

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Katedra technologií a měření

Diplomová práce

Stavba zkušební kalorimetrické komory – cenová rozvaha

vedoucí práce: Ing. Karel Hruška PhD.
autor: Bc. Jiří Gdovin

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří GDOVIN**
Osobní číslo: **E10N0218P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Stavba zkušební kalorimetrické komory - cenová rozvaha**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Uveďte parametry požadované pro zkušební komoru pro měření ztrát kalorimetrickou metodou.
2. Vytvořte návrh kalorimetrické komory pro stroje do výkonu 100kW.
3. Proveďte cenovou rozvahu pro stavbu uvedené kalorimetrické komory.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Literaturu určí vedoucí práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Karel Hruška, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

V úvodu předložené diplomové práce je obecně popsán princip kalorimetrické komory a k čemu se používá. Dále jsou zde popsány dva typy kalorimetrické komory, princip měření a příklad konstrukce. V další kapitole je popsán způsob konstrukce, použité materiály, které je možné při stavbě komory použít (materiál pro základ konstrukce, izolační materiály, spojovací materiály a měřicí technika). V následující kapitole se zabývám vlastním návrhem kalorimetrické komory pro měření ztrát na stojích o výkonu do 100kW. Jsou zde popsány parametry potřebné pro návrh a realizaci kalorimetrické komory, použité materiály, jejich rozměry a způsob instalace. V další kapitole je vytvořen samotný návrh komory ve 2D modelu. Na závěr diplomové práce je provedena cenová rozvaha potřebná pro stavbu uvedené kalorimetrické komory

Klíčová slova

Kalorimetrická komora, ztráty, MDF desky, izolační materiál, polystyren, termofolie, termočlánky, samořezné šrouby, ventilátor, chladicí vzduch

Abstract

At the beginning of the diploma thesis is generally described the principle of the calorimetric chamber and what it is used. Next, there are described two types of calorimetric chamber, principle of measurement and the example of construction. In the next chapter are described method of construction, materials which can be used in the construction of the calorimetric chamber (base material for construction, insulation materials, fasteners and measuring technique). The following chapter deals with the design itself of the calorimetric chamber for measuring the loss of power machines about performance to 100kW. There are described parameters necessary for the design and implementation of the calorimetric chamber, used materials, the size and type of installation. In the next chapter is created the proposal of calorimetric chamber in the 2D model. At the conclusion of the diploma thesis is a statement of the price needed for the construction of the calorimetric chamber.

Key words

Calorimetric chamber, loss, MDF panel, insulating material, polystyrene, thermofoil, thermocouples, self-tapping screws, ventilator, cooling air

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 13.5.2013

Jiří Gdovin

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Karlovi Hruškovi, PhD. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah:

Seznam symbolů a zkratek.....	9
1 ÚVOD	10
2 Teoretický úvod	11
2.1 JEDNOKOMOROVÁ KALORIMETRICKÁ KOMORA	13
2.2 DVOUKOMOROVÁ KALORIMETRICKÁ KOMORA.....	14
2.3 CHLAZENÍ KALORIMETRU	15
3 Design a konstrukce	16
3.1 EXTRUDOVANÝ POLYSTYREN EPS	16
3.2 TEPelná IZOLACE NA BÁZI ČEDIČOVÉ VLNY	17
3.3 PŘÍVOD A ODVOD CHLADICÍHO VZDUCHU	18
3.4 PŘÍSTROJE A MĚŘICÍ SYSTÉM	20
3.4.1 <i>Měření teplot pomocí termočlánků</i>	<i>20</i>
3.4.2 <i>Měřič teploty Term2205.....</i>	<i>22</i>
3.5 MĚŘENÍ ABSOLUTNÍ TEPLoty POMOCÍ ODPOROVÝCH TEPLotNÍCH DETEKTORŮ RTD (RESISTANCE TEMPERATURE DETEKTOR):	24
3.5.1 <i>Co je vlastně odporový detektor (odporový teploměr).....</i>	<i>24</i>
3.5.2 <i>Obvyklé materiály pro odporové teploměry:</i>	<i>25</i>
3.5.3 <i>Výhody použití odporového snímače.....</i>	<i>25</i>
3.5.4 <i>Provedení odporových snímačů</i>	<i>25</i>
4 Vlastní návrh zkušební kalorimetrické komory.....	27
4.1 MĚŘENÍ NAPĚTÍ A PROUDŮ:	27
4.2 PARAMETRY ZKUŠEBNÍ KOMORY PRO MĚŘENÍ ZTRÁT KALORIMETRICKOU METODOU.....	28
5 Návrh kalorimetrické komory pro stroje do výkonu 100kW – 2D model	33
6 Cenová rozvaha pro stavbu kalorimetrické komory	34
6.1 MDF DESKY	34
6.2 IZOLAČNÍ MATERIÁL	34
6.3 CHLADICÍ SYSTÉM	35
6.4 MĚŘICÍ SYSTÉM	35
6.5 SHRNUtÍ	36
Závěr.....	37
Použitá literatura	38
Přílohy	1

Seznam symbolů a zkratk

<i>DCC</i>	Dvoukomorový kalorimeter (Double calorimetric chamber)
<i>m'</i>	hmotnostní průtok (mass flow rate (kg/s))
<i>cp</i>	měrná tepelná kapacita (specific heat (J/kg K))
ΔT	oteplení (temperature rise (K))
$T_{out} - T_{in}$	hmotnostní průtok chladicího vzduchu
λ	Součinitel teplotní vodivosti
<i>dm/dt</i>	Moment motoru s rozběhovým kondenzátorem [<i>Nm</i>]
<i>RTD</i>	Teplotní odporové detektory
<i>MDF</i>	Deska z dřevěných vláken (Medium-density fibreboard)
<i>EPS</i>	Extrudovaný polystyren

1 ÚVOD

Pro přímé měření ztrát elektrických strojů se používá principu kalorimetrické metody, která je popsána v této práci. Design a konstrukce jak jednokomorové, tak dvoukomorové kalorimetrické komory DCC (Double calorimetric chamber), která může být použita pro měření harmonických ztrát indukčních motorů, je diskutovanou záležitostí. Výhody dvoukomorové kalorimetrické komory v porovnání s jednokomorovým typem kalorimetru jsou uvedeny v práci.

Teplo, které uniká skrze stěny kalorimetru, se odhaduje vytvořením jednoduchého tepelného modelu a porovnáním s experimentálními výsledky. Přesnost a spolehlivost je vyšetřována prováděním experimentálních zkoušek. V důsledku těchto experimentální zkoušek jsou poté odvozeny hodnoty pro průtok vzduchu a zvýšení teploty uvnitř kalorimetrické komory. Kalorimetr, který je navržen na základě zadání diplomové práce, je schopen měřit tepelné ztráty strojů až do výkonu 100kW. Rozměry kalorimetrické komory jsou proto navrženy dle parametrů již zmíněného elektrického stroje o výkonu 100kW.

2 Teoretický úvod

Při práci elektrického stroje se část přiváděného výkonu (příkonu) spotřebuje na oteplení vodičů, přemagnetování magnetického obvodu, vytvoření proudu vzduchu nutného pro chlazení, tření v ložiskách apod. Tato část výkonu se nazývá ztráty. Ztráty v elektrických strojích se rozdělují na ztráty hlavní a dodatečné. Mezi hlavní ztráty patří ztráty elektrické (Jouleovy) a ztráty v kluzných kontaktech (kartáče-kroužky nebo kartáče-komutátor). Dodatečné ztráty vznikají jak ve vodičích, tak v železe v různých částech magnetického obvodu.

Kalorimetrická měření jsou taková měření, při kterých se zabýváme měřením množství tepla, které přechází z jednoho tělesa na druhé. Měření se provádí v kalorimetrech. Přítomnost harmonických napětí při napájení indukčních motorů způsobují dodatečné ztráty. Tyto dodatečné ztráty je velmi obtížné měřit / oddělit pomocí přesných wattmetrů, když je stroj v provozu. Na základě principu kalorimetrické metody mohou být ztráty elektrických strojů stanoveny přímo měřením energetických ztrát ve stroji.

V ustáleném stavu a při tepelné rovnováze lze pomocí energetické bilanční rovnice lze určit rychlost přenosu tepla chladicí kapaliny Q (W), která představuje ztráty na stroji.

$$Q(W) = m' c_p \Delta T \quad (1)$$

kde:

m' = hmotnostní průtok (mass flow rate (kg/s)),

c_p = měrná tepelná kapacita (specific heat (J/kg K)),

ΔT = oteplení (temperature rise (K)),

jsou vlastnosti potřebné k určení rychlosti přenosu tepla chladicí kapaliny

Kalorimetrické měření ztrát:

Pro ideální případ platí

- únik tepla $q = 0$

$$P_{\text{loss}} = Q_{\text{out}} - Q_{\text{in}} = c_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) dm/dt \quad (2)$$

c_p = měrná tepelná kapacita

$T_{\text{out}} - T_{\text{in}}$ = nárůst teploty

dm/dt = hmotnostní průtok chladicího vzduchu

Pro reálný případ však platí jiné podmínky

- únik tepla z kalorimetru je $q > 0$
- vliv vlhkosti a teploty
- dm/dt = hmotnostní průtok chladicího vzduchu

[1][2]

2.1 Jednokomorová kalorimetrická komora

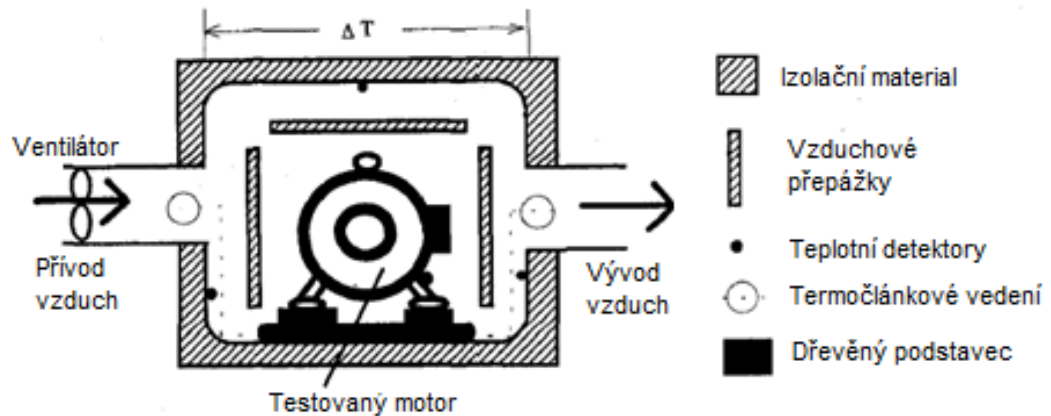
Jednokomorový kalorimetr pro měření ztrát na elektrických strojích byl navržený a postavený panem D.R.Turnerem. Tento kalorimetr byl otevřeného typu, kde byl použit vzduch jako chladicí medium k odvedení ztrátového tepla testovaného motoru mimo kalorimetr. V rámci tohoto typu musí být kalorimetrické zkoušky provedeny ve dvou částech: hlavní test a kalibrační zkouška.

V hlavní zkoušce je stroj řízený podle požadovaných podmínek zatížení, kde je vzduch s konstantní teplotou a průtokem přiváděn do kalorimetru. Zkouška pokračuje až do doby, kdy je teplota na vstupu a výstupu kalorimetru konstantní (tj. dosažení tepelné rovnováhy).

V kalibračním testu je chladicím médiem vzduch, který musí mít zachované stejné vlastnosti (teplota, relativní vlhkost, průtok, měrná teplota, atd.) jako v hlavní zkoušce. Pokud testovaný motor není přímo řízen napětím, použije se k jeho vybuzení pomocný stroj se stejnou rychlostí jako v hlavní zkoušce. Tento pomocný motor je umístěn mimo kalorimetr. Chladicí kapalina se případně ohřívá přes elektrický odporový ohříváč, který je umístěn uvnitř kalorimetru. Jeho příkon se musí nastavit tak, aby bylo dosaženo stejných teplotních rozdílů mezi vstupem a výstupem jako při zkoušce [1].

Podle tepelné rovnováhy se předpokládá, že celkové ztráty v motoru (kromě vinutí a třecích ztrát) se rovnají elektrické energii tepelného ohříváče.

Tento postup však vyžaduje nutnou kontrolu vlastností vzduchu (průtok, teplota na vstupu, konkrétní teplota, atd.), neboť toto je nezbytné pro zachování stejných podmínek v obou částech testu.



Obr. 1 Příklad konstrukce jednokomorového kalorimetru s testovaným motorem [1]

2.2 Dvoukomorová kalorimetrická komora

Rozdíl mezi jednokomorovým a dvoukomorovým kalorimetrem je v tom, že dvoukomorový kalorimetr je schopný provádět oba kalibrační testy současně. To vede ke značnému zjednodušení převážně v časové náročnosti. Trvání každé kalorimetrické zkoušky je asi 3 hodiny, což je téměř polovina času požadovaného pro jednokomorový kalorimetr.

Na rozdíl od jednokomorového kalorimetru není nutná kontrola a přesné měření vlastností vzduchu (kromě nárůstu teploty vzduchu z jedné komory do druhé). Také není nutné pro klimatizační systém udržovat konstantní teplotu vzduchu při provádění kalorimetrických zkoušek. Z tohoto důvodu je tento typ kalorimetru jednodušší a výhodnější jak z časového hlediska, tak náročnosti testů, než jednokomorový typ. Na druhou stranu je zase oproti jednokomorovému typu finančně nákladnější a zhruba jedenkrát tak větší [1].

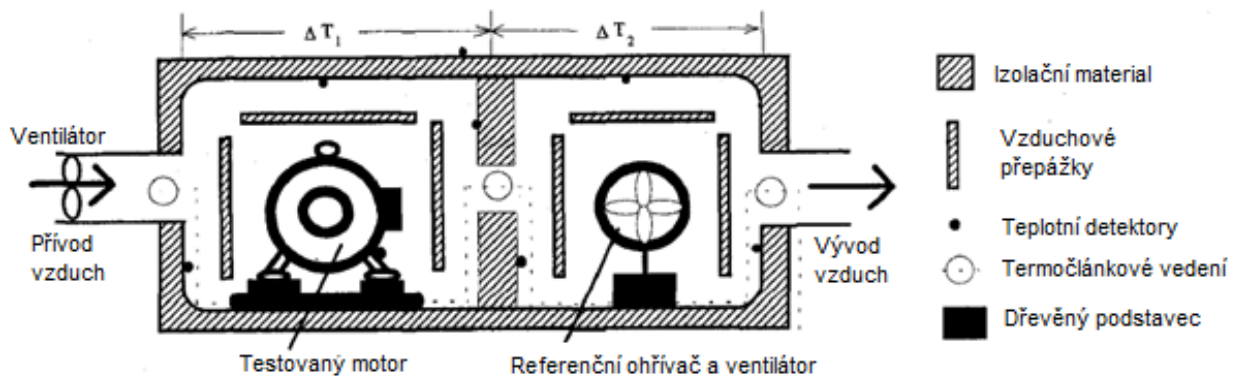
Konstrukční schéma dvoukomorové kalorimetrické komory osazené testovacím motorem a referenčním ohříváčem je znázorněno na Obr. 2.

Z prvního pohledu lze předpokládat, že veškeré teplo rozptýlené v kalorimetru je odváděno pomocí ventilátoru. Proto v teplotně stálém stavu lze ztráty motoru odhadnout jako funkce topného výkonu referenčního ohříváče P_{heater} a oteplení v každé komoře, $\Delta T1$ a $\Delta T2$:

$$P_{\text{motor}} = P_{\text{heater}} (\Delta T1 / \Delta T2) \quad (3)$$

Přesnější odhad ztrát motoru může být proveden, pokud byl zohledněn únik tepla,

skrze stěny kalorimetru. Také může být zohledněn korekční faktor pro přenos tepla v důsledku výměny měrného tepla na teplotě vzduchu. Z rovnice (3) je patrné, že přesnost měření je ztráta přímo závislá na přesnosti měření teploty vzduchu pro každou komoru ΔT_1 a ΔT_2 stejně tak, jako pro topný výkon referenčního ohříváče P_{heater} . Z tohoto důvodu by měly být všechny veličiny měřeny pečlivě, aby se získalo co nejpřesnějších hodnot [1]



Obr. 2: Příklad konstrukce dvoukomorového kalorimetru s testovaným motorem a referenčním ohříváčem [1]

2.3 Chlazení kalorimetru

Chlazení kalorimetru může být prováděno dvěma způsoby.

Jedním způsobem je tzv. otevřený okruh, kde je chladicí medium vzduch, jež je zmíněn v bodě 2.1 a 2.2.

Druhým způsobem chlazení kalorimetrické komory je tzv. uzavřený okruh, kde se jako chladicí medium používá voda, případně může být použit také olej. Toto chladicí medium je poháněné čerpadlem mezi dvěma chladiči. Jeden chladič přijímá teplo a je umístěn uvnitř kalorimetru a druhý chladič je umístěn mimo a teplo předává do okolí. Pořizovací náklady na takovýto chladicí systém jsou poměrně vysoké a doba ustálení tohoto systému je velmi dlouhá. Na druhou stranu kalorimetry s tímto typem chladicího systému mají vyšší přesnost než kalorimetry chlazené vzduchem.

3 Design a konstrukce

Kalorimetrická komora může být sestavena pomocí dřevěných desek (např. z překližky, MDF desek nebo jiných dřevěných materiálů). Komora může být také zhotovena i z železných či plechových desek spojených nýty nebo svárem. Avšak s ohledem na cenu a hmotnost celé komory je výhodnější použít ke stavbě komory dřevěných desek. K montáži je vhodné použít samořezné šrouby a dosedací plochy desek potřít chemoprenovým lepidlem. Velikost komory závisí na výkonu a velikosti testovaných motorů. Na obrázcích Obr. 1 a Obr. 2 je možné vidět příklad konstrukce jednodokorové a dvoukomorové kalorimetrické komory. V obou případech jsou komory vybaveny otevřeným chladicím okruhem a tzv. vzduchovými přepážkami. Tyto přepážky jsou použity kolem testovaného motoru. Podle experimentálních zkoušek hrají důležitou roli při cirkulaci vzduchu v kalorimetrické komoře.

3.1 Extrudovaný polystyren EPS

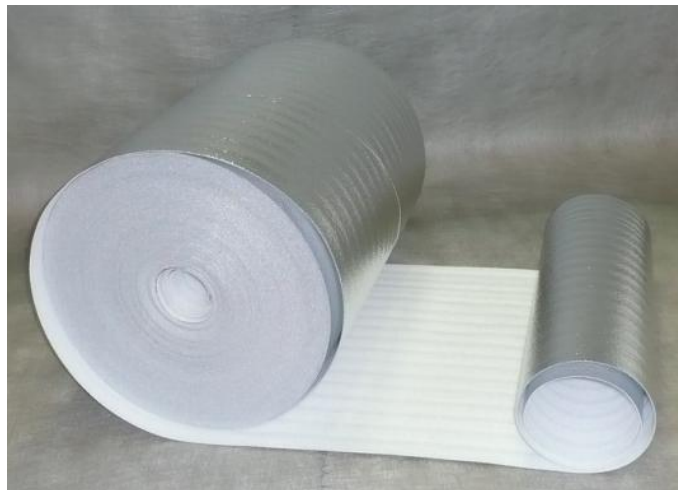
Jako izolační materiál se používá extrudovaný polystyren (ESP), který je k dostání v různých tloušťkách. Jeho průměrný součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0.037\text{W/mK}$. Tento typ izolace je lehký, dostatečně účinný a jeho cena není nijak zvláště vysoká [3].

Pro upevnění desek se používá řada montážních voděodolných lepidel (např. montážní lepidlo Peri-Bond). Toto lepidlo je vysoce úsporné a účinné. Lepidlo se nanáší kolem dokola polystyrenové desky a v jejich úhlopříčkách. Poté se nechá po dobu 10ti minut zatuhnout a přimáčkne na místo určení. Po půlhodině je lepidlo plně ztuhlé. Ideální je použití toho polystyrenu vně kalorimetru a dodatečně jej potáhnout polystyrenovou termofolií. Jedná se o kombinaci cca. 2mm tlustého polystyrenu potaženého hliníkovou folií.

Použití této polystyrenové termofolie je vhodné, neboť odráží až 90% tepla vyzařovaného z měřeného stroje. Zabraňuje také průniku tepla do stěn kalorimetru a zlepšuje cirkulaci vzduchu. Venkovní stěny je vhodné taktéž potáhnout touto folií.



Obr. 3 – Extrudovaný polystyren EPS [3]



Obr. 4 – Polystyrenová termofolie [12]

3.2 Tepelná izolace na bázi čedičové vlny

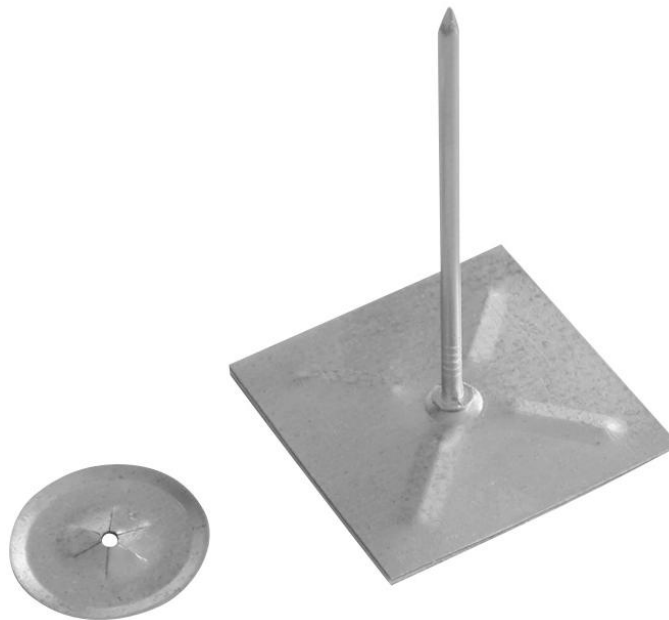
Dalším používaným typem je tepelná izolace na bázi čedičové vlny o tloušťce o různých tloušťkách, která je z jedné strany potažená hliníkovou folií. Součinitel tepelné vodivosti $\lambda =$ je 0,036W/mK. Tato tepelná izolace vyniká výbornými tepelně izolačními vlastnostmi, požární odolností, kvalitními akustickými vlastnostmi a jsou hygienicky a ekologicky nezávadné [4].

Pro jejich uchycení se využívají navařovací trny (v případě konstrukce komory z plechu) nebo samolepicí trny (v případě konstrukce komory z dřevěných desek), na které je izolační materiál napíchnut a zajištěn proti vysunutí z trnu kulatou přichytkou z pozinkovaného plechu. Dojde-li během montáže k protržení hliníkové folie, je možné tyto

trhliny překrýt hliníkovou lepicí páskou [5].



Obr. 5 – Tepelná izolace na bázi čedičové vlny [4]



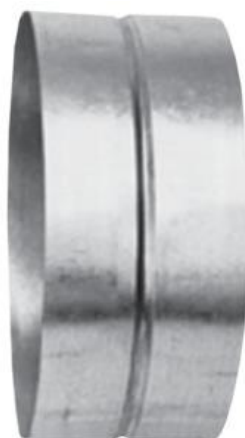
Obr. 6 – Samolepicí trny [5]

3.3 Přívod a odvod chladicího vzduchu

Z příkladu konstrukce kalorimetrické komory na Obr. 1 a Obr. 2 jsou pro přívod a odvod chladicího vzduchu použity dvě kovové (plechové) trubky ideálně s přírubou (Obr. 7), které jsou umístěny na obou bočních stranách komory. Na přívodní potrubí je pomocí plechové spojky (Obr. 8) namontován ventilátor (Obr. 9) s proměnlivou nebo konstantní rychlostí sací síly. Kalorimetrická komora by měla být navržena tak, aby alespoň dvě stěny byly odnímatelné pro zajištění dobrého přístupu a manipulace.



Obr. 7 – Plechová trubka s přírubou [14]



Obr. 8 – Plechová spojka [15]



Obr. 9 – Ventilátor [16]

3.4 Přístroje a měřicí systém

3.4.1 Měření teplot pomocí termočlánků

Z rovnice (3) je patrné, že cílem je spíše měření rozdílů teplot vzduchu v každé komoře ΔT_1 a ΔT_2 než měření absolutní teploty vzduchu. Pro tento účel měření se navrhuje využití termočlánků.

Volba počtu a rozmístění termočlánků závisí na rozložení teploty stroje, který se má měřit. Použití této měřicí techniky má následující výhody:

- Měření rozdílů teplot vzduchu v každé komoře (dvoukomorový kalorimetr)
- Nerovnoměrné rozložení teploty distribuované ze vstupní části komory do výstupní
- Není vyžadován kompenzační obvod pro výpočet absolutní teploty a v důsledku toho se jedná o jednoduché měření pomocí obvodu z termočlánků

Pro jednokomorový kalorimetr je ideální použití dvou termočlánků, z nichž se jeden umístí do části pro přívod vzduchu a druhý do části pro odvod vzduchu [1].

3.4.1.1 Co je to vlastně termočlánek

Termočlánek je snímač pro měření teploty. Skládá se ze dvou různých kovů, které jsou spojeny do jednoho bodu. Pokud je tento spoj zahříván nebo chlazen, dojde ke vzniku napětí souvztažné k teplotě. Termočlánekové slitiny jsou dodávány jako dráty [6].

3.4.1.2 Druhy a typy termočlánků:

Termočláanky jsou k dispozici v různých kombinacích kovů nebo kalibrací. Nejrozšířenější a nejpoužívanější jsou kalibrace J, K, T a E. Pro vysoké se využívají kalibrace R, S, C a GB. Každý typ kalibrace má různý teplotní rozsah a pracovní podmínky, ačkoliv se maximální teplota mění dle průměru drátu použitého na termočlánek. I když typ kalibrace termočláanky určuje rozsah teploty, je maximum rozsahu také omezeno průměrem termočláankyvého drátu. To znamená, že s velmi tenkým termočláankyvéým drátem nelze dosáhnout plný rozsah teploty [6].



Obr. 10 – Termočlánek typu K [18]

3.4.1.3 Výběr termočlánu

Termočlánek měří v širokém rozsahu teplot a může být relativně robustní. Pro výběr termočlánu se používají následující kritéria [6]:

- Teplotní rozsah
- Chemická odolnost termočlánu nebo materiálu pláště
- Odolnost proti abrazi a vibracím
- Požadavky instalace (potřeba kompatibility s existujícím přístrojem, existující otvory mohou určovat průměr sondy)

3.4.1.4 Typ měřicího spoje

Pláštěvané termočlánekové sondy jsou k dodání ve třech typech měřicího konce: uzemněný, neuzemněný nebo nechráněný [6].

Termočlánek s uzemněným měřicím koncem

U uzemněného měřicího konce sondy jsou termočlánekové dráty fyzicky spojeny s vnitřní stěnou pláště termočlánu. To má za následek dobrý přenos tepla z vnějšku přes stěnu pláště sondy k termočlánekovému spoji (viz. Obr. 11) [6].



Obr. 11 – Uzemněný měřicí konec [6]

Termočlánek s neuzemněným měřicím koncem

V neuzemněné (izolované) sondě je termočlánekový spoj oddělen od stěny pláště sondy. Odezva u tohoto termočlátku je pomalejší než u typu uzemněného, ale poskytuje se zde elektrická izolace (viz. Obr. 12) [6].



Obr. 12 – Neuzemněný měřicí konec [6]

Termočlánek s nechráněným měřicím koncem

Termočlánek s nechráněným spojem má spoj vysunutý vně z konce pláště a je tak vystaven okolní atmosféře. Tento typ nabízí nejlepší odezvu, avšak použití je omezeno na suché nekorozivní a beztlakové aplikace (viz. Obr. 13) [6].



Obr. 13 – Nechráněný konec [6]

Teplotní rozsahy běžně používaných termočládků [6]:

Kalibrace	Teplotní rozsah
J	0°C – 750°C
K	-200°C – 1250°C
E	-200°C – 900°C
T	-200°C – 350°C

3.4.2 Měřič teploty Term2205

Měřič teploty typu Term2205 je elektronický přístroj pro měření teploty termočládky typu K. Přístroj obsahuje 5 samostatných měřicích kanálů s galvanickým oddělením elektrických obvodů. Jednotlivé termočládky jsou k přístroji připojeny prostřednictvím termočládkových konektorů typu SMP. Měřená teplota je zobrazena na čtyřmístném displeji o výšce znaků 14mm. Pro volbu kanálu, jehož teplota bude zobrazena na displeji, slouží pět

tlačítek s indikačními diodami LED. Přístroj je vybaven sériovým rozhraním typu RS232. Software dodaný s přístrojem umožňuje nastavení kalibračních konstant pro jednotlivé termočlánky a rovněž čtení měřených teplot i termočlánekových napětí. Rozsah měření je od 0 do +400°C s rozlišením 0,1°C [7].

Přístroj měří cyklicky všech pět teplot rychlostí 2 měření za sekundu pro každou teplotu. Dále je snímána teplota svorek termočlánku, která je pak použita pro korekci měřených teplot. V případě poruchy měření jsou na displeji zobrazeny znaky „nnnn“. V tomto případě je nutné nejprve zkontrolovat termočlánek, který je pravděpodobně poškozen. Volbu jiného kanálu provedeme stiskem příslušného tlačítka. Na displeji je vždy zobrazena teplota kanálu, pro který svítí odpovídající dioda LED na tlačítku [7].

Pro připojení k počítači je určen propojovací kabel k sériové lince RS232. Kabel je zapojen symetricky a oba jeho konce jsou shodné. Do počítače se kabel zapojí na konektor COM1 nebo COM2. Software obsahující měřicí programy je dodáván společně s přístrojem.



Obr. 14 – Měřič teploty: Typ Term2205 [7]

3.5 Měření absolutní teploty pomocí odporových teplotních detektorů RTD (Resistance temperature detektor):

Měření absolutní teploty pro správný odhad úniku tepla z komory je nutné provádět venku a uvnitř kalorimetrické komory. Je však nutná znalost absolutní teploty vzduchu kolem testovaného motoru, aby nedošlo k jeho přehřívání. K tomuto účelu se pro měření absolutní teploty používají odporové teplotní detektory RTD.

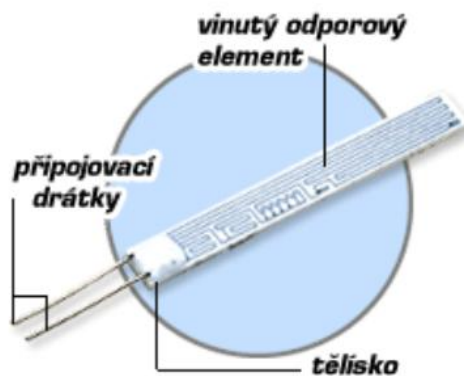
Všechny RTD moduly jsou umístěny na ISO-nosič a připojeny prostřednictvím kanálů na I/O desce k počítači pro A/D převod údajů z měření. Příkladem, každý RTD modul vyrábí 0.5 V signál, který odpovídá teplotě v rozmezí 0 – 200°C, což dává rozlišení 25 mV na °C. Kalibrace RTD se provádí v rozsahu pracovních teplot 0 až 100°C s maximální udávanou chybou 0.1°C [1].

3.5.1 Co je vlastně odporový detektor (odporový teploměr)

Z názvu je jistě patrné, že se jedná o snímače používané k měření teploty, neboť odpor elementu je funkcí jeho teploty. Z velké části se jedná o odporové elementy tvořeny tenkým odporovým drátem určité délky, který je navinutý kolem keramického nebo skleněného tělíska. Obvykle se tyto elementy vkládají do ochranné sondy, protože jsou velice křehké. Odporový element je vyroben z čistého materiálu, jehož odpor byl při různých teplotách zaznamenán a dokumentován. Jedná se tedy o materiál, který má určitou změnu odporu při určité změně teploty. Dá se tedy již dopředu stanovit odpor snímače při určité teplotě [8].

3.5.2 Obvyklé materiály pro odporové teploměry:

- Platina (velmi často, přesná)
- Nikl
- Měď
- Balco (dnes již ne)
- Wolfram (dnes již ne)



Obr. 15 – Typické provedení odporového snímače [8]

3.5.3 Výhody použití odporového snímače

Odporové teploměry patří k nejpřesnějším snímačům teploty. Nejen že poskytují dobrou přesnost, ale je to také výborná stabilita a opakovatelnost. Většina standardních odporových teploměrů vyhovují normě DIN IEC třída B.

Odporové teploměry jsou relativně odolné vůči elektrickému rušení, a proto se dobře hodí k měření teploty ve výrobních prostorách, zejména u motorů, generátorů a jiných zařízení s vysokým napětím [8].

3.5.4 Provedení odporových snímačů

3.5.4.1 Odporové elementy

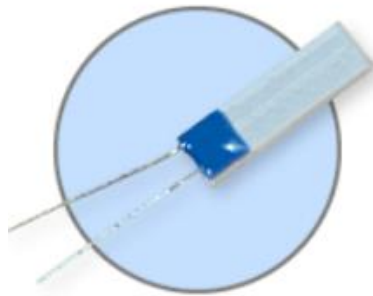
Odporový element je nejjednodušší forma odporového teploměru. Skládá se z kousku drátku navinutého kolem keramického nebo skleněného tělíska. Používají se přímo jen ve stísněných prostorách [8].



Obr. 16 – Odporové elementy [8]

3.5.4.2 Odporové elementy pro povrchové teploty

Element pro povrchovou teplotu je zvláštní typ odporového elementu. Je konstrukčně co nejtenčí, aby se dosáhlo dobrého kontaktu při měření teploty na plochých površích [8].



Obr. 17 – Odporové elementy pro povrchové teploty [8]

3.5.4.3 Odporové teploměry – sondy

Odporové sondy jsou mnohem robustnější. Sonda se skládá z odporového elementu vloženého do kovové trubky nazývané plášť. Tento plášť chrání element před vnějším prostředím [8].



Obr. 18 – Odporové elementy – sondy [8]

4 Vlastní návrh zkušební kalorimetrické komory

Zadáním diplomové práce je cenová rozvaha zkušební kalorimetrické komory pro měření ztrát kalorimetrickou metodou pro stroje do výkonu 100kW. Rozhodl jsem se vypracovat návrh pro stavbu jednokomorové kalorimetrické komory s otevřeným okruhem chlazení. Parametry, použité materiály a způsob konstrukce jsou popsány v dalších částech této kapitoly.

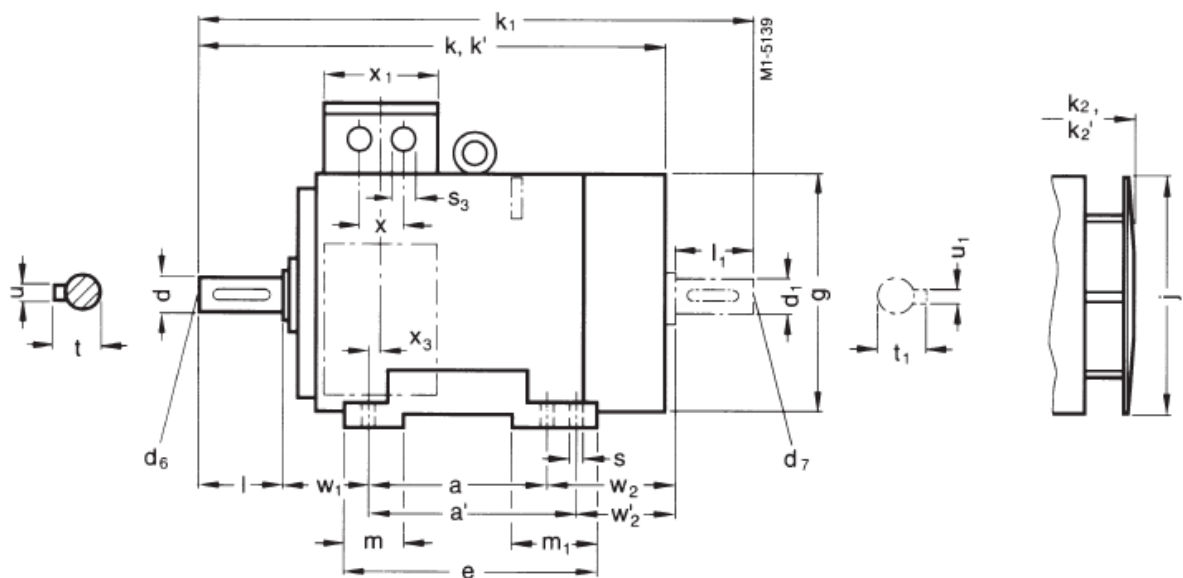
4.1 Měření napětí a proudů:

Měření elektrických veličin jako napětí, proud a výkon se může provádět za použití běžných laboratorních přístrojů. Nicméně tyto přístroje mohou měřit zkreslené hodnoty vzhledem k omezené šířce frekvenčního pásma. Za tímto účelem byly navrženy a realizovány napěťové a proudové měřicí obvody a zaznamenávaly průběh napětí a proudů testovaného motoru prostřednictvím D/A systému. Pro měření napětí se používají vhodné napěťové děliče ve spojení s oddělovacími zesilovači.

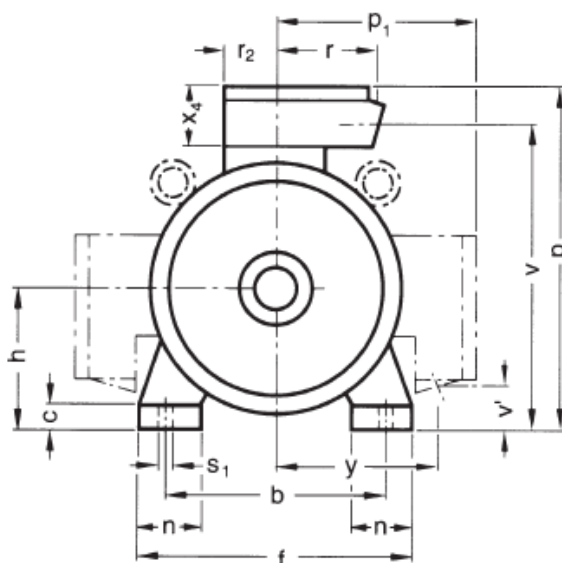
Pro měření proudů se používají Hallovy snímače. Naměřené hodnoty (křivky) odpovídají každému testu [1]

4.2 Parametry zkušební komory pro měření ztrát kalorimetrickou metodou

Nejprve bylo důležité určit velikost stroje, pro který bude kalorimetrická komora zhotovena. Jako výrobce motorů jsem si vybral celosvětově známou a uznávanou společnost Siemens. Na jejich stránkách jsem si vyhledal rozměry potřebného elektrického stroje, konkrétně jimi označovaný typ 280M o jmenovitém výkonu 100kW a poměrně vysoké hmotnosti 600 kg [9]. Jedná se o trojfázový asynchronní motor s kotvou nakrátko. Rozměry mnou zmiňovaného motoru jsou uvedeny níže.



Obr. 19 – Rozměry elektrického motoru typ 280M – boční pohled [9]



Obr. 20 - Rozměry elektrického motoru typ 280M – čelní pohled [9]

Typ	DIN	a	a'	b	c	e	f	g ¹	h	j	k	k ²	k ₁ ³
280M		368	419	457	42	479	557	575	280	525	1005	1080	1155
Typ	DIN	k ₂	k ₂ ²	m	m ₁	n	p	p ₁	r	r ₂	s	s ₁	s ₃
280M		1155	1230	100	151	100	770	490	200	120	24	30	M63 x1,5
Typ	DIN	v	v'	w ₁	w ₂	x	x ₁	x ₃	x ₄	y	d	d ₆	l
280M		675	80	190	266	95	234	30	193	410	65	M20	140
Typ	DIN	t	u	d ₁	d ₇	l ₁	t ₁	u ₁					
280M		69	18	60	M20	140	64	18					

Tabulka 1 – Rozměry elektrického stroje o výkonu 100kW [9]

Jak je patrné z tabulky Tabulka 1 základní rozměry motoru v , $š$, h (výška, šířka, hloubka) jsou 770 mm, 557 mm, 1005 mm. Ovšem svorkovnice nemusí být vždy umístěna pouze na horní části motoru, ale může být jak vlevo tak i vpravo. Proto jsem zvažoval i tyto možnosti a tudíž šířka motoru narostla z hodnoty $f=557$ mm na hodnotu cca 980 mm ($2 \times p_1$).

Z důvodu vyšší hmotnosti motoru jsem jako stavební materiál zvolil dřevěnou desku vyráběnou z dřevěných vláken označovanou jako MDF viz. Obr. 23. MDF desky jsou v surovém stavu (tzn. nelakované, nebarvené, nelaminované). Pro spodní část kalorimetrické komory, která ponese celou váhu motoru, jsem zvolil tloušťku MDF desky 40mm. Pro zbytek komory je dostačující tloušťka MDF desky 20 mm. Komora se tedy bude skládat z desek

MDF o rozměrech:

- Základová část (podlaha) – 1324 x 1349 x 40 mm
- Boční stěny – 2 x 1349 x 972 x 20 mm
- Přední stěna – 1284 x 972 x 20 mm
- Zadní stěna – 1284 x 972 x 20 mm
- Horní část (víko) – 1324 x 1349 x 20 mm

Kalorimetrická komora je konstruována ze dvou pevných částí. Tím mám na mysli, že jednou částí je “podlaha” pevně spojená s přední stranou komory a druhou částí je levá, pravá a zadní stěna, které jsou napevno spojeny s vrchní částí. To je z důvodu, aby bylo možné odejmout větší část komory, pohodlně ji osadit testovaným motorem a také pro lepší manipulaci. Pro spojení desek jsem zvolil samořezné šrouby se zápusťnou hlavou $\varnothing 4,8$ x 60 mm (viz. Obr. 22), pro které je však potřeba předvrtat otvor cca $\varnothing 2,5$ mm, jinak by mohlo docházet ke štípání či jiné deformaci MDF desek. Šrouby jsou umístěny cca. 100 mm od sebe.

Pro maximální utěsnění spár a zvýšení pevnosti je vhodné potřítk kontaktní plochy spojů desek chemoprenovým lepidlem. Ve středu levé a pravé strany je vyvrtán otvor $\varnothing 152$ mm pro přívod a odvod vzduchu a následně osazen plechovou rourou s přírubou $\varnothing 150$ x 120 mm. Střed otvoru je v bodě 674.5 x 496 mm. Roura je osazena tak, aby příruba byla z vnitřní strany komory. Následně je upevněna pomocí čtyř samořezných šroubů $\varnothing 2,5$ x 9mm. Na přívod vzduchu je pomocí plechové spojky a 8-mi samořezných šroubů $\varnothing 2,5$ x osazen ventilátor $\varnothing 150$ mm, který zajišťuje přívod chladicího vzduchu a proudění v kalorimetrické komoře.

Přívodní kabel pro napájení testovaného motoru je vyveden skrze přední stěnu komoru v jejím středu zhruba 100mm od spodního okraje.

**Obr. 21 – MDF deska [11]****Obr. 22 – Samořezný šroub se zápusťnou hlavou [17]**

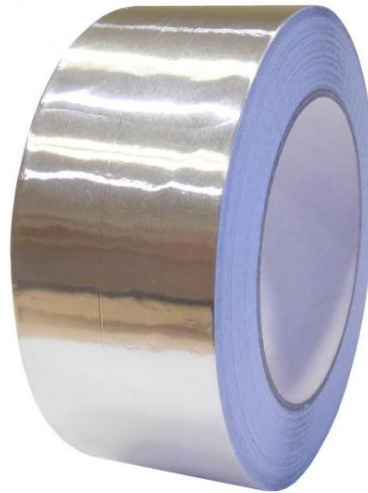
Jako izolační materiál jsem použil polystyren typu EPS (extrudovaný polystyren), jehož vlastnosti a způsob montáže jsou popsány v kapitole 3.1. Pro izolaci vnitřní části kalorimetrické komory (kromě “podlahy”) je použit polystyren o tloušťce 50 mm potažený ještě 2 mm polystyrenovou termofolií. Poté je potřeba polystyren vyříznout v místě přívodu a odvodu chladicího vzduchu. Na podlahu (pod motor) je použita jen polystyrenová termofolie, neboť z důvodu vysoké váhy motoru by při použití 50 mm EPS polystyrenu došlo k jeho destrukci. Motor je vyvýšen pomocí dřevěných hranolů 400 x 15 x 10 mm. To je z důvodu využívání kalorimetrické komory pro různé typy motorů s různými roztečemi upevňovacích otvorů. To proto, aby se motory neuchycovaly přímo do spodní části kalorimetru. Až budou tyto hranoly značně “provrtané” (opotřebované), jejich výměna bude jednoduchá.

Veškeré polystyrenové izolace jsou lepeny speciálním montážním lepidlem Peri-Bond [10] (viz. Obr. 23). Montážní lepidlo se nanese kolem dokola lepené části izolace, nechá se 10 minut zatuhnout a poté se přimáčkne na určené místo. Do 30-ti minut je lepidlo zcela zatuhlé. Tímto způsobem aplikujeme lepidlo i na polystyrenovou termofolii, kterou poté přilepíme přes EPS polystyren, jímž jsme izolovali vnitřní část komory.

Vnější část celé komory (až na “podlahu”) pokryjeme polystyrenovou termofolií, avšak musíme brát v úvahu fakt, že komora se skládá ze dvou částí, které se v případě potřeby musí dát oddělit. Proto spáry kolem spodní části a přední stěny komory musí být odděleny (proříznuty). Pokud omylem dojde k protržení hliníkové folie, je třeba trhlinu přelepit lepicí hliníkovou páskou (Obr. 24).



Obr. 23 – Montážní lepidlo Peri-Bond [10]



Obr. 24 – Hliníková lepicí páska [13]

Pro měření ztrátového tepla jsem zvolil termočlánky typu K s pracovním rozsahem -50°C až 200°C (viz. 3.4.1). Použity jsou dva termočlánky, jejichž měřicí hroty jsou umístěny ve vstupní části pro přívod vzduchu a druhý ve výstupní části. Termočlánky jsou připojeny k měřicímu přístroji prostřednictvím konektorů SMP. Jako měřicí přístroj je použit typ Term2205 (viz. 3.4.2).

5 Návrh kalorimetrické komory pro stroje do výkonu 100kW – 2D model

Kalorimetrickou komoru jsem navrhoval v programu Autocad 2009 dle výše zmíněných rozměrů materiálů, které jsou ke stavbě komory použity. Jedná se o dva samostatné výkresy, čelní pohled v řezu a boční pohled na stranu s ventilátorem. Výkresy jsou přiloženy na konci diplomové práce. Veškeré rozměry jsou uvedeny v mm.

6 Cenová rozvaha pro stavbu kalorimetrické komory

6.1 MDF desky

Základní částí kalorimetrické komory jsou MDF desky. Pro jednodušší a přesnější montáž jsou desky nařezány na míru přímo od dodavatele. To samé platí i pro otvory na přívod a odvod chladicího vzduchu v bočních stěnách komory. Jako dodavatele jsem vybral společnost SMĚJA. [11] Cena za použité MDF desky včetně truhlářských prací jsou uvedeny v Tabulka 2.

	Rozměry (mm)	Povrch S (m ²)	Cena (kč/ m ²)	Cena (kč)
Spodní část (podlaha)	1324 x 1349 x 40	1,79	329	558,9
Boční stěny (2x)	2 x (1349 x 972 x 20)	2x 1,31	145	380
Přední stěna	1284 x 972 x 20	1,25	145	181
Zadní stěna	1284 x 972 x 20	1,25	145	181
Víko	1324 x 1349 x 20	1,79	145	259,5
Truhlářské práce				290
Samorezné šrouby	Ø 4,8 x 60	80 ks	0,35	28
Chemopren	300ml			98
Celková cena				1985

Tabulka 2 – Tabulka cen MDF desek a truhlářských prací

Ceny jsou uvedeny bez DPH

6.2 Izolační materiál

Pro izolaci kalorimetrické komory jsou použity dva typy polystyrenu. Pro vnitřní izolaci komory je použit polystyren EPS [3] o tloušťce 50 mm, který je poté pokryt druhým typem polystyrenu s termofolií o tloušťce 2 mm. Polystyren typu EPS se prodává po deskách o velikosti 1000 x 500 mm a polystyren s termofolií v rolích o různých rozměrech

Na izolaci vnitřní části komory EPS polystyrenem bude potřeba zhruba 14 desek 1000 x 500 mm (bráno s rezervou). Na izolaci vnitřní části přes EPS polystyren a vnější části (krom podlahové desky) je potřeba zhruba 15 m² ± 10% polystyrenové termofolie [12]. Ta se dodává o šířce 70 mm, tloušťce 2mm a délce dle potřeby. V mém případě se jedná o délku 22 m ± 10%. K lepení veškeré izolace je zapotřebí dvou kusů montážního lepidla Peri-Bond (Obr. 23). Pokud dojde během montáže v protržení hliníkové folie, je třeba trhlinu přelepit hliníkovou lepicí páskou [13]. Ceny za použitý izolační materiál jsou vedeny v Tabulka 3.

	Rozměry (mm)	Kusy	Cena (kč/ ks)	Cena (kč)
Polystyren EPS	1000 x 500	14	34	558,9
Polystyrenová Termofolie	700 x 2200 x 2	1	33,62/m ²	504,3
Peri-Bond		2	185	370
Hliníková páska		1	99	99
Cena celkem				1532,2

Tabulka 3 – Tabulka cen izolačního materiálu

Ceny jsou uvedeny bez DPH

6.3 Chladicí systém

Jako chladicí systém kalorimetrické komory je použit tzv. otevřený typ (viz. 2.3), kde se jako chladicí medium používá vzduch. Pro chladicí systém kalorimetrické komory jsou použity následující položky [14] [15] [16] [17].

	Rozměry (mm)	Kusy	Cena (kč/ ks)	Cena (kč)
Plechová trubka s přírubou	ø 150 x 120	2	45	90
Plechová spojka	ø 150	1	44	44
Ventilátor		1	499	499
Samořezné šrouby	2,5 x 9	16	0,20	3,20
Cena celkem				636,2

Tabulka 4 – Tabulka cen chladicího systému

Ceny jsou uvedeny bez DPH

6.4 Měřicí systém

Měřicí systém je složený ze dvou termočlánků typu K o teplotním rozsahu -50°C až +200°C. Oba termočlánky jsou připojeny k měřicímu přístroji Term 2205. Ceny použitých součástí nutných k měření kalorimetrických ztrát jsou uvedeny v tabulce níže [7][18].

	Kusy	Cena (kč/ ks)	Cena (kč)
Termočlánek K	2	247	494
Měřicí přístroj Term2205	1	4300	4300
Cena celkem			4794

Tabulka 5 – Tabulka cen měřících komponentů

Ceny jsou uvedeny bez DPH

6.5 Shrnutí

Provedení cenové rozvahy kalorimetrické komory je spíše orientační. Ceny jednotlivých položek se mohou u různých prodejců lišit. Cenová rozvaha je provedena zvlášť pro jednotlivé části kalorimetrické komory (MDF desky, izolace, chlazení, měřicí technika). V následující tabulce je kompletní přehled všech materiálů a přístrojů, z kterých je kalorimetrická komora sestavena.

	Rozměry (mm)	Kusy	Cena (kč/ ks)	Cena (kč)
Spodní část (podlaha)	1324 x 1349 x 40	1,79	329	558,9
Boční stěny (2x)	2 x (1349 x 972 x 20)	2x 1,31	145	380
Přední stěna	1284 x 972 x 20	1,25	145	181
Zadní stěna	1284 x 972 x 20	1,25	145	181
Víko	1324 x 1349 x 20	1,79	145	259,5
Truhlářské práce				290
Samořezné šrouby	Ø 4,8 x 60	80 ks	0,35	28
Chemopren	300ml			98
Polystyren EPS	1000 x 500	14	34	558,9
Polystyrenová Termofolie	700 x 2200 x 2	1	33,62/m ²	504,3
Peri-Bond		2	185	370
Hliníková páska		1	99	99
Plechová trubka s přírubou	Ø 150 x 120	2	45	90
Plechová spojka	Ø 150	1	44	44
Ventilátor		1	499	499
Samořezné šrouby	2,5 x 9	16	0,20	3,20
Termočlánek K		2	247	494
Měřicí přístroj Term2205		1	4300	4300
Celková cena				8947,40
Celková cena vč. DPH (21%)				10826,40

Tabulka 6 – Tabulka finální ceny kalorimetrické komory

Z Tabulka 6 je patrné, že celková cena, na kterou vyjde mnou navržená kalorimetrická komora je konečných cca 11000 Kč včetně DPH. Jak jsem se již zmínil, cena jednotlivých položek kalorimetrické komory se může u různých prodejců lišit. Nicméně si myslím, že se nebude jednat o zvlášť vysoký peněžní rozdíl. Závěrem bych ještě zmínil, že stavba kalorimetrické komory bude provedena samotným zákazníkem, neboť se nejedná o nikterak složitý proces a zvládne to každý šikovnější kutil. Z toho důvodu jsem do celkové ceny nezahrnoval montážní práce.

Závěr

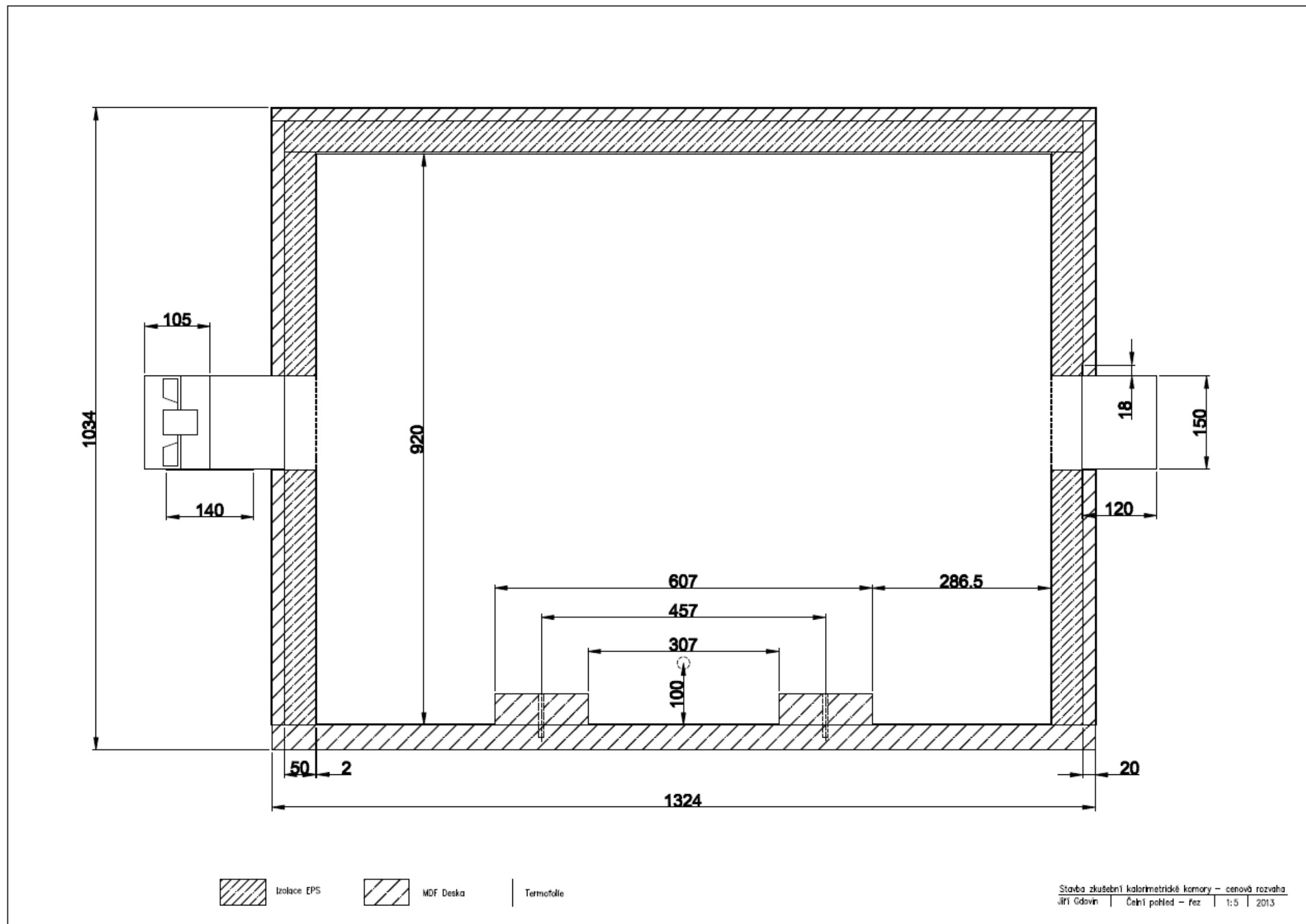
Vzhledem k finanční a konstrukční náročnosti jsem se rozhodl vypracovat cenovou rozvahu pro jednokomorový typ kalorimetrické komory. Oproti dvoukomorovému typu kalorimetrické komory se sice jedná o méně přesnou, zato ale levnější variantu. K chlazení komory slouží tzv. otevřený okruh. Jedná se o chlazení vzduchem, kde je ve vstupní části ventilátorem nasáván chladný vzduch a oteplený vypouštěn výstupní částí.

Jako základ pro stavbu kalorimetrické komory jsou použity MDF desky, na ně je připevněn polystyren EPS a termofolie. O přívod vzduchu se stará $\varnothing 150$ mm ventilátor. Pro měření tepelných ztrát jsou použity dva termočlánky typu K a měřicí přístroj Term2205.

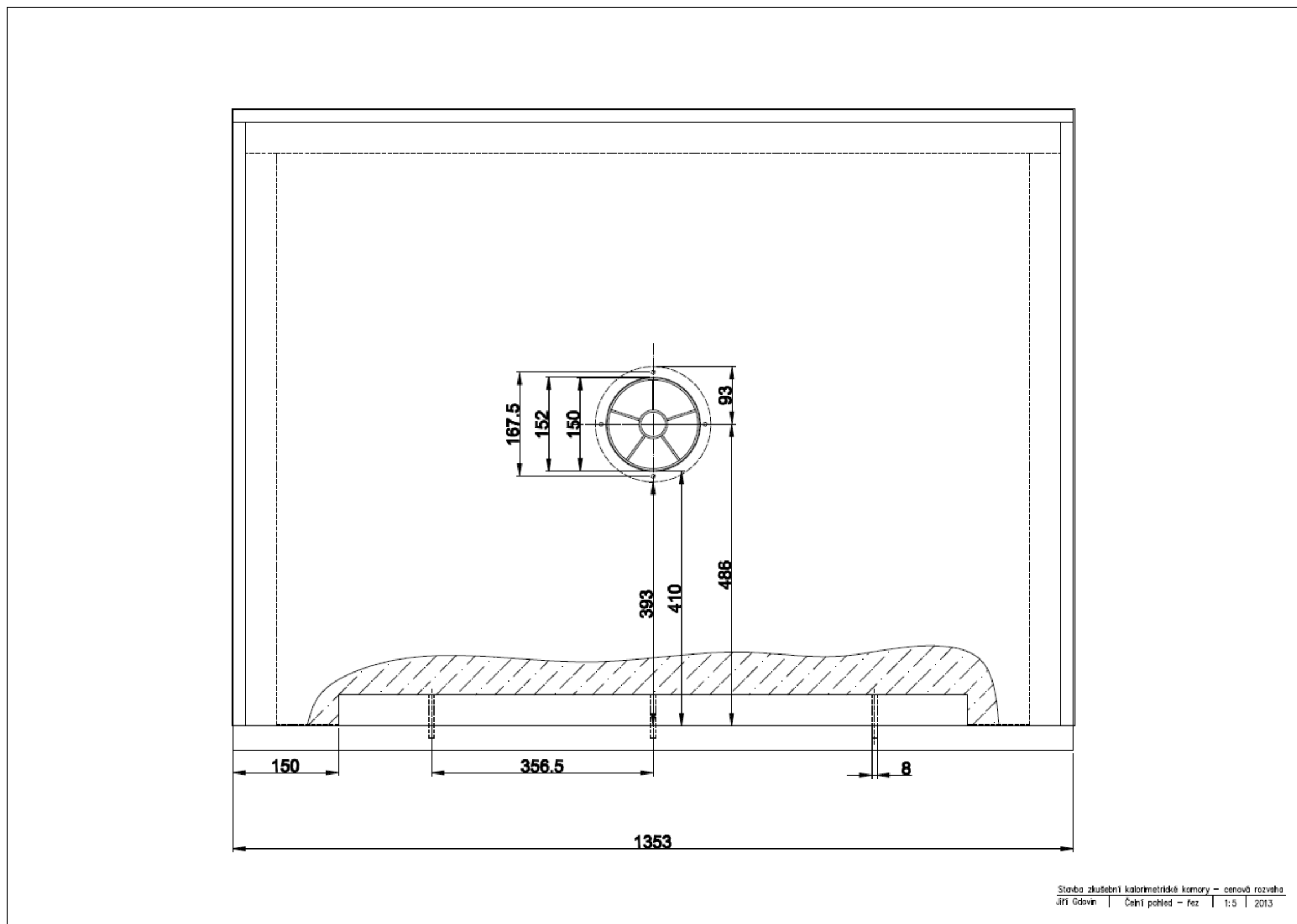
Cenová rozvaha je poté provedena pro každou část kalorimetrické komory: základní část-MDF desky, izolace, chlazení a nakonec měřicí systém. Typ, množství a ceny jednotlivých položek jsou přehledně rozepsány v tabulkách. Uvažované ceny nejsou na trhu cenami nejnižšími, jedná se spíše o průměrné ceny pro koncového zákazníka. Výsledná cena kalorimetrické komory se proto může lišit.

Použitá literatura

- [1] 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
- [2] Minervini, J. V.; Steevens M. M.; Hoening M. O.: *Calorimetric Measurement of AC loss*
- [3] <http://www.isover.cz/isover-eps-100s>
- [4] <http://www.isool.cz/index.php/tech-izolace-z-min-vaty.html>
- [5] <http://www.darte.cz/technicke-izolace/trny-navarovaci-a-samolepici>
- [6] <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>
- [7] <http://www.aterm.cz/Teperm.htm#21>
- [8] <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/RTD.html>
- [9] <http://stest1.etnetera.cz/ad/current/index.php?ctxnh=ea0f46d792&ctxp=home>
- [10] <http://www.stavebniny-rychle.cz/peri-bond.html>
- [11] <http://www.smeja.cz/cz/index.php?odd=mdf>
- [12] <http://www.posuvnedvere.com/termoizolacni-pas-mirelon-al-tl-2-mm-s-70-cm/1332>
- [13] <http://www.europack.cz/katalog/samolepici-pasky/izolacni-pasky/hlinikove-a-pokovene/produkt/hlinikova-paska>
- [14] <http://www.vzduchotechnikaobchod.cz/vzduchotechnikaobchod/eshop/18-1-PRISLUSENSTVI-VZT/463-3-Priruby-a-zaslepky/5/1091-Kovova-priruba-prumer-100-m>
- [15] <http://www.vzduchotechnikaobchod.cz/vzduchotechnikaobchod/eshop/18-1-PRISLUSENSTVI-VZT/444-3-Spojky/5/1072-Spojka-vnejsi-kovova-prumer-150-mm>
- [16] <http://www.vents.cz/catalog/index.php?cat=1&sub=160>
- [17] <http://shop.berner.eu/berner/cz/productgroup/677193/Klicovy+zakaznik/Spojovaci+a+normalizovane+soucastky>
- [18] <http://www.meteostanice.cz/zbozi/4448/Teplotni-sonda-dratkoveho-typu--termoclanek-K.htm>



Obr. 25 – Kalorimetrická komora – čelní pohled v řezu



Obr. 26 – Kalorimetrická komora – boční pohled