



**Fakulta elektrotechnická**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Čidla vlhkosti a detektory sněhu

Autor práce: Vojtěch Smetana

Vedoucí práce: Ing. Zuzana Petránková

Plzeň 2012



## **Abstrakt**

Tato práce vznikla za účelem seznámení se s principy měření vlhkosti a detekce sněhu. Dalším bodem je popis konstrukčních řešení jednotlivých senzorů a detektorů. V následujícím textu naleznete rovněž přehled dnes používaných metod a prostředků. Dále se tato práce zabývá samotným návrhem a sestavením čidla vlhkosti pro venkovní použití. Návrh systému byl proveden v systému Formica. Vlastní konstrukční řešení je realizováno deskou plošných spojů, kde základním elementem je vlhkosní čidlo SHT 11 od firmy Sensorion, které komunikuje s mikrokontrolérem typu 89S52.

## **Klíčová slova**

Vlhkost, vzduch, vodní pára, rosný bod, senzor

## **Abstract**

This work was created for the purpose of familiarization with the principles of measurement of humidity and snow detection. Another point is the description of the various designs of sensors and detectors. Below you will also find an overview of methods used today, and resources. Furthermore, this work deals with the actual design and compilation of the humidity sensor for outdoor use. The system design was carried out of Formica. Custom design is realized by PCB, the main element is a humidity sensor SHT 11 from Sensorion company that communicates with microcontroller 89S52 type.

## **Keywords**

Humidity, air, water vapor, dew point, sensor

## Obsah

1 – Úvod, Cíle práce .....	6
2 – Základní veličiny a druhy vlhkosti vzduchu .....	7
2.1 Absolutní vlhkost - $\Phi$ .....	7
2.2 Relativní vlhkost – $\rho$ .....	7
2.3 Měrná vlhkost – $\chi$ .....	7
2.4 Teplota rosného bodu.....	8
3 – Přehled použitelných metod pro měření vlhkosti plynů.....	8
3.1 Hygrometrická.....	8
3.2 Psychometrická .....	8
3.3 Coulometrická .....	9
3.4 Rosného bodu .....	9
3.5 Difúzní .....	9
3.6 Další používané metody .....	9
4 – Popis metod pro měření vlhkosti .....	10
4.1 Psychometrická metoda.....	10
4.2 Hygrometrická metoda .....	10
4.2.1 Metoda Gravimetrická .....	11
4.2.2 Metoda dilatační .....	11
4.2.3 Metoda Odporová.....	13
4.2.4 Metoda Kapacitní .....	13
4.2.5 Metoda Rezonanční .....	14
4.2.6 Metoda Tepelné vodivosti .....	15

## 1 – Úvod, Cíle práce

### *Vlhkost vzduchu a její definice*

Nejprve, než přejdeme k přímé definici vlhkosti vzduchu, je třeba definovat několik základních pojmů, jako jsou vlhký a mlhový vzduch. Tyto pojmy vyjadřují, v jaké formě se ve vzduchu vyskytuje voda. Vlhký vzduch je směs suchého vzduchu a vody ve formě vodní páry, oproti tomu pojem mlhový vzduch se používá, pokud je voda ve zkondenzované formě, tj. vodní kapičky či krystalky ledu.

Vlhkost vzduchu udává, jakou měrou je vzduch nasycen vodními parami. Vlhkost je velmi závislá na teplotě, jinak řečeno maximální množství páry, která může být obsažena v určitém objemu vzduchu, závisí na teplotě. Z toho plyne, že při stejném tlaku vodních par, ale při odlišné teplotě je vzduch relativně suchý či vlhký. Jako příklad uvedu následující: v  $1\text{m}^3$  při teplotě  $10^\circ\text{C}$  je pouze 9 g vody, kdyžto při  $20^\circ\text{C}$  je objem vody již 17 g.

Vlhkost vzduchu se vyjadřuje v procentech, pro lepší představivost, relativní vlhkost je rovna 100%, pokud je vzduch vodní parou zcela nasycen a kdybychom dodali větší množství vodní páry, vedlo by to ke kondenzaci.

Jak jsem již výše zmínil tlak vodních par je jednou z charakteristik vlhkosti vzduchu, další charakteristikou je teplota rosného bodu, což je vlastně teplota, při které se vzduch izobarickým ochlazováním nasytí bez toho, aby bylo dodáno jakékoli množství vodní páry. Pokud teplota klesne pod úroveň teploty rosného bodu, dochází obvykle ke kondenzaci vodní páry. To zapříčiňuje vznik rosy nebo mlhy. Jestliže je relativní vlhkost menší než 100%, je teplota rosného bodu nižší než teplota vzduchu. Tento rozdíl se nazývá deficit teploty rosného bodu, je nepřímo úměrný relativní vlhkosti.

### *Cíle práce*

Cílem této bakalářské práce je popsat metody ať už dnes či v minulosti používané k měření vlhkosti vzduchu respektive detekci sněhu. Vytvořit přehled těchto metod a zejména konstrukčních řešení senzorů a detektorů užívaných v tomto odvětví.

Dalším neméně důležitým bodem práce je návrh elektronického systému pro měření vlhkosti nebo detekci sněhu, který je určen pro venkovní použití. V následujícím kroku sestavení a oživení tohoto systému ve formě funkčního vzorku. S tímto bodem úzce souvisí návrh technického a programového prostředku.

## 2 – Základní veličiny a druhy vlhkosti vzduchu

### 2.1 Absolutní vlhkost - $\Phi$

Pojem, který udává hmotnost vodní páry vázaný na objem vzduchu. Typickou jednotkou je gram na metr krychlový [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]. Absolutní vlhkost je přímo úměrná teplotě, to znamená, že s rostoucí teplotou vlhkost roste. Množství páry, která může být ve vzduchu obsažena je omezena. Pokud se vzduch plně nasytí, další vlhkost již nepřijme.

$$\Phi = \frac{m_V}{V} \left[ \text{g}/\text{m}^3, \text{kg}/\text{m}^3 \right]$$

### 2.2 Relativní vlhkost – $\rho$

Tento pojem vyjadřuje poměr mezi skutečným a maximálním možným nasycením vzduchu vodní parou. Udává se v procentech [% RH]. Jinak řečeno, je to procentní podíl nasycení suchého vzduchu vodní parou při konstantní teplotě. Pro lepší představu, suchý vzduch má relativní vlhkost 0 %, naopak relativní vlhkost nasyceného vzduchu je 100 %. Relativní vlhkost můžeme určit z parciálního tlaku vodní páry.

$$\rho = \frac{P_p}{P_p''} = \frac{\Phi}{\Phi''} \cdot 100 \text{ [%]}$$

$P_p$  parciální tlak vodní páry

$P_p''$  parciální tlak nasycené vodní páry

$\Phi$  absolutní vlhkost vzduchu

$\Phi''$  absolutní vlhkost nasyceného vzduchu

$$\varphi = \frac{P_c - P_p}{P_c - P_p''} \text{ [%]}$$

$P_c$  celkový tlak vodní páry a suchého vzduchu

### 2.3 Měrná vlhkost – $\chi$

Udává množství hmoty vodní páry, odpovídající hmotnosti 1 kg suchého vzduchu. Pro výpočet využívá hmotnostní zlomek a poměr hmotnosti vodní páry  $m_p$  a hmotnosti suchého vzduchu  $m_v$ , jednotkou jsou procenta.

$$\chi = \frac{m_p}{m_v} \cdot 100 \text{ [%]}$$

$m_p$  hmotnost vodní páry

$m_v$  hmotnost suchého vzduchu

## 2.4 Teplota rosného bodu

Tato teplota označuje hranici, kdy už vzduch není schopen přijímat jakékoli množství vodní páry. Je dána ochlazením vzduchu do stavu sytosti, jinak řečeno je to teplota mezního adiabatického ochlazení. Adiabatické ochlazení je stav sytosti, kdy se medium ochlazuje odpařováním vody bez přívodu nebo odvodu tepla.

## 3 – Přehled použitelných metod pro měření vlhkosti plynů

### 3.1 Hygrometrická

Je to druh metody sorpční, u které se využívá sorpční vlhkosti, která mění permitivitu a vodivost nebo fyzické vlastnosti. Tato změna je způsobena absorpcí molekul vodní páry, která je součástí vzduchu či jiného plynu. Výhodou je jednoduchost a zároveň dobrá citlivost.

### 3.2 Psychometrická

Tato metoda je založena na snímání mezního adiabatického ochlazení. Měření probíhá při adiabatickém sycení vzduchu vodní párou, kdy je měřena teplota suchého a mokrého teploměru, respektive rozdíl parciálních tlaků. Relativní vlhkost je poté dána psychometrickým rozdílem.

$$\varphi = \frac{p_m''}{p_1''} - \frac{p_s}{p_1''} A(t_1 - t_m)$$

$t_1$	teplota suchého teploměru
$t_m$	teplota mokrého teploměru
$p_m''$ , $p_1''$	parciální tlak nasycené vodní páry při $t_m$ , $t_1$
$p_1''$	parciální tlak nenasyčeného vzduchu
$p_s$	statický tlak (obvykle barometrický)
$A$	psychometrická konstanta [ $K^{-1}$ ]

Konstanta  $A$  je závislá na rychlosti proudění vzduchu v okolí měřícího teploměru, závislost se projevuje při hodnotách rychlosti do 2,5 m/s, při rychlostech nad touto hodnotou lze  $A$  považovat za konstantní.



### **3.3 Coulometrická**

Patří mezi elektrolytické metody měření, základem je tenká vrstva oxidu fosforečného, která pokrývá elektrodu a absorbuje vodní páru z měřeného vzorku. Tato vlhkost je elektrolyzována proudem, který dodává vnější zdroj. Pokud je proudění plynu či vzduchu v okolí měřící elektrody konstantní, tak je dodávaný proud přímo úměrný vlhkosti plynu. Metoda vhodná zejména pro měření malých koncentrací vlhkosti.

### **3.4 Rosného bodu**

Principem je měření teploty na povrchu vody při dynamické rovnováze mezi množstvím vypařené vody z povrchu a množstvím kondenzované vodní páry z okolního vzduchu. Pokud dosáhneme rovnováhy, tak teplota vzduchu je shodná s teplotou povrchu vody, zároveň tato vrstva vzduchu má relativní vlhkost 100 %.

### **3.5 Difúzní**

Principem této metody je různost rychlosti difúze vodní páry a vzduchu na pórovité přepážce. Nevýhodou je celkově malá účinnost.

### **3.6 Další používané metody**

- měření sorpčního tepla
- měření tepelné vodivosti
- měření pomocí rovnovážného elektrolytického teploměru
- měření permitivity
- využití monokrystalu iontové soli
- spektrální metody -využití schopnosti atomů a molekul pohlcovat a vyzařovat elektromagnetické vlnění pouze některých vlnových délek
- chromatografické metody -vlhkost je stanovena pomocí dalších složek plynu

## 4 – Popis metod pro měření vlhkosti

### 4.1 *Psychometrická metoda*

Měření tímto způsobem je nejčastěji aplikovaná metoda pro měření relativní vlhkosti.

### 4.2 *Hygrometrická metoda*

Jak jsem již výše zmínil, jedná se o metodu sorpční, která využívá fyzikálních či chemických změn vlastností materiálu. Tyto změny jsou zapříčiněny změnou absorbované vlhkosti respektive vodní páry zkoumaného materiálu.

Vlhkost má za následek zejména změny tohoto druhu:

- objem
- hmotnost
- elektrický odpor
- permitivita

Z tohoto hlediska také následně můžeme tyto metody dále rozlišovat a určit jednotlivé druhy senzorů, které pracují s těmito principy. Na senzory jsou také kladeny určité požadavky, a to zejména:

- odezva ve směru sorpce a desorpce musí být rychlá s velmi malou hysterezí
- změna měřené veličiny musí být dostatečně velká a zároveň lineárně závislá na relativní vlhkosti nebo teplotě rosného bodu
- stálost kalibračních křivek za běžných měřicích podmínek
- měřitelnost v širokém teplotním rozsahu, vliv teploty na měření musí být zanedbatelný

#### *Výhody*

Jednoduchost konstrukce senzorů (nízká cena).

Rychlost měření, velký rozsah akceptovatelných vlhkostí, dobrá rozlišitelnost.

#### *Nevýhody*

Hystereze, teplotní závislost sorpce a desorpce, nestabilita kalibračních křivek.

***Dělení sorpčních metod:***

- gravimetrická
- dilatační
- odporová
- kapacitní
- rezonanční
- pomocí tepelné vodivosti

***4.2.1 Metoda Gravimetrická***

Tato metoda je považována za standard pro měření vlhkosti plynů. Princip této metody a samotného zařízení pro měření touto metodou je velmi jednoduchý. Vhodný absorpční materiál, někdy označován jako sušidlo, pohlcuje vodní páru známého objemu. Poté se odečítá přírůstek hmotnosti.

Současný model měření touto metodou spočívá v plynu, který protéká třemi trubicemi tvaru U, které jsou plněny chloristanem hořečnatým nebo oxidem fosforečným. Po průchodu plynu prvními dvěma trubicemi je odečtena hmotnost. Přírůstek hmotnosti a známý objem plynu poté slouží pro výpočet střední hodnoty vlhkosti. Poslední trubice slouží ke kontrole a zároveň zabraňuje difúzi vlhkosti do opačného směru. V dnešní době se používá zejména pro kalibraci a ověřování měření pomocí jiných metod.

***Nevýhody***

Časová náročnost měření

Použitelnost přístroje pouze pro laboratorní měření

***4.2.2 Metoda dilatační***

Nejstarším materiálem, který se využívá v rámci tohoto měření, je odmaštěný lidský vlas, který je základem tzv. vlasového vlhkoměru či hygrometru. Princip tohoto přístroje je založen na vhodných vlastnostech lidského vlasu, popř. koňské žíně, která po odstranění tuku, svými vlastnostmi shoduje se zmiňovaným lidským vlasem. Fyzikálně se tento vlas či žíně chová tak, že se v závislosti na vlhkosti mění jeho délka. Pro rostoucí vlhkost vzduchu se délka zvyšuje, a naopak pro klesající vlhkost prostředí se délka zmenšuje.

Přístroj je koncipován tak, že určité množství vlasů tvoří svazek, který je jedním koncem pevně spojen s pružinou, která se opírá o nařizovací šroub, druhý konec svazku je zavěšen na rameni, které celý systém napíná. Poté jakákoliv změna délky vlasu, způsobena změnou vlhkosti je převáděna na stupnici, která znázorňuje hodnotu relativní vlhkosti.

Poměrné prodlužování je dáno vztahem:

$$\tau = k \cdot T \cdot \log \varphi$$

T      absolutní teplota [K]

k      konstanta

$\phi$       relativní vlhkost [%]

Pro urychlení měření je možno výchylku převést na elektrický signál, který je následně snímán odporovým potenciometrem nebo indukčním snímačem.

V závislosti na vlhkosti je vlas schopen změnit svoji délku o 2,5 až 3 % při změně relativní vlhkosti 0 – 100 %, z čehož vyplývá, že teoretická přesnost je kolem 3 %. Závislost délky vlasu a vlhkosti ale není lineární, ale spíše se podobá funkci logaritmus. Pro zlepšení vlastností se používá různých úprav vlasu, abychom zlepšili linearitu a zároveň zmenšili hysterezi, je možno odmastit vlas pomocí éteru.

### ***Výhody***

Spolehlivost při teplotách pod bodem mrazu, až do 80°C.

Velká jednoduchost celého zařízení.

### ***Nevýhody***

Nutnost časté regenerace. Ta spočívá ve vystavení senzoru do prostředí s vysokou vlhkostí, blízkou stavu nasycení. To může být problém u vnitřních zařízení. U přístrojů zejména pro meteorologické, či jiné odborné měření probíhá tato regenerace samočinně při výrazném poklesu teploty (noční provoz), kdy dochází k výraznému zvýšení relativní vlhkosti, která často dosahuje hodnot rosného bodu.

Choulostivost při vyšších teplotách.

### 4.2.3 *Metoda Odporová*

Tato metoda respektive senzor pracuje na principu změny elektrolytické vodivosti. Základem je elektrolyt v pevné nebo kapalné formě.

Základem odporového hygrometru s kapalným elektrolytem na bázi Lithium-chloridu, je nevodivá trubička, na níž je umístěna tkanina, která se sestává z drátkových elektrod, které jsou navinuty bifilárně a připojeny na zdroj střídavého proudu. Zároveň je tkanina napuštěná již zmiňovaným roztokem LiCl (Lithium-chlorid). Po sepnutí zdroje, se začne elektrolyt ohřívat a tím pádem se z roztoku začne odpařovat voda. Tento jev způsobí pokles vodivosti a následné snížení procházejícího proudu, které provází pokles teploty. Naopak snižováním teploty dochází k absorpci vodní páry, zvyšování vodivosti a proudu, který zapříčiní zvýšení teploty.

Rovnováha systému a objemu vody v elektrolytu je závislá na teplotě, která je funkcí parciálního tlaku vodních par ve vzduchu.

Druhou variantou je elektrolyt v pevném skupenství. Tuto variantu tvoří hliníková elektroda, jejíž povrch je tvořen vrstvou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (oxid hlinitý), na druhé elektrodě je napařena tenká vrstva zlata, která je pro vodní páru propustná.

Měření probíhá při napájení střídavým proudem, abychom předešli polarizaci elektrod. Velikost měřeného odporu je závislá jak na relativní vlhkosti, tak i na teplotě, proto je nutné měřící soustavu teplotně stabilizovat. Výše zmíněná závislost vlhkosti a odporu je exponenciální. Rychlost odezvy je závislá na pohybu a teplotě okolního vzduchu.

Používané senzory se liší většinou pouze typem používaného elektrolytu: LiCl,  $\text{SeO}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{ZnO}$   $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

#### *Výhody*

Velká přesnost, až desetiny % RH. Dobrá stabilita.

#### *Nevýhody*

Citlivost senzoru na kondenzaci, nemožnost použití při vyšších teplotách.

### 4.2.4 *Metoda Kapacitní*

Konstrukce těchto senzorů je podobná konstrukci odporového senzoru, pracuje na principu kondenzátoru, jehož dielektrikum tvoří polymer s hygroskopickými vlastnostmi. Polymer je tenká vrstva takového materiálu, který je schopen vratně sorbovat vlhkost

okolního prostředí. Místo polymer je možné použít také vhodný oxid kovu. Elektrody kondenzátoru jsou odlišné, jedna z elektrod je děrovaná a umožňuje kontakt vzduchu a dielektrika.

Princip, se kterým se zde pracuje, je změna kapacity a elektrického odporu, tím pádem také impedance, vlivem sorpce vlhkosti materiálem. Množství vody, které je materiálem absorbováno, je velmi malé, přesto jsou změny kapacity dobře měřitelné, vlivem velké dielektrické konstanty. Možnou výhodou je možnost výstupu v přijatelnější formě elektrického napětí či digitálního rozhraní.

### ***Výhody***

Velká citlivost, malý vliv znečištění, malá závislost měřeného údaje na teplotě.

Odolnost vůči kondenzaci, přesnost na jednotky % RH.

Měřitelnost jak vlhkosti plynů, tak i kapalin.

Téměř lineární závislost kapacity senzoru a relativní vlhkosti.

### ***Nevýhody***

Odezva v řádu desítek sekund.

#### ***4.2.5 Metoda Rezonanční***

V tomto případě probíhá měření tak, že množství vody, která je sorbována materiálem, ovlivní celkovou vlhkost tohoto materiálu.

Jak již název metody napovídá, princip je založen na oscilacích, proto i měřicí obvod je sestaven z oscilátoru, do jehož obvodu jsou zapojeny elektrody křemíkového výbrusu. Z tohoto zapojení je patrné, že frekvence výstupního vysokofrekvenčního napětí závisí na mechanických vlastnostech křemíkového výbrusu. Těmito vlastnostmi jsou zejména rozměry a hmotnost.

Z této závislosti, při zjednodušení některých podmínek vyplývá:

$\Delta f = K - \Delta m$	$\Delta f$	změna frekvence vyvolaná změnou hmotnosti
	K	konstanta úměrnosti
	$\Delta m$	změna hmotnosti

$K = \frac{f^2}{N \cdot \rho \cdot S}$	f	vlastní frekvence oscilátoru
	N	frekvenční konstanta závislá na úhlu řezu
	$\rho$	hustota křemene
	S	plocha výbrusu

Pro praktické využití těchto poznatků je nutné splnit několik základních podmínek:

- Malé množství sorbované látky, jelikož velké množství sorbované vody ovlivní koncentraci vodních par v měřené látce.
- Pro rychlou odezvu je nutné, aby se na povrchu sorbantu rychle ustálila dynamická rovnováha mezi plynnou fází a sorbovanou látkou.
- Dostatečná rychlost metody pro měření změny hmotnosti.

#### 4.2.6 *Metoda Tepelné vodivosti*

Principem této metody je využití závislosti tepelné vodivosti vzduchu na její vlhkosti. Této závislosti vyhovuje konstrukce s vyhřívanými termistory. Senzor je sestaven ze 2 shodných termistorů, kde jeden je hermeticky oddělen a uzavřen v prostředí se suchým dusíkem. Druhý termistor je volně uložen, tak aby jej mohl obklopovat okolní vzduch. Sériové spojení těchto termistorů tvoří jednu větev můstku, kde druhá větev je tvořena pevnými rezistory a proměnným trimrem, který slouží k nulování rozváženého můstku. Pokud jsou termistory protékány proudem, tak se zahřívají do teploty, která je závislá na tepelné vodivosti okolního plynu. Pokud je můstek umístěn v absolutně suchém prostředí, je vyvážen a zobrazuje nulovou výchylku, tato výchylka se začne měnit spolu se změnou vlhkosti prostředí. Výstupní signál senzoru je úměrný absolutní vlhkosti.

#### *Výhody*

Měřitelnost i při vysokých teplotách ( až 200°C )

Vysoká chemická odolnost