



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SNÍMAČ VLHKOSTI VZDUCHU

MOISTURE SENSOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN ČERMÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2008

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Čermák Jan
Ročník: 3

ID: 78220
Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Snímač vlhkosti vzduchu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou měření vlhkosti v laboratorních podmínkách. Zabývejte se problematikou kalibrace těchto snímačů.

Ověřte vlastnosti dostupných snímačů vlhkosti vzduchu - stanovte citlivost, teplotní závislost, časové konstanty snímačů.

Navrhněte a realizujte analogovou část snímače vlhkosti vzduchu s unifikovaným výstupem 0-5V využívající některého dostupného čidla. Funkci a parametry modulu ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 1.2.2008

Termín odevzdání: 2.6.2008

Vedoucí projektu: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření vlhkosti vzduchu. Jsou zde popsány základní vzorce vztahující se k vlhkosti vzduchu a podrobný popis jednotlivých metod, které se využívají ve snímačích pro měření vlhkosti vzduchu. Následuje zmínka o problematice měření vlhkosti v pevných látkách. Dále se práce zabývá kalibrací snímačů. V poslední části je popsáno praktické sestavení obvodu s unifikovaným výstupem, který je závislý na okolní relativní vlhkosti. Mimo jiné je zde uvedeno i praktické měření vlhkosti v průmyslu a problematika s tím spojená.

Klíčová slova

- vlhkost vzduchu
- hygroskopické látky
- relativní vlhkost
- absolutní vlhkost
- rosný bod
- gravimetrická komora
- psychrometr
- dilatační vlhkoměr
- solné roztoky

Bibliografická citace:

ČERMÁK, J. *Snímač vlhkosti vzduchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky. 2008. 52 s., 8 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Annotation

This bachelor work consider with question of measurement of air humidity. Here are the basic theorem, wich have relation to air humidity, and detailed description of methods, wich are used in air humidity sensors. After come note about qestion of measurement humidity in soild substance. Next theme is calibration of sensors. In the last part is describe the structure of electrical network with unificated readout., wich is dependent on surrounding relative air humidity. Obiter work contain practical measurement of humidity in industry and qestions about it.

Keywords

- humidity air
- hygroscopic material
- relative humidity
- absolute humidity
- dew point
- gravimetric chamber
- psychrometr
- dilatation hygrometer
- salt solution

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Snímač vlhkosti vzduchu" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v použitých zdrojích na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za cenné připomínky, konzultace a odbornou pomoc při vypracovávání bakalářské práce.

V Brně dne :

Podpis:

Obsah

ÚVOD	9
1. TEORETICKÝ ÚVOD	10
1.1 Absolutní vlhkost vzduchu	10
1.2 Relativní (poměrná) vlhkost vzduchu.....	10
1.3 Rosný bod	11
1.4 Mollierův diagram	11
2. PRINCIPY MĚŘENÍ VLHKOSTI VZDUCHU	13
2.1 Dilatační vlhkoměry	13
2.2 Psychrometr	14
2.3 Optická metoda (Metoda rosného bodu)	15
2.4 Kapacitní princyp	16
2.5 Elektrolytický princip	17
2.6 Rezonanční princip č.1	18
2.7 Rezonanční princip č. 2	18
2.8 Gravimetrická metoda	19
2.9 Infračervená metoda	19
2.10 Odporový princip.....	20
2.11 Bakteriální princip	21
3. MĚŘENÍ VLHKOSTI PEVNÝCH LÁTEK.....	22
3.1 Měření vlhkosti obilovin v zemědělství	22
3.2 Měření vlhkosti půdy.....	23
3.3 Měření vlhkosti dřeva a stavebních materiálů.....	23
4. JUSTOVÁNÍ A KALIBRACE SNÍMAČŮ	25
5. PRAKTICKÁ ČÁST	27
5.1 Obvod s napětovým výstupem 0 až 5V	27
5.1.1 Oživení základního obvodu.....	27
5.1.2 Návrh přístrojového zesilovače.....	29
5.1.3 Návrh Schmittova klopného obvodu.....	30

5.1.4	Výsledné zapojení vlhkostního modulu	32
5.1.5	Napájecí modul	33
5.1.6	Ověření funkčnosti vlhkostního modulu	33
5.2	Obvod s frekvenčním výstupem	35
5.3	Vlastnosti dostupných snímačů	36
5.3.1	Postup při měření	37
5.3.2	Zhodnocení měření.....	37
5.4	Praktické měření vlhkosti v průmyslu	39
5.4.1	Průběh měření	39
5.4.2	Zhodnocení měření.....	40
6.	ZÁVĚR.....	41
7.	POUŽITÉ ZDROJE	42
	SEZNAM PŘÍLOH.....	44

Seznam obrázků

Obr. 1.1	Graf závislosti rosného bodu na teplotě	11
Obr. 2.1	Vlasový vlhkoměr.....	14
Obr. 2.2	Stacionární psychrometr	15
Obr. 2.3	Kapacitní senzor vlhkosti a teploty	17
Obr. 2.4	Rezonanční princip měření vlhkosti	18
Obr. 2.5	Odporový snímač vlhkosti.....	20
Obr. 3.1	Elektromagnetický snímač půdní vlhkosti	23
Obr. 3.2	Vlhkoměr pro měření vlhkosti materiálů.....	24
Obr. 4.1	Vlhkostní kalibrační sada	25
Obr. 5.1	Schéma zapojení základního modulu	28
Obr. 5.2	Schéma symetrického přístrojového zesilovače	29
Obr. 5.3	Vnitřní zapojení OZ LM358.....	30
Obr. 5.4	Upravené schéma Schmittova klopného obvodu.....	31
Obr. 5.5	Výsledné schéma vlhkostního modulu	32
Obr. 5.6	Schéma napájecího modulu	33
Obr. 5.7	Výstupní charakteristika vlhkostního modulu.....	34
Obr. 5.8	Schéma zapojení frekvenčního modulu.....	35
Obr. 5.9	Závislost frekvence modulu na kapacitě čidla.....	35
Orb. 5.10	Teplotní charakteristika čidla KFS33-LC.....	36
Obr. 5.11	Porovnání průběhů naměřených vlhkostí	40

Seznam tabulek

Tab. 4.1	Relativní vlhkosti solných roztoků	26
Tab. 5.1	Naměřené hodnoty na vlhkostním modulu.....	34
Tab. 5.2	Dostupné snímače vlhkosti vzduchu	36
Tab. 5.3	Vytvořené vlhkosti pro měření	37
Tab. 5.4	Naměřené hodnoty na snímačích.....	38

ÚVOD

Tato bakalářská práce na téma: „Snímač vlhkosti vzduchu“ obsahuje popis jednotlivých metod a principů, které se v současné době nejčastěji využívají pro snímání a měření vlhkosti ve vzduchu a v látkách s plynným skupenstvím. Jednotlivé metody a principy pro měření vlhkosti ve vzduchu jsou popsány v kapitole 2. Důvodem, proč měřit vlhkost právě ve vzduchu, může být několik. Od orientačního měření vlhkosti vzduchu v domácnosti přes měření vlhkosti v teráriích pro exotická zvířata až po měření vlhkosti ve skladech s ovocem. Principy, kterými se v dnešní době měří relativní vlhkost ve vzduchu je mnoho. Velmi blízké k tématu této práce je měření vlhkosti v kapalinách a pevných látkách, a proto tato práce obsahuje ve 3. kapitole i stručný popis základních metod pro měření různých materiálů v pevném skupenství. 4. kapitola popisuje základní principy kalibrace a justování snímačů. Tato práce také obsahuje a popisuje v 5. kapitole laboratorní měření na snímačích a určení jejich parametrů, popis návrhu vlhkostního modulu jehož výstupem je unifikované napětí 0 až 5 V závislé na okolní měřené relativní vlhkosti a praktické měření a porovnávání vlhkosti v průmyslu.

1. TEORETICKÝ ÚVOD

Vlhkost vzduchu je meteorologický prvek, který popisuje množství vodní páry ve vzduchu, která je obsažená zejména ve spodních vrstvách atmosféry a vzniká vypařováním z velkých vodních ploch, půdy, rostlin, živočichů atd. Vlhkost ve vzduchu můžeme vyjádřit dvěma způsoby, a to v absolutním a relativním tvaru. Absolutní a relativní množství vodní páry ve vzduchu je popsáno v následujících podkapitolách 2.1 a 2.2.

1.1 ABSOLUTNÍ VLHKOST VZDUCHU

Absolutní vlhkost vzduchu Φ je hmotnost vodní páry v 1 m³ vzduchu:

$$\Phi = \frac{m}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (2.1)$$

kde m je hmotnost vodní páry v kg a V je objem vzduchu v m³.

Absolutní vlhkost vzduchu změříme tak, že v daném objemu vzduchu V necháme projít hygroskopickou látkou (látkou pohlcující vlhkost nebo látkou zadržující vlhkost např. H₂SO₄, CaCl₂) o hmotnosti m_1 . Až látka pohltní všechnu vodní páru, zvětší se její hmotnost na hodnotu m_2 . Rozdíl $(m_2 - m_1)/V$ pak udává absolutní vlhkost vzduchu.

1.2 RELATIVNÍ (POMĚRNÁ) VLHKOST VZDUCHU

Relativní (poměrnou) vlhkost vzduchu určíme poměrem absolutní vlhkosti vzduchu a absolutní vlhkost vzduchu nasyceného vodními párami při dané teplotě:

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_m} \cdot 100 \quad [\%], \quad (2.2)$$

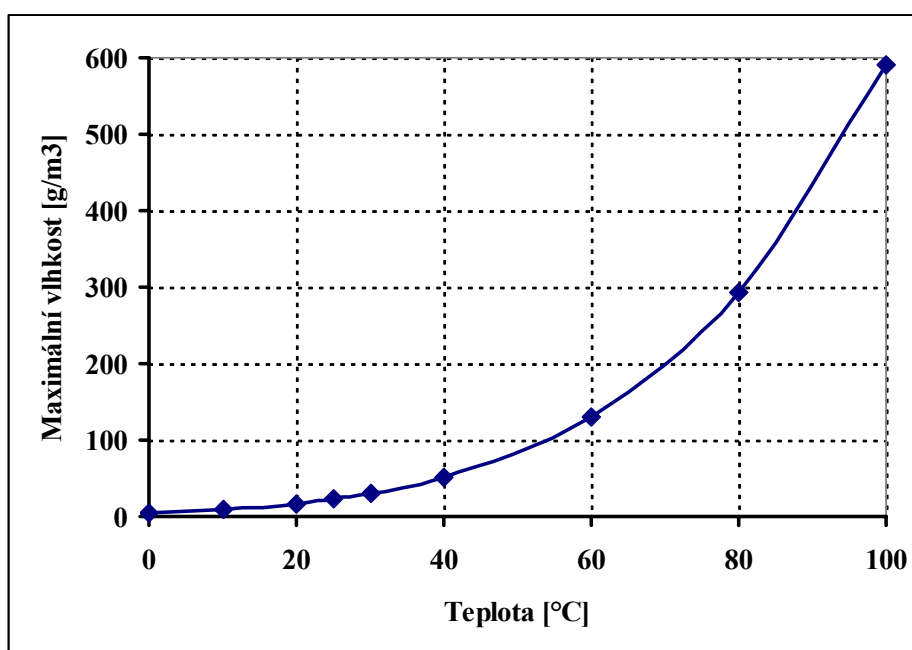
kde Φ je absolutní vlhkost a Φ_m je absolutní vlhkost nasyceného vzduchu.

Konkrétní hodnota vlhkosti vzduchu závisí tedy především na teplotě, viz. kapitola 2.3 metoda rosného bodu. S relativní vlhkostí se v praxi setkáme nejčastěji. I většina měřicích přístrojů udává vlhkost v relativním tvaru. Suchý vzduch má relativní vlhkost 0 % a nasycený vzduch má relativní vlhkost 100 %.

[1 str. 1422, 2 str. 271, 3, 4]

1.3 ROSNÝ BOD

Rosný bod znázorňuje stav, kdy bylo dosaženo nasycení vzduchu vodními párami. Do prostředí, kde bylo dosaženo rosného bodu, se již další vodní páry nemohou do vzduchu vypařit a případné nadbytky začnou kondenzovat ve vodu nebo při nízkých teplotách desublimovat v led. Závislost zobrazená v grafu č. 1.1 ukazuje, že se stoupající teplotou vzduchu roste maximální nasycení vodními párami exponenciálně a tohoto se využívá ke zjištění relativní vlhkosti u snímačů pracujících s optickou metodou (viz kapitola 2.3). Jednotlivé hodnoty nasycení vzduchu vodními párami při různých teplotách jsou uvedeny v příloze A. [5 str.72-4]



Obr. 1.1 Graf závislosti rosného bodu na teplotě

1.4 MOLLIERŮV DIAGRAM

Mollierův stavový diagram viz graf č. 1.2, nazvaný podle Richarda Molliera, ukazuje vzájemnou závislost vlhkosti vzduchu a teploty při izobarických dějích. V diagramu je na horizontální ose vyznačena měrná vlhkost vzduchu x [g/kg] a na vertikální ose je vyznačena teplota vzduchu t [°C]. V grafu jsou pak vyneseny křivky s konstantní relativní vlhkostí vzduchu φ [%]. Dále jsou pak v grafu

vyznačeny přímkou s konstantní inverzní hustotou vzduchu [kg/m^3] a přímkou s konstantní entalpií h [kJ/kg], což je tepelná energie jednotkového množství. Podobný Mollierovu diagramu je psychrometrický diagram (viz. příloha C), který je jejím převráceným a otočeným obrazem. [6]

2. PRINCIPY MĚŘENÍ VLHKOSTI VZDUCHU

2.1 DILATAČNÍ VLHKOMĚRY

Dilatační vlhkoměry fungují na základě tzv. hygroskopické vlastnosti některých syntetických organických látek měnit své rozměry na základě změny relativní vlhkosti. Nejčastěji se používají lidské vlasy nebo živočišné blány. Lidský vlas dokáže absorbovat vodu ze vzduchu. V závislosti na relativní vlhkosti a změnou obsahu vodní páry ve vzduchu dilatuje (mění svoji délku). Tohoto jevu se pak využívá pro funkci vlasového vlhkoměru. Princip spočívá ve sledování změny délky svazku odmaštěných lidských vlasů, které musí být napnuty tak, aby k nim proudil vzduch jehož vlhkost měříme. Tento svazek vlasů pak v závislosti na relativní vlhkosti mění svoji délku a přes malou kladku pohybuje rafičkou, která na ciferníku zobrazuje relativní vlhkost vzduchu. Při změně relativní vlhkosti vzduchu od 0 % do 100 % se odmaštěný lidský vlas prodlouží o 2,5 %. Protože závislost změny délky vlasu na relativní vlhkosti je značně nelineární, musí být tato nelinearita vyrovnána v kladce, nebo je ciferník nelineárně rozložen, jak je vidět na obr. 2.1. Výhodou vlasových vlhkoměrů je, že spolehlivě pracují i pod bodem mrazu. Nevýhodou je, že jsou choulostivé na otřesy, mohou maximálně pracovat do teploty 80 °C a často se musí regenerovat, tzn., že se vystaví vlhkosti blízko rosnému bodu, aby se obnovila jejich dilatační schopnost. Při orientačním měření v domácnosti se na tuto skutečnost zapomíná, ale v meteorologických podmínkách k tomuto regenerování dochází téměř každou noc, kdy se relativní vlhkost obvykle zvýší až k rosnému bodu. V laboratorních podmínkách by tento přístroj s přesností přibližně $\pm 3 \%$ příliš neobstál, ale pro orientační zjištění vlhkosti ve vzduchu bohatě postačí. [1 str. 1424, 7, 8]



Obr. 2.1 Vlasový vlhkoměr [9]

2.2 PSYCHROMETR

Psychrometr je jednoduchý přístroj sloužící k přibližnému určení relativní vlhkosti vzduchu. Nevýhodou profesionálně vyráběných psychrometrů je jejich vysoká pořizovací cena. Protože pracují na velmi jednoduchém principu, lehko si je dokáže i menší kutil hravě vyrobit.

Augustův psychrometr funguje na principu porovnávání teplot vzduchu na tzv. suchém a vlhkém teploměru. Tento psychrometr má tedy 2 teploměry, z nichž jeden měří relativní teplotu vzduchu v okolí. Na druhý teploměr je navlečen vlhčený pásový knot (viz. obr. 2.2 vlevo) a měří mezní adiabatické ochlazení. Tento teploměr se pak nazývá vlhký. Rozdíl teplot na suchém a vlhkém teploměru nazýváme též psychrometrická diference, která je přímo úměrná relativní vlhkosti. Tento pokles teploty na vlhkém teploměru je způsoben jevem, který doprovází vypařování kapaliny do prostoru, tzn. při rostoucím objemu (vypařování) a stálém tlaku teplota klesá a tento děj se odehrává při měření teploty na vlhkém teploměru.

Např.: Pokud by byla relativní vlhkost 100 %, k žádnému odpařování by na vlhkém teploměru nedošlo, protože by vzduch už nemohl více vlhkosti pojmout a teplota na obou teploměrech by byla stejná. K odečtení relativní vlhkosti se potom z tohoto rozdílu teplot používají psychrometrické tabulky nebo nomogramy a psychrometrické diagramy viz. příloha B a C.

Assmanův (aspirační) psychrometr využívá stejného principu jako Augustův psychrometr s tím rozdílem, že kolem teploměrů proudí vzduch a celý proces ochlazování je tím urychlen. [1 str. 1424, 5 str. 72-5, 10 str. 254, 11]



Obr. 2.2 Stacionární psychrometr [11]

2.3 OPTICKÁ METODA (METODA ROSNÉHO BODU)

Při ochlazování nějakého předmětu (např. zrcátka nebo skla v automobilu) se při určité teplotě začne předmět rosit. Pak o tomto stavu říkáme, že bylo dosaženo rosného bodu, který se značí ve °C. Tohoto děje využívají přístroje pro zjištění vlhkosti vzduchu pracující s touto metodou. Princip přístroje spočívá v detekování změny intenzity odraženého světla zrcátkem, kde LED dioda z jedné strany svítí pod úhlem na ochlazované zrcátko a při dosažení rosného bodu a jeho orosení, čidlo na druhé straně zrcátka zaznamená pokles intenzity odraženého světla a z aktuální

teploty tohoto bodu určí relativní vlhkost. Toto lze provést i odečtením z grafu nebo tabulky (viz. graf č. 1.1 nebo příloha A), ale většina přístrojů dnes tento úkon provádí automaticky, a výsledkem je zobrazení relativní vlhkosti, případně teploty vzduchu a teploty rosného bodu, na displeji. Také existuje opačný princip k výše uvedenému a konstrukce přístroje je přitom stejná jen místo obyčejného zrcátka je v přístroji ochlazováno černé zrcátko, které většinu světla které na něj dopadne se zrcátkem pohltí. Z jedné strany opět svítí pod úhlem LED dioda a z druhé je čidlo pro snímání intenzity světla z diody. Po dosažení teploty rosného bodu se ochlazované černé zrcátko orosí a intenzita odraženého světla se zvýší, což zaznamená čidlo, a přístroj tento stav zhodnotí a z aktuální teploty vypočítá relativní vlhkost.

[1 str. 1428, 5 str. 72-4, 10 str. 251]

2.4 KAPACITNÍ PRINCYP

V přístrojích pro vyhodnocení relativní vlhkosti jsou nejčastěji používány právě kapacitní senzory a čidla. Tyto senzory mohou být kombinované a měřit tak i jiné fyzikální veličiny. Firmě, která vyrobila senzor na obr. 2.3, se povedlo na jedinou destičku umístit odporový snímač teploty a zároveň přesný kapacitní snímač, jehož výstup je závislý na relativní vlhkosti plynu. Kapacitní čidla pracují na principu hygroskopické vlastnosti polymeru, který je ve funkci elektrolytu mezi kontakty kondenzátoru. Polymer nanesený mezi elektrodami má přístup ke vzduchu, jehož vlhkost měříme, a v závislosti na relativní vlhkosti plynu vodu ze vzduchu absorbuje. Polymer pak z absorpcí vody mění své vlastnosti, čímž se mění i kapacita kondenzátoru. Díky velké dielektrické konstantě polymeru stačí i malé množství absorbované vody k tomu, aby se projevil změny v kapacitě kondenzátoru. Změna kapacity pak připadá asi na 0,1 % z celkové kapacity kondenzátoru na 1 % relativní vlhkosti. Tuto výstupní kapacitu z čidla následně vyhodnocuje většinou mikroprocesor, který vypočítá ze známé závislosti senzoru relativní vlhkost měřeného plynu. Kapacita kondenzátoru se většinou pohybuje mezi 100 pF až 500 pF. Tyto senzory se také vyrábějí integrované do jednoho čipu a výstupem nemusí být jen kapacita, ale také mnohem přijatelnější elektrické napětí. Jejich odezva je

řádově v desítkách sekund, pracují v přesnosti v jednotkách procent relativní vlhkosti, mají malou závislost výstupního údaje na teplotě a jsou poměrně levné. [1 str. 1429, 2 str. 272, 10 str. 252, 12 str. 396]



Obr. 2.3 Kapacitní senzor vlhkosti a teploty [13]

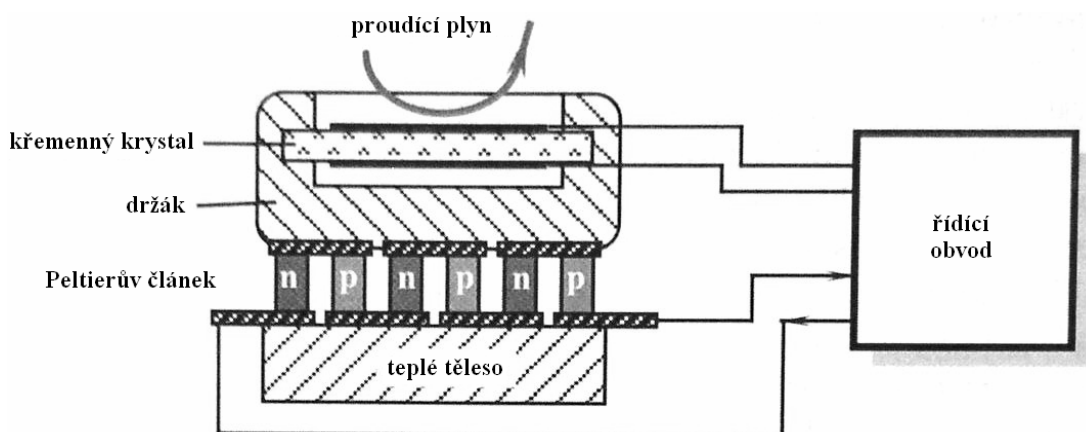
2.5 ELEKTROLYTICKÝ PRINCIP

Elektrolytické senzory pro snímání relativní vlhkosti patří hned po gravimetrické metodě k těm nejpřesnějším. Jejich přesnost se udává v $\pm 1\%$. Využívají vlastnosti některých látek udržovat svou vlhkost v rovnovážném stavu s okolním vzduchem. Tyto látky reagují na změnu vlhkosti vzduchu tím, že do sebe absorbují, nebo ze sebe vypařují vodní páry v sobě obsažené, aby se stav vlhkosti se vzduchem vždy vyrovnal. Konstrukce snímače je pak provedená ve skleněné trubičce, do které jsou umístěny dvě platinové elektrody v savém materiálu napuštěné většinou roztokem chloridu lithia (LiCl). Uvnitř je také umístěn odporový teploměr pro snímání teploty roztoku. Do elektrod se pouští střídavý proud a roztok LiCl se zahřívá, a tím je i částečně odpařována vlhkost. Pokud se vlhkost vzduchu zvýší, elektrolyt začne pohlcovat tuto vlhkost do sebe, a tím se zvětší jeho vodivost. Při zvýšení vodivosti se opět zvětší proud procházející elektrolytem a ten se o to víc zahřívá, až se vlhkost opět ustálí. Teplota elektrolytu je tedy přímo závislá na parciálním tlaku vodní páry. Výsledkem měření je ustálená teplota elektrolytu. Tento přístroj měří ve spodní hranici do doby, dokud rosná teplota není vyšší, než teplota vzduchu. S ohledem na přípustné oteplení snímače nepřesahuje teplota, při které dochází k rosení 60°C . Pro měření relativní vlhkosti vzduchu musí být

přístroj ještě vybaven jedním teploměrem, který snímá vnější teplotu vzduchu.
[10 str. 254]

2.6 REZONANČNÍ PRINCIP Č.1

Tato metoda je podobná metodě optické (viz. kapitola 2.3) s tím rozdílem, že není založena na optické odrazivosti ochlazovaného zrcátka, ale na hlídání změny frekvence krystalu. Krystal je v podobě talíře ochlazován Peltierovým článkem, který řídí jeho teplotu s vysokým stupněm přesnosti. Jakmile teplota poklesne na rosný bod, tak se na křemenném talíři začnou tvořit malé kapičky zkondenzované vodní páry. V důsledku toho se začne měnit frekvence krystalu, která závisí na tloušťce vodní vrstvičky. Jakmile tuto změnu frekvence zaznamená řídicí obvod, tak okamžitě přestane Peltierovým článkem ochlazovat křemen. Po odpaření kapiček z křemene se frekvence krystalu vrátí do původního stavu a řídicí člen opět začne krystal ochlazovat. Tímto cyklem se teplota ustálí na rosném bodu a z té lze zjistit pomocí grafu relativní vlhkost. Celý tento princip je graficky zobrazen na obrázku č. 2.4. [12 str. 403]



Obr. 2.4 Rezonanční princip měření vlhkosti [12 str. 404]

2.7 REZONANČNÍ PRINCIP Č. 2

Rezonanční princip měření relativní vlhkosti plynů je založen na změně výstupní frekvence v závislosti na relativní vlhkosti. Krystal křemene, který je natřen hygroskopickým nátěrem, je zapojen do obvodu jako oscilátor. Nátěr na krystalu

přímo ovlivňuje jeho možnost kmitat. Četnost kmitů krystalu, a tedy i jeho výstupní frekvence, je tedy přímo závislá na absorbované vodě nátěrem ze vzduchu. Výstupní frekvenci krystalu potom porovnává přístroj s předem známými hodnotami závislosti frekvence krystalu na vlhkosti. Výsledkem je zobrazení relativní vlhkosti plynu na displeji. Tyto přístroje a čidla se v praxi moc nepoužívají, protože jsou příliš drahá, a jejich kalibrování je obtížné. Nevýhodou je také jejich odezva na jednotkovou změnu vlhkosti, která se pohybuje kolem jedné minuty. [5 str.72-8, 10 str.254]

2.8 GRAVIMETRICKÁ METODA

Tato metoda gravimetrického měření vlhkosti představuje z metrologického hlediska absolutní standard. Princip, na kterém stojí tato metoda, je jednoduchý. Cílem je zjistit, kolik je ve známém objemu vzduchu vodní páry, pomocí vhodného sušidla (hygroskopická látka). Pokud vzduch projde touto látkou, vlhkost se do ní absorbuje a rozdíl hmotností před a po této reakci je absolutní vlhkost obsažená ve vzduchu, viz. princip, který je popsán v kapitole 1.1. Toto měření je ovšem velmi zdlouhavé zejména pro malé vlhkosti vzduchu a používá se zejména k laboratorním účelům. Přístroj je velmi nákladný a slouží spíše ke kalibraci dalších kalibračních standardů a k jejich ověřování. [5 str. 72-4, 8]

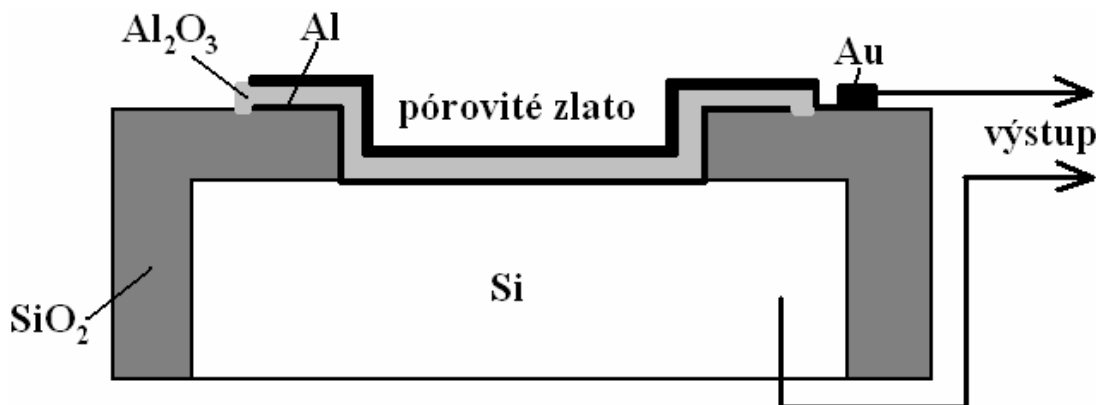
2.9 INFRAČERVENÁ METODA

Přístroje pracující s infračervenou metodou využívají absorpce infračerveného záření v závislosti na obsahu vody v měrné látce. Vlhkost v plynu má vlastnost více či méně pohlcovat některé složky infračerveného záření v určitých pásmech. Přístroj se skládá z infračerveného zdroje, který je opatřený filtrem a propouští záření jen určité vlnové délky. Vlnová délka zdroje infračerveného záření musí mít velikost některého, již z výše uvedených z absorpčních pásů vodní páry. Nejčastěji se používají vlnové délky o hodnotách 1,45 μm , 1,94 μm a 2,95 μm . Toto záření prochází měřeným prostředím a dopadá na infračervený snímač, který je má největší citlivost právě v oblasti vysílaného záření. Z intenzity záření, které dopadne na snímač, pak přístroj vyhodnotí vlhkost, která se může pohybovat v rozmezí

od 0,02 % do 100 %. Touto metodou lze měřit skupenství plynné, pevné i kapalné v rámci možností průchodu infračerveného záření. [5 str. 72-8]

2.10 ODPOROVÝ PRINCIP

Odporové snímače vlhkosti pracují na principu měření změny impedance. Tato závislost je exponenciální, ale může být analogově nebo digitálně zpracována a převedena do lineární podoby. Vodivost mnoha nekovových materiálů závisí na jejich obsahu absorbované vody. Materiály, které mají vlastnost měnit svou impedanci v závislosti na relativní vlhkosti, jsou většinou vodivé polymery a soli. Konstrukce snímače je provedena na křemíkové destičce s dvěma plochými elektrodami ze zlata a hliníku, které jsou ve styku s polymerem (viz obr. 2.5). Spodní vrstva hliníku je spojena s křemíkem, a aby nedocházelo ke zkreslení výsledků, musí mít křemík odpor řádově menší než $0,1 \Omega/\text{cm}$. Aby se k polymeru mohla vůbec dostat vzdušná vlhkost je potřeba, aby vrstvička zlata byla pórovitá. Polymer pak v závislosti na relativní vlhkosti plynu absorbuje vodu a mění své impedanční schopnosti. Rozsah měření těchto senzorů je od 3 % do 95 % relativní vlhkosti a přesnost je $\pm 2 \%$. Pro senzory s velkým odporem je čas odezvy na jednotkovou změnu vlhkosti o 63 % 10 až 30 sekund. Rozsah impedance snímače se mění od $1 \text{ k}\Omega$ do $1 \text{ M}\Omega$. Jejich teplotní rozsah se pohybuje od -40°C do 100°C , takže je lze využít na mnoha nepříznivých místech, kde ostatní snímače měří nepřesně. [12 str. 399, 14 str. 119]



Obr. 2.5 Odporový snímač vlhkosti, [12 str. 400]

2.11 BAKTERIÁLNÍ PRINCIP

Konstrukce tohoto snímače je provedena na křemíkové destičce, která je porostlá bakterií *Bacillus cereus*. Tyto bakterie pak tvoří most mezi elektrodami snímače. K získání závislosti vodivosti snímačem na relativní vlhkosti se musí nechat tato destička s bakteriemi ponořit do lázně se zlatými nanočásticemi o průměru asi 30 nanometrů. V okamžiku ponoření bakterie zahynou a na jejich povrchu se vytvoří vodivá vrstva zlata, která má své konce spojeny s elektrodami, a snímač je hotov. Při nepatrném poklesu respektive vzestupu relativní vlhkosti bakterie zmenšují respektive zvětšují svůj objem. V důsledku toho se mění rozestupy mezi jednotlivými nanočásticemi až o 0,2 nm, a tím se mění i jejich vodivost mezi elektrodami. Bakterie na snímači přežijí bez potravy až 2 dny, ale i po své smrti pracují stejně jako živé. Je důležité, aby byly živé při výrobě a neztrácely svou buněčnou šťávu. Tyto senzory dosahují výborných výsledků a jsou až 4× přesnější než běžné elektronické senzory. Jedinou nevýhodou je jejich doba životnosti, protože mrtvé bakterie dokáží měnit svůj objem jen po určitou dobu, která se pohybuje kolem jednoho měsíce. [15]

3. MĚŘENÍ VLHKOSTI PEVNÝCH LÁTEK

Měření vlhkosti kapalin a pevných látek je v některých případech podobné měření relativní vlhkosti ve vzduchu a v jiných případech se pro měření používá jedinečná metoda určená jen pro určitý druh materiálu. Cíl je ale vždy stejný, a to zjistit množství nebo váhu vody obsažené v měřeném vzorku. Gravimetrickou metodou by se toto provedlo zvážením látky před a po sušení a absolutní rozdíl těchto hodnot by byla samotná hmotnost vody ve vzorku. Toto ovšem platí za předpokladu, že je v látce obsažena jen jedna těkavá látka, a to voda. V ostatních případech je toto měří komplikovanější a nepřilíš přesné. V následujících podkapitolách jsou uvedeny praktické příklady měření vlhkosti různých materiálů a jejich metody pro měření. [5 str. 72-9]

3.1 MĚŘENÍ VLHKOSTI OBILOVIN V ZEMĚDĚLSTVÍ

Dříve, než začneme měřit obiloviny, tak si musíme uvědomit, že měřený vzorek musí reprezentovat celé množství měřeného obilí. Nemůžeme odebrat vzorek jen z povrchu, který byl například ozařován sluncem a je tedy méně vlhký než zrna na dně nákladu. Je tedy nezbytnou součástí každého měření vzít obilovinu z různých částí měřeného nákladu a tu pak smíchat a z toho ještě odsypat měřený vzorek. Princip měření obilovin spočívá v tom, že dielektrická konstanta vody je mnohem větší než dielektrické konstanta vzduchu. Dielektrická konstanta obilí záleží na typu obilí, teplotě, hustotě a vlhkosti. Při změření všech ostatních faktorů dokážeme získat přímou závislost dielektrické konstanty na vlhkosti. Přístroj pro vyhodnocení obilovin tedy musí změřit kapacitu vzorku (čímž získá dielektrickou konstantu), hustotu, teplotu a hmotnost. Následně se z těchto získaných údajů vypočítá mikroprocesorem procentuální vlhkost. [16]

3.2 MĚŘENÍ VLHKOSTI PŮDY

Pro měření se používá několik metod. Závislost dielektrických vlastností půdy na její půdní vlhkosti využívá elektromagnetický snímač (viz obr. 3.8). Pracuje na podobném principu popsaném v podkapitole 3.1, kde zjišťuje dielektrické vlastnosti půdy. Další metodou jak měřit vlhkost je pomocí dvou kolmo zasunutých elektrod do země, kde se změří její vodivost. Tyto závislosti jsou dále převáděny v A/D převodníku a elektronicky zpracovány. Výsledkem je pak procentuální obsah vody v půdě. Tyto senzory pracují s přesností na 1 % a jsou spolehlivé. Další přístroje pro měření vlhkosti půdy pracují např. s absorpčními sádrovými válečky, tensiometry a neutronovými čidly. [17]



Obr. 3.1 Elektromagnetický snímač půdní vlhkosti, [17]

3.3 MĚŘENÍ VLHKOSTI DŘEVA A STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

Na trhu je dnes nepřeberné množství kapesních a spolehlivých přístrojů pro změření vlhkosti dřeva a stavebních materiálů. Můžeme se rozhodovat nejen mezi cenou, ale i mezi spolehlivostí, přesností a výkonností měřidla. Přístroj uvedený na obrázku 3.2 umí změřit vlhkost dřeva a stavebních materiálů, teplotu vzduchu a relativní vlhkost vzduchu. Je v něm implementováno několik set charakteristik materiálů. Cena se pohybuje od 2000 Kč do 8000 Kč. Většina těchto přístrojů využívá vodivosti vody v materiálu ke stanovení jeho vlhkosti. Přístroje

také používají kapacitní metodu, která dokáže změřit vlhkost stejně dobře jako vodivostní metodou bez nutnosti bodat do materiálu. [18]



Obr. 3.2 Vlhkoměr pro měření vlhkosti materiálů [18]

4. JUSTOVÁNÍ A KALIBRACE SNÍMAČŮ

Pro správné a co nejpřesnější měření je potřeba na snímačích a přístrojích pro měření relativní vlhkosti čas od času provést kalibraci a nastavení (justování) snímače. Například u dilatačních vlhkoměrů je potřeba, aby alespoň jednou za 3 měsíce byly vystaveny relativní vlhkosti blízké rosnému bodu (100% relativní vlhkosti) pro obnovení a regeneraci své dilatační vlastnosti. Po této době totiž klesá jejich přesnost, ale ne každý, kdo tento vlhkoměr doma má, jej takto regeneruje, a proto tyto vlhkoměry slouží jako orientační. Pro snímače pracující na principu rosného bodu a psychrometry je potřebná kalibrace jednou za jeden až dva roky. Ostatní elektronické snímače, které využívají vlastnosti některé z chemických sloučenin měnící své vlastnosti v závislosti na relativní vlhkosti, je potřeba provést kalibrace jednou za půl až jeden rok, ale většinou záleží na snímači, na údajích od výrobce a na potřebné odchylce snímače.



Obr. 4.1 Vlhkostní kalibrační sada [19]

Na trhu se prodávají i sady, které jsou určeny pro kalibraci (viz obr 4.1), v nichž se vytváří kontrolované prostředí o známé a konstantní vlhkosti a teploty. Pro dosažení takového prostředí se používají některé solné roztoky, viz. tabulka 4.1.

Tyto solné roztoky jsou schopné v omezeném prostoru po určitém čase vytvořit prostředí o konstantní vlhkosti specifickou právě pro daný roztok. Každý roztok má totiž svou specifickou vlhkost, kterou dokáže v omezeném prostoru vytvořit. Specifická vlhkost roztoku může být ovlivněna teplotou a nebo tím, jak je roztok zředěn. Z těchto známých a přesných relativních vlhkostí roztoků je sestavena celá procentuální škála relativních vlhkostí od jednotek procent do hodnot blíží se bodu nasycení vodními parami, tedy rosnému bodu. V kalibračních sadách jsou nejčastěji využity 2 vlhkostní body z Chloridu magnesia (32,8 % RH) a Chloridu sodného (75,3 % RH) při 25°C. Samotná kalibrace se pak provádí pomocí snímače etalonu, který ukazuje vlhkost s minimální odchylkou a slouží jako standard pro ostatní snímače. Snímače jsou vystaveny stejným podmínkám v nádobách (viz. obr. 4.1) a na základě vyhodnocení vlhkosti etalonem se provede korekce kalibrovaného snímače. Pro přesné justování a samotnou kalibraci snímačů etalonů se pak používají vlhkostní a gravimetrické komory, do kterých se snímač vloží. Jak již bylo jednou zmiňováno, tak v tabulce 4.1 je uveden přehled ostatních nejpoužívanějších hygroskopických solných roztoků. [5 str.72-12, 20]

Tab. 4.1 Relativní vlhkosti solných roztoků [5 str. 72-7]

		Teplota [°C]				Použitelné [°C]	
		10	20	30	40		
Název	Roztok soli	Relativní vlhkost [%]				od	do
Fluorid cesia	CsF		4			15	80
Bromid lithia	LiBr		7			5	80
Chlorid lithia	LiCl	11,3	11,3	11,3	11,2	5	80
Acetát draselný	CH₃COOK		23			10	30
Chlorid magnesia	MgCl₂	33,5	33,1	32,4	31,6	5	80
Uhlíčan draselný	K₂CO₃		43			5	30
Bromid sodný	NaBr		59			5	80
Jodid draselný	KI		70			5	80
Chlorid sodný	NaCl	75,7	75,5	75,1	74,7	5	80
Chlorid draselný	KCl	86,8	85,1	83,6	82,3	5	80
Síran draselný	K₂SO₄	98,2	97,6	79	96,4	5	80

5. PRAKTICKÁ ČÁST

Součástí zadání této bakalářské práce bylo i navrhnout a prakticky realizovat a odladit elektronický obvod, který bude snímat vlhkost vzduchu. Výstupní napětí z obvodu má být závislé na snímané relativní vlhkosti, které se pak dále může zpracovávat například pro ovládání odvlhčovače v místnosti nebo jako kontrola, pokud by relativní vlhkot v místnosti překročila určitou nastavenou mez. Postup při navrhování základního obvodu je uveden v kapitole 5.1. V této práci je uveden nejen obvod, jehož výstupem je proměnné napětí s měnící se relativní vlhkostí, ale i obvod, který má na výstupu frekvenční závislost a je popsán v kapitole 5.2. V kapitole 5.3 se zabývám vlastnostmi dostupných snímačů vlhkosti vzduchu a měření v laboratoři a v poslední kapitole 5.4 je popsáno praktické měření v průmyslu, které bylo se svolením realizováno u firmy BOSCH DIESEL v Jihlavě.

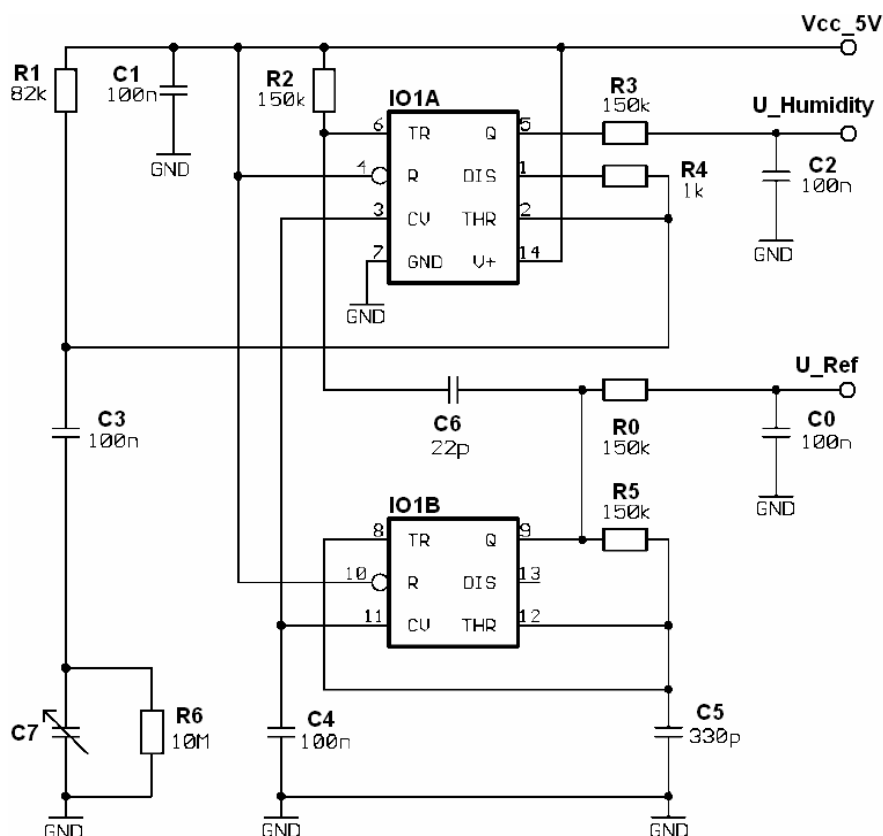
5.1 OBVOD S NAPĚŤOVÝM VÝSTUPEM 0 AŽ 5V

Pro realizaci jsem použil kapacitní polymerové čidlo KFS33-LC od firmy Hygrosens na jejichž stránkách je i doporučené zapojení, viz obr. 5.1. Celý modul má pracovat tak, že spodní modul obvodu 556 IO1B má rezonovat s frekvencí asi 11,3 kHz, která je nastavena kondensátorem $C5 = 330$ pF. Tato kapacita je přibližně střední hodnota kapacity vlhkovostního čidla při 50 % relativní vlhkosti (viz obr. 5.10), takže vzniklé impulzy slouží jako referenční hodnota. Tyto impulzy se dále přenáší do horní části obvodu 556 IO1A přes kondenzátor $C6$, kde se vždy po tomto impulsu výstup obvodu (pin č. 5) resetuje. Na tomto výstupu z obvodu jsou generovány impulzy, jejich délka trvání je přímo souvislá na kapacitě vlhkovostního čidla $C7$. Se změnou této kapacity se mění i délka výstupního impulsu na výstupu obvodu a po usměrnění přes RC člen tvořený $R3$ a $C2$ je zde stejnosměrné napětí.

5.1.1 Oživení základního obvodu

Podle schéma zapojení na obr. 5.1 byl navrhnout plošný spoj v programu EAGLE se školní licenci, viz. příloha G, a následně vyroben klasickou cestou kreslení lihovým nátěrem a leptáním v roztoku chloridu železitého. Plošný spoj byl osazen součástkami a místo vlhkovostního čidla byla po dobu ožívování vyrobena

náhrada za toto čidlo pomocí proměnného kondenzátoru 50 pF a paralelních keramických kondenzátorů, aby se dosáhla proměnná kapacita od 294 pF až 360 pF, (stejně jako má čidlo od 0 do 100 % relativní vlhkosti) a obvod mohl být s rychlejší změnou kapacity oživen.



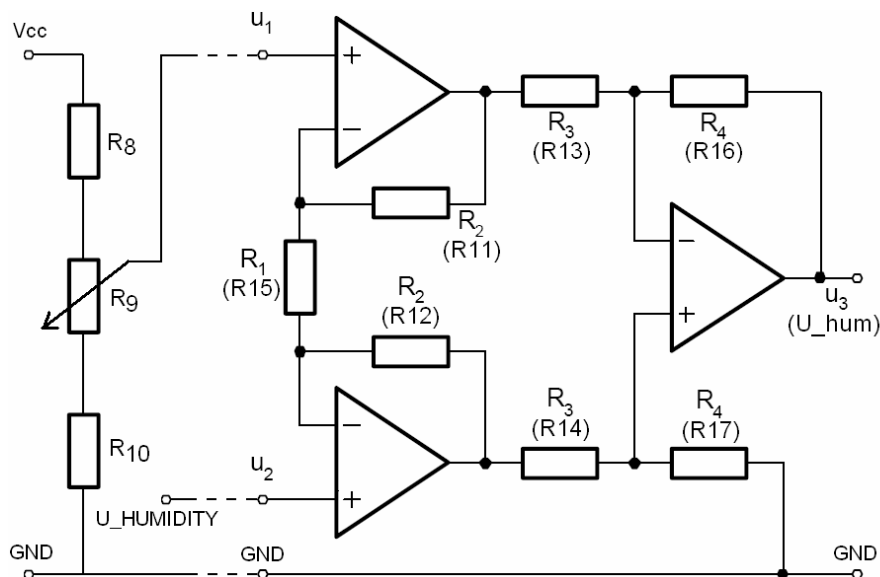
Obr. 5.1 Schéma zapojení základního modulu [21]

Při oživování se narazilo na problém s tím, že modul nepracoval správně, jak měl, a na výstupu měl stále konstantní napětí i při měnící se kapacitě náhrady vlhkostního čidla. Celý elektronický komplet byl proto v laboratoři podroben sérii měření a zkoušení, aby se odhalila příčina nesprávného chování obvodu. Nakonec byl problém nalezen a spočíval v tom, že kondenzátor C6, který propouští referenční impulsy k horní části obvodu, žádné impulsy nepropouští. Jeho nepropustnost byla způsobena špatně navrhnutou velikostí kapacity tohoto kondenzátoru C6, který měl malou kapacitu. To vedlo k tomu, že tyto propouštěné impulsy nedosáhli požadovaných dvou třetin napájecího napětí k resetování obvodu. Po chvíli měření a zkoušení byla kapacita C6 změněna asi na trojnásobek kapacity původní, a to z 22 pF

na 63 pF. Po této změně modul začal pracovat správně. Protože vlhkostní čidlo pracuje jen s napětím do 5 V a výstup z výsledného obvodu se musí pohybovat od 0 V do 5 V, a na výstupu z operačního zesilovače, který bude popsán dále, není nikdy celé napájecí napětí, muselo se použít druhé napájecí napětí 8 V zvláště pro zesilovací stupěň. Dále byla změřena napětí na výstupu obvodu U_{humidity} při změně kapacity od 294 pF do 360 pF, při napájení 5 V a výsledek se pohyboval od 1,25 V do 1,5 V, což se muselo zesílit. Navrhnutý plošný spoj je v příloze G.

5.1.2 Návrh přístrojového zesilovače

Dalším cílem bylo zesílit malý rozdíl souhlasného napětí na výstupu napěťového obvodu U_{humidity} pohybujícího se od 1,25 V do 1,5 V tak, aby se pohybovalo od 0 V do 5 V. K této realizaci byl k obvodu navržen tzv. přístrojový zesilovač, který zesiluje rozdíl souhlasného napětí, což přesně vyhovuje zadaným požadavkům.



Obr. 5.2 Schéma symetrického přístrojového zesilovače [22]

Schéma přístrojového zesilovače je uvedeno na obr. 5.2 v pravé části. Na vstupy přístrojového zesilovače s napájením 8 V měly být zapojeny výstupy z napěťového obvodu, ale kvůli příliš rozdílnému referenčnímu napětí $U_{\text{ref}} = 2,55 \text{ V}$ a výstupního napětí $U_{\text{humidity}} = 1,25 \text{ V}$ až $1,5 \text{ V}$ se to takto nedalo

realizovat. Proto bylo nutno referenční výstup nahradit nastavitelným odporovým děličem viz obr. 5.3 v levé části, na kterém se nastaví přesné minimální napětí přibližně 1,25 V a přístrojový zesilovač pak sleduje napět'ovou změnu těchto dvou signálů. Výsledné rozdílové zesílení se vypočítá pomocí následujícího vztahu (5.1):

$$G_D = \frac{u_3}{u_2 - u_1} = \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \quad [-] \quad (5.1)$$

po dosazení požadovaného výstupního a vstupních napětí dostaneme zesílení:

$$G_D = \frac{5}{1,25 - 1,50} = 20 \quad [-] \quad (5.2)$$

z toho plyne, že výstupní odpory musí být navrženy například takto:

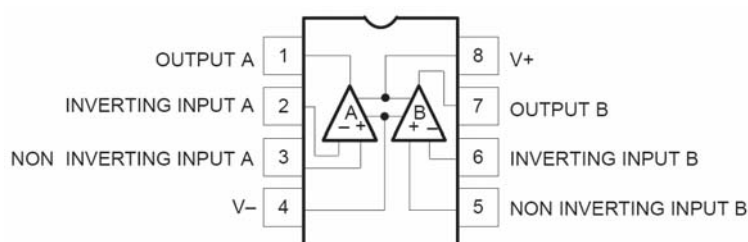
$$G_D \doteq \frac{33k}{10k} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{10k}{3,9k} \right) = 3,3 \cdot 6,12 \doteq 20,22 \quad [-] \quad (5.3)$$

$$\Rightarrow R_1 = 3k9; R_2 = 10k; R_3 = 10k; R_4 = 33k$$

Odporový dělič jsem pak navrhl tak, aby se jeho výstupní napětí pohybovalo v rozmezí od 1,04 V do 1,72 V a bylo možné dobře nastavit střední napětí 1,25 V.

$$\Rightarrow R_8 = 20k; R_9 = 2k2; R_{10} = 3k3$$

Pro tento přístrojový zesilovač byly použity dva dvojnásobné nízkopříkonové operační zesilovače LM358 jehož vnitřní zapojení je na obr. 5.4. [22]

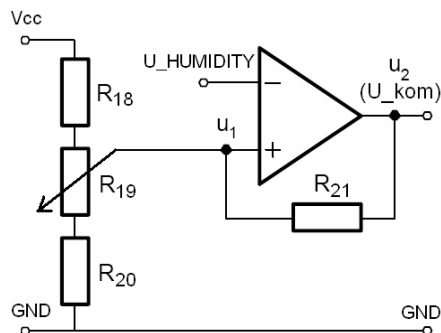


Obr. 5.3 Vnitřní zapojení OZ LM358 [23]

5.1.3 Návrh Schmittova klopného obvodu

Protože při návrhu přístrojového zesilovače zůstal jeden z operačních zesilovačů v obvodu LM358 volný, využijeme jej k sestavení modifikovaného Schmittova klopného obvodu, který bude sledovat výstupní signál z napět'ového obvodu a v určitou nastavenou mez se překloupí. Zpětné překlopení je opatřeno malou

hysterezí, která je zajištěna zpětnou vazbou přes rezistor R_{21} , aby se obvod na nastavené mezi náhodně nerozkmital.



Obr. 5.4 Upravené schéma Schmittova klopného obvodu [24]

Rezistory napěťového děliče byly zvoleny stejně jako při návrhu přístrojového zesilovače $\Rightarrow R_{18} = 20k$; $R_{19} = 2k2$; $R_{20} = 3k3$. Pro zpětnou vazbu R_{21} musíme použít takový rezistor, aby výsledná hystereze byla například 2 mV což představuje při změně kapacitního čidla asi 8% vlhkosti. Vypočítáme proud děličem a potenciometrem, aby napětí u_1 bylo například 1,4 V:

$$i = \frac{V_{cc}}{R_8 + R_9 + R_{10}} = \frac{8}{25,5k} \doteq 0,3137 \text{ mA} \quad (5.4)$$

Náhrada za nastavený rezistor mezi u_1 a GND je:

$$R_{34} = \frac{u_{\text{požadované}}}{i} = \frac{1,4}{0,3137 \cdot 10^{-3}} \doteq 4,463 \text{ k}\Omega \quad (5.5)$$

Pokud chceme, aby hystereze Δu byla 2 mV vypočteme rozdíl proudů při napětí $u_{\text{požadované}} + \Delta u$ a $u_{\text{požadované}}$, který musí odtéct přes R_1 :

$$i_{R1} = \frac{u_{\text{požadované}}}{R_{34}} - \frac{u_{\text{požadované}} + \Delta u}{R_{34}} = \frac{1,402}{4463} - \frac{1,4}{4463} = 0,4481 \mu A \quad (5.6)$$

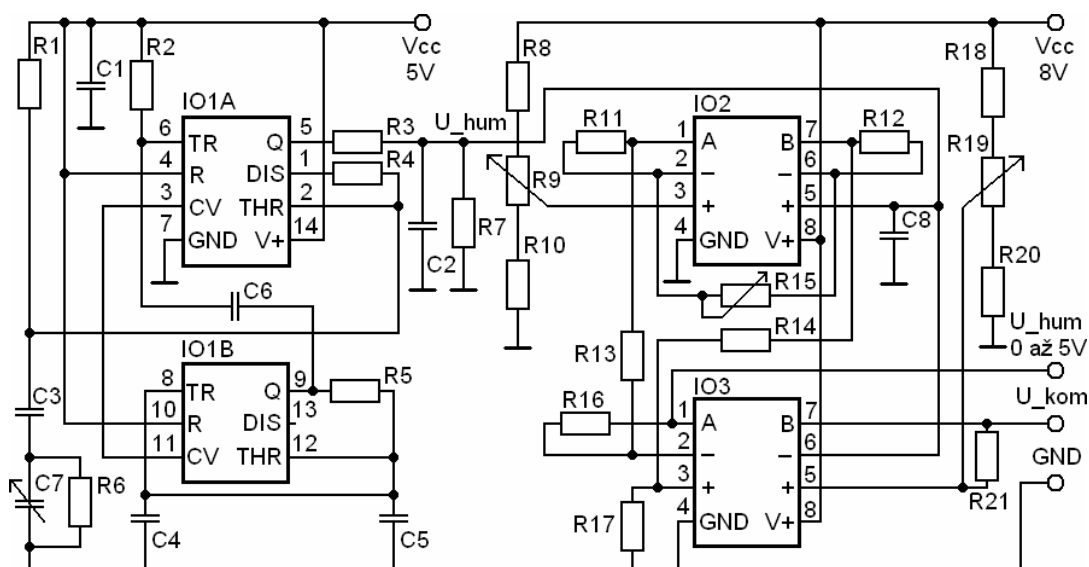
Odpor R_1 pak dostaneme dosazením do Ohmova zákona:

$$R_{21} = \frac{u_{R1}}{i_{R21}} = \frac{u_1 - u_2}{i_{R21}} \doteq \frac{6,7 - 1,4}{0,4481 \mu} \doteq 11,83 \cdot 10^{-6} \Rightarrow 10 \text{ M}\Omega \quad (5.7)$$

Velikost hystereze se tedy může nastavit rezistorem R_{21} a stav při jaké vlhkosti se má spínat je dán nastavením trimru R_{19} , a lze jej libovolně měnit.

5.1.4 Výsledné zapojení vlhkostního modulu

Výstupem obvodu, jehož schéma je na orb 5.5, je nejen napětí závislé na měnící se vlhkosti vzduchu U_{hum} od 0 V do 5 V, ale i nastavitelná mez Schmittova klopného obvodu, při které se přepne, a po zesílení je tento signál vhodný například ke spínání relé, na jehož kontaktech může být třeba odvlhčovač. Na výstupu obvodu proměnného napětí od 0 V do 5 V se 0 V nikdy nevyskytne. Je to dáno tzv. souhlasným zesílením přístrojového zesilovače, které bylo změřeno a pohybuje se kolem 0,07 V a je způsobeno párovou nepřesností a tolerancí použitých rezistorů udávané výrobcem a je třeba s tím počítat. Výsledná charakteristika tohoto modulu je na obrázku 5.8 a navrhnutý plošný spoj je v příloze G.



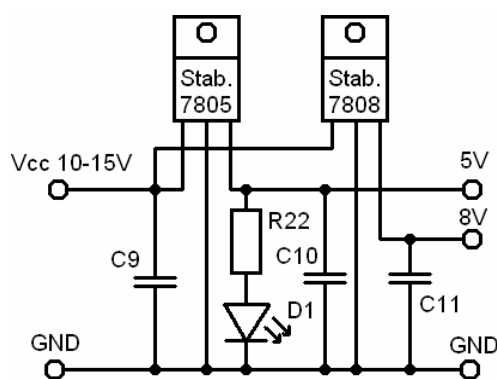
Obr. 5.5 Výsledné schéma vlhkostního modulu

Seznam součástek:

R1	82k	R16,17	20k
R2,3,5	150k	R21	5M
R4	1k	C1-4,8	100n
R6,7	10M	C5	330p
R8,11-14,18	10k	C6	63pF
R9,19 - Trimr	2k2	C7	KFS 33LC
R10,15,20	3k3	IO1	NE556
R15 - Trimr	3k3	IO2,3	LM358

5.1.5 Napájecí modul

Protože vlhkostní čidlo KFS33-LC pracuje jen do 5 V a výstupní napětí z obvodu je také 5 V, ale to se na výstupu z operačního zesilovače nikdy nevyskytne, muselo být použito druhé napájecí napětí, pro každý modul zvlášť. Pro základní obvod pracující s vlhkostním čidlem bylo použito doporučené napájecí napětí 5 V a pro navrhovaný přístrojový zesilovač 8 V. Následující modul obsahuje 2 stabilizátory napětí, které napájí jednotlivé výše uvedené moduly. Vlastní napájení tohoto modulu se může pohybovat od 10 V do 15 V DC. Navrhnutý plošný spoj je v příloze G.



Obr. 5.6 Schéma napájecího modulu

Seznam součástek:

R22	150	D1	LED 5mm
C9,11	0,1 μ F		Stabilizátor 7805
C10	0,33 μ F		Stabilizátor 7808

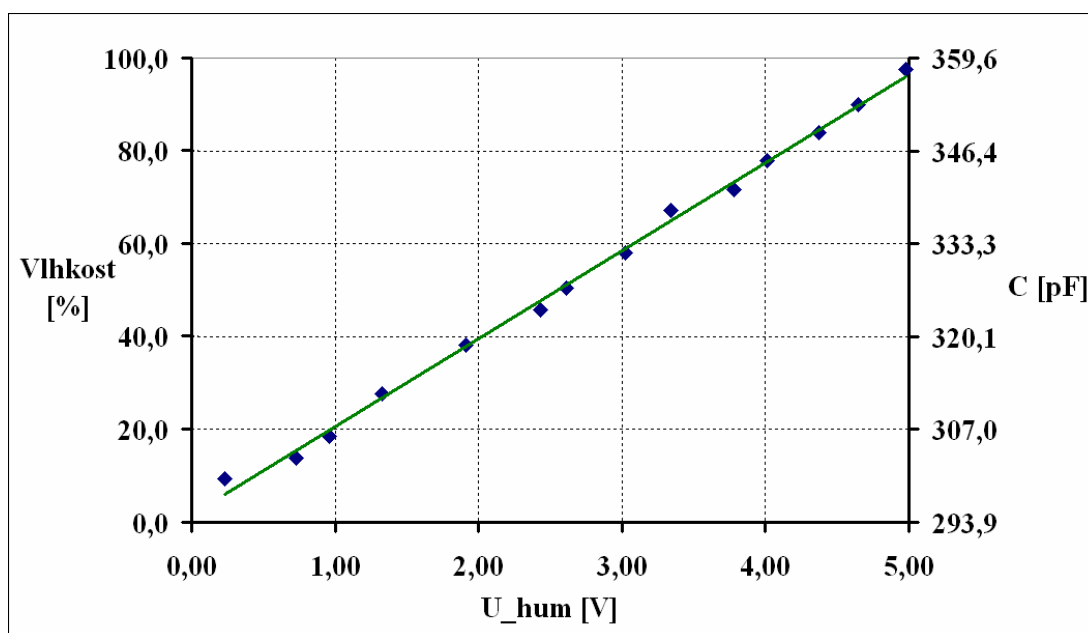
5.1.6 Ověření funkčnosti vlhkostního modulu

U výsledného vlhkostního modulu byla změřena výstupní charakteristika, jejíž hodnoty jsou v následující tabulce 5.1. Hodnoty pak byly vyneseny do grafu, který je na obrázku 5.7. Vlhkostní čidlo KFS33-LC od firmy Hygrosens má na výstupu proměnnou kapacitu od 294 pF do 360 pF, jehož kapacita se snímá a převádí na napětí. Jeho přesná charakteristika udávaná výrobcem je na obr 5.10. V době měření byla opět použita vyrobená náhrada za toto čidlo a pomocí rovnice regrese vypočítané v MS Excel z charakteristiky vlhkostního čidla přepočítány

jednotlivé příslušející hodnoty vlhkosti a uvedeny paralelně do grafu pro srovnání. Výška výsledné aproximované přímky se může ovlivnit trimrem R9, kterým se nastavuje napětí, které vstupuje do přístrojového zesilovače. Strmost výsledné charakteristiky lze pak nastavit trimrem R 15, kterým se nastavuje zesílení přístrojového zesilovače. Odchytky od ideální charakteristiky jsou způsobeny nepřesným měřením kapacity a tolerancí použitých součástek.

Tab. 5.1 Naměřené hodnoty na vlhkostním modulu

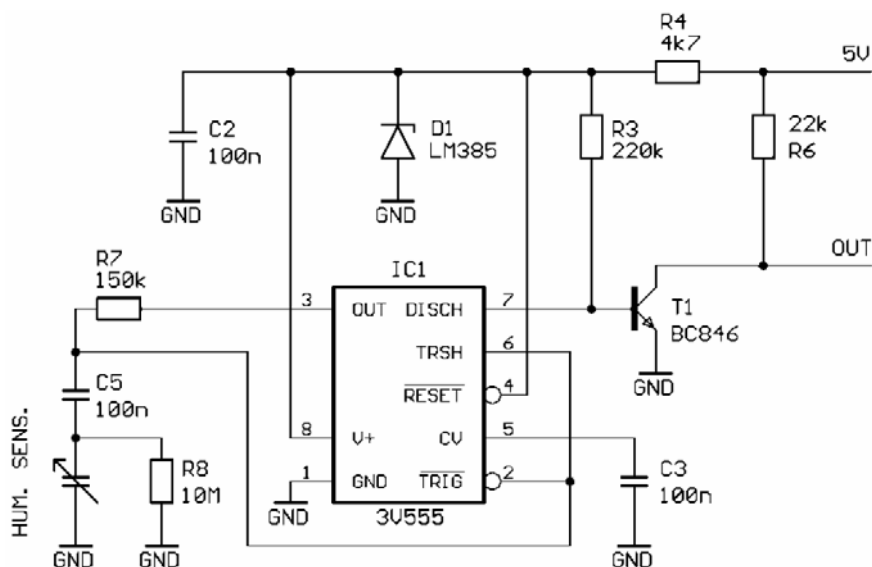
Vlhkost při 23°C [%]	U [V]	C [pF]
97,60	4,98	358
89,99	4,65	353
83,90	4,37	349
77,82	4,01	345
71,73	3,78	341
67,16	3,34	338
58,03	3,02	332
50,43	2,61	327
45,86	2,43	324
38,25	1,91	319
27,60	1,33	312
18,47	0,96	306
13,91	0,73	303
9,34	0,23	300



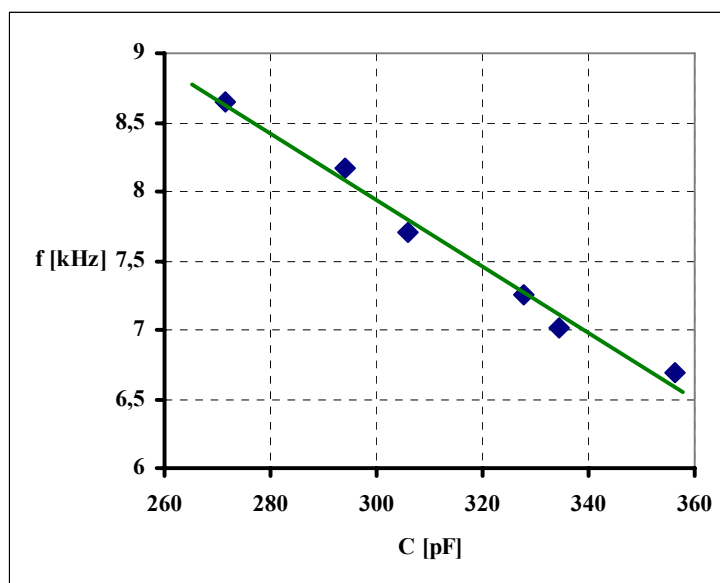
Obr. 5.7 Výstupní charakteristika vlhkostního modulu

5.2 OBVOD S FREKVENČNÍM VÝSTUPEM

Tento modul pracuje také jako předchozí s čidlem KFS33-LC od firmy Hygrosens, jejichž doporučené schéma je uvedené na obr. 5.2. V modulu je zapojen obvod NE555, který zde slouží jako oscilátor s proměnnou frekvencí se závislosti na kapacitě vlhkostního čidla. Tento byl také realizován a odzkoušen v laboratoři. Výstupní charakteristika tohoto obvodu byla proměřena a je v grafu na obr. 5.9.

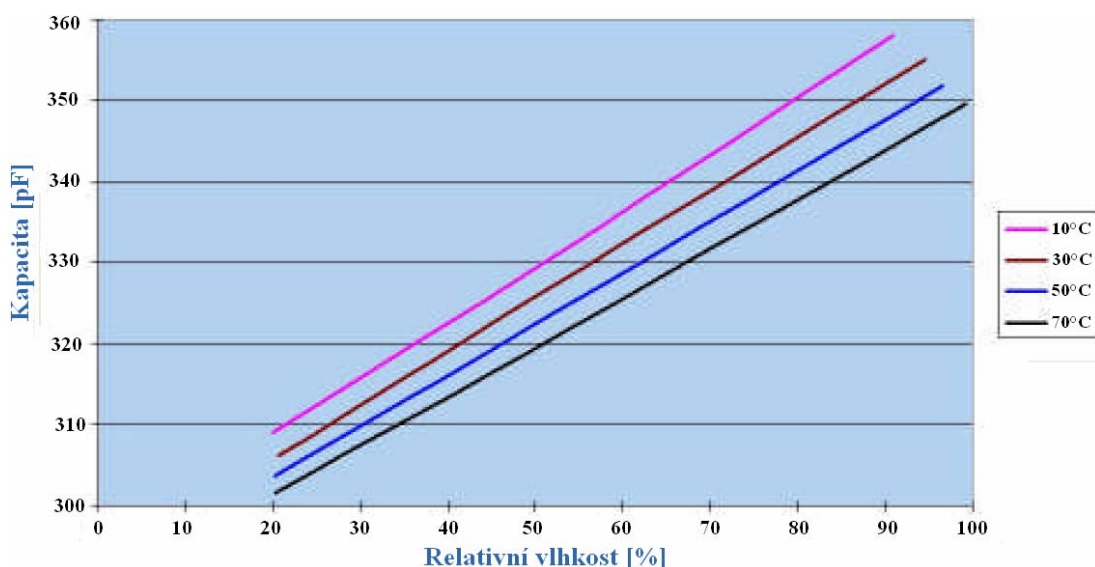


Obr. 5.8 Schéma zapojení frekvenčního modulu [23]



Obr. 5.9 Závislost frekvence modulu na kapacitě čidla

Závislost frekvenčního modulu je téměř lineární a od ideální aproximované přímky se liší jen nepatrně, jak je vidět z obr. 5.9. Chyba odchylek může být způsobena mnoha vlivy a to především nepřesným měřením připojené proměnné kapacity k obvodu a tolerancí součástek.



Orb. 5.10 Teplotní charakteristika čidla KFS33-LC [23]

5.3 VLASTNOSTI DOSTUPNÝCH SNÍMAČŮ

Seznam dostupných snímačů vlhkosti vzduchu v laboratoři je uveden v následující tabulce 5.2 a použité referenční vlhkosti v tabulce 5.3.

Tab. 5.2 Dostupné snímače vlhkosti vzduchu

č.	Výrobce	Označení	Princip	Výstup podle výrobce
1.	Shinyei	C5-M3	odporový	odpor
2.	Valvo	NAE 832	kapacitní	kapacita
3.	Smartec	RH-05	kapacitní	kapacita
4.	Farnell	RHU 217-5AT	odporový	napětí (0-3,3V)

Tab. 5.3 Vytvořené vlhkosti pro měření

	Název	Prostředí	Relativní vlhkost při 25 °C
A	Vzduch	Vzduch	32,0 %
B	Chlorid sodný	NaCl	75,3 %
C	Chlorid draselný	KCl	84,2 %
D	Síran draselný	K ₂ SO ₄	97,3 %

Vlastnosti snímačů byly ověřeny v laboratoři pro měření neelektrických veličin s dostupnými snímači vlhkosti vzduchu, které jsou uvedeny v tabulce 5.2. K získání přesných vlhkostí vzduchu pro měření bodů v charakteristice snímače byly použity dostupné roztoky solí (viz. tab. 5.3), které jsou schopny v uzavřeném prostoru vytvořit prostředí o konstantní vlhkosti. Uzavřený prostor byl tvořen sklenicí s víkem, ve kterém byl umístěn snímač. Pokrytí škály vlhkostí, jak je vidět z tabulky, není ideální, a proto byla použita k měření i vlhkost vzduchu v laboratoři k získání dalšího bodu v charakteristice snímačů.

5.3.1 Postup při měření

Datum měření: 22.4.2008

Teplota: 25,9 °C

Tlak: 969 hPa

Relativní vlhkost: 32 %

Použité přístroje: Multimeter UT55, RLC Meter Metex, Zdroj BK125, Stopky

Měření bylo prováděno postupně vždy se stejnou látkou na všech snímačích. Jako první byla použita vlhkost vzduchu v laboratoři, která se pohybovala ve výši 32 %. Dále byly snímače postupně umisťovány do prostředí vytvořeným látkami B, C a D z tabulky 5.3. Naměřené hodnoty ze snímačů jsou uvedeny v tabulce 5.4 a výsledné výstupní charakteristiky v obrázcích 5.11 až 5.14.

5.3.2 Zhodnocení měření

Každé měření bylo ovlivněno pokaždé tím, kdy došlo k úniku části vytvořené vlhkosti ze sklenice, když se snímač do prostředí s roztokem soli vkládal. Než došlo

k opětovnému vytvoření původní vlhkosti, tak to ovlivnilo časovou konstantu snímače, citlivost i přesnost naměřených hodnot. Na získání přesné vlhkosti mělo také vliv stáří, množství a vysušenost solných roztoků. K určení teplotní závislosti nebylo možné v laboratoři vytvořit vhodné podmínky změny teploty, a proto zde uvedeny tato měření nejsou.

Tab. 5.4 Naměřené hodnoty na snímačích

		Vlhkostní snímače			
		1	2	3	4
		C5-M3	NAE832	RH-05	RHU-217-5AT
	Vlhkost [%]	R [k Ω]	C [pF/1 kHz]	C [nF/1 kHz]	U [V]
A	32,0	359,60	145,7	10,85	1,347
B	75,3	81,07	161,6	37,55	2,638
C	84,2	78,28	164,2	60,36	3,004
D	97,3	64,14	171,0	104,2	3,289
Časová konstanta		80 s	60 s	95 s	30 s
Citlivost na 1 %RV		-	0,3777 pF	-	0,0303 V

Výpočet citlivosti byl proveden pomocí rovnice regrese v programu MS Excel, které jsou uvedeny jednotlivých grafů v příloze E. U snímače č. 1 a 3 je závislost nelineární a citlivost tak nebyla stanovena. Jednotlivé výsledky souhlasí s udávanými údaji od výrobce pouze u snímači č. 1 a 4. Ostatní snímače č. 2 a 3 mají změřenou charakteristiku částečně posunutou nebo odlišnou od údajů od výrobce. To je způsobeno tím, že snímače v minulosti byly ponořeny do solného roztoku a hygroskopická látka na snímačích se částečně poškodila, čímž se změnila a posunula i výstupní charakteristika čidla.

5.4 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VLHKOSTI V PRŮMYSLU

Po domluvě s firmou BOSCH DIESEL v Jihlavě bylo provedeno praktické měření vlhkosti v průmyslové hale na montáži, kde je sledována relativní vlhkost vzduchu a teplota pomocí snímačů jednotlivých snímačů. Snímače jsou umístěny v hale i venku a údaje jsou v intervalu po 15 minutách zaznamenány a archivovány. Vlhkost vzduchu je uvnitř prostor haly i v montáži ovlivňována venkovní vlhkostí, odkud dochází k ventilaci vzduchu přes klimatizační zařízení. V dané montáži je občas problém s udržením relativní vlhkosti vzduchu nad zákonem stanovených 30 %, což při dlouhodobém působení může být i zdraví škodlivé, a proto je stanovena tato mez.

5.4.1 Průběh měření

V montáži bylo provedeno paralelní měření se snímači v hale přesným kalibrovaným programovatelným záznamníkem dat TESTO 177-H1, aby se vyloučila možnost špatného justování snímačů umístěných v hale. V době, kdy probíhalo toto měření, bylo zrovna deštivé období a vlhkost vzduchu byla vysoká a nemohla být zaznamenána hodnota poklesu vlhkosti v montáži pod daných 30 %. Paralelní měření probíhalo od 9 h do 14 h vždy ve stejný čas jako zaznamenávání hodnot snímači v hale po 15 minutách, aby se zaznamenaná data mohla porovnat.

Datum měření: 16.5.2008

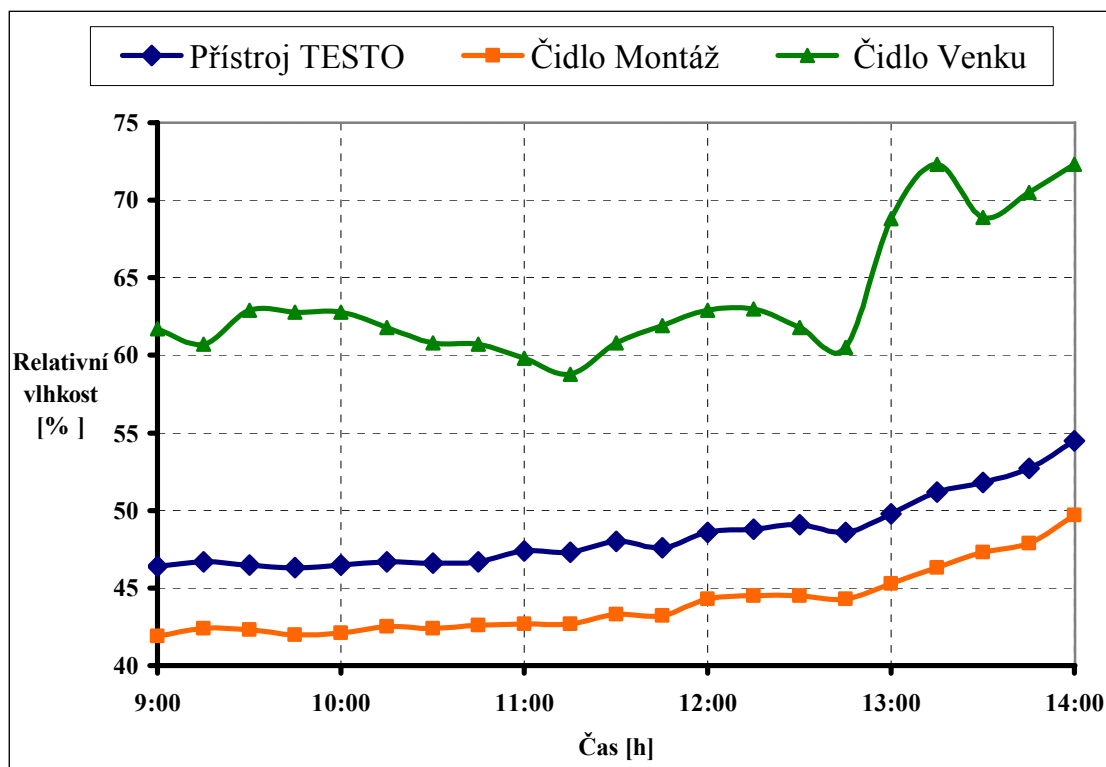
Teplota: 22,9 °C

Tlak: 1002 hPa

Relativní vlhkost: 32 %

Použité přístroje: Programovatelný záznamník dat TESTO 177-H1, PC

Snímač vlhkosti v montáži: Santer EY3600



Obr. 5.11 Porovnání průběhů naměřených vlhkostí

5.4.2 Zhodnocení měření

Vzhledem k obsáhlosti dat zde jednotlivé naměřené hodnoty nejsou uvedeny a jsou shrnuty výše v grafu, který je v obrázku 5.11. Z grafu je vidět, že naměřené hodnoty přesným programovatelným záznamníkem dat TESTO byly po celou dobu měření vždy vyšší. Rozdíly jednotlivých měření relativní vlhkosti dosahovaly v průměru 4,46 % a jejich medián je 4,4 %. Problém, při kterém vlhkost poklesla pod 30 %, nebyl tedy ve skutečnosti tak veliký, protože snímač umístěný v hale je chybně justován a ukazuje nižší hodnotu než je skutečná. V grafu také vidíme, že vlhkost měřená v montáži je do jisté míry závislá na vlhkosti venkovní, protože při postupně kolísavě rostoucí hodnotě venkovní vlhkosti stoupala i vlhkost v montáži. Rozdíl vlhkostí mezi venkovní a vnitřní je způsoben ztrátami v klimatizaci, kde se při proudění a ochlazování vzduchu vodní pára kondenzuje.

6. ZÁVĚR

Při hledání teorie o principech vlhkostních snímačů byl nalezen jako jeden z nejzajímavějších princip bakteriální, který je popsán v kapitole 2.11 a jde o první propojení elektroniky s živými bakteriemi. V praktické části při navrhování vlhkostního modulu s unifikovaným výstupem 0 až 5 V byl největší problém s tím jak vyřešit splnění maximálního napětí 5 V, které může být na čidle KFS33-LC a zároveň mít výstup celého vlhkostního modulu 5 V. To vedlo k tomu, že se musely vytvořit 2 napájecí úrovně 5 V a 8 V pomocí napájecího modulu, což výsledný vlhkostní modul výrazně zkomplikovalo. Výsledkem je ovšem funkční vlhkostní modul, který dokáže sledovat vlhkost v okolí a podle ní měnit výstupní napětí a spínat v nastavené mezi například relé k ovládání odvlhčovače apod. Aby se při proměřování výstupní charakteristiky vlhkostního modulu co nejvíce eliminovali náhodné chyby způsobené přechodovým odporem, musela se před každým měřením výstupní hodnoty kapacity náhradního čidla odpájet změřit a znovu připájet a tak pořád dokola. Praktické měření na dostupných snímačích bylo omezeno referenčními vlhkostmi, které se daly vytvořit, neboť jich bylo velmi málo a všechny vytvářeli relativní vlhkost nad 75 % a tudíž se nemohla podrobně proměřit celá charakteristika snímače. Proto se muselo použít i vlhkosti v místnosti, která do charakteristiky doplnila další bod. Praktické měření vlhkosti v průmyslu bylo velice zajímavé co do automatizovanosti, neboť se veškeré hodnoty ze statických snímačů měří a ukládají do archivu automaticky. Přesné paralelní měření se statickými snímači ovšem ukázalo, že jejich justování bylo o 4,46 % nižší.

7. POUŽITÉ ZDROJE

- [1] Lipták, B.: Process measurement and Analysis. CRC PRESS, 2003, ISBN 0-8493-1083-0
- [2] Wilson, J.: Sensor technology. Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7729-5
- [3] Encyklopedie Wikipedie: Vlhkost vzduchu [online]. Akt. 25.4.2008.
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlhkost_vzduchu>
- [4] Meteocentrum.cz: Meteorologická encyklopedie [online]. [cit. 1.12.2007]
URL: <<http://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vlhkost-vzduchu.php>>
- [5] Webster J.: Measurement instrumentation and sensors. CRC PRESS, 1999, ISBN 0-8493-8347-1
- [6] Encyklopedie Wikipedie: Mollierův diagram [online]. Akt: 31.3.2008
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Mollierův_diagram>
- [7] Encyklopedie Wikipedie: Vlhkoměr [online]. Akt. 27.4.2008.
URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlhkoměr>>
- [8] Neustupa Z.: Technické prostředky, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava [online]. Aktualizováno: 22.3.2002.
URL: <<http://hgf.vsb.cz/neu10/studium/tpa/tpahtml/skripta.htm>>
- [9] Obrázek [online]. Aktualizováno: 26.8.2005.
URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Haar-Hygrometer.jpg>>
- [10] Norton H.: Handbook of transducers. Prentice-Hall, Inc., 1989, ISBN 0-13-382599-X
- [11] Tuša, I.: Měření relativní vlhkosti vzduchu – problém nejen muzejní [online]. Aktualizováno: 15.8.2007.
URL: <<http://ivantusa.webpark.cz/udelej/psychrometry.html>>
- [12] Fraden, J.: Handbook of modern sensors: physics, designs and applications. Springer science + business media, Inc., 2004, ISBN 0-387-00750-4
- [13] Obrázek [online]. Aktualizováno: 29.6.2007.
URL: <http://automatizace.hw.cz/images/temp_humid/smallHMC01_1.jpg>

- [14] Pallàs-Areny, R., Webster, J.: Sensors and signal conditioning. John Wiley & Sons, 2001, ISBN 0-471-33232-1
- [15] Lázňovský, M.: Zombie měří vlhkost vzduchu [online]. Akt. 19.10.2005.
URL: <http://www.lidovky.cz/zombie-meri-vlhkost-vzduchu-dgf-/ln_veda.asp?c=A051019_081407_ln_veda_blh>
- [16] Srpek, P.: Návod k přístroji Super Matic 20, MEZOS a.s.
- [17] OBS Doksany.: Vlhkost půdy [online]. Aktualizováno: 25.8.2007.
URL: <<http://www.chmi.cz/meteo/ok/oba/obs/o4.html>>
- [18] I & CS spol. s r.o.: Vlhkoměry [online]. Aktualizováno: 20.1.2008.
URL: <<http://www.e-pristroje.cz/vlhkomery-drevo.html>>
- [19] Greenspan, L.: Relative humidity calibration. Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. [online]. Aktualizováno: 22.10.2003.
URL: <http://www.thesolar.biz/Relative_Humidity_Calibration_Kit.htm>
- [20] Cometsystem: Nádobka pro kalibraci a justování vlhkosti [online].
URL: <<http://cometsystem.cz/manuals/i-log-kal-md046.pdf>>
- [21] Hygrosens: Data sheet KFS33-LC [online].
URL: <http://www.hygrosens.de/fileadmin/user_upload/Shop/Distribution/Sensoren/Feuchtesensoren/156509_KFS33_Feuchtesensor_dbe.pdf>
- [22] ČVUT: Přístrojový zesilovač [online].
URL: <http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/cmm/PRISTR_ZES.pdf>
- [23] Philips: Data sheet LM358 [online].
URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/LM358_A.pdf>
- [24] E-laboratory project: Schmittův klopný obvod [online]. Aktualizováno: 19.2.2008. URL: <<http://www.ises.info/old-site/experim/fyzika/f23/f23.html>>
- [25] Hanzal, J.: Vlhkoměry [online]. Aktualizováno 10.1.2004.
URL: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1022-Vlhkomery.html>>
- [26] Čehák, P.: Psychrometr [online]. Aktualizováno: 20.4.2008.
URL: <<http://www.labo.cz/mft/psychrometr.htm>>

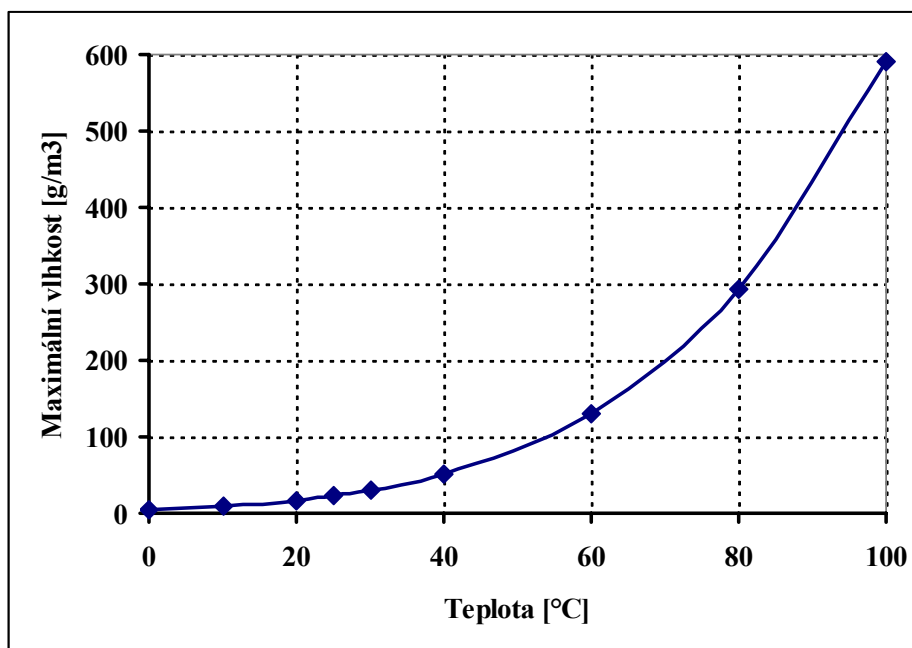
SEZNAM PŘÍLOH

- **Příloha A** Tabulka hodnot rosného bodu v závislosti na teplotě
- **Příloha B** Psychrometrické tabulky
- **Příloha C** Psychrometrický diagram
- **Příloha D** Molierův diagram
- **Příloha E** Naměřené hodnoty na snímačích č.1 a 2
- **Příloha F** Naměřené hodnoty na snímačích č.3 a 4
- **Příloha G** Realizované plošné spoje
- **Příloha H** Výsledný vlhkostní modul

Příloha A

Tabulka teplot rosného bodu a maximální vlhkosti [25]

Teplota rosného bodu [°C]	Maximální vlhkost [g/m ³]
-100	0,000 018
-80	0,000 6
-60	0,011
-40	0,12
-20	0,888
0	4,87
10	9,44
20	17,4
25	23,1
30	30,5
40	51,3
60	130
80	292
100	591



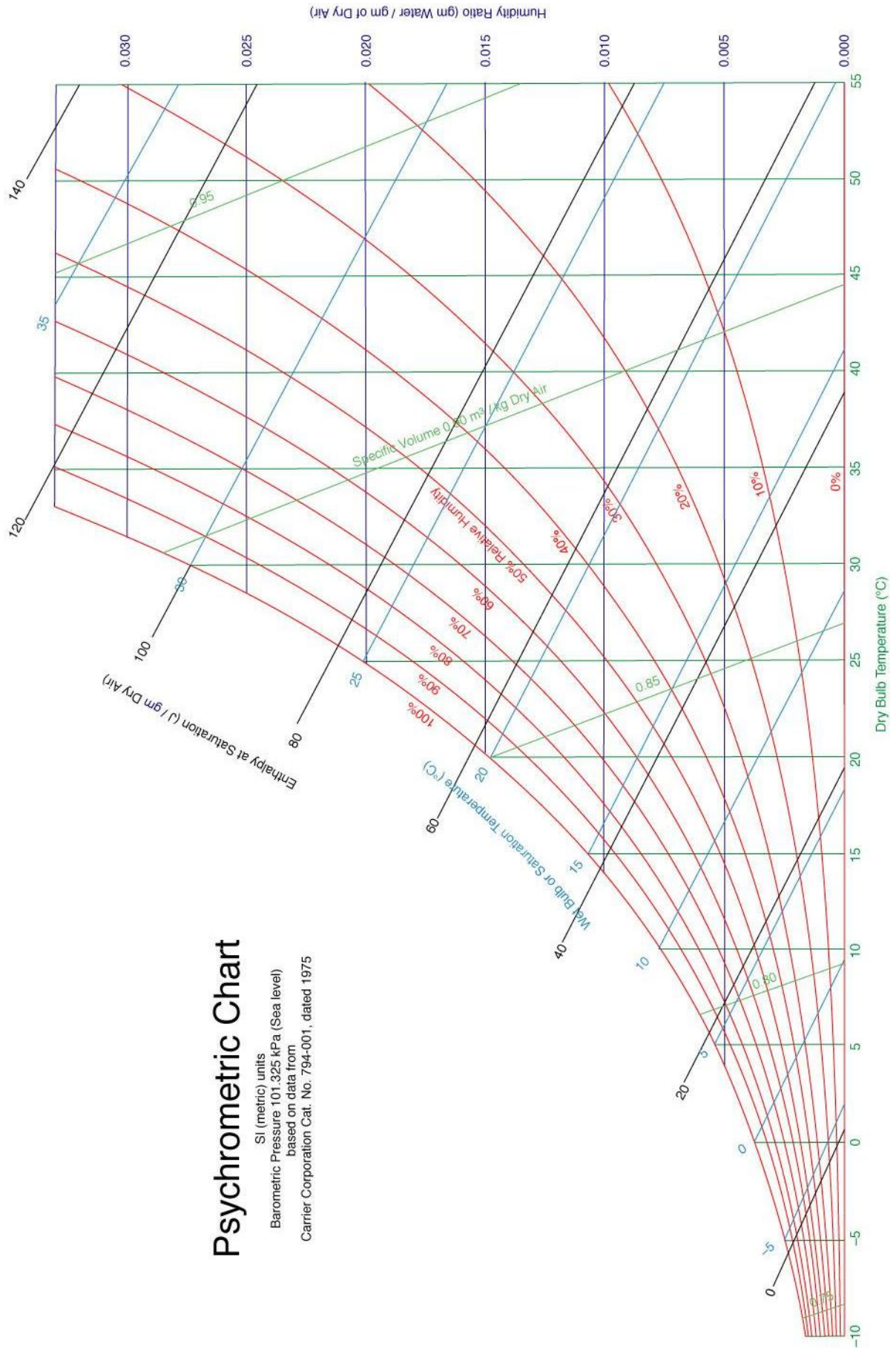
Graf závislosti teploty rosného bodu na maximální vlhkosti

Příloha B

Psychrometrické tabulky [26]

t [°C]	Relativní vlhkost [%]													
Rozdíl teplot ($t_m - t$) [°C]	1	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
0	80	60	51	41	32	22	13	4						
2	82	64	55	47	38	30	21	13	5					
4	84	67	59	51	44	36	29	21	14					
6	85	70	63	56	48	41	35	26	21	14	8			
8	86	72	66	59	53	46	40	34	27	21	15	6		
10	87	74	68	62	56	50	44	39	33	27	22	16	11	6
12	88	76	70	65	59	54	48	43	38	33	28	23	18	13
14	89	78	72	67	62	57	52	47	42	37	32	28	23	19
16	89	79	74	69	64	60	55	50	46	41	37	33	28	24
18	90	80	76	71	66	62	58	53	49	45	41	37	33	29
20	91	81	77	73	68	64	60	56	52	48	44	40	37	33
22	91	82	78	74	70	66	62	58	54	51	47	43	40	39
24	91	83	79	75	71	68	64	60	57	53	50	46	43	40
26	92	84	80	76	73	69	66	61	59	55	52	49	46	43
28	92	84	81	77	74	71	67	64	60	57	54	51	48	45
30	93	85	82	78	75	72	68	65	62	59	56	53	50	47
32			83	79	76	73	70	67	64	61	58	5	52	49
34							71	68	65	62	59	57	54	51

Příloha C, Psychrometrický diagram [6]

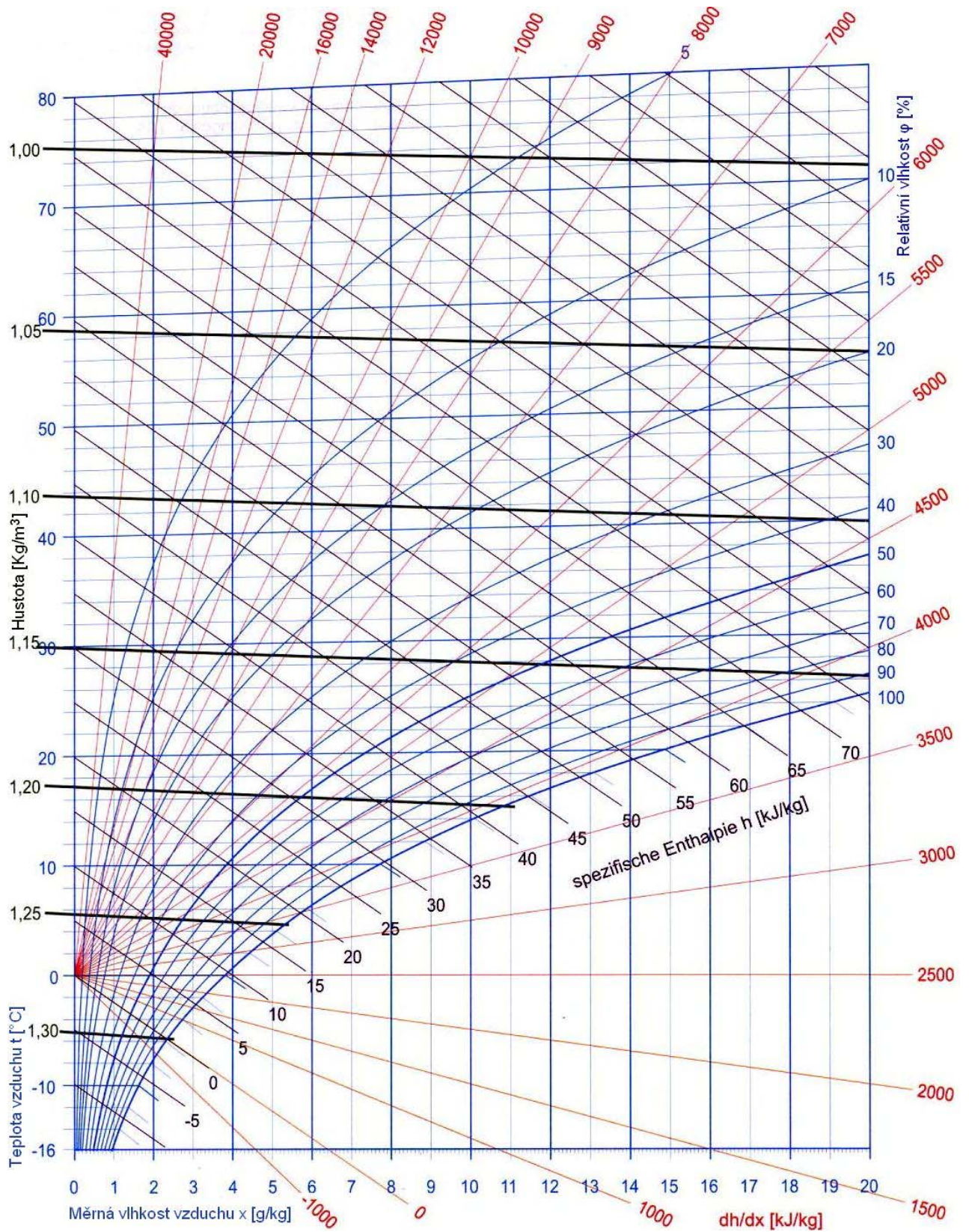


Psychrometric Chart

SI (metric) units
 Barometric Pressure 101.325 kPa (Sea level)
 based on data from
 Carrier Corporation Cat. No. 794-001, dated 1975

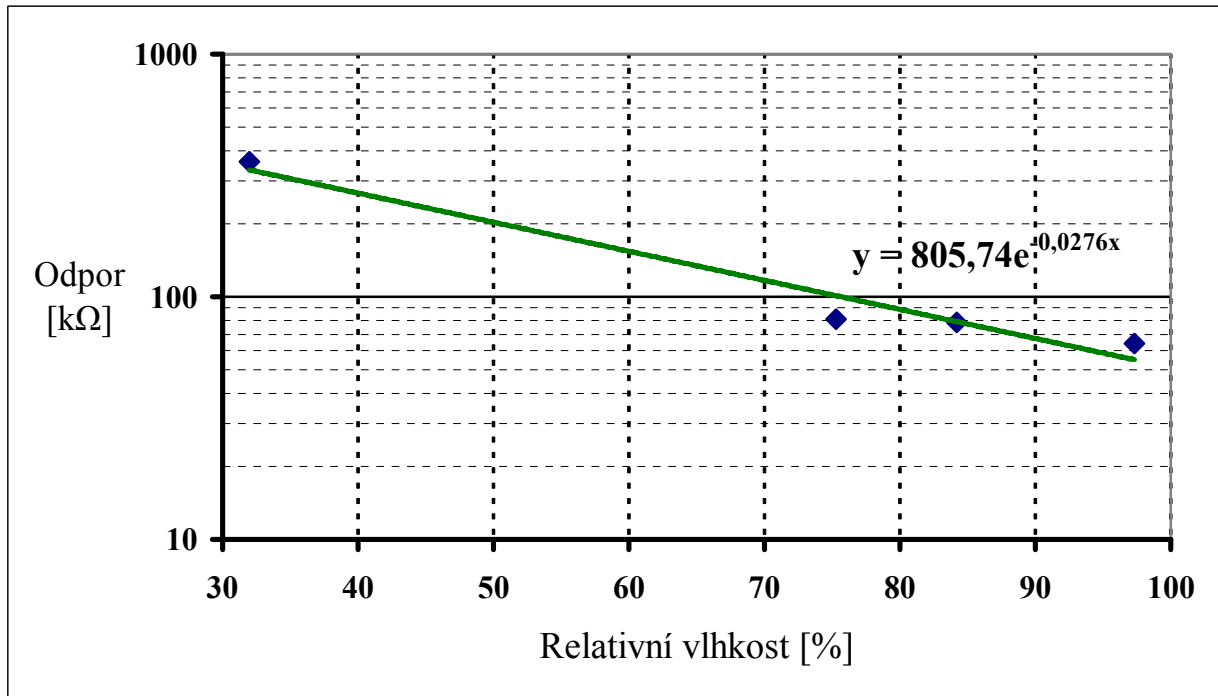
Příloha D

Molierův diagram [6]

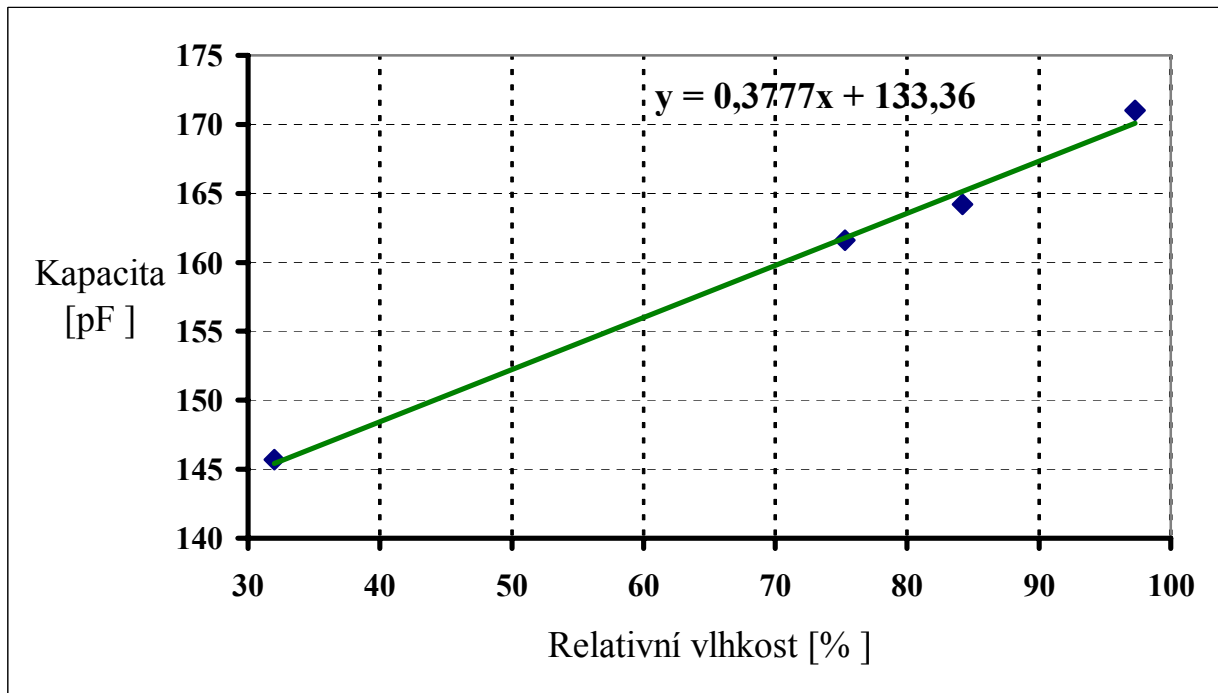


Příloha E

Naměřené hodnoty na snímači č.1: C5-M3

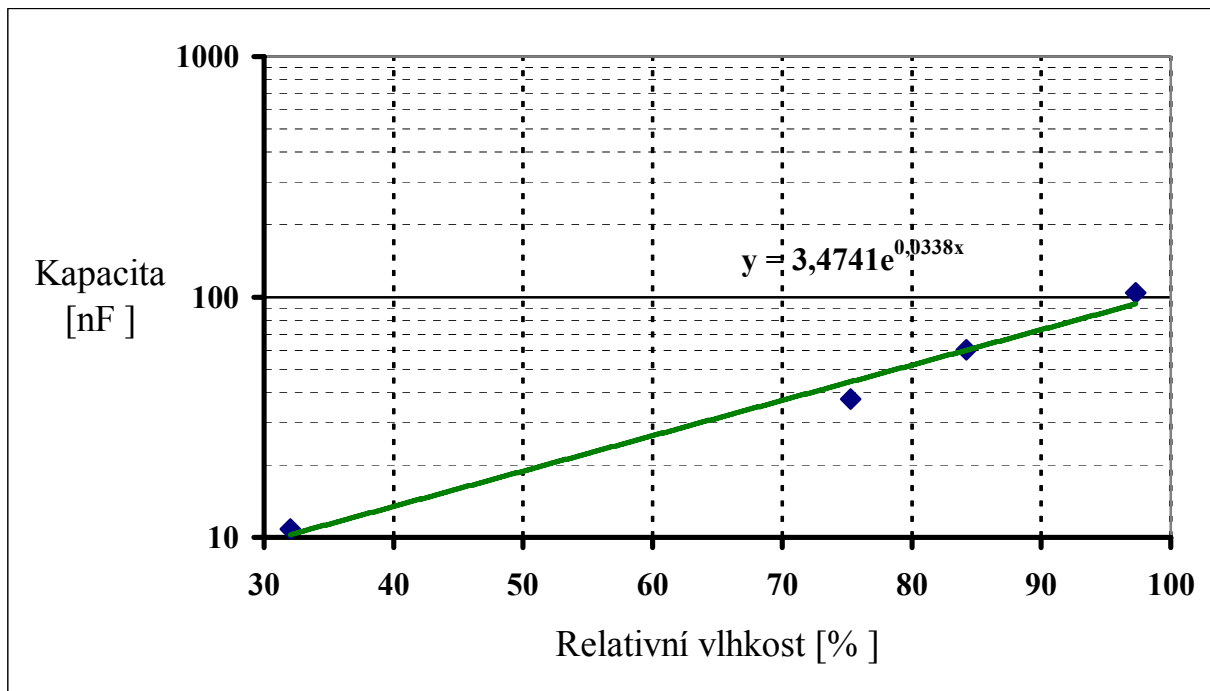


Naměřené hodnoty na snímači č.2: NAE832

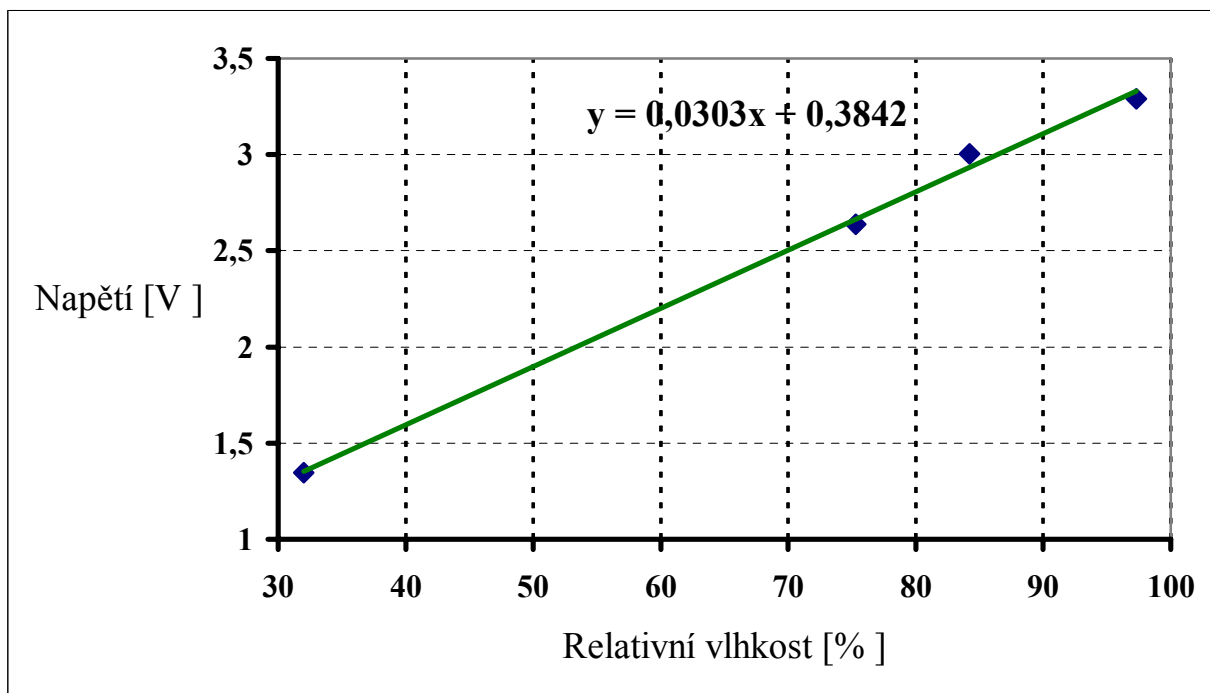


Příloha F

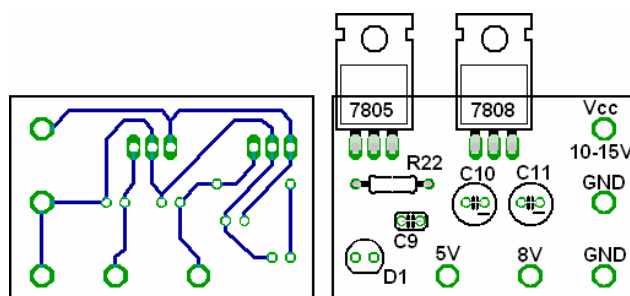
Naměřené hodnoty na snímači č.3: RH-05



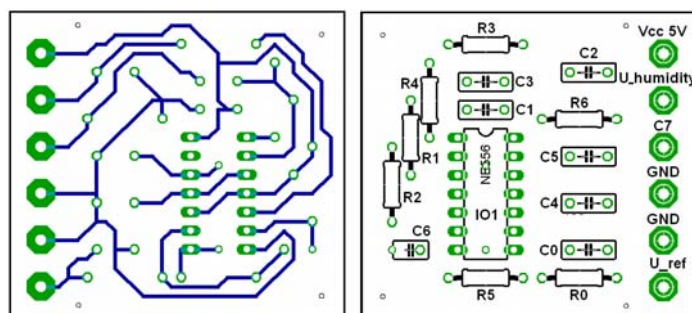
Naměřené hodnoty na snímači č.4: RHU-217-5AT



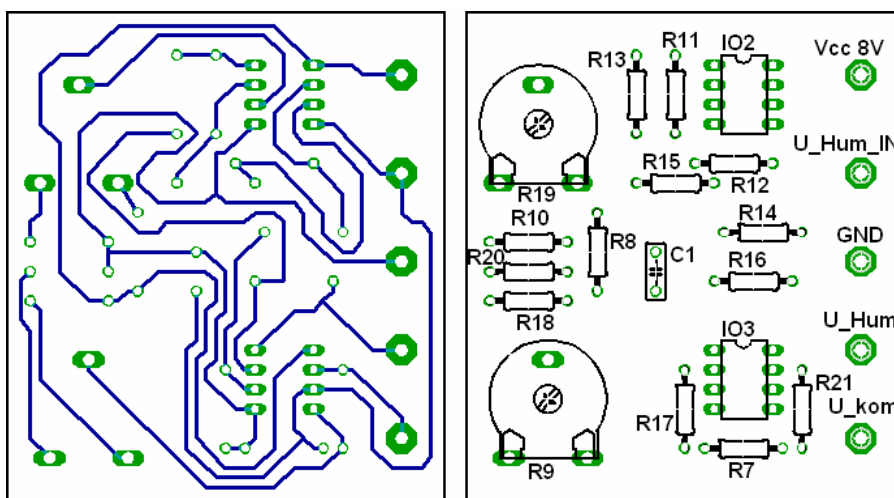
Příloha G – Realizované plošné spoje v měřítku M 1:1



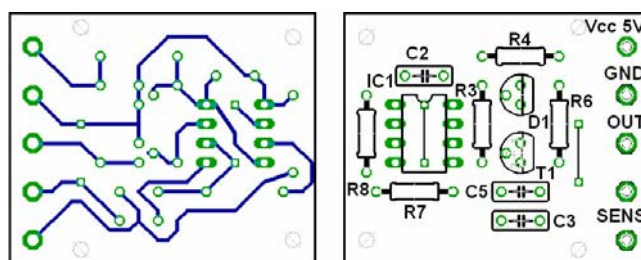
Napájecí zdroj



Základní vlhkostní modul



Přístrojový zesilovač



Frekvenční modul

Příloha H

Výsledný vlhkostní modul

(nahore napájecí modul, uprostřed základní vlhkostní modul, dole přístrojový zesilovač)

