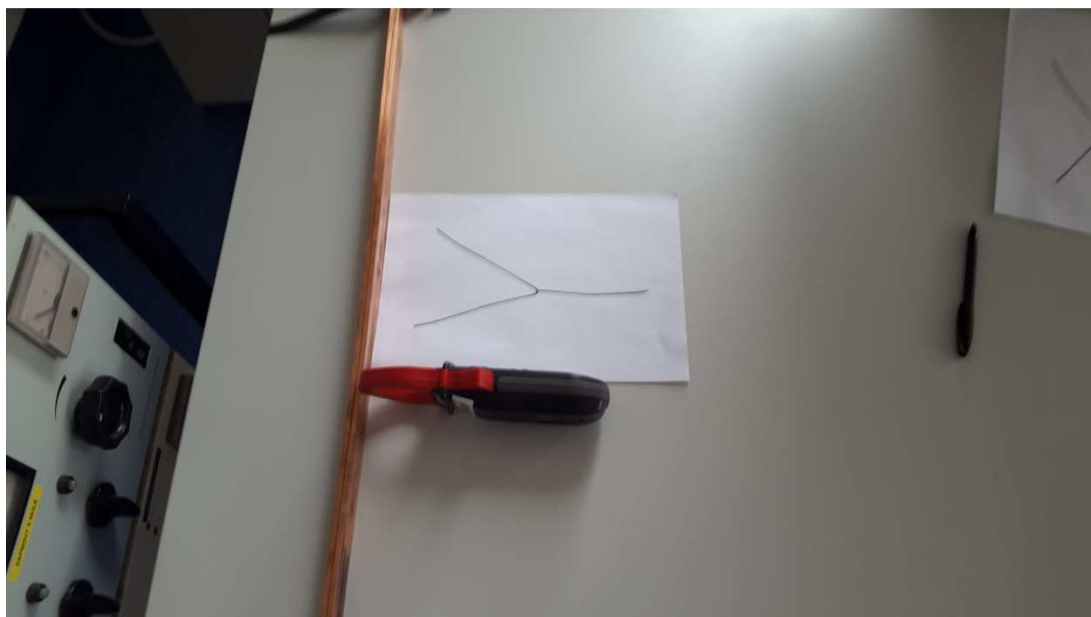
3.1.2 Použité měřicí přístroje

Samotné měření probíhalo tak, že na zdroji byla nejprve nastavena hodnota 100 A a pomocí vybraných ampérmetrů bylo zjišťováno, do jakých vzdáleností dokáže vysoký proud, protékající měděnou přípojnicí, ovlivnit snímače jednotlivých ampérmetrů. Stejně měření bylo provedeno při 300 A a 590 A. V práci se porovnává pouze nejvyšší použitý proud, což byl 590 A. Každý z pěti ampérmetrů byl měřen ve třech polohách označených X, Y, Z (viz obrázky níže).



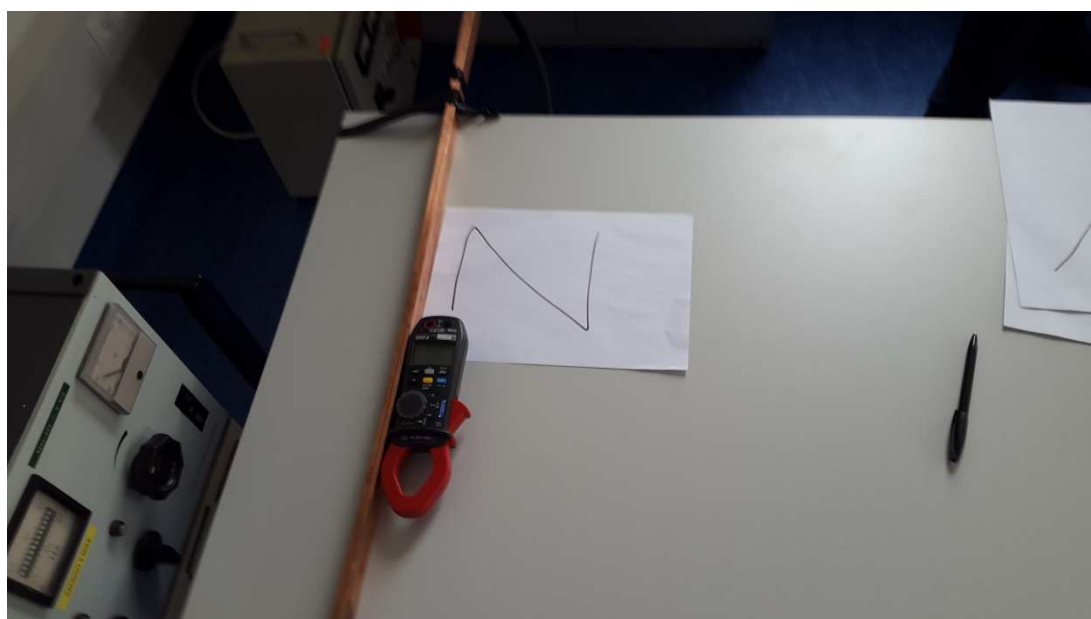
Obrázek 16 Pozice multimetru X

V pozici X byl multimetr položen kolmo k přípojnice, kudy protékal měřený proud.



Obrázek 17 Pozice multimetru Y

Na pozici Y byly jednotlivé multimetry postaveny na hranu kolmo k přípojnicí a byla provedena jednotlivá měření v daných vzdálenostech.



Obrázek 18 Pozice multimetru Z

V poslední pozici Z byly umístěny multimetry vodorovně s měřenou přípojnicí a poté proběhly měření ve zvolených vzdálenostech.

Tabulka 2 Použité měřicí přístroje a jednotlivé nastavené rozsahy

Měřicí přístroj	Rozsah
Chauvin Arnoux F205	600 A
Prova 23	100 A
Range RE9030	200 A
Mastech M266F	1000 A
Chauvin Arnoux MN 71	10 A
ESCORT 3136A	1200 V

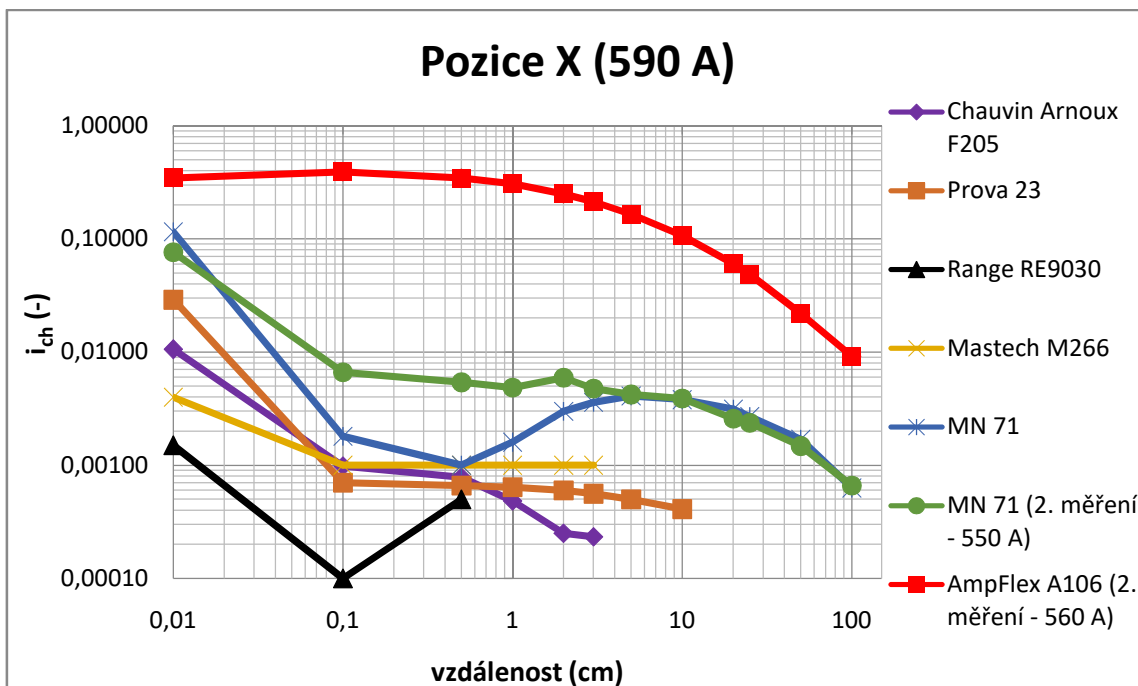
Měřicí přístroj MN 71 jsou jen kleště bez elektroniky. Napětí těchto kleští bylo měřeno pomocí stolního multimetru ESCORT 3136A. Hodnoty poté byly přepočítány na proud v poměru 10 A/1 V, jak bylo napsáno na kleštích.



Obrázek 19 Použité měřicí multimetry (zleva MN 71, Mastech M266F, Range RE9030, Prova 23, Chauvin Arnoux F205)

3.1.3 Naměřené hodnoty prvního měření

No Obr. 20 jsou zobrazeny přepočtené hodnoty jednotlivých multimetrů v pozici X při nastavené hodnotě 590 A. Měření mělo probíhat při 600 A, ale použitý zdroj neměl dostatečný výkon. Obvod měl velkou reaktanci a představoval vyšší zátěž pro obvod, zdroj proto nebyl schopen vybudit proud 600 A. Dále jsou do grafů přidány i hodnoty z druhého měření pro srovnání, ty ale byly měřeny na nižších proudech (proudy jsou uvedeny v legendě grafů).



Obrázek 20 Přepočtené hodnoty v pozici X

Tabulka 3 Změřené a přepočtené hodnoty multimetru Chauvin Arnoux F205

	Naměřená hodnota	Přepočtená hodnoty
vzdálenost (cm)	590 A	590 A
0,01 (na přípojnici)	6,34	0,01057
0,1 (na dotek přípojnice)	0,59	0,00098
0,5	0,47	0,00078
1	0,29	0,00048
2	0,15	0,00025
3	0,14	0,00023

Jednotlivé změřené hodnoty byly přepočítány pomocí nastavených rozsahů jednotlivých multimetrů, které byly použity při měření, jak lze vidět níže:

$$i_{ch} = \frac{I_{naměř.}}{rozsah} = \frac{6,34}{600} = 0,01057 \quad (13)$$

Měření probíhalo na vzdálenostech od 0,5 cm až po 100 cm v určitých rozestupech, které jsou ukázány v příložených tabulkách. V tabulce jsou navíc uvedeny dva speciální případy umístění snímačů proudu:

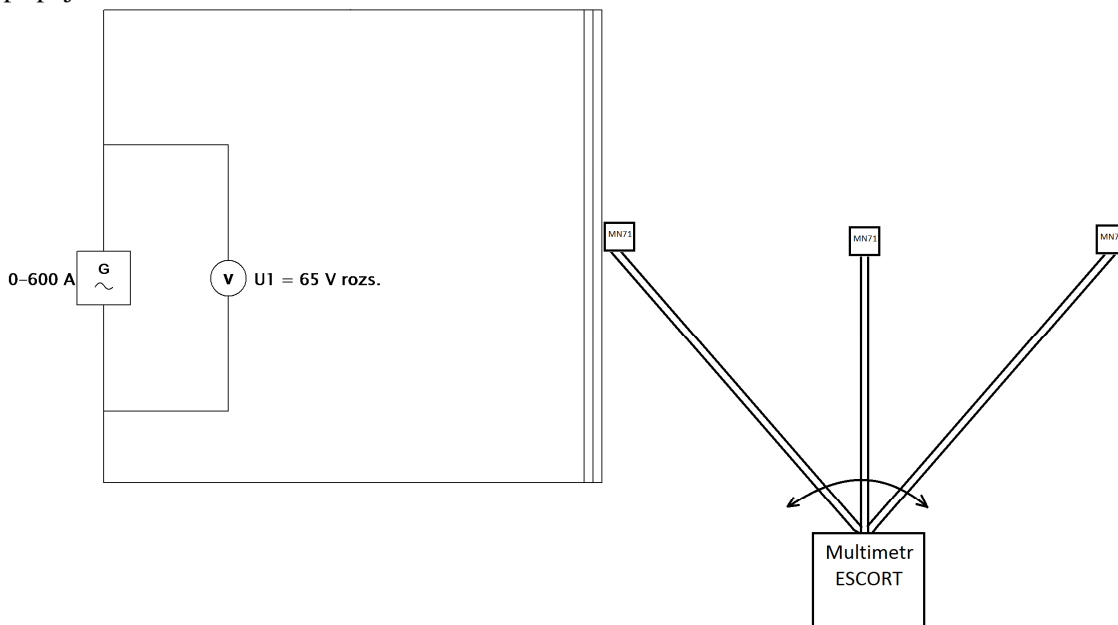
- Umístění „na přípojnici (0,01cm)“ – kdy byl přístroj položen v dané poloze (X, Y, nebo Z) přímo na přípojnici tak, aby osa otvoru přístroje pro vodič byla nad podélnou osou přípojnice.

- Umístění „na dotek přípojnice (0,1 cm)“ – kdy byl přístroj v dané poloze přiložen na nulovou vzdálenost k přípojnici.

Virtuální hodnoty vzdálenosti přístroje 0,01 cm, resp. 0,1 cm byly v tabulce použity z toho důvodu, aby bylo možné tato dva umístění přístrojů zobrazit v logaritmickém grafu. Nulovou ani zápornou vzdálenost není možné (ze samotné definice logaritmu) v logaritmickém grafu zobrazit.

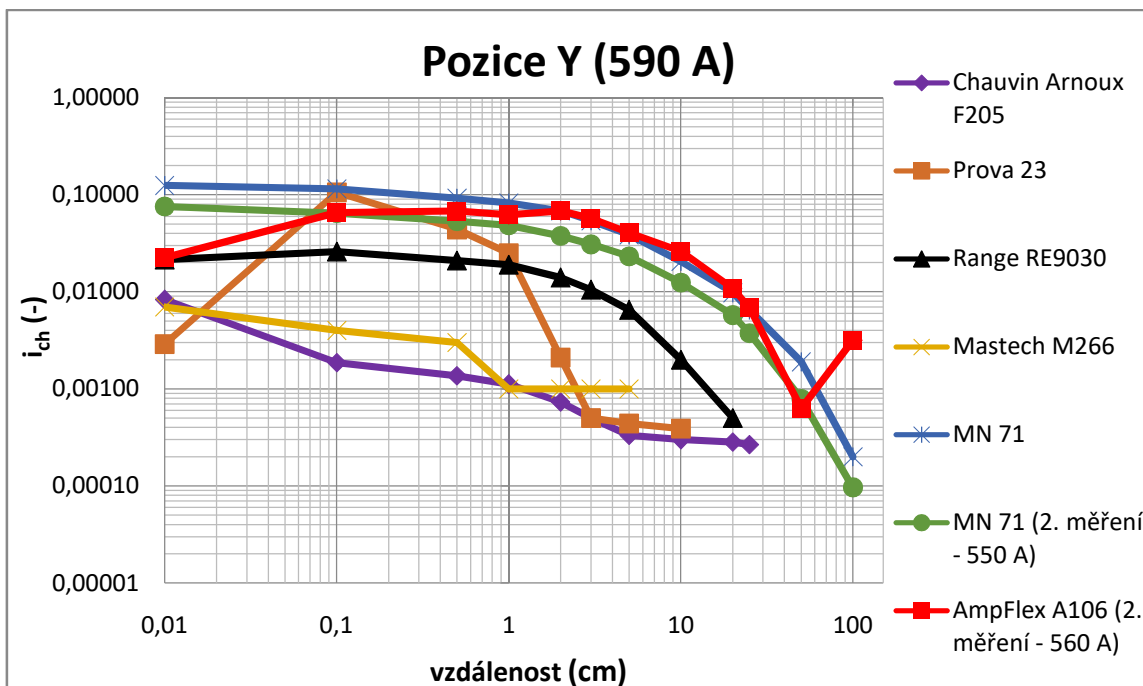
Většina multimetrů ale v maximální vzdálenosti nebyla schopna změřit vůbec nic. Každý dokázal měřit do kratších vzdáleností. V grafech a tabulkách jsou vykresleny tedy průběhy pouze do vzdálenosti, kdy přístroj ukazoval nějakou hodnotu.

Jak lze vidět z Obr. 20, tak nejvíce hodnot dokázal zaznamenat multimetr s připojenými kleštěmi MN 71. Hodnoty však nejsou nijak zvlášť přesné. Hodnoty by měly v závislosti na vzdálenosti klesat. V grafu je ale jasně vidět, že hodnoty ve 2 centimetrech začaly lehce stoupat. Tohle mohlo být zapříčiněno vedením mezi multimetrem MN 71 a stolním multimetrem ESCORT 3136A. Při posouvání kleští od přípojnice se dvojlinka mohla dostávat více nebo méně do magnetického pole přípojnice a tím se indukovalo větší či menší napětí.



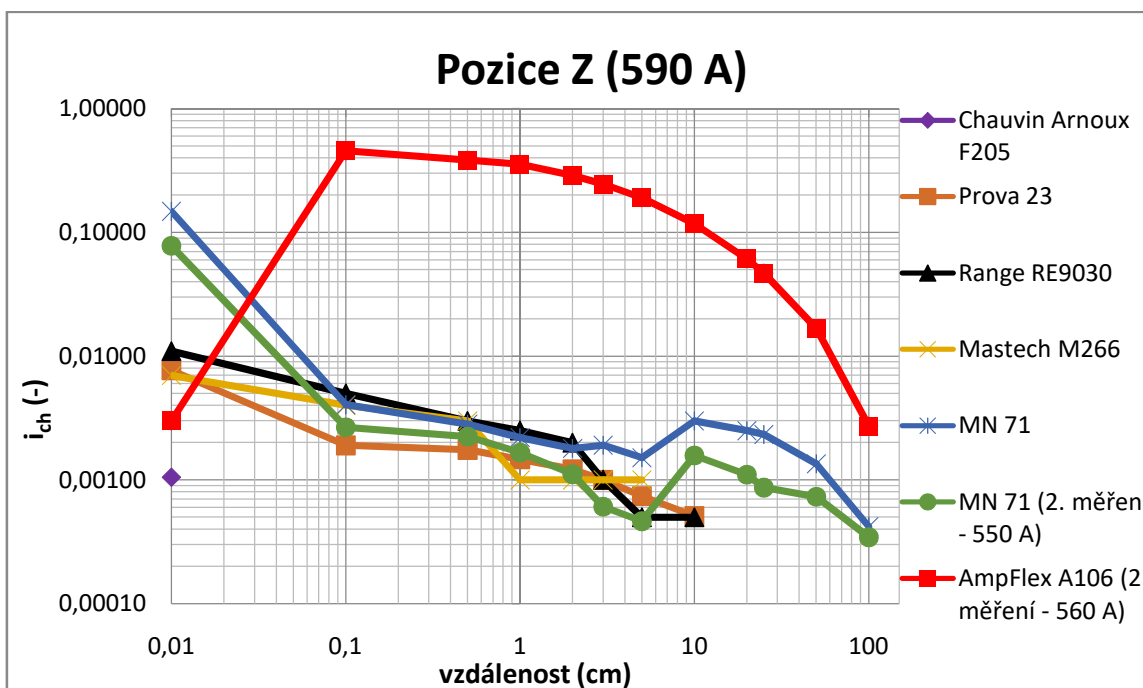
Obrázek 21 Zapojení kleští MN 71 a multimetru ESCORT

Stejný nárůst je vidět i u multimetru Range RE9030, kde přístroj zaznamenal hodnoty do vzdálenosti 0,5 cm. Při měření mělo velký vliv na výkyvy hodnot i natočení multimetru – mírné odklony od ideální osy X, Y, resp. Z způsobené držením přístrojů v ruce.



Obrázek 22 Přepočtené hodnoty v pozici Y

Ve druhé pozici, která je na Obr. 22, vznikla chyba u měřicího přístroje Prova 23, kde druhá hodnota opět vzrostla.



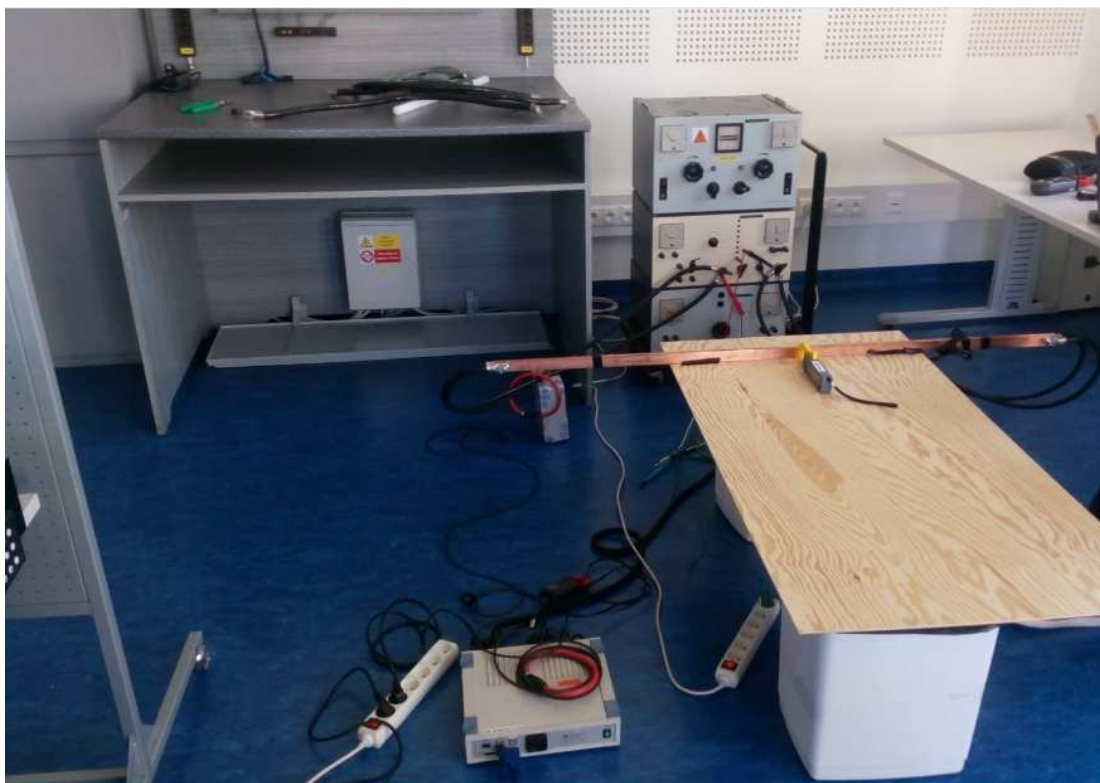
Obrázek 23 Přepočtené hodnoty v pozici Z

V pozici Z měřicí přístroj Chauvin Arnoux F205 zaznamenal jen jednu hodnotu, kdy byl přímo nad přípojnicí. V dalších vzdálenostech snímač nezaznamenal vůbec nic. V této poloze byl tedy zvolený snímač nejméně ovlivněn vnějším magnetickým polem. U měřicího přístroje MN 71 se v

posledních vzdálenostech projevila chyba metody. Stejný problém jako u měření pozice X. Ostatní multimetry byly ovlivněny jen do vzdálenosti deseti centimetrů (s výjimkou průběhů z druhého měření). V této poloze jsou tedy snímače proudu nejvíce odolné vůči vnějšímu magnetickému poli lineární přípojnice.

3.2 Druhé měření pomocí síťového analyzátoru

3.2.1 Zapojení měření



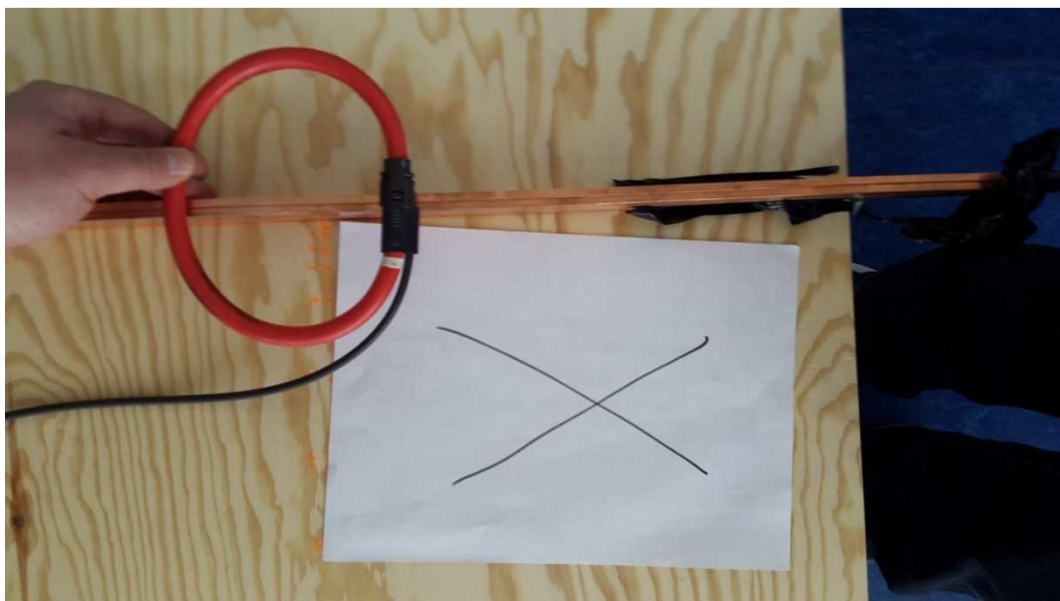
Obrázek 24 Zapojení měření s analyzátozem ENA330

Měření pro MN 71 bylo provedeno opět ve třech stejných pozicích jako měření předchozí a pro AmpFlex jsou jednotlivé polohy zobrazeny níže na obrázcích 25, 26 a 27, jelikož konstrukce Rogovského senzoru (AmpFlex) je odlišná od konstrukce klešťových přístrojů. Tentokrát ale měření probíhalo jen pro proudy 300 A a 560 A (550 A). Toto měření bylo provedeno na nižším nastaveném proudu, než první měření. Při dlouhém zapnutí zdroje začaly vznikat tepelné ztráty, kabely a přípojnice se začaly dost oteplovat a proud bylo možno nastavit pouze na 560 A pro měření s AmpFlexem. Při změně měřicího přístroje na MN 71 proud na zdroji znovu poklesl na hodnotu cca 550 A. Vliv na pokles proudu měla také velikost proudové smyčky, a tedy její indukčnost. Tepelné ztráty mohly být redukovány přidáním dalších kabelů do vedení, nebo záměnou kabelů za kabely s vyšším průřezem.

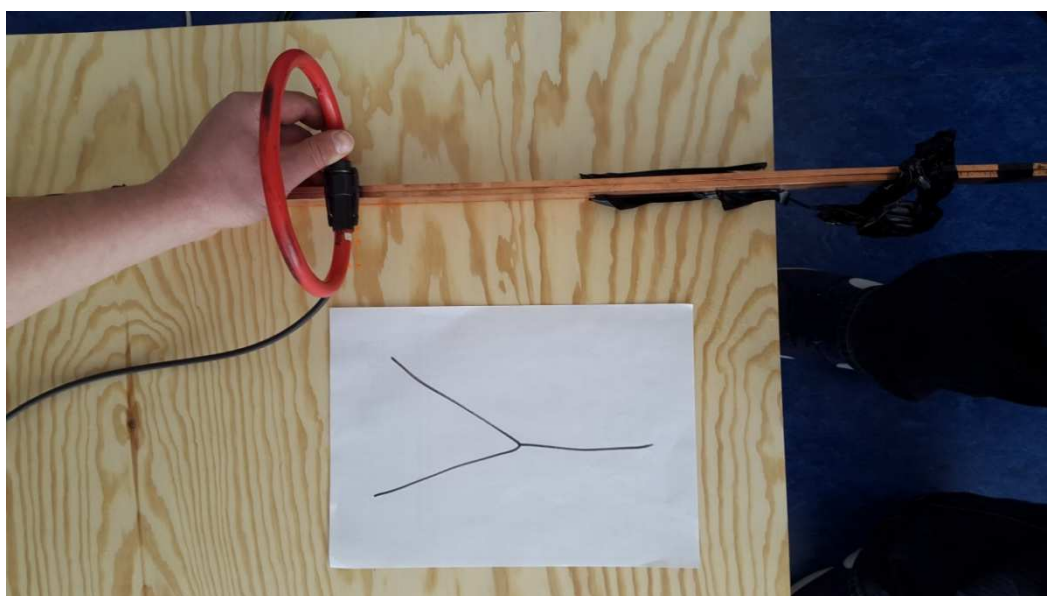
Analyzátor ENA330 měl nastaven interval ukládání každých 0,2 sekund. Hodnoty se poté uložily do tabulkového souboru. Z naměřených hodnot poté byla vytvořena Kontingenční tabulka, pro seskupení a přehlednost celého měření.

3.2.2 Použité měřicí přístroje

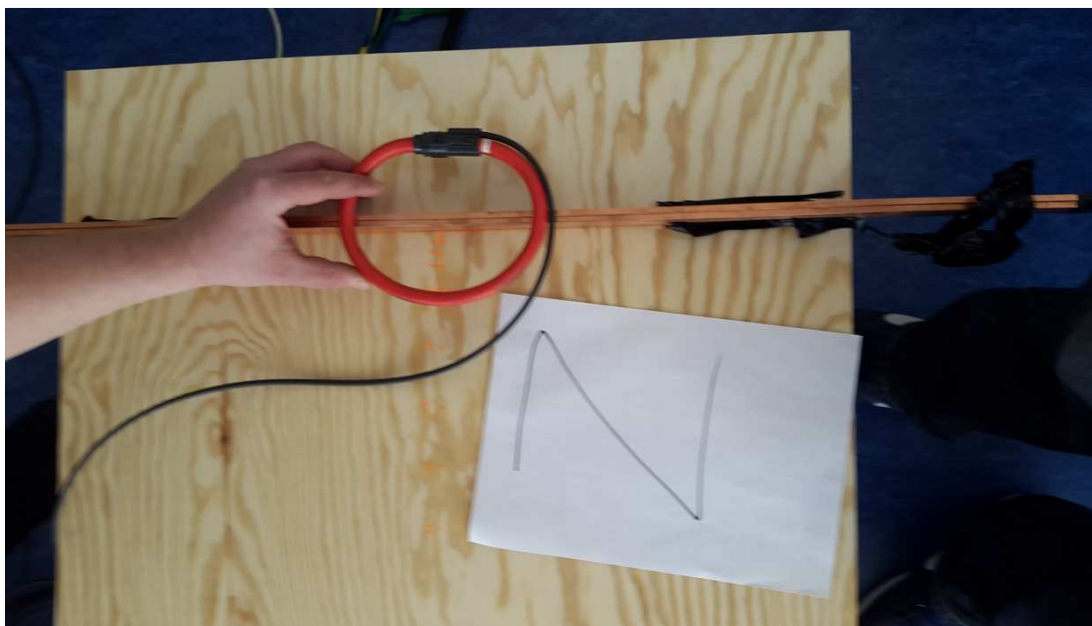
Pro druhé měření byly použity Chauvin Arnoux MN 71 a AmpFlex A106, které byly připojeny na síťový analyzátor ENA330. V obvodu byl zapojen ještě další AmpFlex, který měl nastaven rozsah 3000 A. Podle něj byl nastavován proud na použitém zdroji.



Obrázek 25 Pozice X převodníku AmpFlex A106



Obrázek 26 Pozice Y převodníku AmpFlex A106



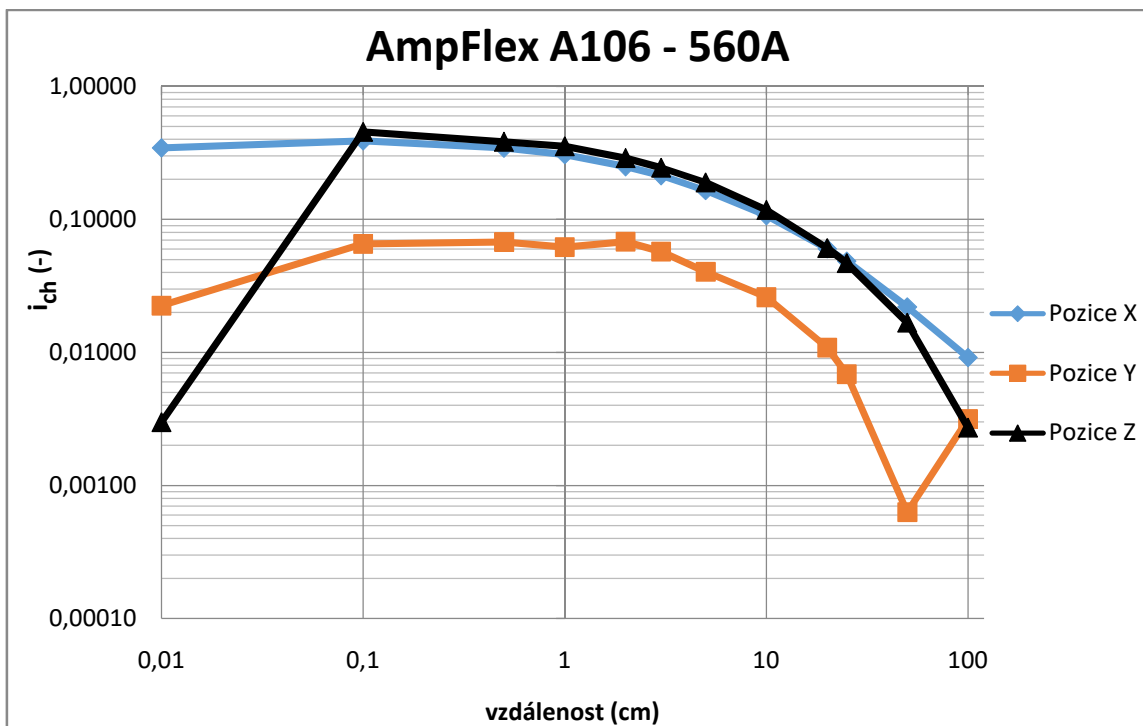
Obrázek 27 Pozice Z převodníku AmpFlex A106

3.2.3 Naměřené hodnoty druhého měření

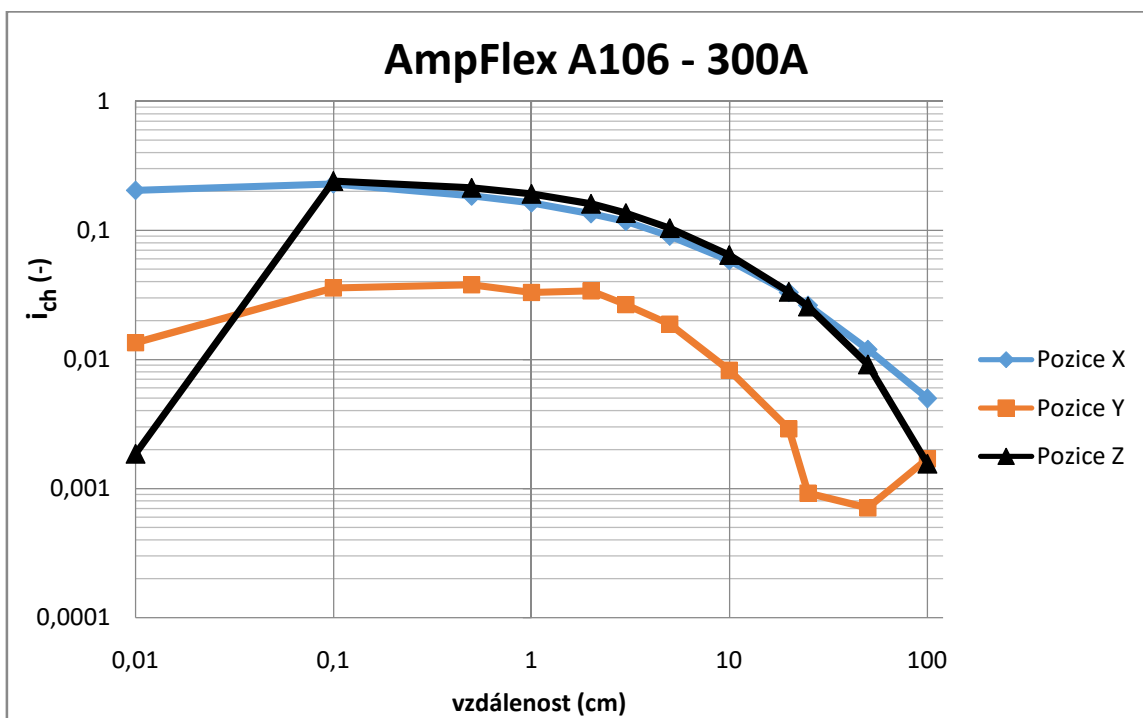
Tabulka 4 Použité měřicí přístroje a nastavené rozsahy

Měřicí přístroj	Rozsah
AmpFlex A106	30 A
Chauvin Arnoux MN 71	10 A

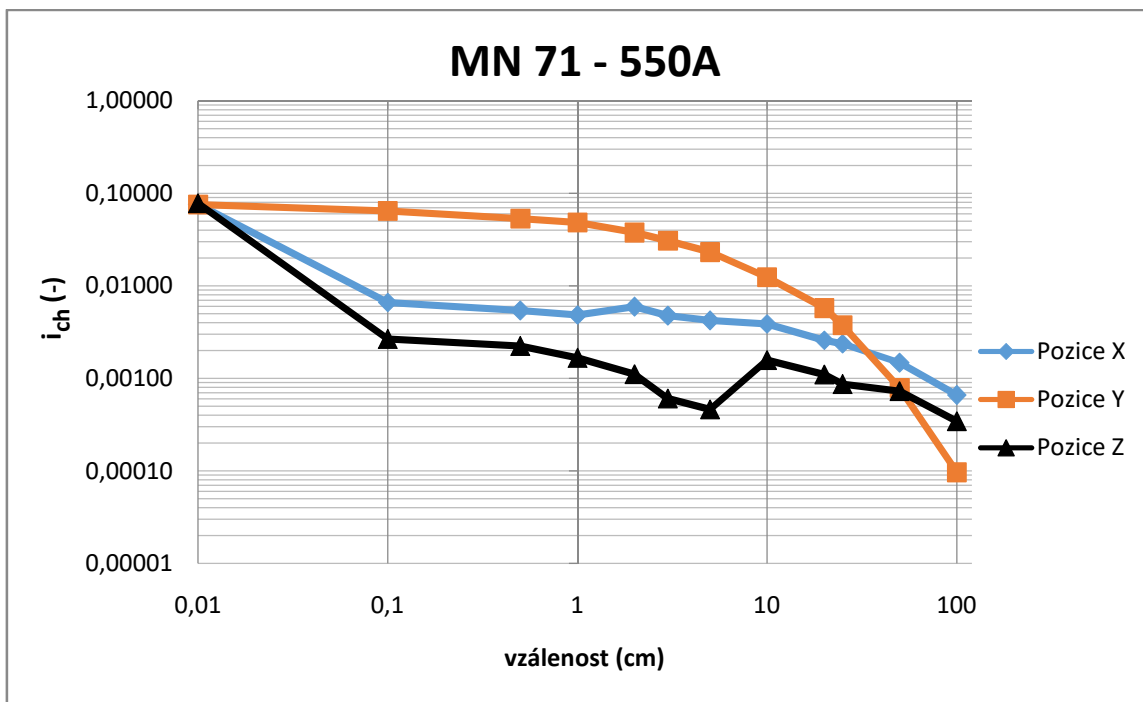
Na obrázcích 28 a 29 při měření s AmpFlexem je vidět, že poslední měřená hodnota u pozice Y poskočila jak při proudu 560 A tak i u 300 A. Je možné, že v té poslední vzdálenosti byl zachycen jiný signál, protože se opakuje stejně u obou měření - 300 i 560 A. Na pozici Z se projevila chyba metody. AmpFlex byl pravděpodobně špatně přiložen a odklonil se od osy měření. Stejně tak u MN 71 ve vzdálenosti deseti centimetrů hodnota v pozici Z při 550 A mírně vzrostla a při 300 A naopak poklesla. Pravděpodobně zapříčiněno špatným držetím kleští nebo zachycením rušivého signálu.



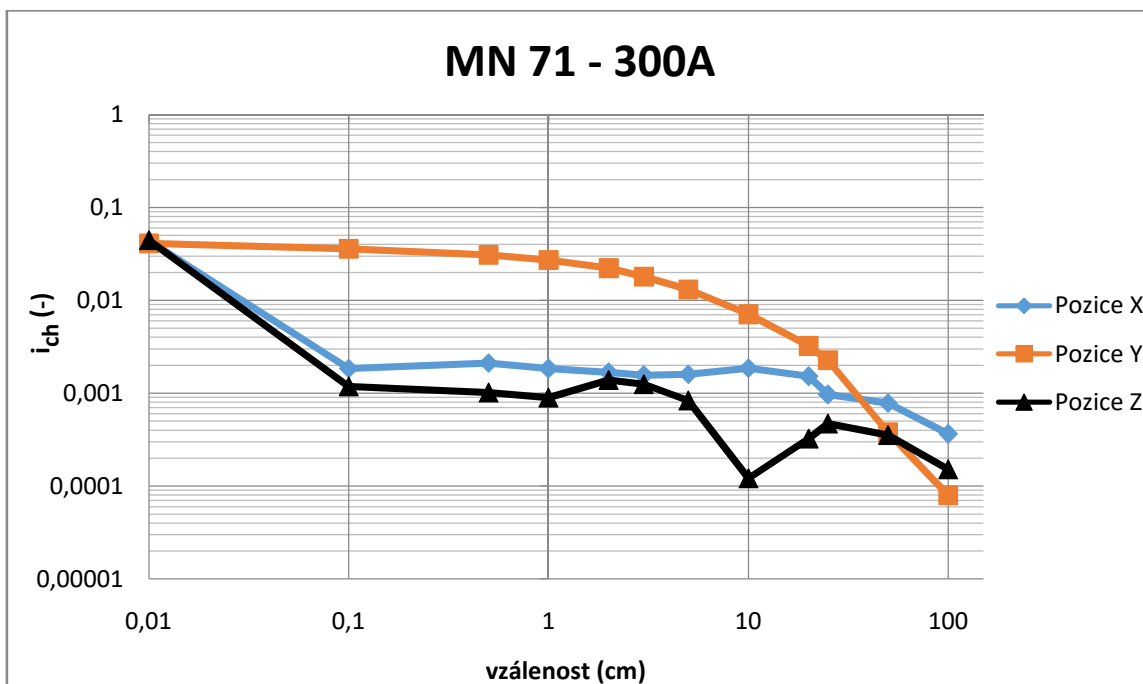
Obrázek 28 Přepočtené hodnoty pro AmpFlex A106 (560 A)



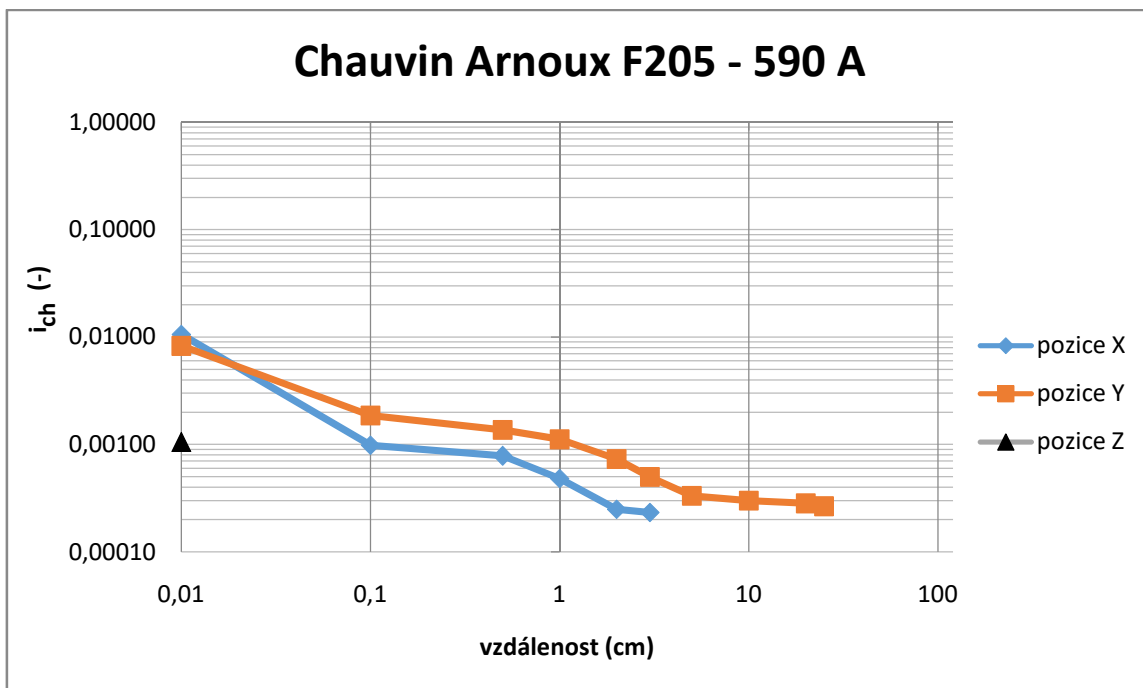
Obrázek 29 Přepočtené hodnoty pro AmpFlex A106 (300 A)



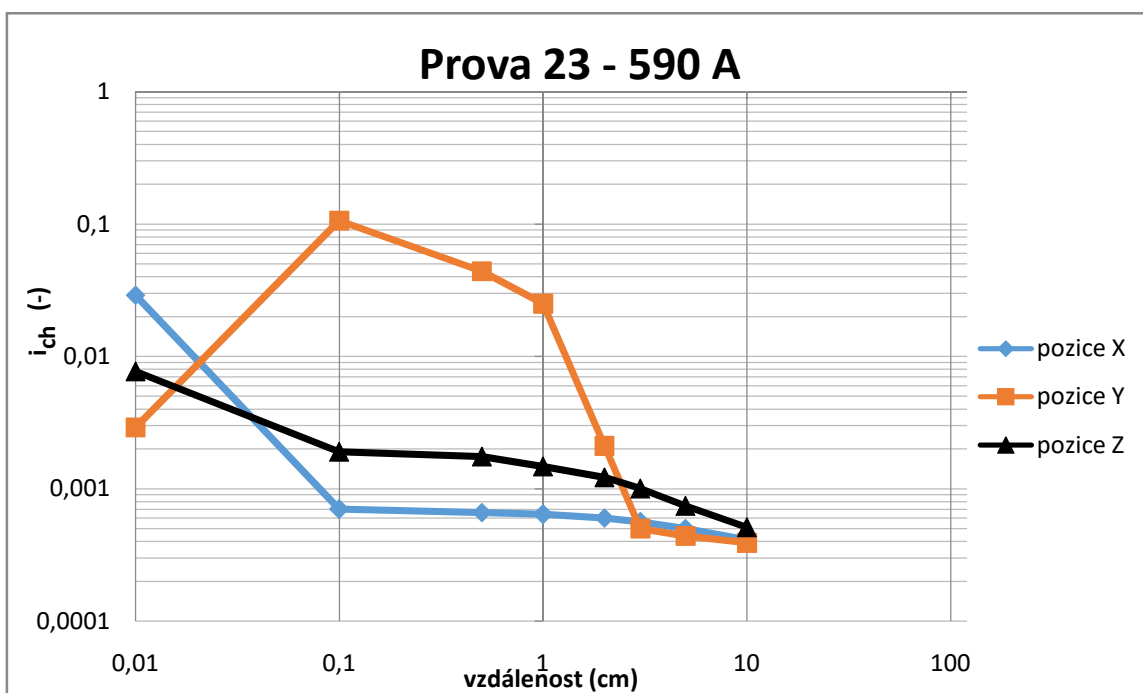
Obrázek 30 Přepočtené hodnoty pro MN 71 (550 A)



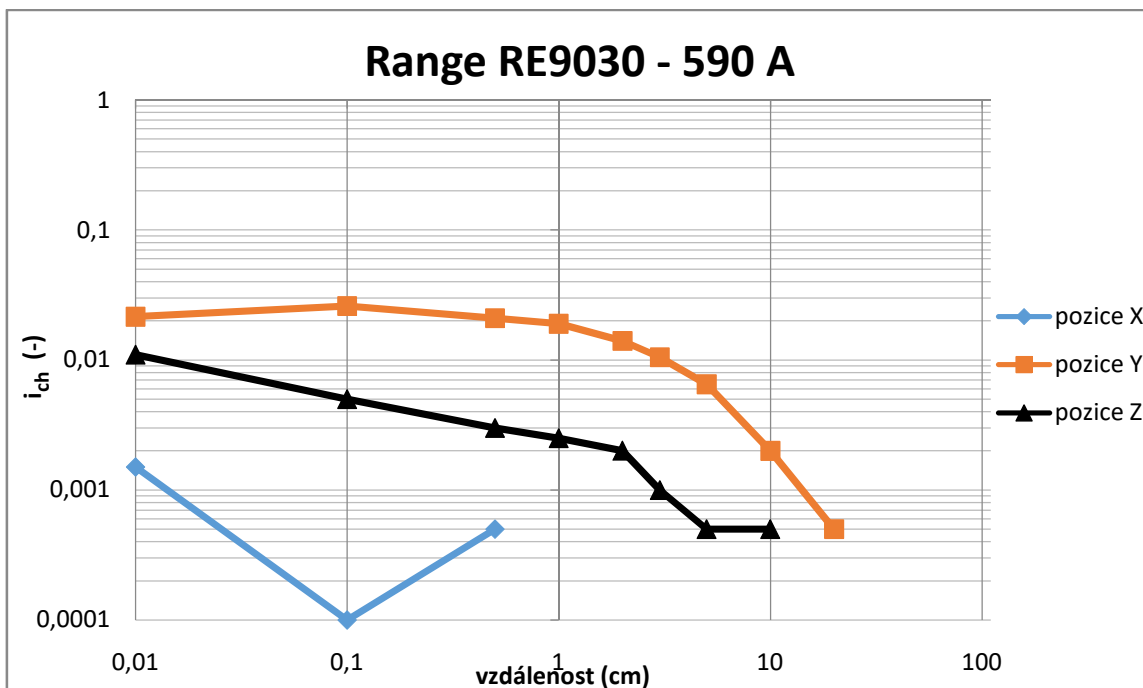
Obrázek 31 Přepočtené hodnoty pro MN 71 (300 A)



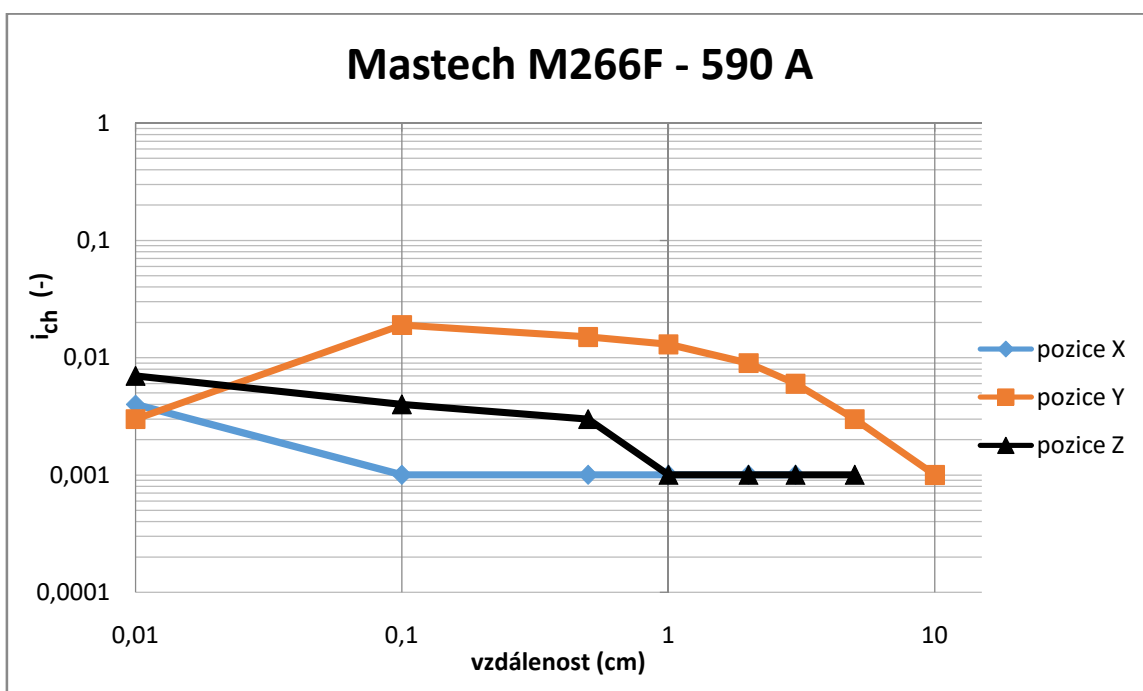
Obrázek 32 Přepočtené hodnoty pro Chauvin Arnoux F205



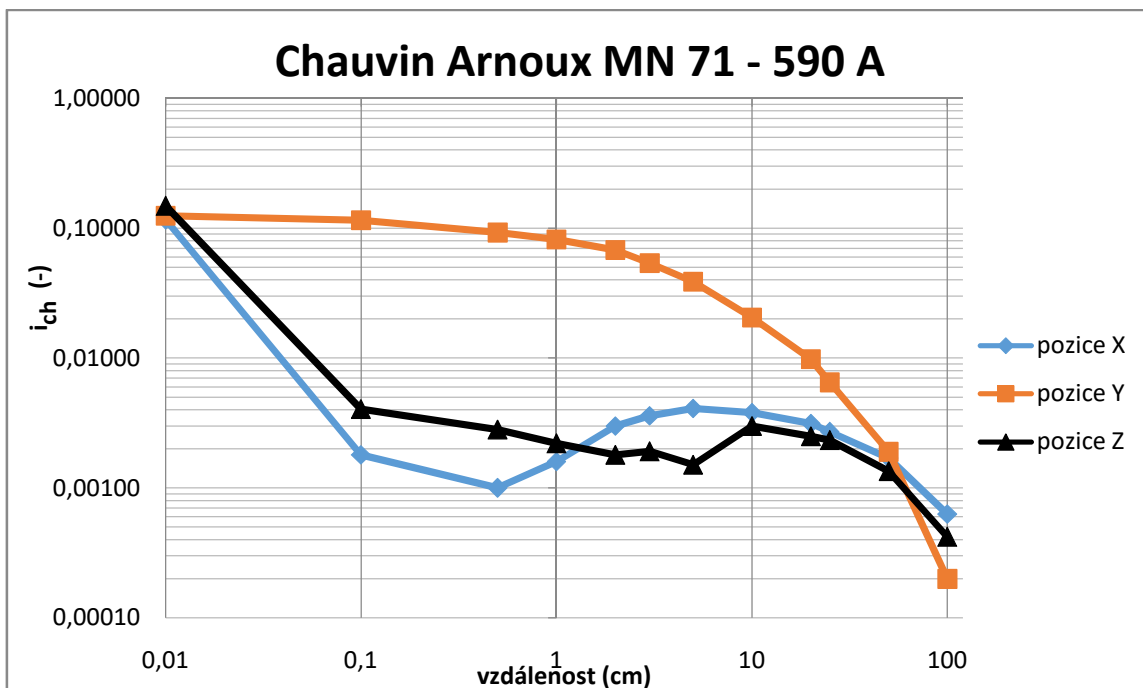
Obrázek 33 Přepočtené hodnoty pro multimetr Prova 23



Obrázek 34 Přepočtené hodnoty pro multimetr Range RE9030



Obrázek 35 Přepočtené hodnoty pro multimetr Mastech M266F



Obrázek 36 Přepočtené hodnoty pro kleště Chauvin Arnoux MN 71

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce, bylo vyhodnotit vybrané klešťové snímače proudu. V teoretické části práce jsem se věnoval různým způsobům měření elektrického proudu. Od měření pomocí Rogowského cívky, přes měřicí transformátory proudu až po klešťové multimetry.

V druhé části práce probíhalo samotné měření pomocí pěti vybraných klešťových měřících přístrojů. Čtyři z pěti zvolených přístrojů měřili proud přímo. Výstup byl zobrazen na displeji. Pátý zvolený měřicí přístroj, byly jen kleště bez elektroniky, které byly připojeny na stolní multimetr a jeho výstupem bylo napětí, které bylo nutno přepočítat podle převodového poměru, který byl uveden na kleštích. Dalším snímačem pro měření proudu byla flexibilní Rogowského cívka - AmpFlex. Ta byla připojena spolu s kleštěmi MN 71 na síťový analyzátor ENA330.

V prvním měření byly nejvíce ovlivněny vnějším magnetickým polem kleště MN 71. Ty dokázaly zaznamenat hodnoty i v metru od měřené přípojnice. Nejvíce se to projevilo v pozici Y. Ve zbylých dvou pozicích vznikla ve větších vzdálenostech chyba metody. Naopak nejméně byl ovlivněn multimetr Chauvin Arnoux F205. V pozici Z byl ovlivněn, jen když byl přímo nad přípojnici. Dále snímač nezaznamenal vůbec nic. V porovnání všech tří pozic, byly měřicí přístroje nejvíce odolné magnetickému poli v pozici Z.

Ve druhém měření vnější magnetické pole více ovlivnilo Rogowského cívku - AmpFlex. Nejvíce v pozici X ve vzdálenosti 0,01 cm. V dalších vzdálenostech se hodnoty téměř shodovaly s pozicí Z. Na měřené pozici Y v maximální vzdálenosti 100 cm hodnoty u obou měřených proudů vyskočili. Je možné, že AmpFlex zaznamenal cizí signál, což zapříčinilo výkyv.

5 Literatura

1. PATOČKA, Miroslav: *Magnetické jevy a obvody ve výkonové, měřicí a silnoproudé elektrotechnice*. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6
2. *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9
3. Klešťové ampérmetry. *ProfiElektrika.cz* [online]. Brno: Elektrika.info, 2006 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2006-02-19.2440432907/view>
4. Hallova sonda. *ProfiElektrika.cz* [online]. Brno: Elektrika.info, 2006 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2006-04-01.2480110481>
5. ČSN EN 61869-2: Dodatečné požadavky na transformátory proudu. Brno: ORGREZ, 2013.
6. HOFMANN, J., URBANOVÁ, M. *Fyzika II*. Praha: VŠCHT, 2000. 216 s.
7. Černý, O. *Měření feromagnetických materiálů* [online]. Laboratorní cvičení, SPŠE v Plzni [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.kotous.xf.cz/fero.doc>
8. Lineární model transformátoru. *Elektrorevue* [online]. Brno: Ing. Radek Stupka, 2005 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05032/index.html>
9. Měřicí technika. *Conrad* [online]. Praha: ConradElektronik, c2017 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/klestovy-multimetr-chauvin-arnoux-f205-ac-dc.k102537>
10. Co je, k čemu je a jak funguje Rogowského cívka? *Hw.cz: automatizace.hw.cz* [online]. Praha: HW server, c1997-2014 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>
11. KUBÁČ, Bc. Stanislav. *Návrh digitálního optického výstupu* [online]. Brno, 2009. Diplomová práce na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na Vysokém učení technickém v Brně. Vedoucí diplomové práce Stanislav Klusáček [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30296825.pdf>
12. Prokop, V. Požadavky diferenciálních ochran na přístrojové transformátory proudu, *Energyspectrum* ISSN 1214-7044, Volume 0 (2003 - 2005), Issue 1 (2003 - 2005), s.58-62.

Přílohy

Příloha 1 Naměřené hodnoty prvního měření

Tabulka P5 Naměřené hodnoty pro Chauvin Arnoux F205

vzdálenost (cm)	pozice X			pozice Y			pozice Z		
	590 A	300 A	100 A	590 A	300 A	100 A	590 A	300 A	100 A
0,01	6,34	3,36	1,12	4,97	2,1	0,67	0,63	0,56	0,18
0,1	0,59	0,46	0,18	1,12	1,07	0,44	0		
0,5	0,47	0,36	0,15	0,82	0,94	0,4			
1	0,29	0,28		0,67	0,77	0,31			
2	0,15	0,2		0,44	0,62	0,23			
3	0,14	0,15		0,3		0,19			
5				0,2		0,15			
10				0,18					
20				0,17					
25				0,16					

Tabulka P6 Naměřené hodnoty pro Prova 23

vzdálenost (cm)	pozice X			pozice Y			pozice Z		
	590 A	300 A	100 A	590 A	300 A	100 A	590 A	300 A	100 A
0,01	2,9	0,16	0,067	0,29	0,15	0,062	0,77	0,215	0,05
0,1	0,07	0,046		10,6	0,21	0,062	0,19	0,07	0,045
0,5	0,066	0,045		4,4	0,14	0,056	0,175	0,071	0,038
1	0,064	0,043		2,5	0,095	0,045	0,147	0,069	0,037
2	0,06	0,04		0,211	0,054	0,04	0,122	0,059	
3	0,056	0,038		0,05	0,037		0,1	0,053	
5	0,05			0,044			0,074	0,045	
10	0,041			0,039			0,051		

Tabulka P7 Naměřené hodnoty pro Range RE9030

vzdálenost (cm)	pozice X			pozice Y			pozice Z		
	590 A	300 A	100 A	590 A	300 A	100 A	590 A	300 A	100 A
0,01	0,3	0,1	0,1	4,3	2,2	0,6	2,2	0,5	0,1
0,1	0	0		5,2	1,4	0,7	1	0,1	
0,5	0,1			4,2	1,2	0,7	0,6	0,1	
1				3,8	1	0,5	0,5	0,1	
2				2,8	0,7	0,3	0,4	0,1	
3				2,1	0,5	0,2	0,2		
5				1,3	0,3	0,1	0,1		
10				0,4	0,1		0,1		
20				0,1					

Tabulka P8 Naměřené hodnoty pro Mastech M266F

vzdálenost (cm)	pozice X			pozice Y			pozice Z		
	590 A	300 A	100 A	590 A	300 A	100 A	590 A	300 A	100 A
0,01	4	1	1	3	2	1	7	3	1
0,1	1	1		19	8	1	4	1	
0,5	1	1		15	6	1	3	1	
1	1	1		13	5		1	1	
2	1	1		9	3		1	1	
3	1	1		6	2		1	1	
5				3	1		1		
10				1	1				

Tabulka P9 Naměřené hodnoty pro MN 71 (výstupem bylo napětí)

vzdálenost (cm)	pozice X			pozice Y			pozice Z		
	580 A	300 A	100 A	580 A	300 A	100 A	580 A	300 A	100 A
osa	116mV	56mV	17,1mV	124,6mV	55mV	12,9mV	148mV	63mV	20,9mV
0	1,8	4	2,17	115	52,7	14,2	4,05	2,15	4,9
0,5	1	3,4	1,97	92,5	44	13,4	2,82	1,6	4
1	1,6	2,6	1,96	82	39,4	13	2,2	0,82	3,4
2	3	2,55	1,7	68	31,5	11,7	1,8	0	2,4
3	3,6	1,72	1,57	53,8	25,6	10,4	1,91	0,4	1,7
5	4,09	1,46	1,36	38,7	18,3	8,7	1,51	1	0,8
10	3,8	1,5	1,03	20,5	10,2	5,8	3	1,6	
20	3,14	1,63	0,69	9,8	4,5	3,4	2,5	1,4	
25	2,7	1,48	0,56	6,5	3,3	2,7	2,33	1,05	
50	1,7	0,93	0,27	1,9	0,59	1,1	1,35	0,53	
100	0,63	0,29	0,02	0,2	0	0,2	0,42	0,143	

Příloha 2 Naměřené hodnoty druhého měření

Tabulka P10 Naměřené hodnoty pro AmpFlex A106

vzdálenost (cm)	pozice x		pozice y		pozice z	
	560 A	300 A	560 A	300 A	560 A	300 A
0,01	10,39234	6,12450	0,67434	0,40443	0,08975	0,05577
0,1	11,73507	6,88028	1,96996	1,07082	13,67750	7,21548
0,5	10,34924	5,55275	2,03691	1,13398	11,50523	6,41306
1	9,23471	4,90481	1,85850	0,98893	10,65916	5,75242
2	7,51118	4,04031	2,04538	1,02230	8,67550	4,82251
3	6,42428	3,51904	1,72130	0,79722	7,36909	4,08074
5	4,96735	2,71233	1,21469	0,56204	5,70663	3,12699
10	3,21230	1,75865	0,78250	0,24697	3,53331	1,93190
20	1,81278	0,99288	0,32598	0,08711	1,83171	1,00181
25	1,45795	0,78845	0,20581	0,02763	1,40892	0,77148
50	0,66084	0,35926	0,01888	0,02124	0,50360	0,27468
100	0,27496	0,14948	0,09469	0,05072	0,08171	0,04679

Tabulka P11 Naměřené hodnoty pro Chauvin Arnoux MN 71 (převedeny na proud pomocí analyzátoru)

vzdálenost (cm)	pozice x		pozice y		pozice z	
	550 A	300 A	550 A	300 A	550 A	300 A
0,01	0,76541	0,43724	0,75787	0,41174	0,78104	0,44426
0,1	0,06632	0,01845	0,64685	0,35914	0,02661	0,01181
0,5	0,05403	0,02106	0,53471	0,30892	0,02236	0,01012
1	0,04864	0,01837	0,48445	0,27178	0,01663	0,00895
2	0,05946	0,01670	0,37770	0,22226	0,01114	0,01386
3	0,04763	0,01555	0,30837	0,17976	0,00608	0,01249
5	0,04222	0,01598	0,23198	0,13072	0,00463	0,00832
10	0,03891	0,01864	0,12456	0,07082	0,01577	0,00121
20	0,02583	0,01521	0,05762	0,03233	0,01101	0,00324
25	0,02374	0,00965	0,03754	0,02262	0,00866	0,00471
50	0,01478	0,00784	0,00789	0,00381	0,00730	0,00354
100	0,00661	0,00364	0,00097	0,00080	0,00344	0,00151