

# Měření proudu tlumivky

**Pracoviště:** Research and Innovation Centre  
**Číslo dokumentu:** 22190 – 003 – 2023  
**Typ zprávy:** Výzkumná zpráva  
**Řešitelé:** Luděk Elis  
**Vedoucí projektu:** Bohumil Skala  
**Počet stran:** 16  
**Datum vydání:** 19.03.2023  
**Oborové zařazení:** 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Automation and control system

**Zadavatel / zákazník:**  
Elzat, s.r.o.  
Bezděkovská 760  
262 42 Rožmitál pod Třemšínem  
Česká republika

**Zpracovatel / dodavatel:**  
Západočeská univerzita v Plzni  
Research and Innovation Centre  
for Electrical Engineering  
Univerzitní 8  
306 14 Plzeň  
**Kontaktní osoba:**  
Bohumil Skala  
tel. 377 634 473  
skalab@fel.zcu.cz

**Tato zpráva vznikla s podporou CZ.01.1.02/0.0/0.0/20\_321/0024444**

## **Anotace**

Tato výzkumná zpráva se zabývá návrhem měření proudu tlumivky. Předpokládá se, že proud bude měřen v prostřední fázi. Velikost proudu bude zobrazována displejem nebo dále zpracovávána v nadřazeném zařízení. Připojení je možné na vzdálenost nižších desítek metrů.

## **Klíčová slova**

Proudový transformátor, měření proudu

## **Název zprávy v anglickém jazyce / Report title**

Current measurement of the inductor

## **Anotace v anglickém jazyce / Abstract**

This research report deals with the current measurement design of a 3f choke. It is assumed that the current will be measured in the middle phase. The magnitude of the current will be shown by the display or further processed in the superior device. Connection is possible at a distance of few tens of meters.

## **Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords**

Current transformer, current measurement

## Seznam symbolů a zkratk

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>SNÍMAČE PROUDU S HALLOVÝM EFEKTEM</b> .....	<b>5</b>
2.1	PRŮVLEKOVÉ HALLOVY SNÍMAČE .....	5
2.2	INTEGROVANÉ HALLOVY SNÍMAČE PŘÍMÉ .....	6
2.3	INTEGROVANÉ HALLOVY SNÍMAČE PŘÍLOŽNÉ .....	6
2.3.1	<i>FHS 40P/SP600</i> .....	7
2.3.2	<i>MLX91206</i> .....	7
<b>3</b>	<b>PROUDOVÝ TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>DIGITÁLNÍ KOMBINOVANÝ VOLTMETR S AMPÉRMETREM AD101-22VAM</b> .....	<b>9</b>
4.1	ROZMĚRY .....	9
4.2	VNITŘNÍ ŘEŠENÍ ELEKTRONIKY .....	10
4.3	SNÍMAČ PROUDU - PROUDOVÝ TRANSFORMÁTOR .....	10
4.4	TESTOVÁNÍ .....	11
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>13</b>

## 1 Úvod

Elektrický proud je možné měřit několika způsoby, všechny ale využívají převodu na elektrické napětí, které je možné následně snadno elektronicky zpracovávat. Základní možnosti převodu proudu na napětí jsou tři:

- Bočník
- Sensor s Hallovoú sondou
- Proudový transformátor

Na bočníku je možné přímého měření úbytku napětí. Nevýhodou bočníku je ale omezený rozsah měřených proudů, který pro velké proudy vede na velký ztrátový výkon. Především ale není bočníkem možné galvanického oddělení měření, a proto nebude dále tento způsob uvažován.

Hallův snímač je citlivý na magnetické pole, které vzniká v okolí vodiče procházeného proudem. Výstupní Hallovoú napětí je pak přímo úměrné velikosti proudu, respektive intenzitě magnetického pole v okolí vodiče. Velkou výhodou této metody měření je galvanické oddělení. Řada výrobců integrovaných obvodů nabízí různé řady integrovaných snímačů proudu založené na tomto principu. Některé vybrané typy jsou diskutovány v následující kapitole.

Poslední možností snímání proudu je pomocí proudového transformátoru. Podobně jako v případě Hallovaú snímače je i zde velkou výhodou galvanické oddělení měřeného proudu. Převod proudu na napětí je řešen snímacím rezistorem zapojeného na sekundární straně transformátoru. Systém měření proudu s použitím proudového transformátoru je rozpracován a použit níže.

## 2 Snímače proudu s Hallovým efektem

V této skupině senzorů je možné se setkat se třemi typy provedení:

- Prstencové / průvlekové
- Integrované přímé
- Integrované příložné

### 2.1 Průvlekové Hallovy snímače

Průvlekový snímač má výhodu v tom, že vodič se jen provlékne skrz prstenec a nemusí se přerušovat. Navinutím více závitů na prstenec dosáhneme snížení měřeného rozsahu – zvýšení citlivosti snímače. Lze tak jednoduše využít jednoho typu snímače pro více rozsahů. Například snímač s rozsahem 100 A bude použitelný také pro rozsahy 50 A či 25 A navinutím 2 nebo 4 závitů. Velké zastoupení průvlekových snímačů proudu zaujímá například společnost LEM USA, Inc. Na *Obrázek 1* je příklad průvlekového snímače proudu *LEM HO 100-S* s rozsahem 100 A.



Obrázek 1: Snímač proudu LEM HO 100-S [1].

Tento konkrétní typ má vysokou přesnost a linearitu. Mezi nevýhody lze vzhledem k zamýšlené aplikaci řadit relativně vysokou cenu (přibližně 24,- USD) a potřebu další úpravy signálu. Výstupní napěťový signál totiž kopíruje průběh proudu a pro reprezentaci efektivní hodnoty proudu by se dále musel ještě zpracovat. Další nevýhodou těchto čidel (netýká se uvedeného typu HO 100-S) je většinou potřeba symetrického napájení.

## 2.2 Integrované Hallové snímače přímé

Přestože tento typ snímačů je galvanicky oddělen vyžaduje přerušení vodiče, ve kterém chceme proud měřit a měřený proud zavést přímo do čipu. Dále jsou snímače z této kategorie vyráběny převážně s pájecími vývody což vyžaduje montáž snímače vždy na plošný spoj. Příklady integrovaných snímačů jsou na *Obrázek 2* a *Obrázek 3*.



Obrázek 2: Snímač proudu Allegro Microsystems ACS72981LLRATR-100B5 [2].



Obrázek 3: Snímač proudu Allegro Microsystems ACS758LCB-100B [2].

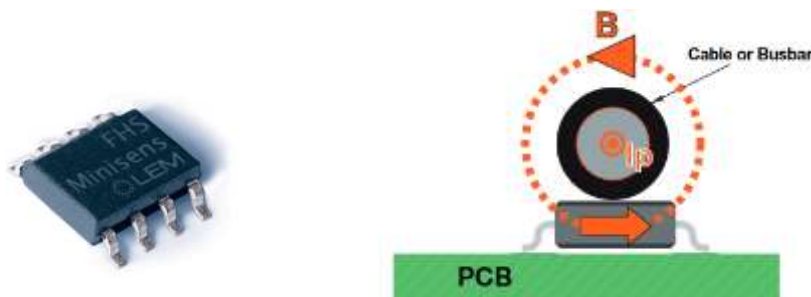
Stejně jako v případě průvlekových Hallových snímačů je i tohoto typu potřeba dalšího zpracování výstupního napěťového signálu pro reprezentaci efektivní hodnoty proudu.

## 2.3 Integrované Hallové snímače příložené

Další z možností využití Hallova jevu při měření proudu jsou integrované snímače, které proud měří nepřímo využitím magnetického pole vznikajícího v okolí proudem protékaného vodiče. Dalo by se říci, že jsou to spíše snímače magnetického pole. Velkou výhodou oproti přímým Hallovým snímačům nevyžadují přerušení vodiče, ve kterém chceme proud měřit. Představitelem takového snímače, který by vyhovoval požadavkům aplikace je například obvod *FHS 40P/SP600* (LEM USA, Inc.) viz *Obrázek 4* nebo *MLX91206* (Melexis) viz *Obrázek 5*.

### 2.3.1 FHS 40P/SP600

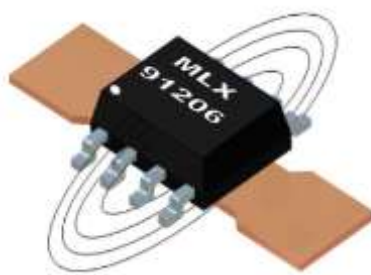
Obvod *FHS 40P/SP600* je galvanicky oddělený proudový převodník. Snímá magnetické pole generované měřeným proudem a převádí jej na výstupní napětí. Pokud je proud obousměrný, snímač zaznamená polaritu magnetického pole a generuje kladné nebo záporné výstupní napětí vzhledem k referenčnímu napětí. Obvod je kalibrován tak, aby se minimalizovaly odchylky a teplotní drifty.



Obrázek 4: Snímač proudu LEM *FHS 40P/SP600* [1].

### 2.3.2 MLX91206

*MLX91206* je monolitický integrovaný senzor s technologií Tria $\otimes$ is<sup>®</sup> Hall. Konvenční planární Hallova technologie je citlivá pouze na hustotu toku aplikovanou ortogonálně na povrch obvodu. Toho je dosaženo prostřednictvím integrovaného magneto-koncentrátoru (IMC-Hall<sup>®</sup>). Ideálně se používá jako proudový senzor s otevřenou smyčkou pro montáž na PCB nebo přímo podél vodiče (viz *Obrázek 5*). Vyznačuje se jednoduchou konstrukcí pro různé proudové rozsahy. Přenosová charakteristika *MLX91206* je programovatelná (offset, zesílení, úroveň upnutí, diagnostické funkce...). Výstup je volitelný mezi analogovým a PWM. Lineární analogový výstup se používá pro aplikace, kde je vyžadována velmi rychlá odezva (<10  $\mu$ sec), zatímco výstup PWM se používá pro aplikace, kde je vyžadována nízká rychlost, ale vysoká robustnost výstupního signálu.



Obrázek 5: Snímač proudu Melexis *MLX91206* [3].

Stejně jako u všech předchozích Hallových snímačů je i pro tyto typy potřeba dalšího zpracování výstupního napěťového signálu pro reprezentaci efektivní hodnoty proudu.

Obvod *FHS 40P/SP600* se nejprve jevil jako vhodný obvod, bohužel je zastaralý a již nelze zakoupit. *MLX91206* je a též zastaralý a špatně dostupný.

Vedle těchto dvou obvodů existují i jiné integrované snímače, nemají ale dostatečnou citlivost (600 mV/mT) pro měření proudů do 100 A, a proto nejsou dále zmiňovány.

### 3 Proudový transformátor

Proudové transformátory se na rozdíl od transformátoru napětí nebo výkonového transformátoru skládají pouze z jednoho nebo velmi malého počtu závitů primárního vinutí jež se provléká středovým otvorem, jak je znázorněno na *Obrázek 6*.



*Obrázek 6: Proudový transformátor Kemet CT-06-100 [4].*

Některé transformátory proudu mají "dělené jádro", které umožňuje jeho otevření, instalaci a uzavření, aniž by se odpojil obvod, k němuž jsou připojeny viz *Obrázek 7*.



*Obrázek 7: Proudový transformátor Magnelab SCT-0400-025 [5].*

Sekundární vinutí má většinou velký počet závitů navinutých na jádře s velkým průřezem a nízkými ztrátami tak, aby výstupní proud byl konstantní, nezávislý na připojené zátěži. Sekundární vinutí musí být zapojeno do zkratu v podobě ampérmetru, nebo do odporové zátěže. V průmyslu je sekundární proud standardizován hodnotu 1 nebo 5 Ampér, ale lze se setkat i s výrazně nižšími hodnotami v řádu tisícin Ampér.

Transformátor proudu oproti v úvodu zmíněných způsobů je jediný, který měří pouze v úzkém frekvenčním pásmu, obvykle 50 – 400 Hz. Z principu tak není schopen měřit stejnosměrný proud, což ale pro zamýšlenou aplikaci (dekompenzační nebo vstupní tlumivka) není limitující. Obecně jsou na trhu různá provedení co do proudového rozsahu tak i do konstrukce od řady renomovaných českých i světových výrobců. Cena takového proudového transformátoru bude několikanásobně vyšší než u integrovaného snímače založeného na Hallova jevu.

Důvod proč se i pře to tímto typem měření zabývat je dostupnost kompletního panelového měřiče proudu a napětí (včetně vlastního proudového transformátoru) za cenu nižší, než je cena za samotný snímač od například výše uvedených výrobců Halloových snímačů nebo proudových transformátorů. Příkladem takového měřiče je například typ *AD101-22VAM*.



## 4 Digitální kombinovaný voltmetr s ampérmetrem AD101-22VAM

Od řady prodejců je dostupný digitální ampérmetr v provedení viz *Obrázek 8* umožňující vestavbu do rozvaděče podobně jako běžné kontrolky s montážním otvorem 22 mm. Ampérmetr je navržený pro měření střídavých proudů do 100 A a frekvencí v rozsahu 20–80 Hz. Požadované napájecí střídavé napětí by mělo být v rozsahu 50–500 V. Dostupné jsou v pěti barevných provedeních. Cena jednoho kusu takového ampérmetru včetně proudového transformátoru se na českém trhu pohybuje kolem 150,- Kč. V zahraničních obchodech je cena přibližně poloviční - cca 3,50 USD.



*Obrázek 8: Digitální ampérmetr v panelovém provedení AD101-22AM.*

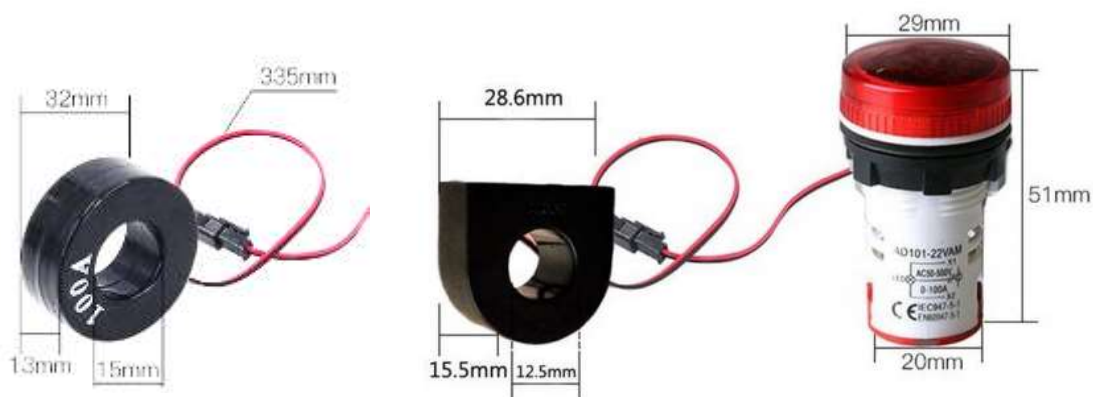
Vedle ampérmetru ve stejném panelovém provedení se vyrábí i voltmetry, wattmetry, teploměry a jejich kombinace. Přestože bylo požadavkem měření proudu, dále se budeme zabývat kombinací voltmetru s ampérmetrem s typovým označením AD101-22VAM.



*Obrázek 9: Digitální Voltmetr a ampérmetr v panelovém provedení AD101-22VAM.*

### 4.1 Rozměry

Ampérmetr je vybavený externím proudovým transformátorem, který je součástí balení měřidla. Velikost měřidla a dvou dodávaných variant proudového transformátoru jsou uvedeny na *Obrázek 10*.



*Obrázek 10: Rozměry AD101-22VAM a dvou variant proudových transformátorů [6].*

## 4.2 Vnitřní řešení elektroniky

Elektronika uvnitř měřidla je postavena na několika základních komponentách. Dominantní je plošný spoj se součástkami a LED displejem. Elektronika je napájena přímo z měřeného (síťového) napětí přes předřadný kondenzátor a omezující rezistor čímž je **měřič galvanicky spojen se sítí**.



Obrázek 11: Vnitřní zapojení elektroniky AD101-22VAM.

Jádrum elektroniky je mikrokontrolér u kterého byl odstraněn potisk. Nicméně se pravděpodobně jedná o 8-bit AVR mikrokontrolér z řady ATtiny v pouzdře SOIC-14. Mikrokontrolér měří analogové signály (proud případně i napětí) a hodnoty zobrazuje na LED displeji.

Proudový transformátor je k elektronice připojen přes konektor a přívodní vodiče procházejí do vnitřku měřidla, kde jsou zapájené do desky plošných spojů. Signál z proudového transformátoru je přes RC filtr snímán na zatěžovacím odporu 10 Ohm. Hodnota proudu zobrazovaná na displeji odpovídá napětí na snímacím odporu v poměru:

$$1 A \approx 10 mV$$

Za předpokladu tohoto poměru musí být pro hodnotu 1 A na displeji a snímacího odporu 10 Ohm proud sekundárním vynutím proudového transformátoru roven:

$$I_S (\text{při hodnotě } 1A \text{ na displeji}) = \frac{10 mV}{10 \Omega} = 1 mA$$

Z rovnice plyne, že **převodní poměr proudového transformátoru musí být 1000:1**. Pro proudové transformátory s jiným převodovým poměrem by bylo nutné změnit hodnotu snímacího odporu.

## 4.3 Snímač proudu - proudový transformátor

V balení měřidla je dodáván externí proudový transformátor s rozsahem do 100 A. Setkat se můžeme se dvěma provedeními viz *Obrázek 10*. Jeho převodní poměr je 1000:1. Proudový transformátor je možné zakoupit i samostatně v zahraničních internetových obchodech na dálném východě. Cena za jeden kus se pohybuje kolem 0,65 USD.

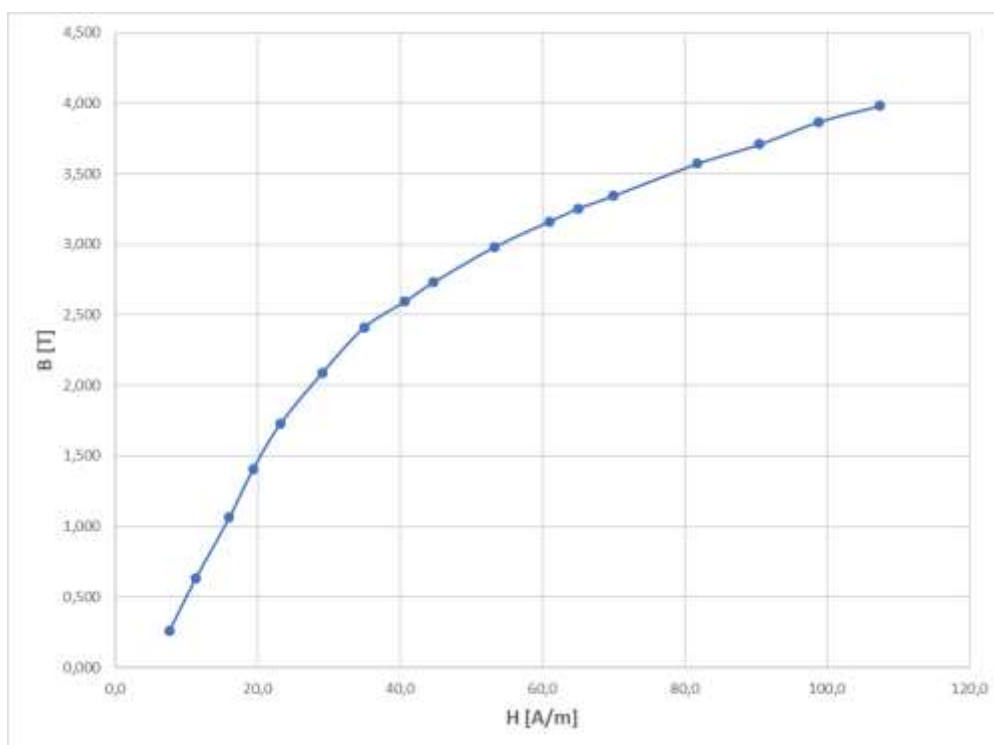
Z proudového transformátoru byl demontován ochranný plastový kryt a následně i část vinutí pro detailnější představu o konstrukci viz *Obrázek 12*.

Sekundární vinutí je tvořeno přibližně 1000 závitů (s přesností  $\pm 50$  závitů) vinuté drátem o průměru 0,1 mm. Jádro je vyrobeno z permalloy plechu o síle 0,26 mm svinutého do toroidního tvaru 17 závitů s vnějším průměrem 27 mm, vnitřním průměrem 18 mm a výškou 6 mm.



Obrázek 12: Vnitřní uspořádání proudového transformátoru 100 A - 1000:1. Vlevo odstraněný kryt, vpravo samotné jádro z permalloy.

Také bylo provedeno měření magnetizační charakteristiky viz následující obrázek.



Obrázek 13: Změřená charakteristika proudového transformátoru (součást AD101-22VAM).

#### 4.4 Testování

Při testování několika kusů měřidla se ukázalo, že zobrazované napětí a proud neodpovídají skutečným hodnotám, avšak odchylka se vždy pohybovala v rámci deklarované 1% tolerance. V rámci testů bylo provedeno měření s prodlouženým kabelem proudového transformátoru. Prodloužení bylo provedeno dvoužilovým nekrouceným kabelem o celkové délce více jak 50 m, přičemž více jak polovina kabelu byla volně položena na podlaze halové laboratoře a to v blízkosti právě testovaného výkonového měniče. Zbytek kabelu byl navinutý na cívce. Toto prodloužení nijak neovlivňovalo zobrazovanou hodnotu měřidla.

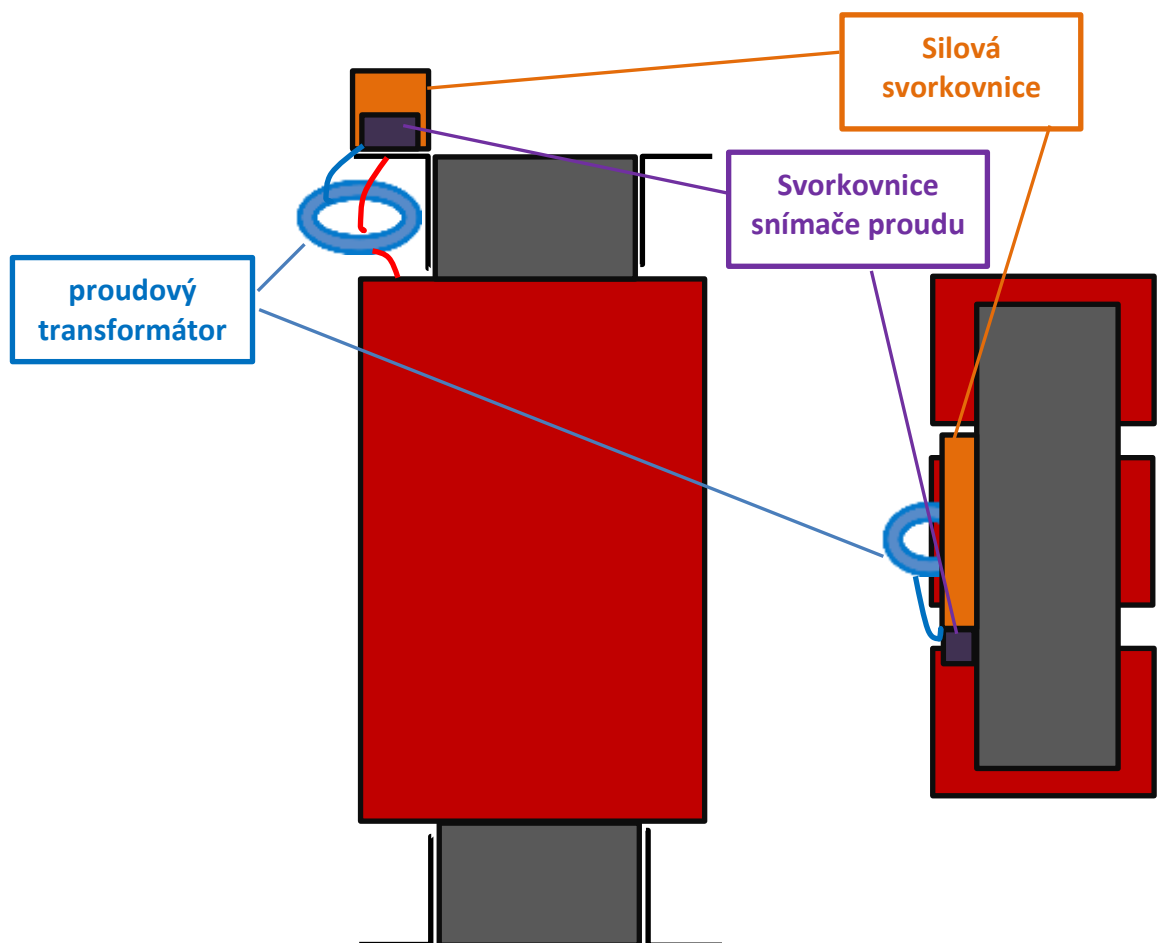


Obrázek 14: Testování AD101-22VAM s prodlouženým vedením snímače proudu (prodloužení bylo cca 30 m a procházelo kolem výkonového měniče).

## 5 Závěr

Ze zprávy vyplývá několik velmi důležitých závěrů:

- Měření proudu pomocí snímacího odporu není možné galvanicky oddělit.
- Vhodné Hallovy snímače jsou drahé a vyžadují další zpracování jejich signálu.
- Běžné proudové transformátory od předních tuzemských i světových výrobců jsou drahé a vyžadují další zpracování (zobrazovač).
- Jako levné a jednoduché řešení se jeví použití hotového měřidla proudu, jehož součástí je snímač (proudový transformátor) a zobrazovač v podobě panelové kontrolky
- Proudový transformátor bude umístěn přímo na tlumivce, a to na vývodu vodiče z cívky, před připojením na svorkovnici tlumivky. Transformátor bude na tlumivce připevněn bandáží a následně impregnován s tlumivkou.



- Pro malé proudy je možné citlivost snímače zvýšit provedením několika průvleků silového vodiče. Pak je ovšem nutné údaj měřidla proudu dělit počtem průvleků. V nadřazeném systému je popř. možné upravit konstantu a proud pak bude přímo v (A).
- Tlumivka bude doplněna svorkovnicí pro připojení proudového měřidla nebo pro zapojení signálu proudu do nadřazeného systému.
- Svorkovnice proudového transformátoru bude z výroby osazena zkratovací propojkou – proudový transformátor nesmí pracovat bez zátěže.
- Vzdálenost měřidla od tlumivky může být nižší desítky metrů.
- V případě potřeby je možné signál z proudového transformátoru zpracovávat v nadřazeném (řídícím) systému, přičemž odpor smyčky sekundárního okruhu by neměl překročit  $100 \Omega$ .

## Literatura

- [1] <https://www.lem.com>
- [2] <https://www.allegromicro.com>
- [3] <https://www.melexis.com/>
- [4] <https://www.kemet.com>
- [5] <https://www.magnelab.com/>
- [6] <https://www.puhy.cz>

## Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	17.2.2023	L.Elis