

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Stanovení ztrát elektrického stroje kalorimetrickou
metodou**

**vedoucí práce: Ing. Roman Pechánek PhD.
autor: Bc. Jakub Švařík**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub ŠVAŘÍK**
Osobní číslo: **E10N0080P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Stanovení ztrát elektrického stroje kalorimetrickou metodou**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s principy měření ztrát kalorimetrickou metodou.
2. Navrhněte vhodnou kalorimetrickou soustavu do laboratoří KEV. Soustavu realizujte a proveďte kalibrační měření. Definujte hlavní problémy při určování ztrát a kalibračního měření.
3. Na vhodném stroji proveďte určení ztrát pomocí kalorimetrické metody. Toto měření ověřte konvenčními metodami měření ztrát na elektrických strojích.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Aktuální články z časopisu IEEE
2. Boldea, I., Nasar, S.; The Induction Machine Handbook, CRC Press, 2002, ISBN 0-8493-0004-5
3. Ďaďo, S., Bejček, L., Platil, A.; Měření průtoku a výšky hladiny, Praha, BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-156-X


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Pechánek**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na konstrukci kalorimetru, jeho zprovoznění a ověření jeho využitelnosti pro měření elektrických ztrát. Jako měřený objekt byl zvolen třífázový asynchronní motor s klecí nakrátko.

Klíčová slova

Kalorimetr, elektrické ztráty, asynchronní motor, účinnost, měření ztrát.

Abstract

Presented master thesis is focused on the construction of calorimeter, its functioning and usage for measuring electric losses. As measured object was chosen a three-phase asynchronous motor with a squirrel cage.

Key words

Calorimeter, electrical losses, asynchronous motor, efficiency, loss measurement.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 4.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D. za profesionální a zároveň vstřícné vedení, za pomoc a za rady, kterých se mi dostalo.

Dále děkuji panu Zdeňku Brejchovi za ochotné zapůjčení prostor a prostředků nezbytných pro vlastní stavbu tohoto projektu.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 TEORETICKÝ ÚVOD DO PROBLEMATIKY	11
1.1 PRINCIP VYUŽITÍ KALORIMETRIE PRO STANOVENÍ EL. ZTRÁT	11
1.2 MOŽNÁ KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ KALORIMETRU	12
1.2.1 Otevřený okruh.....	13
1.2.2 Uzavřený okruh.....	13
1.3 PRAKTICKÉ POUŽITÍ KALORIMETRU	14
2 NÁVRH A KONSTRUKCE VLASTNÍ NÁDOBY A MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU	16
3 MĚŘENÍ TEPELNÝCH ZTRÁT KALORIMETREM	21
3.1 PRVNÍ KALIBRAČNÍ MĚŘENÍ	21
3.2 MĚŘENÍ TEPELNÝCH ZTRÁT ASYNCHRONNÍHO MOTORU	24
3.3 TECHNICKÉ ÚPRAVY SYSTÉMU	26
3.4 DRUHÉ KALIBRAČNÍ MĚŘENÍ	26
3.5 DRUHÉ MĚŘENÍ TEPELNÝCH ZTRÁT ASYNCHRONNÍHO MOTORU	27
3.6 SEZNAM POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ.....	28
ZÁVĚR	29
POUŽITÁ LITERATURA	30
PŘÍLOHY	1
EVIDENČNÍ LIST	3

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá projektem na Katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky zaměřeným na využití kalorimetrie pro měření celkových ztrát elektrických zařízení.

V následujících kapitolách bude popsán obecný princip metody, její využití, dále volba technických parametrů měřicího systému, vlastní konstrukce, prováděná měření a nakonec vyhodnocení naměřených dat a celého projektu.

Dlouhodobý přínos vyplývající z této práce je zkonstruování funkčního kalorimetru a posouzení možnosti jeho budoucího využití pro měření elektrických ztrát.

Seznam symbolů

$P_{př}$ [W].....	Příkon
P [W].....	Výkon využitý
ΔP [W].....	Ztrátový výkon
c_p [J/kgK].....	Měrná tepelná kapacita
ρ [kg/m ³].....	Hustota
Q_v [m ³ /s].....	Objemový průtok
ΔT_c [°C].....	Rozdíl teplot chladiva
ΔT_s [°C].....	Teplotní gradient stěn kalorimetru
α [-].....	Součinitel přestupu tepla
P_r [W].....	Výkon rezistorů
P_v [W].....	Výkon změřený kalorimetrem
T_1 [°C].....	Teplota vstupního chladiva
T_2 [°C].....	Teplota výstupního chladiva
t [min].....	Čas (trvání celého měření)
v [m/s].....	Rychlost proudění
Δ [%].....	Rozdíl výkonů

1 Teoretický úvod do problematiky

První kapitola je věnována popisu teoretických aspektů kalorimetrie, výhod jejího využití, možných technických provedení a jejich vlastností.

1.1 Princip využití kalorimetrie pro stanovení el. ztrát

Princip kalorimetrie je jednou z metod pro měření ztrát v elektrických zařízeních.

$$P_{\text{př}} = P + \Delta P \quad (1)$$

kde: $P_{\text{př}}$ je celkový činný výkon dodaný zařízení [W]

P je výkon konající práci [W]

ΔP je ztrátový výkon [W]

Z rovnice (1) vyplývá, že celkový příkon každého elektrického systému je roven součtu využitého výkonu a celkových ztrát. Tyto ztráty jsou způsobeny také jevy s těžko předvídatelným a měřitelným chováním (například vířivé proudy, proximity efekt, skin efekt, a jiné). Avšak ať už se jedná o ztráty elektrické, magnetické, či mechanické, vždy se ve výsledku projeví vznikem tepla [1].

V případech, kdy se hodnoty veličin udávající příkon či výkon prudce mění (například modulace proudu v pohonech s výkonovými měniči), jsou klasické elektrické metody měření značně nespolehlivé [1]. Řada měřících přístrojů je konstruována buď na stejnosměrné vyhlazené průběhy, nebo na čistě sinusové o síťovém kmitočtu. Následně vypočítané hodnoty oteplení pak mohou být značně odlišné od skutečnosti.

V takových případech se jeví vhodné měřit ztrátový výkon přímo, tedy kalorimetricky, což může být za určitých podmínek velice přesné. Pokud tedy umístíme sledované zařízení do uzavřeného a tepelně izolovaného prostoru s řízeným tokem chladiva, můžeme zjistit celkový ztrátový výkon ze změny teploty chladícího média. Musíme tedy znát tepelnou kapacitu chladiva, jeho objemový průtok, hustotu a rozdíl teploty před a po přivedení k objektu zájmu. Tento vztah je popsán rovnicí (2) [1][2][3].

$$\Delta P = c_p * \rho * Q_V * \Delta T_c \quad (2)$$

kde: c_p je měrná tepelná kapacita [J/kg]

ρ je hustota [kg/m^3]

Q_V je objemový průtok [m^3/s]

ΔT_c je rozdíl vstupní a výstupní teploty chladiva [$^{\circ}\text{C}$]

V případě, že uvažujeme nedokonalost kalorimetru, tedy teplo, které unikne do okolí skrze konstrukci měřicího systému, musíme rovnici (2) doplnit do tvaru (3) [1].

$$\Delta P = c_p * \rho * Q_V * \Delta T_c + \alpha * \Delta T_s \quad (3)$$

kde: α je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W/m}^{\circ}\text{K}$]

ΔT_s je teplotní spád skrz stěny kalorimetru [$^{\circ}\text{C}$]

Z takto získané hodnoty celkového ztrátového výkonu a hodnoty příkonu, nebo výkonu, lze dopočítat účinnost celého měřeného zařízení dle rovnic (4), nebo (5).

$$\mu = 1 - \frac{\Delta P}{P_{př}} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{P}{P - \Delta P} \quad (5)$$

1.2 Možná konstrukční provedení kalorimetru

Kalorimetrů pro měření elektrických ztrát je mnoho druhů. Liší se použitým chladivem, druhem jeho oběhu, počtem komor, počtem vrstev izolace, systémem měření teploty, atd. Všechny tyto parametry mají významný vliv na přesnost a složitost měření, provozní náklady, pořizovací náklady, nebo délku měření.

Jsou dva druhy okruhů chladiva, otevřený a uzavřený. Liší se druhem přenosu tepla ze sledovaného objektu do okolí.

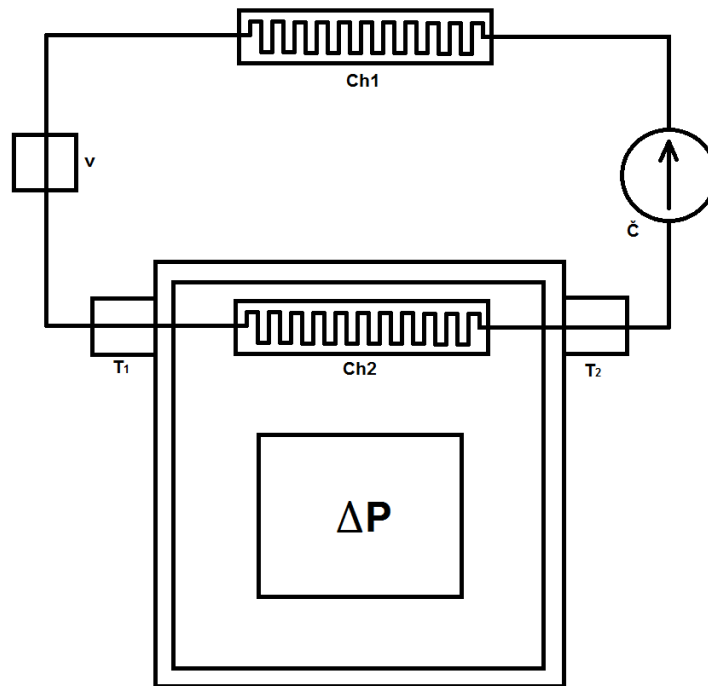
1.2.1 Otevřený okruh

Otevřený okruh využívá jako chladivo vzduch, který po ohřátí odchází přímo do okolí (viz *Obr.2.1*). Výhodou je kratší odezva na změnu ztrátového výkonu a výrazně jednodušší konstrukce. Nevýhodou je nepřesnost způsobená závislostí tepelné kapacity a hustoty na teplotě, vlhkosti a tlaku vzduchu. Také je zde mnohem méně přesné měření teploty a objemového průtoku. Pro vyšší přesnost měření potřebujeme po celou dobu konstantní teplotu vstupního vzduchu. Proto musí být zajištěna dostatečná vzdálenost sacího a výfukového otvoru, aby ohřátý vzduch znovu nevstupoval do systému. To by mohlo výrazně prodloužit dobu ustálení a zkreslit výsledky [3].

1.2.2 Uzavřený okruh

V uzavřeném okruhu cirkuluje kapalné chladicí médium (většinou je jím voda, případně olej), poháněné čerpadlem, mezi dvěma chladiči. Jeden je umístěn v nádobě a přijímá teplo, druhý je vně kalorimetru a předává teplo do okolí. Je tedy zřejmé, že doba ustálení takového systému může být velice dlouhá (3 až 12 hodin) v závislosti na velikosti ustálené vnitřní teplotě. Také pořizovací náklady na kapalný chladicí a měřicí systém jsou výrazně vyšší, než je tomu při použití vzduchu. Avšak kalorimetry s uzavřeným okruhem dosahují obecně mnohem vyšší přesnosti než ty s otevřeným [1][2][3].

Na obrázku *Obr. 1.1* je zjednodušené schéma kalorimetru s uzavřeným okruhem chladiva.



Obr. 1.1 Schéma kalorimetru s uzavřeným okruhem

- V - pozice čidla průtoku
- T_1 - pozice čidla vstupní teploty
- T_2 - pozice čidla výstupní teploty
- Ch1 - vnější chladič
- Ch2 - vnitřní vhladič
- Č - čerpadlo
- ΔP - měřený objekt (zdroj ztrátového tepla)

1.3 Praktické použití kalorimetru

Požadavek na uzavření zkoumaného objektu do kalorimetru předem řadí použití této metody do oblasti výzkumu a vývoje. Konstrukce kalorimetru může být velice nákladnou záležitostí, proto se předpokládá využití těchto měření jako laboratorních zkoušek na prototypch elektrických zařízení. Těmi mohou být jak elektrické stroje (točivé i netočivé), tak výkonové elektronické prvky a systémy. Navíc již z principu, využívajícího tepelné procesy s velkou časovou konstantou, vyplývá nevýhoda, že kalorimetrická měření nejsou schopná poskytnout spolehlivé informace o rychlých přechodových dějích. Kalorimetrická metoda je určena k měření ustálených stavů a čas potřebný k ustálení celého měřicího systému se zvětšuje úměrně ztrátovému výkonu (až na několik hodin po každé změně vstupních parametrů).

Hlavní výhodou této metody je možnost přesného změření tepelných ztrát zkoumaného objektu nezávisle na příčinách jejich vzniku [1][2][3].



Obr. 1.2 Příklad kalorimetru s uzavřeným okruhem [1]

Na obrázku Obr 1.2 je vidět nádoba kalorimetru popsaná v [1]. Tento konkrétní přístroj má uzavřený okruh chladiva a je schopen měřit ΔP od 200W do 1500W s maximální odchylkou 5W.

2 Návrh a konstrukce vlastní nádoby a měřicího systému

Plán tohoto projektu počítal se stavbou prototypové nádoby, která by byla prvním krokem ke stavbě přesnějšího a nákladnějšího systému.

Zvolený předmět měření elektrických ztrát:

Asynchronní motor s klecí nakrátko

$$P = 3 \text{ kW}$$

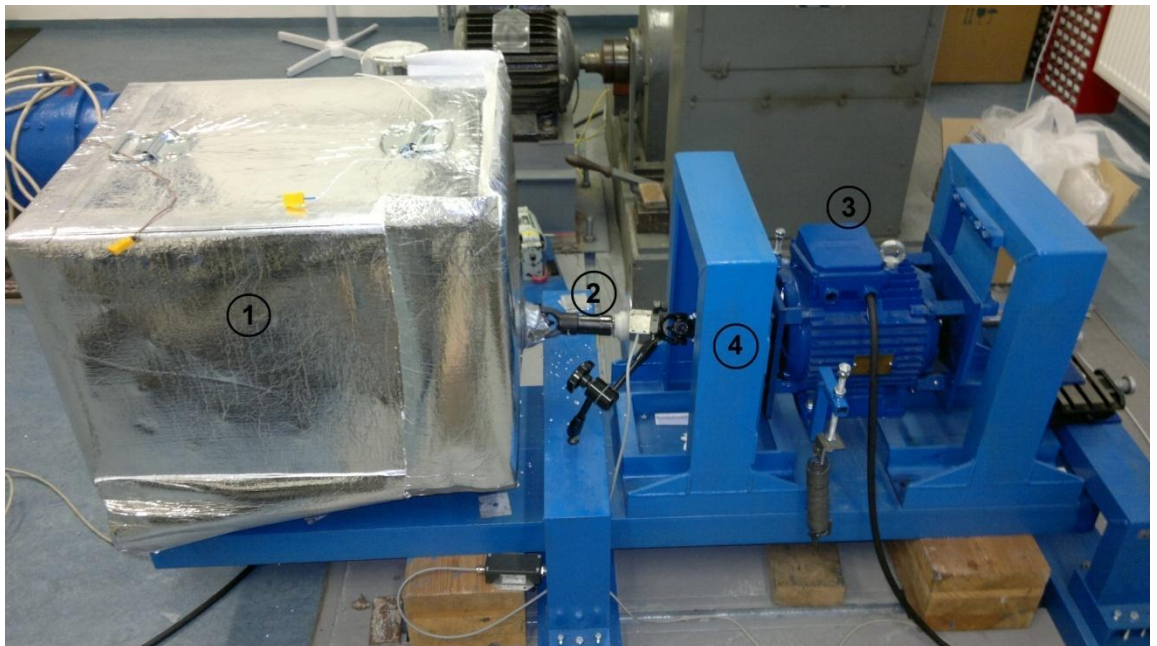
$$n = 1415 \text{ ot/min}$$

$$IP 55$$

$$U = D220/Y380 \text{ V}$$

$$\cos\phi = 0,81$$

Tento motor je součástí soustrojí dvou asynchronních strojů spojených kardanovou hřídelí a umístěných na konstrukci svařené z ocelových nosníků (viz Obr 2.1).

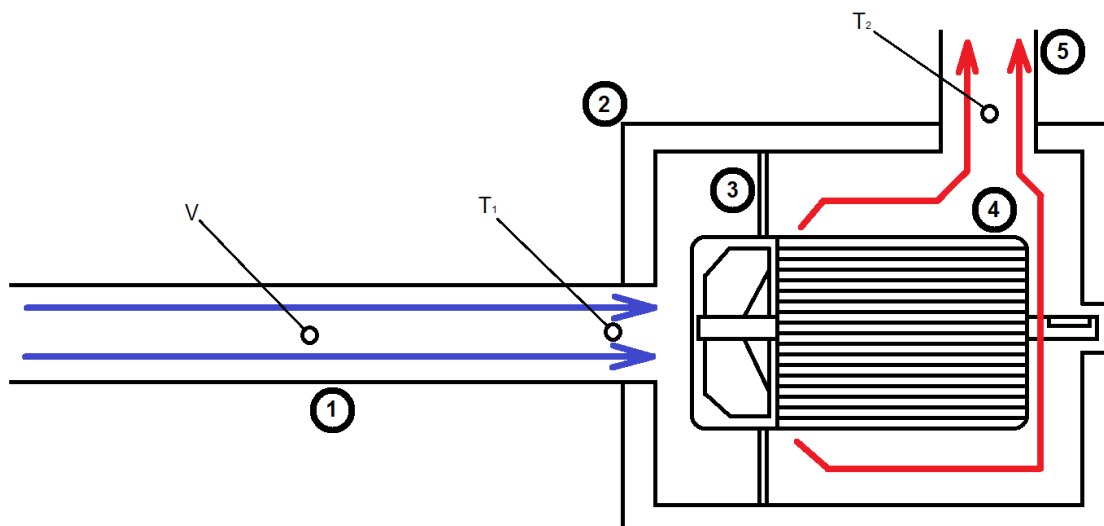


Obr. 2.1 Soustrojí kalorimetru a zátěže

- 1 - nádoba kalorimetru
- 2 - kardanová hřídel
- 3 - zatěžující motor
- 4 - nosná ocelová konstrukce

Další součástí soustrojí je tachodynamo pro měření otáček a dynamometr (schopný měřit pouze dynamické změny momentu). I když v tomto případě nebylo zapotřebí měření otáček a dynamických změn momentu, nelze vyloučit, že budou užitečné pro budoucí uplatnění tohoto kalorimetru. Tento již existující přípravek byl uznán jako ideální platforma pro stavbu kalorimetru.

Byl tedy zvolen a postaven jednokomorový systém s otevřeným oběhem vzduchu, který je schematicky znázorněn na obrázku *Obr. 2.2*.



Obr. 2.2 Schéma jednokomorového kalorimetru

- V - pozice čidla průtoku
- T_1 - pozice čidla vstupní teploty
- T_2 - pozice čidla výstupní teploty
- 1 - přívod chladného vzduchu
- 2 - nádoba kalorimetru
- 3 - přepážka
- 4 - měřený stroj s radiálním ventilátorem
- 5 - odvod ohřátého vzduchu

Na obrázku *Obr. 2.2* je zobrazen dlouhý válcový přívod vzduchu o vnitřním průměru 14cm. Při návrhu bylo počítáno s délkou 2m, kvůli ustálení proudu vzduchu a vytvoření laminárního proudění. Toto je nezbytné pro přepočet rychlosti proudění na objemový průtok. Ten je pak pro kruhový průřez určen vztahem (6).

$$Q_V = \pi * r^2 * v \quad (6)$$

kde: r je vnitřní poloměr válce [m]

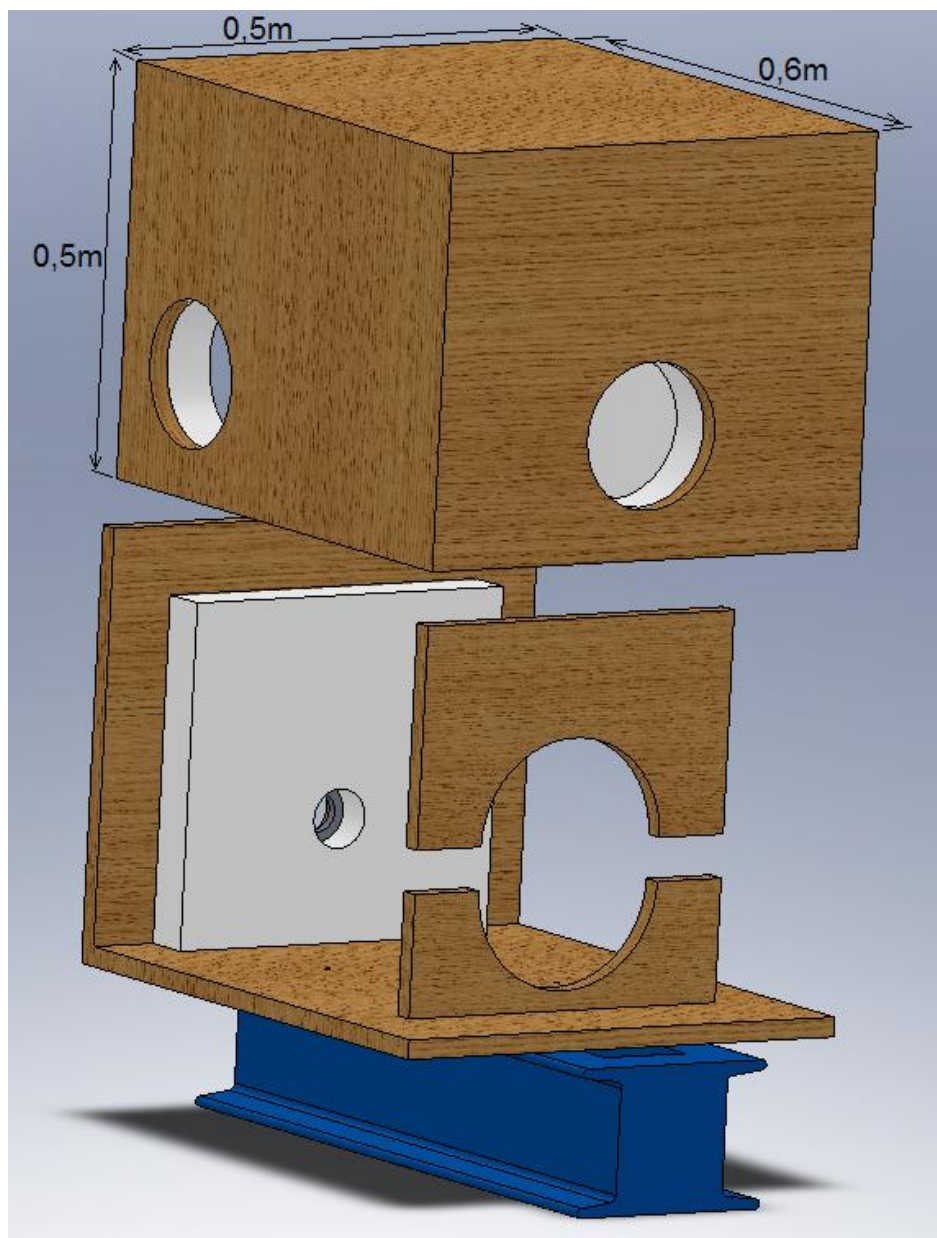
v je rychlost proudění ve středu válce [m/s]

Dále je zde upřesněna poloha čidel teploty T_1 a T_2 na okrajích nádoby. Proud chladiva je realizován vlastním ventilátorem asynchronního motoru. Avšak aby byl dodržen plynulý proud vzduchu požadovaným směrem, musel být vnitřní prostor rozdělen úzkou vzduchotěsnou přepážkou, aby nedocházelo k vnitřní cirkulaci již ohřátého chladiva.

Vlastní nádoba kalorimetru byla rozdělena na dvě oddělitelné části (víko a dno), pro snazší přístup a manipulaci. Toto uspořádání je znázorněno na obrázku *Obr. 2.3*.

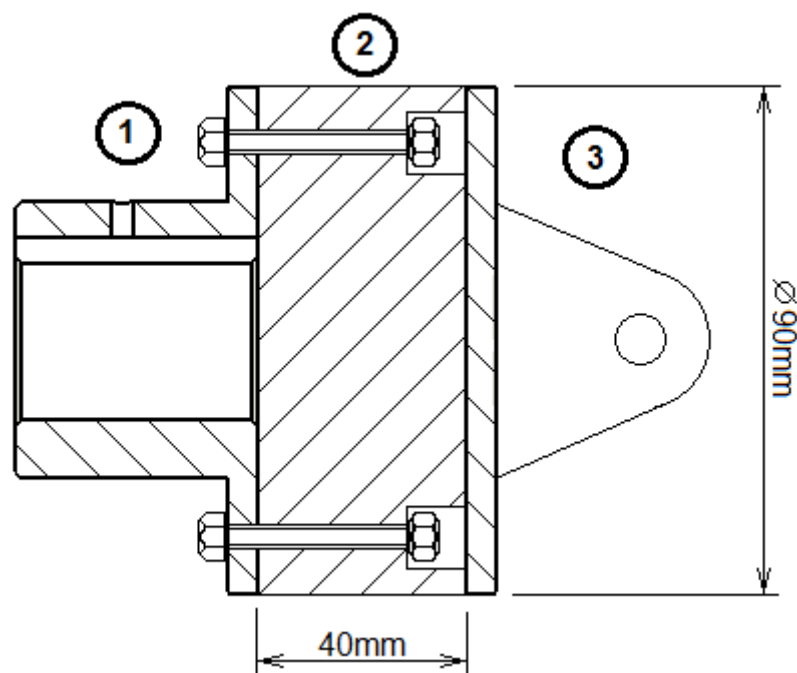
Základní nosná konstrukce byla zhotovena z dřevotřískové desky o tloušťce 2cm. Hlavní izolaci tvoří polystyren o tloušťce 5cm. Pro omezení přenosu tepla zařízením byla po celém vnitřním i vnějším povrchu nádoby použita sekundární izolace z 2mm tlustého polystyrenu potaženého aluminiíovou fólií. Kvůli dosažení dokonalé vzduchotěsnosti byly všechny spáry v konstrukci utěsněny silikonovým tmelem a na styčné plochy dílů nádoby byla nalepena pružná pryžová páska.

Vnitřní rozměry takto sestavené nádoby jsou přesně 0,45 x 0,35 x 0,35m, tedy dostatečné pro umístění zvoleného motoru.



Obr. 2.3 Trojrozměrný projekt nádoby kalorimetru

Dále byl řešen problém s vyvedením hřídele ven z nádoby kalorimetru. Bylo nutné zajistit, aby teplo neunikalo vzduchem kolem točící se hřídele a také hřídelí samotnou, protože je dobrým tepelným vodičem. Únik vzduchu kolem hřídele byl vyřešen vyplněním tohoto prostoru plastovou fólií, která těsně doléhá na hřídel, ale nenamotá se a nevytváří teplo třením. Pro znemožnění přenosu tepla vedením skrz hřídel samotnou byla vysoustružena válcová vložka ze silonu, který je tepelně izolující a dostatečně houževnatý pro přenos točivého momentu. K této vložce byly z obou stran přišroubovány díly pevné přírubové spojky, přenášející točivý moment mezi motorem v kalorimetru a kardanovou hřídelí soustrojí (viz Obr. 2.4).



Obr. 2.4 Přírubová hřídelová spojka se silonovou vložkou

- 1 - příruba k měřenému motoru
- 2 - silonová vložka
- 3 - příruba ke kardanové hřídeli

Pro zajištění dostatečné tuhosti celého soustrojí, musel být měřený motor přišroubován skrz dno nádoby k ocelové konstrukci pod ní. K omezení tepelného přenosu tímto spojením byly pod hlavy šroubů použity plastové podložky a motor byl pečlivě usazen, aby nedošlo k přímému dotyku šroubů a patek stroje.

3 Měření tepelných ztrát kalorimetrem

Tato kapitola popisuje měření provedená kalorimetrem, jejich hlavní problémy, způsoby jejich realizace a hodnoty jimi získané.

Po dokončení konstrukce kalorimetru byl osazen měřícími čidly teploty a rychlosti vzduchu (viz *Obr. 2.2*).

Čidla teploty byla tvořena standardními termočlánky dodanými výrobcem k elektronickému multimetru METEX.

Měření rychlosti proudění vzduchu zajišťovalo čidlo termoelektrického anemometru s vyhodnocovacím přístrojem schopným přepočítat rychlost ve středu válce (o známém průměru) na objemový průtok. Toto čidlo pracuje na principu ohřátí vodivého tělíska průchodem proudu a snímání teploty tělíska i okolí. Po vystavení čidla chladícímu účinku proudu vzduchu v předem určeném směru je řídicí jednotka nucena zvýšit žhavicí proud. Změna dodávky el. energie je pak úměrná rychlosti proudění vzduchu.

3.1 První kalibrační měření

Předem byl vzat v úvahu vznik nepřesností způsobených nedokonalostí konstrukce (prostup tepla stěnami kalorimetru a upevněním), nepřesným měřením a nestálým tepelným chováním vzduchu (teplotní závislost hustoty a měrné tepelné kapacity). Aby bylo možno tyto nepříznivé vlivy zanedbat, bylo provedeno kalibračního měření za účelem korekce dat získaných v dalších měřeních na asynchronním motoru.

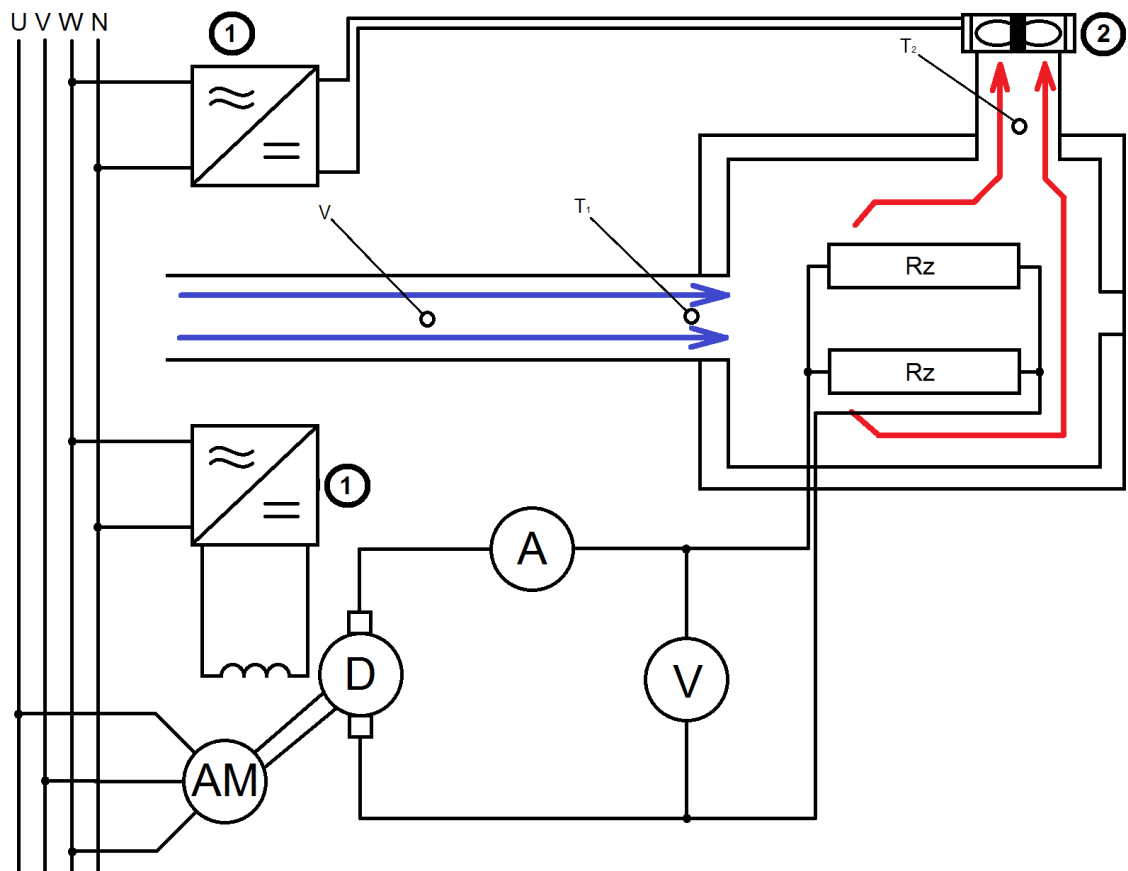
K tomuto účelu je nejvhodnější kalibrace celého systému dodáním známého tepelného výkonu do měřící nádoby a jeho porovnání s hodnotou výkonu naměřenou pomocí kalorimetrie. Tento známý tepelný výkon je poměrně přesně získatelný z výkonových rezistorů napájených stejnosměrným proudem podle rovnice (7).

$$P_r = R * I^2 \quad (7)$$

kde: R je činný odpor [Ω]

I je proud [A]

Odpor paralelní kombinace dvou použitých rezistorů byl změřen ohmovou metodou při stejnosměrném napájení, aby se neprojevila indukčnost jejich válcových závitů.



Obr. 3.1 Schéma kalibračního měření

- 1 - stejnosměrný stabilizovaný zdroj
- 2 – axiální ventilátor
- Rz - výkonový rezistor
- A - ampéremetr
- V - voltmetr
- D - dynamo
- AM - asynchronní motor
- U, V, W, N - napájecí síť

Na obrázku *Obr. 3.1* je znázorněno celé schéma zapojení, včetně způsobu napájení topných rezistorů. Z důvodu odběru vysokého napájecího proudu po dlouhou dobu byla raději zvolena varianta napájení ze stejnosměrného dynama poháněného asynchronním motorem. Velikost proudu protékajícího obvodem je regulována pomocí buzení dynama.

Plynulý proud vzduchu je zajištěn ventilátorem původně určeným pro PC. Napájen je napětím 12V ze stejnosměrného stabilizovaného zdroje. Umístěn je na výstupu z kalorimetru, aby turbulence vytvářené jeho lopatkami neovlivňovaly měření průtoku.

Samotné měření probíhalo zvyšováním výkonu na rezistorech od 100W do 450W po 50W. Hodnoty objemového průtoku a teplot byly odečítány každých 15 minut. Po každém zvýšení výkonu bylo nutné nechat teplotu ustálit asi 30 až 45 minut. Celkem tedy kalibrační měření trvalo 5 hodin.

Pro všechny výpočty dle vztahů (2) a (7) byly použity hodnoty konstant v tabulce *Tab. 3.1* závislých na výstupní teplotě vzduchu:

Tab. 3.1 Hodnoty konstant závislých na teplotě

T_2 [°C]	25	30	35	40	45
c_p [J/kg*K]	1010,8	1011,5	1012,2	1013	1013,5
ρ [kg/m ³]	1,1845	1,1649	1,146	1,1277	1,11

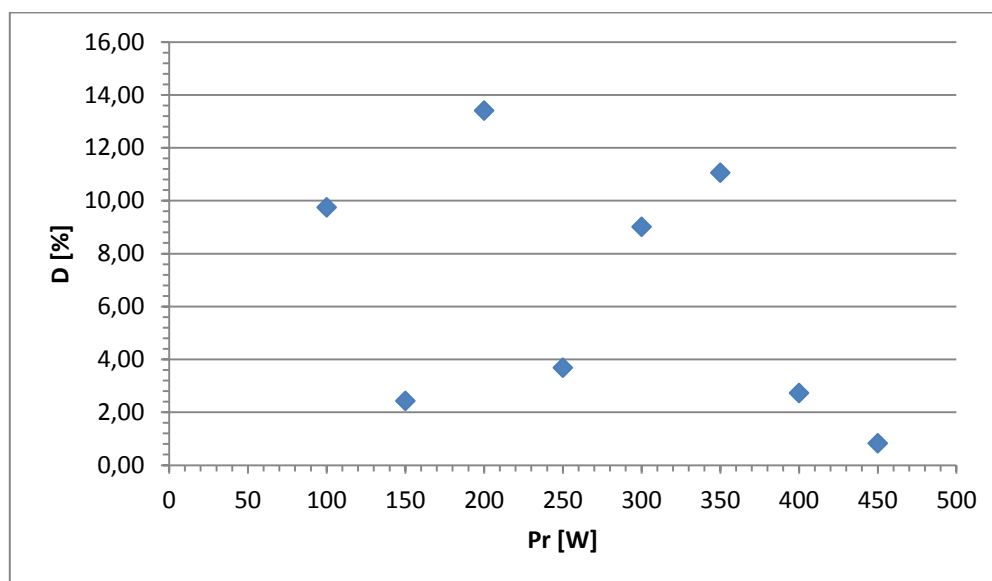
$R = 8,1373 \Omega$... Odpor paralelní kombinace výkonových rezistorů

Hodnoty měrné tepelné kapacity a hustoty vzduchu byly uvažovány pro suchý vzduch a tlak 100kPa.

Naměřené a spočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce *Tab. 3.2*. Procentuální rozdíl výkonu rezistorů a výkonu zjištěného kalorimetrem je označen Δ a graficky znázorněn v grafu *Obr 3.2*.

Tab. 3.2 Naměřené a spočtené hodnoty první kalibrace

P_r [W]	100	150	200	250	300	350	400	450
T_1 [°C]	19	19	19	19,5	20	20	20	21
T_2 [°C]	24	26	29,5	31,5	34,5	37,5	38,5	43
Q [m ³ /h]	66	66	66	66	70	70	70	66
P_v [W]	109,75	153,65	226,82	259,23	327,05	388,72	410,93	453,74
Δ [%]	9,75	2,44	13,41	3,69	9,02	11,06	2,73	0,83

Obr 3.2 Grafické vynesení hodnot Δ

Jak je na první pohled vidět z grafu Obr 3.2, první kalibrační měření nepřineslo očekávaný výsledek. Propojením hodnot rozdílu Δ v grafu by nebyla získána kalibrační křivka vhodná pro zpřesnění výsledků dalších měření.

3.2 Měření tepelných ztrát asynchronního motoru

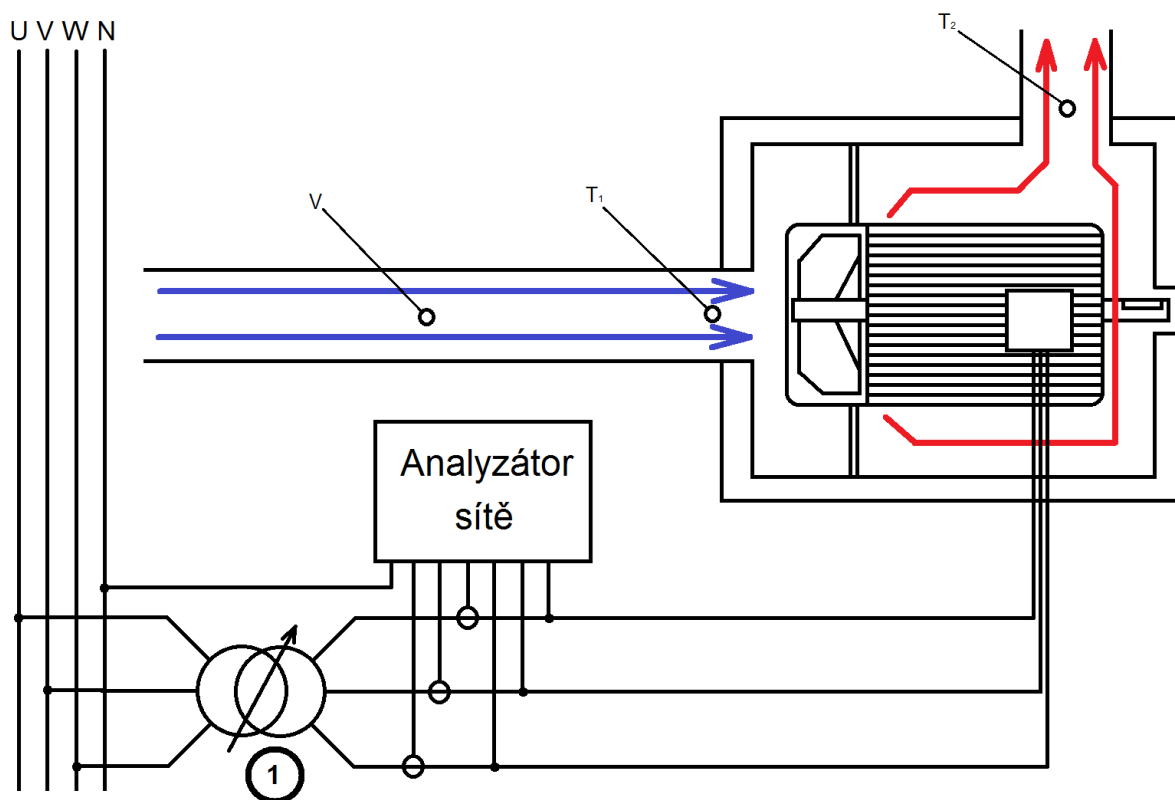
Měření ztrát elektrického motoru s připojenou vnější mechanickou zátěží nebylo provedeno, protože použité soustrojí neumožňuje změřit mechanický výkon přenášený hřídelí z kalorimetru.

Bylo tedy provedeno pouze měření ve stavu naprázdno. Ve stavu naprázdno může být celý motor uzavřen v kalorimetru a veškerý příkon jemu dodaný se mění v tepelné ztráty. Pracuje tedy s účínkem rovným nule a v ideálním případě by mělo být veškeré teplo odvedeno vzduchem a změřeno kalorimetrem.

Pro měření trojfázového příkonu byl v tomto případě použit analyzátor sítě, který udává jeho okamžitou velikost.

Jako napájecí zdroj byl zvolen natáčivý transformátor, který umožňuje rozběh motoru plynulým zvyšováním napětí.

Celé schéma zapojení je znázorněno na obrázku *Obr. 3.3*.



Obr. 3.3 Schéma měření ztrát asynchronního motoru

1 - natáčivý transformátor

Naměřené a vypočtené výsledky jsou uvedeny v tabulce *Tab. 3.3*. Pro ustálení systému bylo třeba 60 minut. Z hodnot po uplynutí této doby byl spočítán ztrátový výkon a procentuální rozdíl dodaného a spočteného výkonu.

Tab. 3.3 Měření ztrát asynchronního motoru

t [min]	0	15	30	45	60
P_{pr} [W]	265	263	260	260	260
T_1 [°C]	18,5	19	19	19	19
T_2 [°C]	19	23,5	26	27	27
Q [m ³ /h]	93				
P_v [W]	243,5				
Δ [%]	-6,341				

Výsledná hodnota $\Delta = -6,341\%$ je značně vysoká.

3.3 Technické úpravy systému

Výsledky předchozích měření jasně poukázaly na nutnost zásadních změn v systému kalorimetru.

Jako hlavní příčiny předchozích problémů byly identifikovány způsoby měření teploty a průtoku. Použité multimetry byly schopny měřit teplotu pouze s přesností na $0,5^{\circ}\text{C}$ a navíc bylo zjištěno, že při měření termočlánků ve stejném bodě se rozcházejí o 1°C . Hodnoty objemového průtoku udávané anemometrem při měření silně kolísaly, což do měření vnáší značnou chybu způsobenou obtížným odečítáním z displeje.

Po konzultaci s vedoucím práce byla tedy domluvena výpůjčka přístroje z Katedry technologií a měření. Tento přístroj ALMEMO 2209-4 umožňuje připojení zároveň obou teplotních sond i sondy rychlosti proudění, které jsou pro tento přístroj určeny a s ním také dodávány.

Dále byla izolační páskou utěsněna všechna místa, kde se víko kalorimetrické nádoby setkává se dnem a čelní stěnou.

3.4 Druhé kalibrační měření

Po dokončení úprav měřícího systému bylo připraveno k provedení další kalibrační měření.

Při tomto měření byl příkon zvyšován od 100W do 400W po 50W a opět bylo nutné nechat teploty 45 minut ustálit.

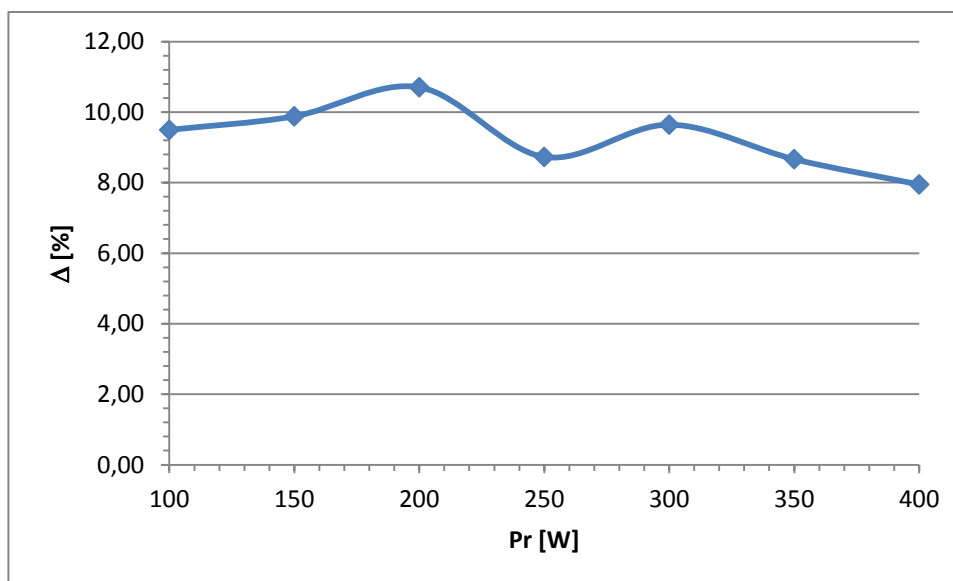
Měření teploty bylo provedeno na setiny stupně celsia a nová čidla se již ve stejném bodě rozcházela pouze o 2 až 3 setiny $^{\circ}\text{C}$.

Nové měření rychlosti vzduchu je realizováno mechanickým vrtulovým čidlem. To se osvědčilo jako mnohem spolehlivější, protože údaj na displeji přístroje se ustálil a umožnil tak přesnější odečet hodnoty. Tento přístroj však, na rozdíl od předchozího, neumožňuje automatický přepočítání rychlosti na objemový průtok. Vztah pro výpočet objemového průtoku ve válci s laminárním prouděním je dán rovnicí (6).

Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce *Tab. 3.4*.

Tab. 3.4 Naměřené a spočítané hodnoty druhé kalibrace

P_r [W]	100	150	200	250	300	350	400
T_1 [°C]	20,97	21,44	22,08	21,99	22,72	23,37	23,79
T_2 [°C]	25,54	28,43	31,47	33,7	37	40,4	42,97
v [m/s]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,29	1,27	1,3
P_v [W]	109,5	164,8	221,4	271,8	328,9	380,3	431,8
Δ [%]	9,50	9,88	10,71	8,73	9,65	8,67	7,95

Obr. 3.4 Grafické vynesení hodnot Δ

Jak je vidět z grafu *Obr. 3.4*, provedené úpravy se projeví značným zpřesněním. Hodnoty procentuálního rozdílu mezi dodaným a kalorimetricky změřeným výkonem se ustálily a jejich rozptyl je 2,76%. Křivka vzniklá propojením těchto bodů se už dá použít jako kalibrační.

3.5 Druhé měření tepelných ztrát asynchronního motoru

Dále byly, podobně jako v kapitole 3.2 vyměněny výkonové rezistory za asynchronní motor. Důvody vyloučení měření s větší zátěží se nezměnily, a proto bylo provedeno měření motoru pouze ve stavu naprázdno.

V tomto případě bylo nutné nechat měření probíhat 90 minut, než se hodnota výstupní teploty ustálila.

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedené v tabulce *Tab. 3.5*.

Tab. 3.5 Druhé měření ztrát asynchronního motoru

t [min]	0	15	30	45	60	75	90
P_{pr} [W]	227	228	250	248	248	246	236
T_1 [°C]	21,01	21,04	21,01	21,12	21,23	21,23	21,24
T_2 [°C]	24,01	24,46	26,9	28,44	29	29,52	29,9
v [m/s]	1,5						
P_v [W]	235,62						
Δ [%]	-0,16						

Zatímco kalibrační test vykazoval kalorimetricky změřený výkon o 8 až 11% vyšší než skutečně dodaný, z měření na asynchronním motoru vyšla hodnota o 0,16% nižší. Kdyby však byla aplikována kalibrační křivka na měření ztrát asynchronního motoru, a tedy výsledná hodnota P_v snížena o dalších 8,73%, byl by výsledný rozdíl mezi výkonem změřeným kalorimetrem a skutečným 8,91%.

3.6 Seznam použitých přístrojů

- Analyzátor sítě HIOKY 3166
- 2x Multimetr METEX M-3830M s termočlánkem typu K
- Anemometr TESTO 426
- 2x Multimetr UNI-T UT53
- 2x Multimetr UNI-T UT33D
- Multimetr ALMEMO 2209-4

Závěr

Po zvážení možných konstrukčních řešení, jejich vlastností a finanční náročnosti jejich realizace, byla zvolena ta nejlevnější, ale zato méně přesná varianta. To se také projevilo na rozdílu kalibračního a hlavního měření.

Hlavním důvodem takového chování systému je rozdílná rychlost proudění vzduchu a teplotní závislost vlastností použitého chladícího média, tedy vzduchu. Tlak, vlhkost a okolní teplota měnící se v průběhu měření mají značný vliv na jeho hustotu a měrnou tepelnou kapacitu.

Hodnoty měrné tepelné kapacity a hustoty použité ve výpočtu se vztahují na teplotu výstupního vzduchu. Aby bylo možné využít data získaná kalibrací ke zpřesnění dalších výsledků, musí být v první řadě zajištěny stejné počáteční podmínky při všech měřeních. Pro oba typy měření musí mít vstupující vzduch stejnou rychlost, stejnou vstupní teplotu a nejlépe i vlhkost a tlak [3].

Jedním z možných řešení je použití automatizované kontroly a úpravy těchto parametrů, například použitím klimatizace. Druhým možným řešením by byla přestavba nádoby kalorimetru na dvoukomorový systém. Ten je schopen provádět kalibrační a praktické měření zároveň.

Po zavedení těchto opatření je možné u tohoto typu kalorimetru dosáhnout odchylky měření ne horší než 5%, což bylo potvrzeno měřeními [3].

Použitá literatura

- [1] Blaabjerg, F.; Hansen, P.; Pedersen, J. K.; Ritchie, E.: *Calorimetric Measuring Systems*, IEEE, 2004
- [2] McMahon, R.; Shafti, M. A.; Weier, S.: *Precision Calorimetry for the Accurate Measurement of Losses in Power Electronic Devices*, IEEE, 2010
- [3] Cooper, P.; Gosbell, V. J.; Jalilian, A.; Perera, B. S. P.: *Double Chamber Calorimeter (DCC): a New approach to measure Induction Motor Harmonic Losses*, IEEE, 1999
- [4] Ďaďo, S.; Bejček, L.; Platil, A.: *Měření průtoku výšky hladiny*, Praha, BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-156-X
- [5] <http://www.wikipedia.org>
- [6] <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
- [7] <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa>

Přílohy

Fotografie probíhající konstrukce a hotového kalorimetru

