

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření vlhkosti

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

Jméno a příjmení: **Bc. Petr RÖSCH**
Osobní číslo: **E15N0038K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Měření vlhkosti**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Prostudujte metody měření vlhkosti plynů a pevných materiálů a v práci je popište.
2. Sestavte přehled dostupných senzorů vlhkosti. Zaměřte se na dosažitelnou přesnost měření, možnost současného měření teploty, velikost, životnost a cenu senzoru.
3. Navrhněte metodu měření vlhkosti uvnitř zdiva a izolačních souvrství. Sestavte a ověřte funkční vzorek měřiče.
4. Technické a programové prostředky v práci podrobně popište.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Václav Koucký, CSc.


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Práce je zahájena vytvořením teoretického základu o měření vlhkosti plyných a pevných látek. Jsou popsány jednotlivé fyzikální veličiny a vztahy mezi nimi. Dále jsou vysvětleny principy různých snímačů a metody měření. V dalším kroku jsou představeny dostupné digitální a analogové senzory vlhkosti plynu. U každého z nich jsou uvedeny technické parametry a cena. Následuje vývoj měřiče vlhkosti zdiva. Nejprve je navržena mechanická konstrukce a potom plošný spoj s mikroprocesorem, displejem, tlačítky a obvody potřebnými pro napájení z akumulátoru. Součástí vytvořeného hardwaru je také sonda s čidlem Sensirion SHT11, kterou lze zasouvat do vyvrtaných otvorů ve zdi. Přístroj je vybaven softwarem pro zobrazování a ukládání měřených veličin do paměti. Hodnoty lze potom přenášet přes sériové rozhraní do počítače a uložit je jako soubor excel. Nakonec je proveden pokus měření v obvodové zdi bytu.

Klíčová slova

Metody měření vlhkosti, snímače vlhkosti, Sensirion SHT11, vlhkost zdiva, mikroprocesor Atmel AVR, SolidWorks, CodeVisionAVR, Delphi

Abstract

The work is started with theory of humidity measurement in gases and solid materials. Physical quantities are described including their mutual relations. Next, there is explanation of different gas humidity sensors principles. After that, available digital and analog gas humidity sensors are introduced. For each of them, technical parameters and price is evaluated. Then in-wall humidity meter development follows. In the beginning the mechanical construction is designed. After that the PCB with microcontroller, display, buttons and accumulator circuit is projected. The part of developed hardware is also a probe with Sensirion SHT11 sensor which can be inserted into drilled holes. The meter is equipped with software for displaying of quantities and saving them into memory. It is possible to download values over serial interface and save them as excel file. Finally there was an experiment performed in bearing wall of flat.

Keywords

Humidity measurement methods, humidity sensors, Sensirion SHT11, in-wall humidity, microcontroller Atmel AVR, SolidWorks, CodeVisionAVR, Delphi

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 §270 trestního zákona č.40/2009 Sb.

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

V Plzni dne

.....

Podpis

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	12
1 METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI	13
1.1 VZTAHY A VELIČINY VYSTUPUJÍCÍ V PROBLEMATICE MĚŘENÍ VLHKOSTI	13
1.2 METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI PLYNŮ	20
1.3 METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI PEVNÝCH LÁTEK.....	27
2 PŘEHLED DOSTUPNÝCH SENZORŮ VLHKOSTI	29
2.1 SENZOR BOSCH BM280.....	29
2.2 SENZORY SENSIRION ŘADY SHT1X	30
2.3 SENZORY TEXAS INSTRUMENTS.....	31
2.4 SENZOR STMICROELECTRONICS HTS221	32
2.5 SENZORY HONEYWELL	33
3 HARDWAROVÝ VÝVOJ MĚŘIČE VLHKOSTI	35
3.1 NAPÁJECÍ NAPĚTÍ.....	35
3.2 MIKROPROCESOR	35
3.3 AKUMULÁTOR.....	36
3.4 REGULACE NAPĚTÍ.....	37
3.5 NABÍJENÍ AKUMULÁTORU	38
3.6 KOMUNIKACE S POČÍTAČEM	39
3.7 DISPLEJ.....	41
3.8 NAPÁJECÍ NAPĚTÍ 5V.....	42
3.9 TLAČÍTKA	43
3.10 PŘIPOJENÍ SENZORU	44
3.11 ŘÍZENÍ MIKROPROCESOREM	45
3.12 OBJEDNÁVKA SOUČÁSTEK.....	45
3.13 MECHANICKÁ KONSTRUKCE	46
3.14 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	50
3.15 STAVBA PŘÍSTROJE	51
3.16 ZÁKLADNÍ OŽIVENÍ	52
3.17 KONSTRUKCE MĚŘÍCÍ SONDY	53
4 SOFTWAREVÝ VÝVOJ MĚŘIČE VLHKOSTI	55
4.1 VIZE O METODĚ MĚŘENÍ.....	55
4.2 FUNKČNÍ DIAGRAM PŘÍSTROJE	55
4.3 ZÁKLADNÍ NASTAVENÍ MIKROPROCESORU	57
4.4 OBSLUHA TLAČÍTEK	57
4.5 OBSLUHA DISPLEJE	59
4.6 KOMUNIKACE SE SENZOREM	61
4.7 ORGANIZACE PAMĚTI EEPROM.....	66
4.8 POČÍTÁNÍ ČASU	66
4.9 SÉRIOVÁ KOMUNIKACE	67
4.10 APLIKACE PRO STAŽENÍ DAT	67
5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	69
5.1 VÝSLEDNÝ PRŮBĚH.....	69
ZÁVĚR	70
POUŽITÁ LITERATURA	71

PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A - ODVOZENÍ VZTAHU PRO VÝPOČET TEPLoty ROSNÉHO BODU.....	1
PŘÍLOHA B - SEZNAM SOUČÁSTEK.....	2
PŘÍLOHA C - KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘÍSTROJE	3
PŘÍLOHA D - NAVRŽENÁ DESKA PLOŠNÉHO SPOJE.....	4

Seznam symbolů a zkratek

P	Tlak [Pa]
V	Objem [m^3]
n	Látkové množství [mol]
R	Univerzální plynová konstanta [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]
T	Teplota [K]
n	Látkové množství [mol]
N	Počet částic v látce [-]
N_A	Avogadrova konstanta rovna 6 022 140 857 [mol^{-1}]
m	Hmotnost látky [kg]
M	Molární hmotnost látky [$kg \cdot mol^{-1}$]
ds	Totální diferenciál entropie systému [$J \cdot K^{-1}$]
dq	Totální diferenciál tepelné energie [J]
di	Totální diferenciál entalpie [J]
du	Totální diferenciál vnitřní energie [J]
da	Totální diferenciál absolutní práce [J]
dg	Totální diferenciál Gibbsovy volné energie [J]
ΔG	Změna Gibbsovy volné energie [J]
ΔS	Změna entropie [$J \cdot K^{-1}$]
ΔV	Změna objemu [m^3]
e	Částečný tlak vodní páry [Pa]
e_w	Tlak nasycené vodní páry nad vodou [Pa]
L	Skupenské teplo [J]
R_v	Univerzální plynová konstanta 8,831 447 2 [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]
U_w	Relativní vlhkost [%]
t, v	Teplota [$^{\circ}C$]
t_d, v_{RB}	Teplota rosného bodu [$^{\circ}C$]
d_V	Absolutní vlhkost [$g \cdot m^{-3}$]
r	Směšovací poměr
e_s	Parciální tlak nasycené vodní páry nad solným roztokem LiCl [Pa]
v_{LiCl}	Teplota chloridu lithného [$^{\circ}C$]
v_0	Teplota měřeného plynu [$^{\circ}C$]
v_m	Teplota mokrého senzoru psychrometru [$^{\circ}C$]

<i>A</i>	Psychrometrický součinitel
<i>S</i>	Plocha [m^2]
<i>d</i>	Vzdálenost [m]
<i>C</i>	Kapacita [F]
ϵ_0	Permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12}$ [$F \cdot m^{-1}$]
ϵ_r	Relativní permitivita [-]
ρ	Rezistivita [$\Omega \cdot m$]
<i>R</i>	Elektrický odpor [Ω]
<i>sps</i>	Samples per second, snímky za sekundu [$I \cdot s^{-1}$]
CAD.....	Computer Aided Design
THT.....	Through-hole Technology
USB.....	Universal Serial Bus
UART.....	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
LDO.....	Low Dropout regulator
PC.....	Personal Computer
LCD.....	Liquid Crystal Display
LED.....	Light Emitting Diode
MOSFET.....	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
SPICE.....	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
I2C.....	Inter-Integrated Circuit
SPI.....	Serial Peripheral Interface
DPS.....	Deska plošných spojů
CNC.....	Computer Numerical Control
SMD.....	Surface Mount Devices
EEPROM.....	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
SRAM.....	Static Random Access Memory
JTAG.....	Joint Test Action Group
DDRAM.....	Display Data Random Access Memory

Úvod

Velké množství obytných objektů se setkává s problémem vlhnutí stěn a následného výskytu plísní. Práce vznikla za účelem analýzy a předcházení těmto jevům. Hlavní myšlenkou je snímání relativní vlhkosti a teploty vzduchu uvnitř vyvrtaného otvoru ve zdi. Veličiny mohou být sledovány v závislosti na hloubce umístění čidla a také jako funkce času.

V první části je probrána fyzika týkající se vlhkosti plynů a pevných látek. Na ní jsou založené principy různých snímačů a metod měření. Často se vyskytuje vazba mezi tepelnými a elektrickými veličinami.

Druhá část představuje přehled dostupných senzorů vlhkosti plynů. Ve většině případů byla zaznamenána současná možnost měření teploty a digitální komunikační rozhraní. Kapitola pojednává o technických parametrech jako je přesnost, životnost, rozměry a cena.

Třetí část podrobně popisuje vývoj hardwaru. Jednotlivé kroky vedou k návrhu mechanické konstrukce měřiče a elektronickému schématu zapojení, podle kterého je vytvořena deska plošných spojů. Podstatnou součástí je i výroba měřicí sondy.

Čtvrtá část se zabývá vytvořením programového vybavení. Software pro mikroprocesor Atmel ATmega644 napsaný v jazyce C umožňuje přečíst veličiny ze senzoru, zobrazit je na displeji a uložit do paměti EEPROM. Díky aplikaci napsané ve vývojovém prostředí Delphi je možné výsledky z přístroje stáhnout do počítače a uložit jako tabulku excel.

V poslední části je provedeno průběhové měření v obvodové zdi bytu. Sonda byla umístěna v otvoru 10 cm hluboko po dobu 4 hodin.

1 Metody měření vlhkosti

Vlhkost je veličina, která udává množství vodní páry v plynu. Molekuly se uvolňují z vody vypařováním, nebo sublimací z ledu. Plyn může být suchý, nebo mokrá. V druhém případě je obtížnější až nemožné docílit větší vlhkosti a voda může začít kondenzovat [1]. Hlavním cílem této kapitoly je vytvoření teoretického základu o problematice měření vlhkosti a vysvětlení jednotlivých fyzikálních veličin. Znalost jejich podstaty a vzájemné vazby je pravděpodobně nezbytná pro pochopení jednotlivých metod měření.

1.1 Vztahy a veličiny vystupující v problematice měření vlhkosti

V následujícím textu budou postupně odvozeny klíčové vztahy, které se podílejí na stanovení vlhkosti. Vzhledem k tomu, že je práce specializovaná na množství vodní páry v plynu, budou všechny výpočty zaměřeny právě na tuto oblast.

1.1.1 Stavová rovnice ideálního plynu

Stavovou veličinou je teplota a tlak směsi vzduchu a vodní páry. Proto lze očekávat velmi častý výskyt stavové rovnice ideálního plynu (1.1). Nerespektování skutečných poměrů zanáší do výpočtu zhruba 1% chybu [4].

$$PV = nRT \quad (1.1)$$

kde	P	tlak [Pa]
	V	objem [m^3]
	n	látkové množství [mol]
	T	absolutní teplota [K]
	R	univerzální plynová konstanta rovna 8,31 [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]

1.1.2 Látkové množství

Látkové množství n udává poměr počtu částic proti celkovému množství částic v 12 gramech nuklidu uhlíku [5].

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} \quad (1.2)$$

kde	n	látkové množství [mol]
	N	počet částic v látce

N_A	Avogadrova konstanta rovna 6 022 140 857 [mol^{-1}]
m	hmotnost látky [kg]
M	molární hmotnost $\left[\frac{kg}{mol} \right]$

1.1.3 Entropie

Veličina definovaná jako poměr přenesené tepelné energie do látky z jejího okolí a teploty při které tento přenos probíhal. Rovnice vyjadřuje 2. termodynamický zákon [6]. Proces který je dokonale tepelně dokonale izolován od svého okolí se nazývá adiabatický a má nulovou změnu entropie [3].

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1.3)$$

kde ds totální diferenciál entropie systému $\left[\frac{J}{K} \right]$

dq totální diferenciál tepelné energie [J]

T teplota, za které je změna tepla prováděna [K]

1.1.4 Entalpie

Energie obsažená v termodynamickém systému. Jedná se o součet vnitřní energie a mechanické vlačovací práce [7].

$$di = du + d(PV) \quad (1.4)$$

kde di totální diferenciál entalpie [J]

du totální diferenciál vnitřní energie [J]

Mění-li plyn objem, vykonává práci v bilanci se svou vnitřní energií a přenášeným teplem. Tato práce se nazývá absolutní a za konstantního tlaku je násobkem změny objemu. Protože změna tepla je dána součtem změn vnitřní energie a absolutní práce, lze změnu vnitřní energie vyjádřit pomocí rovnice (1.5) [6].

$$du = dq - da = dq - P \cdot dV \quad (1.5)$$

kde da totální diferenciál absolutní práce [J]

Kombinací rovnic (1.3) - (1.5) byl odvozen další vztah, z kterého je patrné, že při konstantním tlaku jsou si změny entalpie a tepelné energie rovny.

$$di = Tds + VdP = dq + VdP \quad (1.6)$$

1.1.5 Gibbsova energie

Někdy se také nazývá jako volná entalpie. Popisuje chemické reakce za konstantního tlaku, teploty a látkového množství. V termodynamice se dá užitečně aplikovat a je dána vztahem (1.7) [8].

$$dg = di - d(Ts) \quad (1.7)$$

kde dg totální diferenciál Gibbsovy volné energie [J]

Další úpravou lze získat Gibbsovu volnou energii s parametry typickými pro stavovou rovnici ideálního plynu. Je patrné, že při konstantním tlaku a teplotě je změna volné entalpie nulová.

$$dg = Tds + VdP - Tds - SdT = -SdT + VdP \quad (1.8)$$

1.1.6 Clapeyronova rovnice

Jedná se o klíčovou rovnici pro přechod mezi kapalným a plynným skupenstvím. Změna fáze není samovolná, ale jasně definovaná termodynamickou rovnováhou. Každá změna skupenství probíhá při konstantním tlaku a teplotě. Důsledkem toho bude změna Gibbsovy volné energie vždy nulová. Na základě tohoto poznatku lze odvodit vztah tlaku a teploty, který má význam hranice mezi dvěma fázemi látky [9].

Veličiny, které se naopak mění jsou objem a entropie. Tyto změny jsou dále označeny symboly ΔV a ΔS . Clapeyronova rovnice využívá pro své odvození matematický nástroj cyklické relace (1.9). Je velice užitečný v termodynamických úlohách. Dolní index znamená, že je veličina v rámci výrazu uvnitř závorky konstantní.

$$\left(\frac{dx}{dy}\right)_z = -\frac{\left(\frac{dz}{dy}\right)_x}{\left(\frac{dz}{dx}\right)_y} \quad (1.9)$$

Prvek x je nahrazen tlakem P , y teplotou T , a element z reprezentuje změnu Gibbsovy energie ΔG . Pro čitatele zlomků pravé strany dz po úpravě vztahu (1.8) platí:

$$dz = d\Delta G = -\Delta SdT + \Delta VdP \quad (1.10)$$

Byly získány všechny potřebné prvky pro dosazení do cyklické relace a ve vztahu (1.11) je Clapeyronova rovnice odvozena do konečné podoby [9].

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{\Delta G} = -\frac{\left(\frac{d\Delta G}{dT}\right)_P}{\left(\frac{d\Delta G}{dP}\right)_T} = -\frac{\left(\frac{-\Delta SdT + \Delta VdP}{dT}\right)_P}{\left(\frac{-\Delta SdT + \Delta VdP}{dP}\right)_T} = \frac{\Delta S}{\Delta V} \quad (1.11)$$

Změnu entropie lze nahradit skupenským teplem L . Místo tlaku P se uvádí tlak nasycené vodní páry nad vodou e_w . Při jeho dosažení už není možná větší vlhkost a dochází ke kondenzaci par. Výsledný tvar je uveden v rovnici (1.12) [2].

$$\frac{de_w}{dT} = \frac{L}{T\Delta V} \quad (1.12)$$

kde ΔV rozdíl objemu vlhkého plynu a zkondenzované vodní páry

1.1.7 Clausiova-Clapeyronova rovnice

Je využito skutečnosti, že při přechodu mezi dvěma fázemi je objem kapaliny velmi malý proti objemu plynu. Vodní pára je uvažována jako ideální plyn. Pak je možné dosadit stavovou rovnici ideálního plynu do Clapeyronovy rovnice [2].

$$\frac{de_w}{dT} = \frac{L \cdot e_w}{T^2 R_V} \quad (1.13)$$

kde R_V univerzální plynová konstanta $8,831\,447\,2 \left[\frac{J}{K \cdot mol} \right]$

Je patrné, že rovnice (1.13) neobsahuje látkové množství n . Možné vysvětlení je vztažení skupenského tepla L na 1 mol látky.

1.1.8 Magnusův vzorec

Řešením obyčejné diferenciální rovnice (1.13) lze získat vztah tlaku a teploty pro změnu skupenství. Výsledkem je exponenciální závislost nazývaná jako Magnusův vzorec. Parametrem je teplota ve stupních Celsia a další koeficienty uvedené v tabulce 1.1. [2]

$$e_w(t) = \alpha \cdot e^{\frac{\beta \cdot t}{\lambda + t}} \quad (1.14)$$

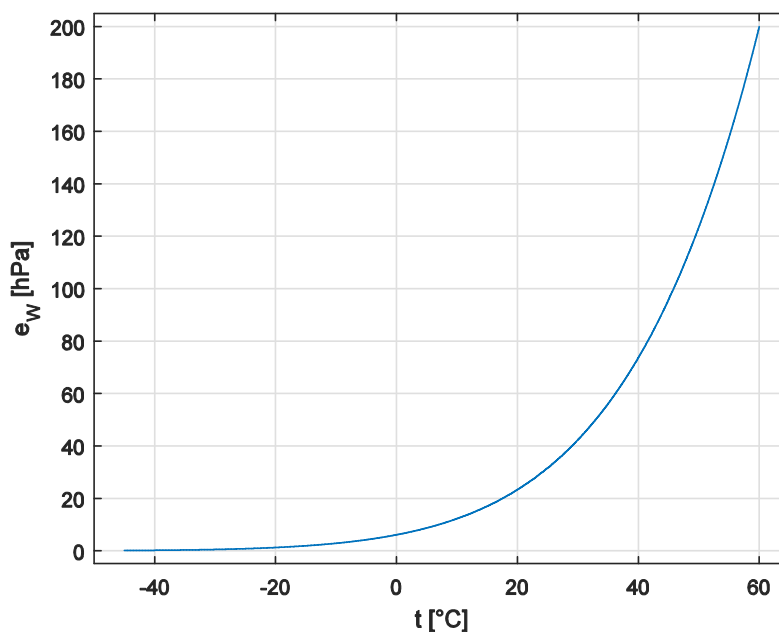
kde t teplota [$^{\circ}\text{C}$]

Tabulka 1.1: Koeficienty Magnusovy rovnice [2]

	Teplotní rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	α [hPa]	β	λ [$^{\circ}\text{C}$]
Nad vodou	-45,00–60,00	6,112	17,62	243,12
Nad ledem	-80,00–0,01	6,112	22,46	272,62

Pro představu o průběhu funkce byl zvolen řádek pro vodu. Došlo k vyčíslení s definovanými koeficienty a graficky znázorněno pomocí programu Matlab. Výsledný průběh je zobrazen na grafu 1.1.

Graf 1.1: Průběh Magnusovy rovnice



1.1.9 Relativní vlhkost

Důležitá veličina dána poměrem částečného tlaku vodní páry a tlaku nasycené vodní páry. Udává míru obsahu vody v plynu. Je nulová pro absolutně suchý plyn a nabývá hodnoty 100 % pro plyn, který už nemůže dosáhnout vyšší vlhkosti z důvodu termodynamické rovnováhy.

$$U_w(t) = \frac{e}{e_w(t)} \cdot 100\% \quad (1.15)$$

kde e částečný tlak vodní páry [Pa]

Za předpokladu konstantního tlaku a neměnicího se množství látky lze při rozdílu teplot definovat poměr relativních vlhkostí [2]. Pro známé U_1 , t_1 a t_2 platí:

$$U_1(t) = \frac{e}{\alpha \cdot e^{\frac{\beta \cdot t_1}{\lambda + t_1}}} \cdot 100\% \quad (1.16)$$

$$U_2(t) = \frac{e}{\alpha \cdot e^{\frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2}}} \cdot 100\% = U_1(t) \cdot \frac{e^{\frac{\beta \cdot t_1}{\lambda + t_1}}}{e^{\frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2}}}$$

1.1.10 Teplota rosného bodu

Je-li v prostředí změřena teplota t_2 a relativní vlhkost U_2 menší než 100 %, nedochází ke kondenzaci. Použitím odvození rovnice (1.16) lze stanovit takovou teplotu t_1 , při které bude relativní vlhkost U_1 rovna 100 %. Taková hodnota je nazývána jako teplota rosného bodu a značí se t_d . Pokud bude látka ochlazena právě na tuto teplotu, začne docházet ke kondenzaci vodní páry [2]. Podrobný postup odvození je uveden v příloze A.

$$t_d = \lambda \cdot \frac{\frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2} + \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right)}{\beta - \frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2} - \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right)} \quad (1.17)$$

1.1.11 Absolutní vlhkost

Jedná se o množství vody obsažené v jednotce objemu plynu. Veličina se značí d_v a její jednotka je $\frac{g}{m^3}$. Výpočet je uveden ve vztahu (1.18). Za objem plynu lze navíc dosadit stavovou rovnici ideálního plynu [2].

$$d_v = \frac{m_{H_2O}}{V} \left[\frac{g}{m^3} \right] \quad (1.18)$$

Hmotnost vody je možné vyjádřit jako součin látkového množství a molární hmotnosti. Odvození (1.19) naznačuje, jak je možné vyjádřit absolutní vlhkost pomocí teploty a částečného tlaku vodní páry.

$$M_{H_2O} = 18 \left[\frac{g}{mol} \right] \quad (1.19)$$

$$m_{H_2O} = M_{H_2O} \cdot n = M_{H_2O} \cdot \frac{e \cdot V}{R_v \cdot T} [g]$$

$$d_v = M_{H_2O} \cdot \frac{e}{R_v \cdot T} = 2,1667 \cdot \frac{e}{T} = 2,1667 \cdot \frac{e}{273,15 + t} \left[\frac{g}{m^3} \right]$$

Rovnice (1.20) dosazuje na místo částečného tlaku vodní páry součin relativní vlhkosti a tlaku nasycené vodní páry. Tím lze poukázat na vzájemnou souvislost dosud odvozených vztahů [2].

$$d_v = 2,1667 \cdot \frac{U_w}{273,15 + t} \cdot \alpha \cdot e^{\frac{\beta-t}{\lambda+t}} \left[\frac{g}{m^3} \right] \quad (1.20)$$

1.1.12 Směšovací poměr

Další používané vyjádření vlhkosti je směšovací poměr. Jedná se o podíl hmotnosti obsažené vody a absolutně suchého plynu. Veličina se značí r a je bezrozměrná [2].

$$r = \frac{m_{H_2O}}{m_{plyn}} \quad (1.21)$$

Protože e je částečný tlak vodní páry a P celkový barometrický tlak, je možné určit tlak suchého plynu jako rozdíl P a e . Alternativní rovnice (1.22) pro směšovací poměr vychází z látkového množství a stavové rovnice ideálního plynu.

$$M_{\text{vzduch}} = 29 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \quad (1.22)$$

$$r = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{vzduch}} \cdot n_{\text{vzduch}}} = \frac{18 \cdot \frac{e}{R_V \cdot T}}{29 \cdot \frac{P-e}{R_V \cdot T}} = 0,622 \cdot \frac{e}{P-e}$$

Podobně jako u absolutní vlhkosti je i směšovací poměr vyčíslitelný pomocí vlhkosti relativní. O této skutečnosti přesvědčuje vztah (1.23). Je nutné nezapomenout, že je veličina stále závislá na teplotě.

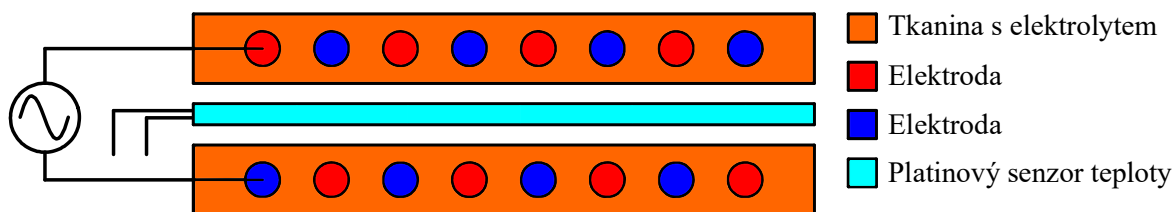
$$r = 0,622 \cdot \frac{\frac{U_W}{100\%} \cdot \alpha \cdot e^{\frac{\beta-t}{\lambda+t}}}{P - \frac{U_W}{100\%} \cdot \alpha \cdot e^{\frac{\beta-t}{\lambda+t}}} \quad (1.23)$$

1.2 Metody měření vlhkosti plynů

Výše uvedené fyzikální vztahy jsou užitečné pro vysvětlení metod měření plynu. Ke zjištění množství vodních par se používají zařízení fungující na různých principech. V následujícím textu bude představen absorpční elektrolytický senzor, psychrometr a zrcadlový senzor teploty rosného bodu. Takové přístroje se vyznačují velkými rozměry a složitější obsluhou ve srovnání s konkurenčními mikroelektronickými senzory.

1.2.1 Absorpční LiCl elektrolytický senzor

Dvojice rovnoběžných elektrod je navinuta ve tvaru připomínající pružinu. Obě jsou zabalené do tkaniny napuštěné chloridem lithným. Ve středu se nachází platinový senzor teploty a celý senzor je zapouzdřen v keramické trubce. Uspořádání je znázorněno na obrázku 1.1. [4]



Obrázek 1.1: Absorpční LiCl elektrolytický senzor

Elektrody jsou připojeny k elektrickému zdroji. Elektrolytem protéká střídavý proud a dochází k jeho zahřívání. Po dosažení teploty v_{LiCl} se začne odpařovat z elektrolytu voda. Roztok v tkanině se transformuje v sůl pevného skupenství. To má za následek pokles vodivosti a protékajícího proudu elektrodami. Zároveň je snížena i teplota. Do tohoto jevu zasahuje vodní pára měřeného plynu přicházející z okolního prostředí. Elektrolyt ji absorbuje a zvyšuje se vodivost roztoku společně s teplotou a procházejícím proudem elektrodami [4].

Elektrolytický senzor využívá termodynamického jevu rozdílných parciálních tlaků nasycených vodních par nad vodou a solným roztokem LiCl.

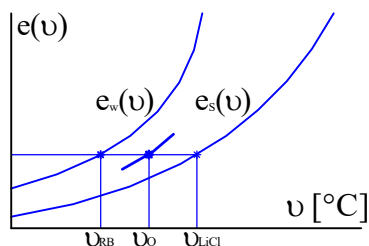
$$e_w \succ e_s \quad (1.24)$$

kde e_w parciální tlak nasycené vodní páry nad vodou

e_s parciální tlak nasycené vodní páry nad solným roztokem LiCl

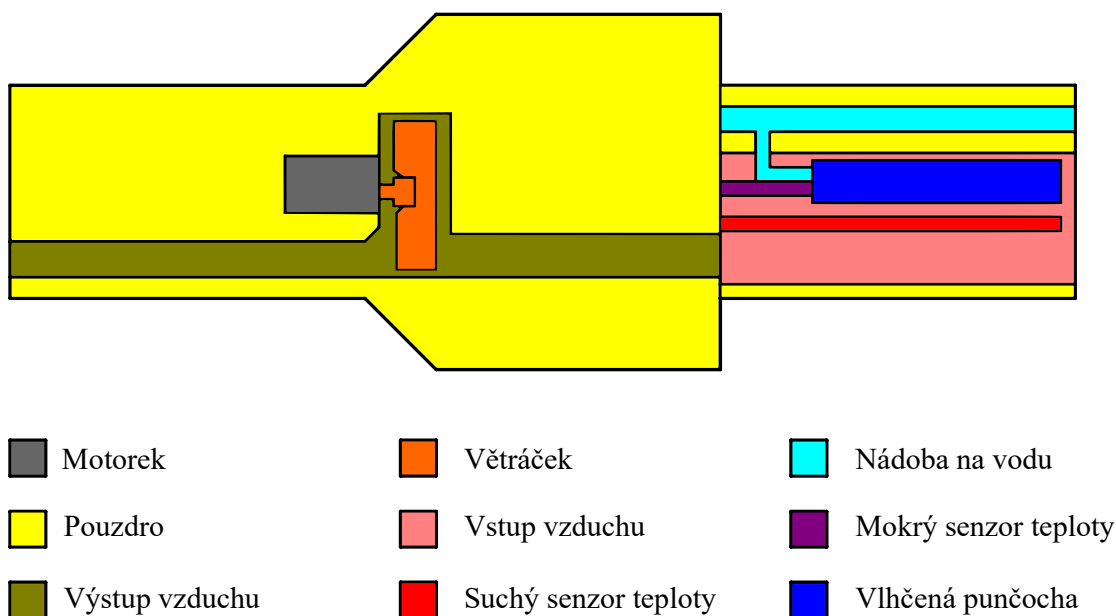
Díky této skutečnosti jsou vodní páry nad solným roztokem neustále nasycené a díky známé teplotě v_{LiCl} je jednoznačná i poloha bodu na Magnusově křivce. Tlak vodní páry měřeného plynu je ve vzájemné rovnováze s tlakem vodní páry nad roztokem soli. Pokud bude tento tlak vynesena na Magnusovu křivku pro nasycenou vodní páru nad vodou, je možné snadno odečíst teplotu rosného bodu v_{RB} . Pro získání relativní vlhkosti je navíc nutné změřit skutečnou teplotu okolí v_0 . V současné době se senzor přestává vyrábět, protože má problematickou obsluhu. Není možné ho vypínat a roztok napuštěný v tkanině se musí doplňovat [4].

Graf 1.2: Charakteristiky pro absorpční LiCl elektrolytický senzor



1.2.2 Psychrometr

V přední části se nachází vstup pro měřený plyn. Ten prochází tělem přístroje a je poháněn ventilátorem. Zadní částí se výstupním otvorem vrací zpět do okolí. V oblasti vstupu jsou umístěné 2 senzory teploty. Spodní je označován jako suchý a je v přímém kontaktu s nasávaným vzduchem. Horní se nazývá mokrý senzor. Je zabalený do punčochy, která je trvale vlhčena vodou přivedenou z vestavěné nádoby. Konstrukce psychrometru je znázorněna na obrázku 1.2 [4].



Obrázek 1.2: Psychrometr

Z punčochy na mokrém senzoru se odpařuje voda. Protože dochází k přeměně skupenství z kapalného na plynné je zapotřebí dodání skupenského tepla. To je odebráno z mokrého senzoru, což způsobí jeho ochlazení na teplotu v_m . Pokud je vysoká relativní vlhkost měřeného plynu, nemůže se z punčochy vypařovat velké množství vodních par. V opačném případě nebude vysoký parciální tlak vodních par ve vzduchu bránit vypařování z mokrého senzoru. Potom je spotřebováno větší množství tepla a roste rozdíl

teplot mezi suchým a mokrým senzorem. Tento rozdíl je klíčový pro odvození relativní vlhkosti a je označován jako psychrometrický. Parciální tlak vodní páry měřeného plynu při teplotě v je možné vypočítat pomocí rovnice (1.25) [4].

$$e(v) = e_w(v_m) - A \cdot P \cdot (v - v_m) \quad (1.25)$$

kde e_w parciální tlak nasycené vodní páry při teplotě v_m [Pa]

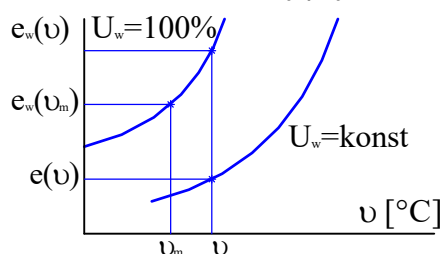
A psychrometrický součinitel

$v - v_m$ psychrometrický rozdíl [$^{\circ}\text{C}$]

P barometrický tlak [Pa]

Psychrometrický součinitel respektuje tlak s teplotou měřeného plynu a také je závislý na rychlosti jeho proudění skrz přístroj. Měření teploty může být prováděno klasickými rtuťovými teploměry. Relativní vlhkost je následně odečtena z psychrometrických tabulek na základě teplotního rozdílu. Alternativní snímání teploty je možné platinovými teploměry. Vyhodnocení je prováděno mikroprocesorem s využitím přesných tabulek, nebo méně přesných empirických vztahů. Průběhy veličin jsou znázorněny na grafu 1.3 [4].

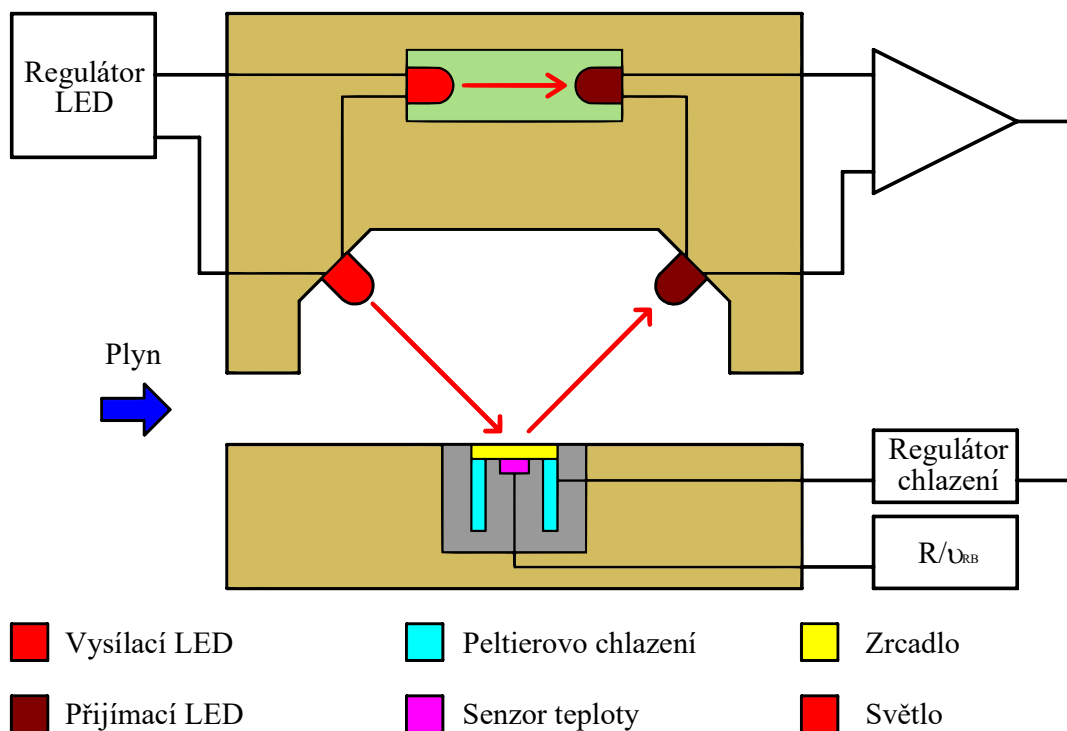
Graf 1.3: Charakteristiky psychrometru



1.2.3 Zrcadlový senzor teploty rosného bodu

Komorou prochází měřený plyn. Uvnitř je osazeno zlaté kulaté zrcadlo o průměru několik mm. Ze spodu je k němu přichycen malý odporový nebo polovodičový senzor teploty a Peltierův chladicí článek. Povrch zrcadla je z jedné strany vystaven komoře. Druhá strana je společně s teploměrem a chladicím článkem tepelně izolována od okolního prostředí. Peltierův článek chladí povrch zrcadla. Důsledkem je kondenzace vodních par na jeho povrchu. Na střed zrcadla je namířena vysílací LED dioda. Světlo odrazem dopadá na fotocitlivý prvek. Orosení snižuje množství světla dopadající na přijímací diodu a pomocí regulátoru je snížen chladicí efekt. Teplota povrchu zrcadla roste, odpařuje se voda a

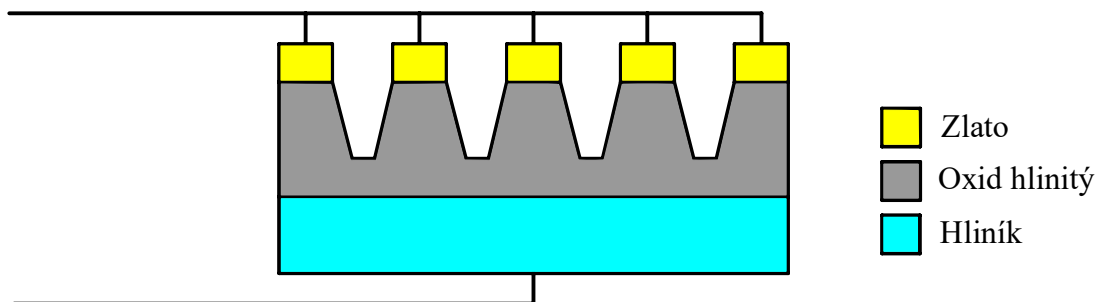
článek opět navyšuje svůj chladicí účinek. Je zde vytvořena regulační smyčka udržující konstantní teplotu rosného bodu. Na obrázku 1.3 je znázorněno principiální schéma tohoto měření. Přesnost je podmíněna čistotou zrcadla. Na vstupu se plyny filtrují, ale přesto je nutné v určitých intervalech povrch manuálně vyčistit [4]. Zlato se vyznačuje nejvyšší chemickou odolností ze všech prvků. Je odolné proti oxidaci a případné nečistoty se snadno odstraňují. Tím je potvrzeno vhodné využití v této aplikaci.



Obrázek 1.3: Zrcadlový senzor teploty rosného bodu

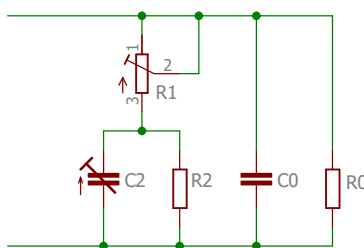
1.2.4 Odporový mikroelektronický senzor vlhkosti

Na hliníkové elektrodě je vytvořena několik μm tenká vrstva oxidu hlinitého. Díky své porézности je schopna absorbovat vodní páry a měnit svou impedanci. Druhá elektroda je velice tenká a zlatá. Nesmí bránit průchodu vlhkého plynu do vnitřní části senzoru. Uspořádání odporového mikroelektronického senzoru je znázorněno na obrázku 1.4 [4].



Obrázek 1.4: Odporový mikroelektronický senzor vlhkosti

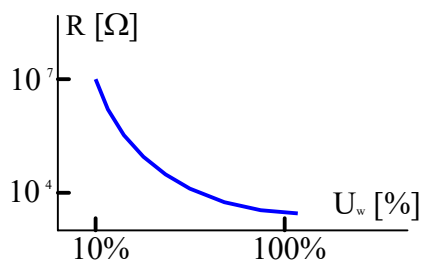
Náhradní elektrický obvod je na obrázku 1.5. Jedná se o obecné schéma pro všechny mikroelektronické senzory měnící svou impedanci. C_0 a R_0 reprezentuje svod mezi elektrodami. Pokud změna vlhkosti ovlivňuje primárně hodnotu R_1 , jedná se o odporový typ. V jiném případě se výrazněji mění kapacita C_2 . Potom se jedná o kapacitní typ. Výše uvedená odporová varianta má vysokou citlivost. Vykazuje dobrou funkci i když se teplota rosného bodu nachází pod $0\text{ }^\circ\text{C}$. R_1 je roven odporu mezi dnem pórů a zlatou elektrodou [4].



Obrázek 1.5: Náhradní schéma mikroelektronického senzoru vlhkosti

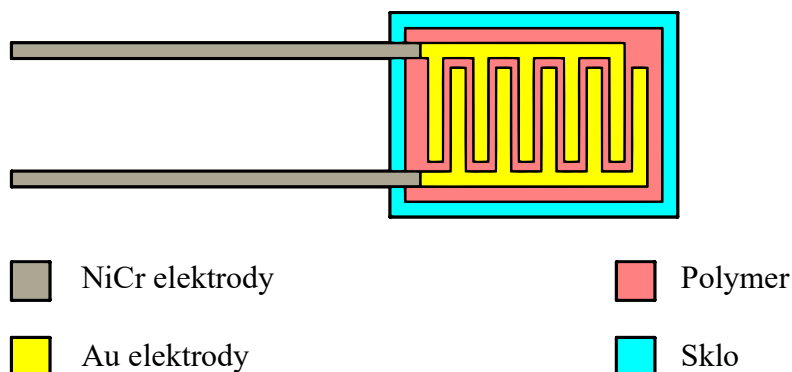
Jiným odporovým typem je senzor nazývaný bulk. Místo vrstvy oxidu hlinitého je mezi elektrody vložen polymer schopný absorbovat vodní páru v celém svém objemu. Závislost odporu takového materiálu na relativní vlhkosti je vyznačena na grafu 1.4 [4].

Graf 1.4: Charakteristika bulk odporového senzoru vlhkosti



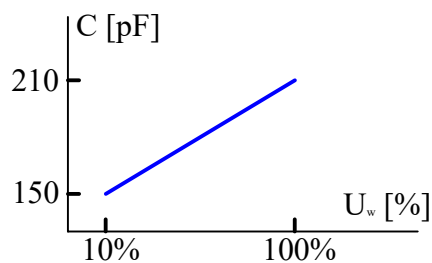
1.2.5 Kapacitní mikroelektronický senzor vlhkosti

Na skleněném substrátu jsou 2 žebříkovitě položené zlaté elektrody. Ty jsou zalité v polymeru, který plní funkci dielektrika kondenzátoru a zároveň je schopný absorbovat vodní páry. Součástka je připojena přes NiCr vývody. Plocha senzoru je menší než 1 cm^2 . Geometrické uspořádání vyjadřuje obrázek 1.6 [4].



Obrázek 1.6: Kapacitní mikroelektronický senzor vlhkosti

Permitivita dielektrika je ovlivněna množstvím vodních par. Výhodou tohoto senzoru je lineární závislost kapacity na relativní vlhkosti. V grafu 1.5 je vyjádřena převodní charakteristika.



Graf 1.5: Charakteristika kapacitního mikroelektronického senzoru vlhkosti

1.3 Metody měření vlhkosti pevných látek

V předchozím textu byly popsány metody měření vlhkosti plynů. Množství vody lze ale také stanovit uvnitř pevných látek. Tato část je zaměřena na představení některých metod měření.

1.3.1 Hmotnostní metoda

Základem je porovnání hmotnosti vlhkého a suchého vzorku pevné látky. Odebraný vzorek je zvážen a následně musí být zajištěno úplné odstranění vody. To lze zajistit uskladněním v absolutně suchém prostředí, nebo využít sušení za zvýšené teploty. Ohřev však nesmí vyvolat sublimaci pevných částic samotné měřené látky. Nakonec je znova stanovena hmotnost a výsledné množství vody je vyjádřeno některou vlhkostní veličinou. Vhodné je použití vztahu (1.21) pro výpočet směšovacího poměru. Do čitatele tohoto zlomku je dosazen rozdíl změřených hmotností a jmenovatel reprezentuje konečnou hmotnost vysušeného vzorku. Pro kvalitní výsledky je nutné vážení s vysokou přesností, nebo odebrání většího množství měřeného vzorku.

1.3.2 Dielektrická metoda

Deskový kondenzátor s plochou elektrod S a jejich vzájemnou vzdáleností d je naplněn odebraným vzorkem měřené látky. Výsledná kapacita je určena následujícím vztahem.

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} [F] \quad (1.25)$$

kde	ε_0	permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12} [F \cdot m^{-1}]$
	ε_r	relativní permitivita [-]
	S	plocha elektrod [m^2]
	d	vzdálenost elektrod [m]

Metoda vyžaduje techniku pro měření kapacity a elektrody s daným geometrickým uspořádáním. Parametrem je právě relativní permitivita, která je pro vodu rovna 80. Takové číslo je velmi vysoké ve srovnání s jinými látkami [10]. To vypovídá o vysoké polarizovatelnosti vody. Lze předpokládat, že kapacita vzorku znatelně poroste s vlhkostí.

1.3.3 Odporová metoda

Metoda je velmi podobná kapacitnímu měření. Využívá vztahu pro výpočet elektrického odporu. Parametrem je rezistivita, která vykazuje určitou závislost na množství vody obsaženém v materiálu.

$$R = \rho \cdot \frac{d}{S} [\Omega] \quad (1.26)$$

kde ρ rezistivita materiálu [$\Omega \cdot m$]

Po připojení stejnosměrného zdroje napětí lze zaznamenat po určité době měnící se hodnotu elektrického proudu. Ta souvisí s polarizačními ději, kterých se využívá v předchozí metodě. Pro správné měření je nutné vyčkat, až se procházející proud ustálí.

1.3.4 Mikrovlnná metoda

Toto měření využívá schopnosti mikrovln procházet nevodivými materiály. Molekuly vody obsažené uvnitř měřeného materiálu mají na tuto prostupnost jistý vliv. Záření je jimi absorbováno a odráženo.

Zjištění vlhkosti pomocí absorpce mikrovln vyžaduje vysílací sondu na jedné straně objektu a přijímací na druhé. Energie snímaná na druhé straně klesá s rostoucím množstvím vody.

Pro měření pomocí odrazu je potřeba pouze jedné sondy, která je vysílací i přijímací. Senzor měří množství vrácené energie, které narůstá s vlhkostí uvnitř materiálu [11].

2 Přehled dostupných senzorů vlhkosti

Přehled dostupných senzorů vlhkosti byl vytvořen na základě nabídky prodejce elektronických součástek Mouser Electronics [14]. Ve vyhledávacím filtru byly zvoleny snímače montované na desku plošných spojů. Obchod byl také zdrojem odkazů na katalogové listy a také sloužil ke srovnání ceny. Bylo nalezeno téměř 250 různých součástek v této kategorii a proto bylo nutné jejich přehled omezit.

2.1 Senzor Bosch BM280

Senzor od známého výrobce má 8 vývodů, které kromě napájecího napětí zahrnují komunikační rozhraní I2C a SPI. Katalogový uvádí, že měření je založeno na ověřených principech. Součástka je určena ke snímání vlhkosti, teploty a tlaku ve spotřební elektronice [12].



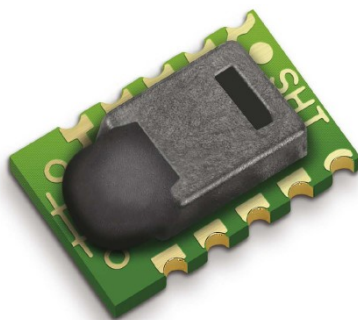
Obrázek 2.1: Senzor Bosch BM280

Tabulka 2.1: Parametry senzoru Bosch BM280

Velikost					
Rozměr		[mm]	Šířka	Délka	Výška
			2,50	2,50	0,93
Rozsah měření					
Veličina			Minimum	Maximum	
	Vlhkost	[%]	0	100	
	Teplota	[°C]	-40	85	
	Tlak	[hPa]	300	1100	
Elektrické parametry					
Veličina			Minimum	Maximum	
	Napájecí napětí	[V]	1,71	3,60	
	Odebraný proud	[μA]	0,10 (Režim sleep)	3,60 (Všechna měření)	
Přesnost					
Veličina			Teplota 25 °C	Teplota 0–65 °C	
	Vlhkost	[%]	±3,00		
	Teplota	[°C]	±0,50	±1,00	
	Tlak	[hPa]	±0,12	±1,00	
Životnost					
Změna přesnosti	Veličina	Vlhkost	[%/rok]	±0,5	
		Tlak	[hPa/rok]	±1,0	
Cena	Nákup 1 ks	[Kč]	185		
	Nákup 10 ks	[Kč]	167		

2.2 Senzory Sensirion řady SHT1x

Další snímače pochází od Švýcarského výrobce Sensirion. Dostupné portfolio zahrnuje 20 modelů s různými parametry a pouzdry. Nejlevnější lze koupit za 75 Kč a cena nejdražšího typu dosahuje 850 Kč [14]. S vedoucím práce byla domluvena realizace měřící metody založené na senzoru SHT11. Proto je představena právě řada, z které tento typ pochází.



Obrázek 2.2: Senzor vlhkosti Sensirion řady SHT1x [13]

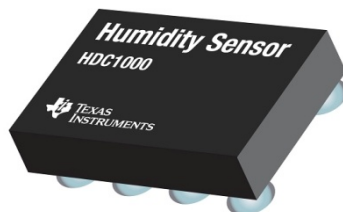
Kromě kapacitního měření vlhkosti lze dále využít snímání teploty založené na obvodu band-gap. Komunikace je postavena na dvou vodičovém sériovém rozhraní, které připomíná I2C. Skutečným I2C disponuje zbývající většina senzorů od tohoto výrobce. Tělo snímače je osazeno na malém plošném spoji, který celkové rozměry mírně navyšuje. Parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2: Parametry senzorů vlhkosti řady SHT1x [13]

Velikost					
Rozměr		Šířka	Délka	Výška	
	[mm]	5,0	7,5	2,5	
Rozsah měření					
Veličina			Minimum	Maximum	
	Vlhkost	[%]	0	100	
	Teplota	[°C]	-40	124	
Elektrické parametry					
Veličina			Minimum	Maximum	
	Napájecí napětí	[V]	2,4	5,5	
	Odebraný proud	[μW]	2–5 (Režim sleep)	3000 (Měření)	
Přesnost			SHT10	SHT11	SHT15
Veličina					
	Vlhkost	[%]	±4,5	±3,0	±2,0
	Teplota	[°C]	±0,5	±0,4	±0,3
Životnost					
Změna přesnosti		Veličina	Vlhkost	[%/rok]	±0,50
			Teplota	[°C /rok]	±0,04
Cena			SHT11	SHT15	
	Nákup 1 ks	[Kč]	544	840	
	Nákup 10 ks	[Kč]	470	726	

2.3 Senzory Texas Instruments

Velice uznávaný výrobce elektroniky Texas Instruments nabízí senzory pro současné měření relativní vlhkosti a teploty s komunikačním rozhraním I2C. Pro srovnání byly vybrány typy HDC1000 [15], HDC1008 [16], HDC1010 [17] a HDC1050 [18]. Pouzdro s 8 vývody je zobrazeno na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Senzor vlhkosti Texas Instruments HDC1000

První 3 zmíněné se vyznačují velmi malými rozměry a paradoxně lze senzor s nejlepšími parametry pořídit za nejnižší cenu. V porovnání s výše uvedenými výrobci lze zaznamenat nejvyšší přesnost měření teploty. Parametry získané z jednotlivých katalogových listů jsou uvedené v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Parametry senzorů vlhkosti HDC10xx

Rozměry			HDC1000	HDC1008	HDC1010	HDC1050
Šířka	[mm]			2,04		3,00
Délka	[mm]			1,59		3,00
Výška	[mm]			0,68		0,80
Elektrické parametry						
Napájecí napětí		[V]	3,0–5,0		2,7–5,5	
Odebraný proud	1 sps	[μ A]	1,2		1,3	
Přesnost						
			HDC1000	HDC1008	HDC1010	HDC1050
Vlhkost	[%]		$\pm 3,0$	$\pm 4,0$	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$
Teplota	[$^{\circ}$ C]		$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
Životnost						
Vlhkost	[%/rok]		$\pm 0,50$	$\pm 0,50$	$\pm 0,25$	$\pm 0,50$
Cena						
Nákup 1 ks		[Kč]	156	107	72	161
Nákup 10 ks		[Kč]	143	91	62	145

2.4 Senzor STMicroelectronics HTS221

Další snímač s poměrně malými rozměry je k dispozici od STMicroelectronics. Využívá kapacitního měření vlhkosti s dielektrikem ve formě polymeru. Naměřené hodnoty mohou být vyčteny podle volby přes rozhraní I2C nebo SPI. Pouzdro je zobrazeno na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Senzor STMicroelectronics HTS221

V katalogovém listu byly některé údaje specifikovány přesněji, než u jiných výrobců. Příkladem je přesnost a životnost, která odpovídá určitým intervalům měřené veličiny. Přesnost měření není ve srovnání s předchozími snímači nijak výjimečná, ale pořizovací cena je velmi přijatelná. Parametry jsou uvedené v tabulce 2.4 [19].

Tabulka 2.4: Parametry senzoru STMicroelectronics HTS221

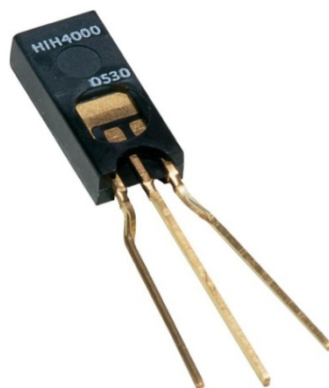
Velikost				
Rozměr	[mm]	Šířka	Délka	Výška
		2,0	2,0	0,9
Rozsah měření				
Veličina			Minimum	Maximum
	Vlhkost	[%]	0	100
	Teplota	[°C]	-40	120
Elektrické parametry				
Veličina			Minimum	Maximum
	Napájecí napětí	[V]	1,7	3,6
	Odebraný proud	[µA]	0,5 (Power down)	2,0 (Měření)
Přesnost				
Vlhkost	Rozsah	[%]	0–100	20–80
	Přesnost	[%]	±5,0	±3,5
Teplota	Rozsah	[°C]	0–60	15–40
	Přesnost	[°C]	±1,0	±0,5
Životnost				
Veličina	Vlhkost	Rozsah	[%]	20–80
		Změna přesnosti	[%/rok]	±0,50
	Teplota	Rozsah	[°C]	0–80
		Změna přesnosti	[°C /rok]	±0,05
Cena	Nákup 1 ks	[Kč]	85	
	Nákup 10 ks	[Kč]	68	

2.5 Senzory Honeywell

Největší zastoupení senzorů vlhkosti v sortimentu obchodu Mouser Electronics má výrobce Honeywell. Nabídka se skládá z téměř 100 analogových i digitálních typů.

2.5.1 Analogové senzory

Z pouzdra jsou obvykle vyvedené 3 vývody. Napájecím pinem teče do senzoru typický pracovní proud 200 μA . Výstupní pin má napětí přímo úměrné relativní vlhkosti. Pro možnost měření teploty je potřeba zvolit model s vývody navíc. Ty jsou uvnitř snímače připojené k termistoru s negativním teplotním koeficientem. Cena analogových snímačů je vzhledem k specifikovaným parametrům velmi vysoká. Na ukázkou je uveden typ střední cenové kategorie HIH4000 zobrazený na obrázku 2.5 [14].



Obrázek 2.5: Analogový senzor vlhkosti Honeywell HIH4000

V katalogovém listu nebyly nalezeny žádné informace o životnosti. Přesnost je $\pm 3,5\%$ za určitých ideálních podmínek, které by vyžadovaly hlubší studium. Ostatní zjištěné parametry jsou vyplněny v tabulce 2.5 [20].

Tabulka 2.5: Parametry senzoru Honeywell HIH4000

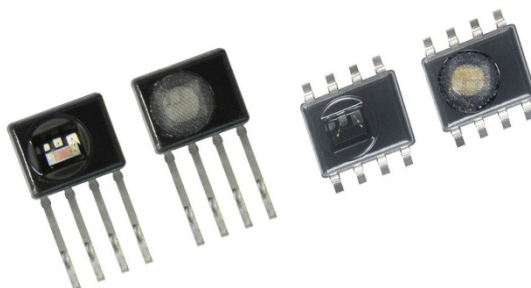
Velikost				
		Šířka	Délka	Výška
Rozměr (bez vývodů)	[mm]	4,17	2,03	8,59
Rozsah měření				
Veličina			Minimum	Maximum
	Vlhkost	[%]	0	100
Elektrické parametry				
Veličina			Minimum	Maximum
	Napájecí napětí	[V]	4,0	5,8
	Odebraný proud	[μA]	200	500
Cena	Nákup 1 ks	[Kč]	543	
	Nákup 10 ks	[Kč]	435	

2.5.2 Digitální senzory

Digitální typy senzorů Honeywell mají proti analogovým lepší parametry a také nižší pořizovací cenu. Pro ukázkou byla zvolena řada HIH8000 [21]. Senzory jsou dostupné v různých variantách z hlediska konstrukce a komunikačního rozhraní. Kromě vlhkosti je možné snímat také teplotu. Jednotlivé typy se označují kódem.

HIH81XY – ZZZ

kde X 2 - pouzdro SIP4, 3 - pouzdro SOIC8
 Y 0 - bez filtru na snímači, 1 - s filtrem na snímači
 Z 000 - rozhraní SPI, 021 - rozhraní I2C



Obrázek 2.6: Senzory vlhkosti Honeywell řady HIH8000

V katalogovém listu je uvedena poměrně dobrá životnost a přesnost. Další parametry včetně ceny se výrazně neliší od digitálních senzorů jiných výrobců. Přehled údajů je zaznamenán pro 6 vybraných typů v tabulce 2.6 [21].

Tabulka 2.6: Parametry senzorů Honeywell řady HIH8000

Typ	8120-021	8121-021	8130-021	8130-000	8131-021	8131-000	
Rozměry							
Šířka	[mm]	4,90		4,90			
Délka	[mm]	1,91		6,00			
Výška	[mm]	3,90		2,06			
Pouzdro		SIP4		SOIC8			
Elektrické parametry							
Napájecí napětí	[V]	2,3–5,5					
Odebíraný proud	Sleep	[μA]	0,6–1,0				
	Měření	[mA]	0,65–1	0,65–1	0,65–1	0,75–1	0,65–1
Komunikační rozhraní		I2C	I2C	I2C	SPI	I2C	SPI
Přesnost							
Vlhkost	[%]	±5,0					
Teplota	[°C]	±0,8					
Životnost							
Změna přesnosti	Vlhkost	[%/5 let]	±1,20				
	Teplota	[°C/rok]	±0,05				
Cena							
Nákup 1 ks	[Kč]	239	301	215	214	-	270
Nákup 10 ks	[Kč]	176	222	158	158	-	199

3 Hardwarový vývoj měřiče vlhkosti

Během vývoje technických prostředků byly všechny kroky podrobně zaznamenány. Navrhované zařízení je rozděleno na 2 části. Pro napájení a odečítání měřených hodnot byl navržen box s akumulátorem, mikroprocesorem a uživatelským rozhraním. Pro účely ladění a dalšího funkčního rozšíření bylo nutné propojení s počítačem. Uvnitř měřeného zdiva je předpokládáno umístění odpojitelné sondy osazené senzorem vlhkosti. Desky plošných spojů byly navrhovány v programu Eagle a mechanické uspořádání jednotlivých částí podpořil CAD software SolidWorks.

3.1 Napájecí napětí

Při volbě napájecího napětí přístroje bylo vycházeno z rozsahů výše uvedených senzorů. V tabulce 3.1 jsou rekapitulovány dovolené intervaly jednotlivých typů podle katalogových listů a jejich průnik. Výsledné zvolené napájecí napětí je 3,3 V. Tato hodnota je velmi používaná a shodou náhod se rovná průměru minimálního a maximálního napětí, které by vyhovovalo celé skupině senzorů.

Tabulka 3.1: Povolené napájecí napětí jednotlivých senzorů

Senzor	Minimální napětí	Maximální napětí
	[V]	[V]
Bosch BM280	1,71	3,60
Sensirion SHT1x	2,40	5,50
TI HDC1000, HDC1008	3,00	5,00
TI HDC1010, HDC1050	2,70	5,50
STM HTS221	1,70	3,60
Honeywell HIH8000	2,30	5,50
Průnik intervalů	3,00	3,60

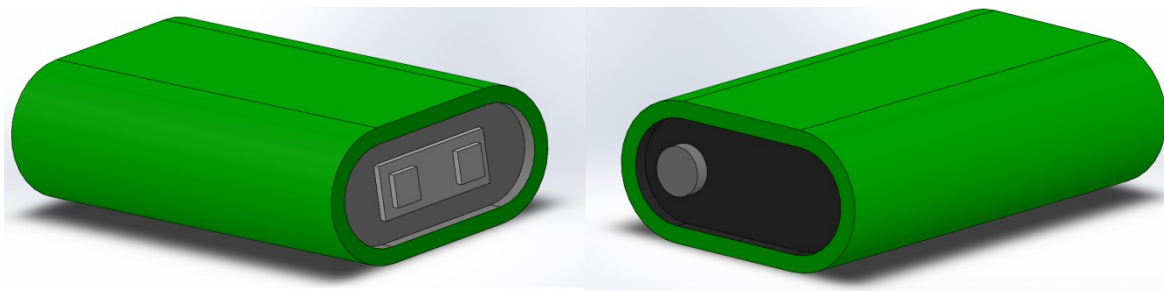
3.2 Mikroprocesor

Z důvodu předchozích zkušeností byla dána přednost mikroprocesoru od výrobce Atmel. Předpokladem pro vybírání typ byla přítomnost komunikačních rozhraní UART, SPI a I2C. Pro snadné připojení tlačítek a displeje byl kladen důraz na dostatečné množství vstupně výstupních pinů. Uvažovaným parametrem se stala také spotřeba. Proto došlo k omezení volby na modely řady picoPower. Nejvíce požadovaným parametřům vyhověl model Atmel ATmega644. Pro snadnou výměnu poškozeného procesoru bylo zvoleno pouzdro DIP40 s vývody THT. Vnitřní paměť 64 kB je dostatečná i pro rozsáhlejší

programový kód. Paměť SRAM má velikost 4 kB a měřené hodnoty mohou být ukládány do 2 kB úložiště EEPROM.

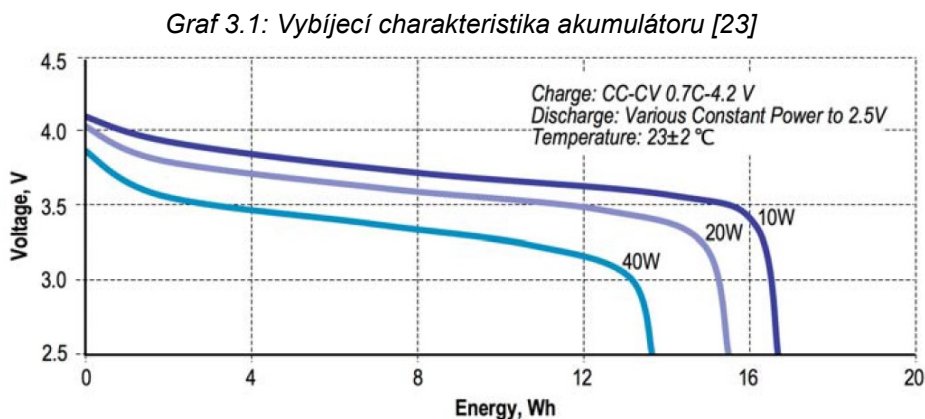
3.3 Akumulátor

Vedoucím práce byl doporučen akumulátor Boston Power Swing 4400. Tento nabíjitelný Lithium-ion článek má jmenovité napětí 3,7 V a jmenovitou kapacitu 4400 mAh [23]. 3D model vytvořený v programu SolidWorks je na obrázku 3.1.



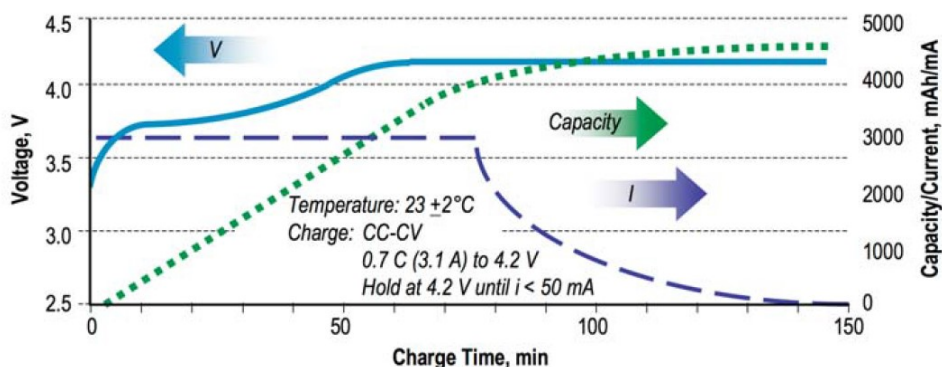
Obrázek 3.1: 3D model akumulátoru Boston Power Swing 4400

U navrhovaného přístroje je předpokládán tak malý příkon, že vybíjecí napětí bude při vyčerpání kapacity stále vyšší než 3,3 V. Zejména u plně nabitého akumulátoru je dokonce napětí vyšší, než je dovolené maximum pro některé senzory. Z tohoto důvodu bylo nutné navrhnout regulaci napájecího napětí.



Katalogový list uvádí možnost nabíjení omezeným proudem 0,7 CA na konečné napětí 4,2 V. Bylo uvažováno dodání energie USB nabíječkou. To způsobí znatelné prodloužení doby opětovného dosažení plné kapacity akumulátoru.

Graf 3.2: nabíjecí charakteristika akumulátoru [23]



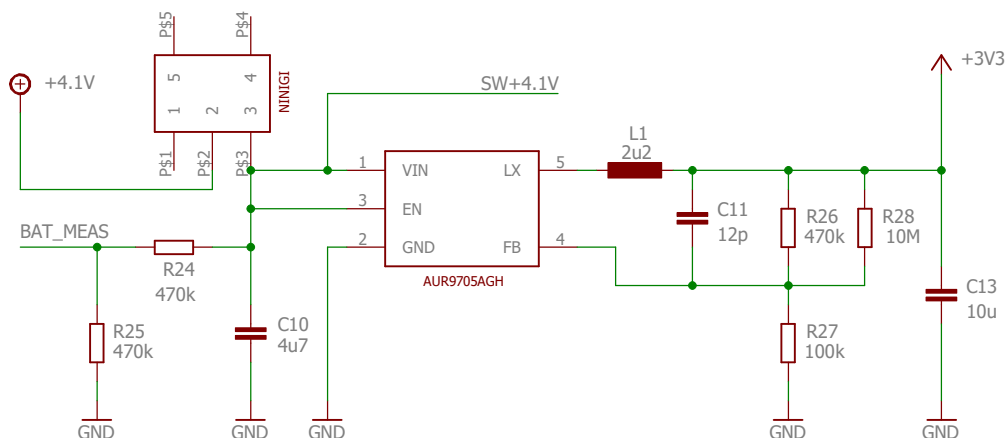
3.4 Regulace napětí

Byl hledán způsob stabilizace napájecího napětí na 3,3 V. Mezi nabízenými součástkami byl nalezen integrovaný obvod AUR9705AGH od výrobce Diodes Incorporated. Jedná se o DC/DC měnič topologie buck. Díky pracovní frekvenci 1,5 MHz vyžaduje pro svou činnost malé hodnoty externí indukčnosti a kapacity. Při pracovním cyklu 100 % je automaticky přepínán z pulzní šířkové modulace do režimu LDO. Maximální zatěžovací proud je 1 A. Výstupní napětí lze nastavit pomocí zpětnovazebního odporového děliče. Regulátor udržuje na vstupu FB konstantní hodnotu 600 mV. Katalogový list stanovuje doporučené hodnoty součástek pro různé hladiny napětí. Lze také použít vztah (3.1) [24].

$$U_{OUT} = U_{FB} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 0,6 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) [V] \quad (3.1)$$

kde R_1 paralelní kombinace rezistorů R_{26} a R_{28} na obrázku 3.2 [Ω]

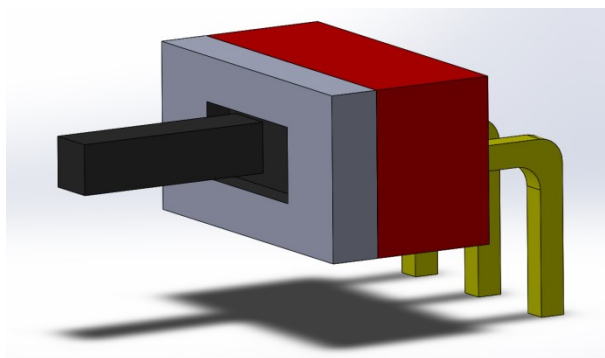
R_2 rezistor R_{27} na obrázku 3.2 [Ω]



Obrázek 3.2: Napěťová regulace zařízení

Obvod byl doplněn dalším odporovým děličem na straně akumulátoru. Je určen pro měření úrovně nabití pomocí A/D převodníku mikroprocesoru. Referenční napětí je rovno 2,56 V a proto je nutné hodnotu tímto způsobem přizpůsobit. Předpokládané maximum 4,2 V se bude na analogovém vstupu projevovat jako 2,1 V.

Úplné vypnutí přístroje bylo realizováno posuvným přepínačem. Byl zvolen typ 5MS1S102AM6QE od výrobce NINIGI. Protože se jedná o součástku rozhraní, byl vytvořen další 3D model v programu SolidWorks pro podporu mechanického návrhu.

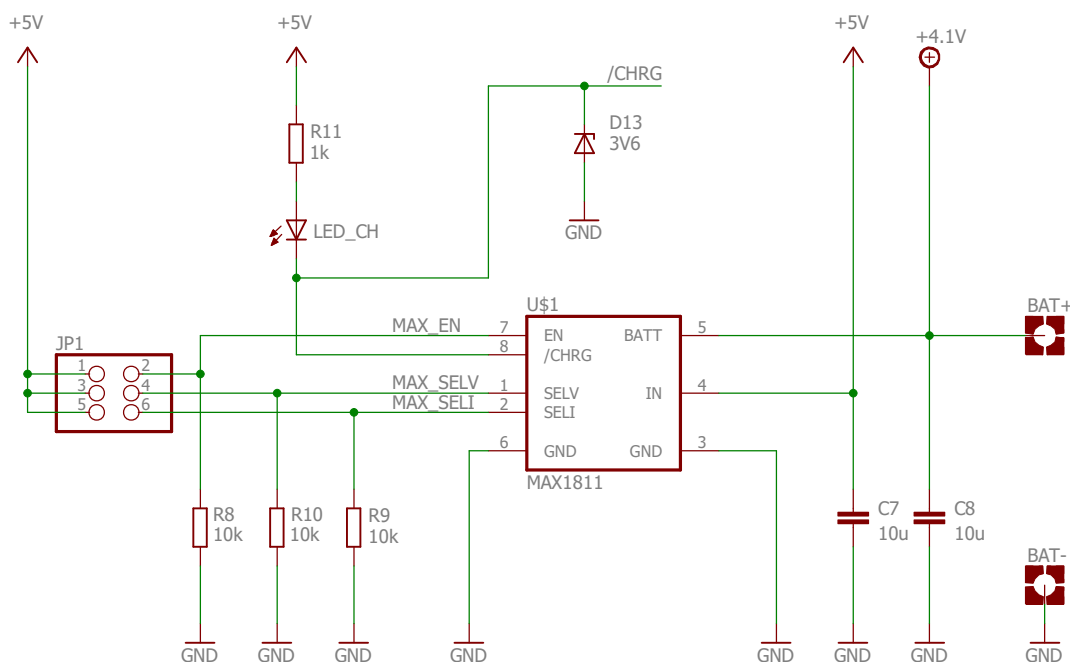


Obrázek 3.3: 3D model posuvného přepínače NINIGI

Během hledání na internetu se nepodařilo získat knihovny DC/DC měniče a přepínače do programu Eagle. Důsledkem byla nutnost studia tvorby vlastních knihoven. Obě součástky byly překresleny podle jejich katalogových listů a došlo ke spárování vývodů s vytvořenými symboly.

3.5 Nabíjení akumulátoru

Nabíjení akumulátoru bylo zajištěno integrovaným obvodem MAX1811. Součástka je zaměřena na nabíjení Lithium-ion článků z USB portu počítače. Pomocí vstupu SELV lze volit konečné nabíjecí napětí 4,1 V a 4,2 V. Nabíjecí proud je možné nastavit vstupem SELI na hodnoty 100 mA nebo 500 mA. Během nabíjení se obvod chová jako zdroj konstantního proudu. Dochází k nárůstu napětí na akumulátoru a při dosažení konečného nabíjecího napětí dojde k přepnutí na napěťovou regulaci. Výstup CHRG slouží k indikaci stavu nabíjení. Užitečnou vlastností je schopnost zacházet s hluboce vybitými články. V případě nižšího napětí než 2,5 V je zahájeno nabíjení proudem omezeným na 43 mA. Teprve po dosažení 2,5 V vzrůstá nabíjecí proud na hodnotou zvolenou vstupem SELI. Navržený nabíjecí obvod vychází z doporučení v katalogovém listu [26]. Schéma zapojení tohoto funkčního bloku je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Nabíjecí obvod akumulátoru

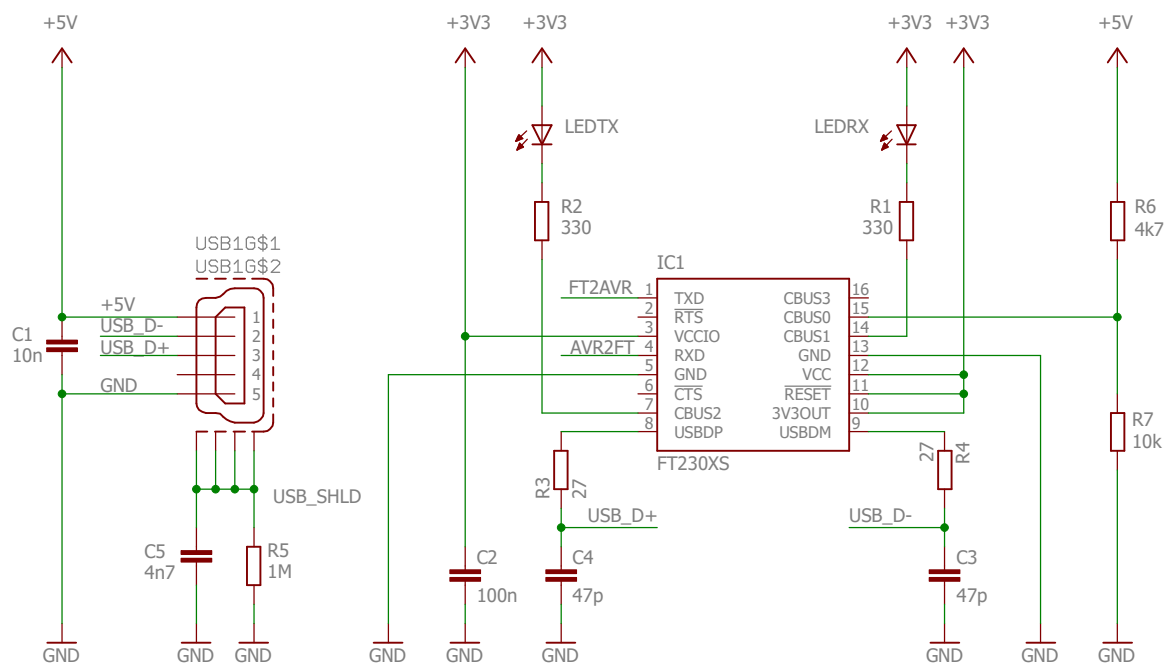
Pinheader JP1 slouží k nastavení parametrů nabíjení. Je předpokládáno povolení nabíječky, konečné nabíjecí napětí 4,2 V a nabíjecí proud 500 mA. Pro správnou funkci musí být zajištěno, že USB host skutečně umožňuje tento proud dodat. Taková konfigurace vyžaduje všechny 3 vstupy připojené na log. 1. Výstup pro indikaci stavu nabíjení CHRG byl zaveden do mikroprocesoru a zároveň spíná červenou LED diodu. Vstupní napětí +5V bylo přivedeno z USB konektoru. Zenerova dioda chrání vstupní port mikroprocesoru před napětím 5 V. Takové ošetření je možné jen díky tomu, že CHRG je open-drain výstup, který má ve stavu log. 1 vysokou impedanci [26].

3.6 Komunikace s počítačem

Nejrozšířenějším rozhraním pro připojení počítačových periferií je v současné době USB. Navrhované zařízení bylo opatřeno obvodem FT230x od výrobce FTDI. Jedná se o převodník mezi sériovými komunikacemi USB a UART. Proto lze tuto součástku použít jako přímý prostředek pro přenos dat mezi PC a mikroprocesorem. Katalogový list specifikuje 3 typická zapojení v závislosti na způsobu napájení. První varianta je aplikace napájená z USB. Zařízení využívá USB jako zdroj energie. Druhá varianta rozšiřuje první o tranzistor, který provádí spínání napájení v závislosti na stavu USB řadiče. Poslední možnost je aplikace s vlastním napájením. V návrhu byla zvolena tato alternativa, přestože bude přístroj odebírat energii z USB portu. Ve vnitřní paměti převodníku existuje položka

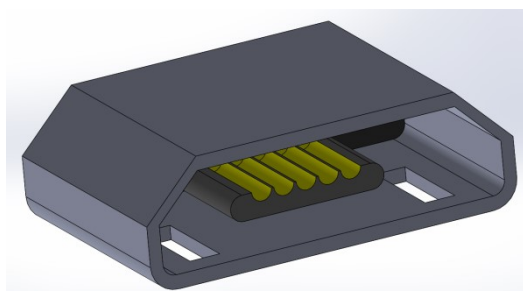
popisující napájení. Ta by měla být nastavena na nulový odběr v zapojení s vlastním zdrojem [27]. Z důvodu zachování možnosti nabíjení bylo toto doporučení ignorováno.

Zásah do konfigurační paměti byl však nevyhnutelný. Aby bylo možné detekovat připojení k USB portu, musí být některý vývod CBUS naprogramován na měření napětí sběrnice. 5V je odporovým děličem sníženo na hodnotu blíží se k 3,3 V a přivedeno do vstupu CBUS0. Vývod 3V3OUT je výstup vnitřního LDO regulátoru. Pokud je napětí VCC rovno 3,3 V, je nutné propojit VCC a 3V3OUT [27]. Důvodem je pravděpodobně nemožný nulový rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím LDO regulátoru.



Obrázek 3.5: USB komunikace

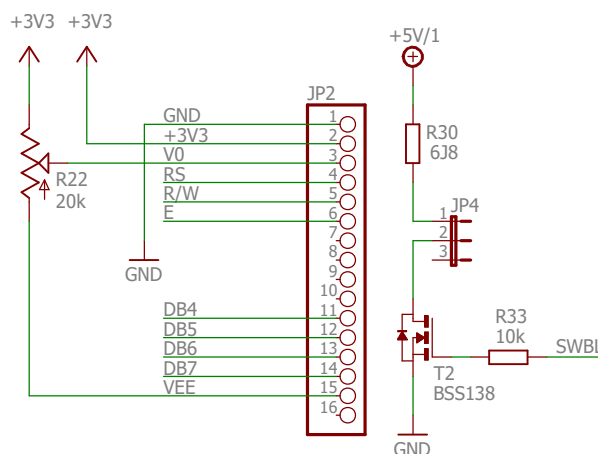
Komunikace je indikována pro každý směr zvlášť LED diodami. Pro připojení počítače nebo nabíječky byl zvolen konektor typu USB B micro. V jeho katalogovém listu [28] byly nalezeny rozměry. Díky tomu mohl být vytvořen další 3D model.



Obrázek 3.6: Konektor USB B micro

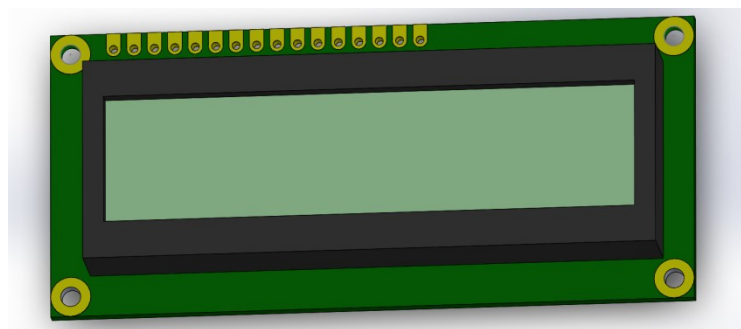
3.7 Displej

Při výběru displeje byl kladen důraz na jednoduchost oživení a dobrou čitelnost i za špatných světelných podmínek. Optimálním parametrem se nejvíce přiblížil podsvícený alfanumerický displej s rozlišením 16x2 znaků a standardním řadičem ST7066. Zvolený model RC 1602B YHY CSVD od výrobce Raystar je vybaven LED světlem žlutozelené barvy. Přestože udávané napájecí napětí je 3,3 V, byly v katalogovém listu zjištěny některé nečekané skutečnosti. Tato hodnota je platná pouze pro logiku komunikačního rozhraní. Typické napájecí napětí pro samotné LCD odpovídá 3,7 V a je připojeno mezi vývody VDD a V0. Dalším studiem byla zjištěna přítomnost generátoru záporného napětí, jehož výstup je označen VEE. Mezi uvedené vývody byl podle doporučení připojen odporový trimr sloužící k nastavení napájení LCD potažmo kontrastu [29].



Obrázek 3.7: Schéma zapojení displeje

Velký problém byl způsoben podsvícením displeje. Minimální napětí udávané katalogovým listem je 4 V. To navíc nezahrnuje úbytek na odporu zapojeném v sérii s LED. Bylo zahájeno hledání jiného typu zobrazovače, ale nebyla nalezena žádná možnost snadno programovatelného displeje za přijatelnou cenu s nízkým napětím pro LCD i LED. Proto bylo rozhodnuto, že podsvícení vyžaduje pomocné napájecí napětí 5V. Dále musela být vyřešena možnost vypínání LED pomocí mikroprocesoru. To bylo zajištěno MOSFET tranzistorem BSS138 s kanálem N. Jeho maximální drainový proud je 360 mA. Výhodou je nízké prahové napětí 1,2 V umožňující ovládání hradla logickými úrovněmi. Typický odpor otevřeného kanálu je 1,6 Ω [31]. Funkce spínání byla ověřena pomocí simulace v programu SPICE, která byla dále využita pro výpočet předřadného odporu podsvícení. LCD displej je významnou součástí mechanické konstrukce. Proto bylo užitečné podle katalogového listu vytvořit 3D model.



Obrázek 3.8: 3D model LCD displeje

3.8 Napájecí napětí 5V

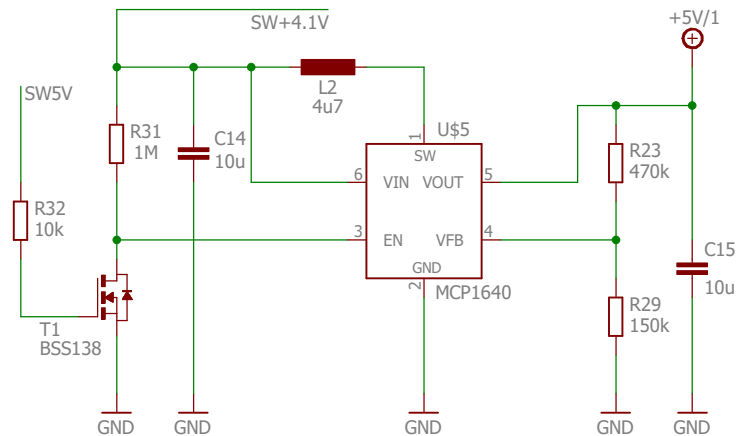
V předchozí části byla zdůvodněna potřeba napájecího napětí 5 V. V nabídce obchodu TME byl nalezen integrovaný DC/DC měnič topologie boost od výrobce Microchip. Součástka je určena pro bateriově napájené aplikace. Pracovní frekvence se pohybuje okolo 500 kHz. Zapojení bylo sestaveno podle doporučeného schématu v katalogovém listu. Výstupní napětí je možné nastavit odporovým děličem ve zpětné vazbě. Regulátor udržuje na vstupu VFB konstantní hodnotu 1,21 V. Volba rezistorů je vyjádřena vztahem 3.2 [30].

$$R_{23} = R_{29} \cdot \left(\frac{U_{OUT}}{U_{FB}} - 1 \right) [\Omega] \quad (3.2)$$

kde U_{OUT} výstupní napětí 5 V

U_{FB} zpětnovazební napětí 1,21 V

Z obrázku 3.9 je patrné, že vstupní napětí je přivedeno z akumulátoru. Tranzistor T1 zajišťuje vypínání připnutím EN vstupu na zem. Původně bylo zamýšleno ovládání přímo portem mikroprocesoru. To je však nemožné z důvodu malého tolerančního pásma vysoké logické úrovně měniče. Pro zapnutí je nutné na vstup *EN* přivést alespoň 90 % napětí V_{IN} [30], což je více než 3,3 V. V celkovém návrhu bylo nutné rozdělit 5 V síť. První část je přivedena z USB konektoru a slouží jako zdroj pro nabíječku. Druhá část vyhází z výstupu step-up měniče a napájí podsvícení LCD displeje.



Obrázek 3.9: Step-up měnič 5V

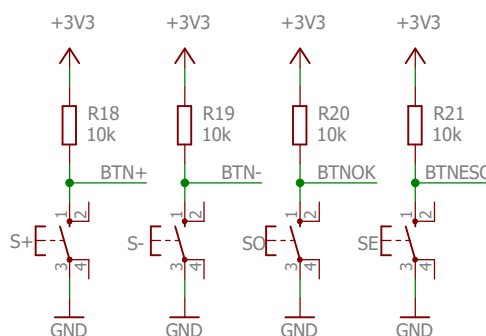
3.9 Tlačítka

Ovládání přístroje bylo založeno na čtveřici tlačítek. Zvolená řada spínacího prvku je B3F od výrobce Omron [32]. V katalogovém listu byly získány rozměry. Rozteč vývodů a výška hmatníku byly základem pro tvorbu 3D modelu.

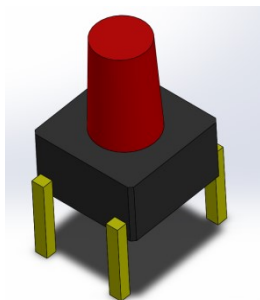
Tabulka 3.2: Funkce tlačítek

Tlačítko	Funkce
+	Následující položka menu, zvýšení hodnoty
-	Předcházející položka menu, snížení hodnoty
OK	Menu, potvrzení
ESC	Návrat, rozsvícení displeje

V nestisknutém stavu je do vstupu mikroprocesoru přivedeno napětí 3,3 V přes pull-up rezistor. Sepnutý stav odpovídá nízké logické úrovni, protože je vstup přes kontakt připnut k zemi.



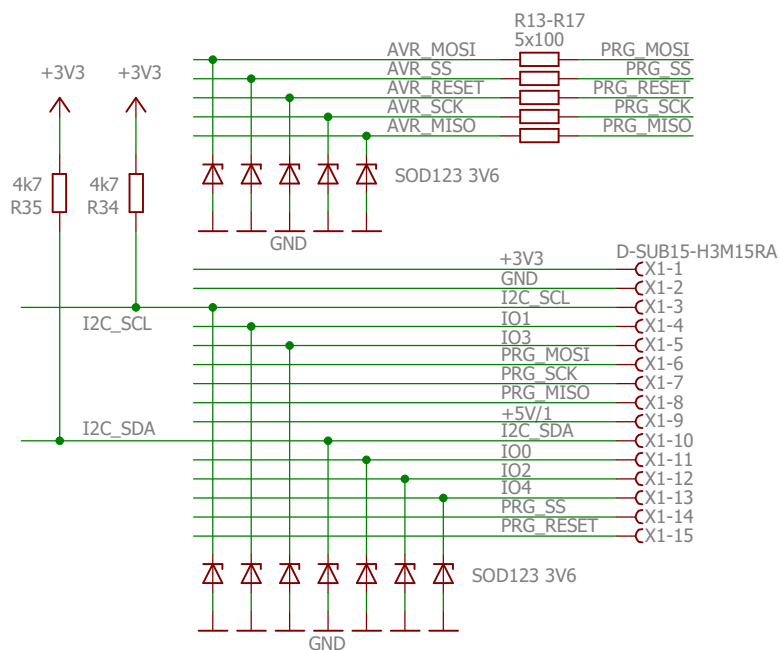
Obrázek 3.10: Obvod mikrosplínačů



Obrázek 3.11: 3D model tlačítka

3.10 Připojení senzoru

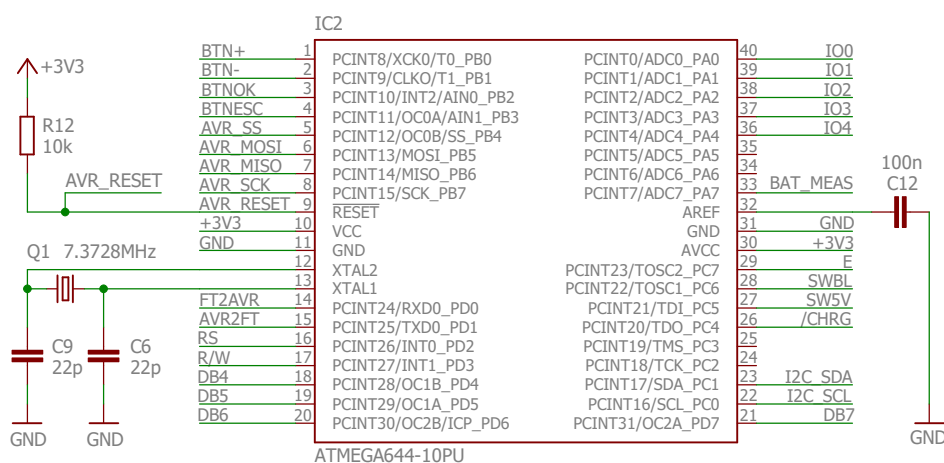
V této fázi byl zpočátku volen vhodný konektor pro připojení senzoru. Během toho proběhla úvaha o možnosti postupného přidávání podpory jednotlivých čidel. Bylo ověřeno, že existují součástky s rozhraním I2C a SPI. Další předávají měřenou hodnotu jiným způsobem. Byl kladen důraz na možnost připojit cokoliv jediným konektorem. Rozhraní SPI je navíc typické pro programování paměti mikroprocesorů Atmel. Robustnost a dostatečné množství pinů splnil konektor D-Sub15. Byla vyvedena obě napájecí napětí vytvořená stejnosměrnými měniči. Linky I2C jsou pull-up rezistory připojeny k 3,3 V. Je uvažováno, že zařízení bude na sběrnici vždy v roli mastera. SPI je oddělené od vnějšku zařízení odpory 100 Ω . Zbývající piny konektoru byly zaplněny vstupně-výstupními porty. Každý vývod je chráněn zenerovo diodou proti přepětí. Podle katalogového listu je maximální napětí na portech rovno napájecímu napětí zvýšenému o 0,5 V [22].



Obrázek 3.12: Periferní připojení

3.11 Řízení mikroprocesorem

Vstupy, výstupy, ovládání, indikace a komunikace byla přivedena do mikroprocesoru. Jako zdroj hodinového signálu byl použit krystal s frekvencí 7,3728 MHz. Tato hodnota je z předchozích zkušeností ideální pro přesný baud rate generátor rozhraní UART. To výrazně snižuje chybovost přenosů dat s počítačem. UART, SPI a I2C má rezervované vývody s hardwarovou realizací komunikace. Dodržení zapojení usnadňuje programování, protože není nutné stavy každého přenosového vodiče specifikovat softwarově. Řízení přenosu je potom postaveno na pouhé operaci se stavovými nebo datovými registry a obsluze přerušení. Zmíněná pětice vstupně-výstupních vývodů konektoru pro senzor byla přivedena na PORT A. Výhodou je, že kterýkoliv jeho pin lze přepnout do režimu analogového vstupu [22]. To umožňuje přístroji v měřit napětí. Této funkce je také využito pro zjištění stavu nabití akumulátoru. Ostatní vývody jsou použity pro ovládání displeje, čtení stavu tlačítek a spínání napětí 5 V step-up měniče nebo podsvícení. Využití vývodů mikroprocesoru je zřejmé z obrázku 3.13.



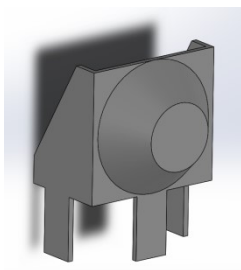
Obrázek 3.13: Řízení mikroprocesorem

3.12 Objednávka součástek

Po dokončení každého elektronického funkčního bloku byl sestaven seznam použitých součástek. Vložení každé komponenty provázal výběr pouzdra a hledání na internetových obchodech. V některých případech dokonce došlo nejprve k vyhledání součástky v katalogu prodejce, ověření parametrů pomocí katalogovém listu a nakonec aplikace v zapojení. Navíc bylo přihlíženo k dostupnosti, ceně a minimálnímu objednatelnému množství. Kompletní seznam součástek je uveden v příloze B.

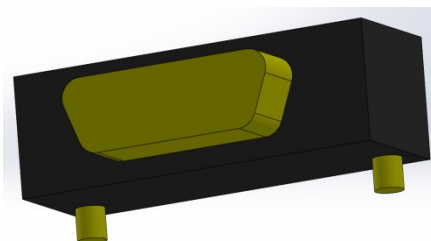
3.13 Mechanická konstrukce

Mezi objednanými součástkami jsou uvedené některé významné položky, které nebyly dosud vyjádřeny 3D modelem a přesto jsou důležité pro mechanickou konstrukci. Proto bylo nezbytné jejich doplnění. Připojení akumulátoru je zajištěno pružinovými kontakty. Katalogový list [33] neudává přesný rozměr pružiny. Z výkresu byla odhadnuta přibližná délka a v modelu byla použita polovina této hodnoty, aby bylo zajištěno simulování určitého stlačení.



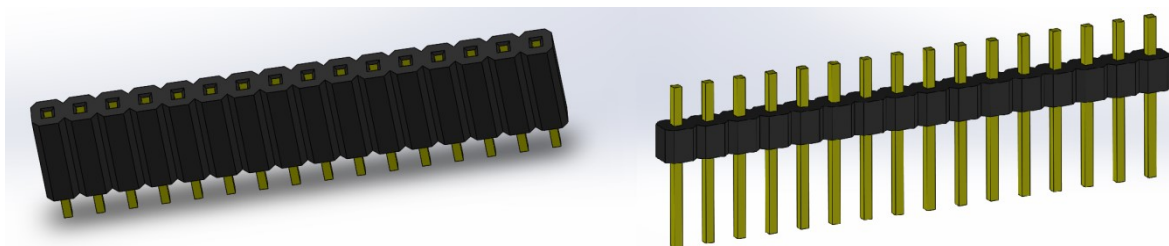
Obrázek 3.14: Kontakt akumulátoru

Významným prvkem je konektor D-SUB 15 pro připojení senzoru a programátoru. Z dostupných rozměrů [34] byla respektována pouze výška, plocha na plošném spoji a poloha montážních trnů. Na jednotlivé piny nebyl brán zřetel, protože jejich modelování by nepřineslo vzhledem k náročnosti žádnou užitnou hodnotu.



Obrázek 3.15: Konektor D-SUB 15

Propojení displeje a plošného spoje bylo zajištěno pomocí pinheaderů s roztečí 2,54 mm. Další rozměry byly získány měřením. Byla vytvořena 16 pinová varianta kolíků a dutinek.



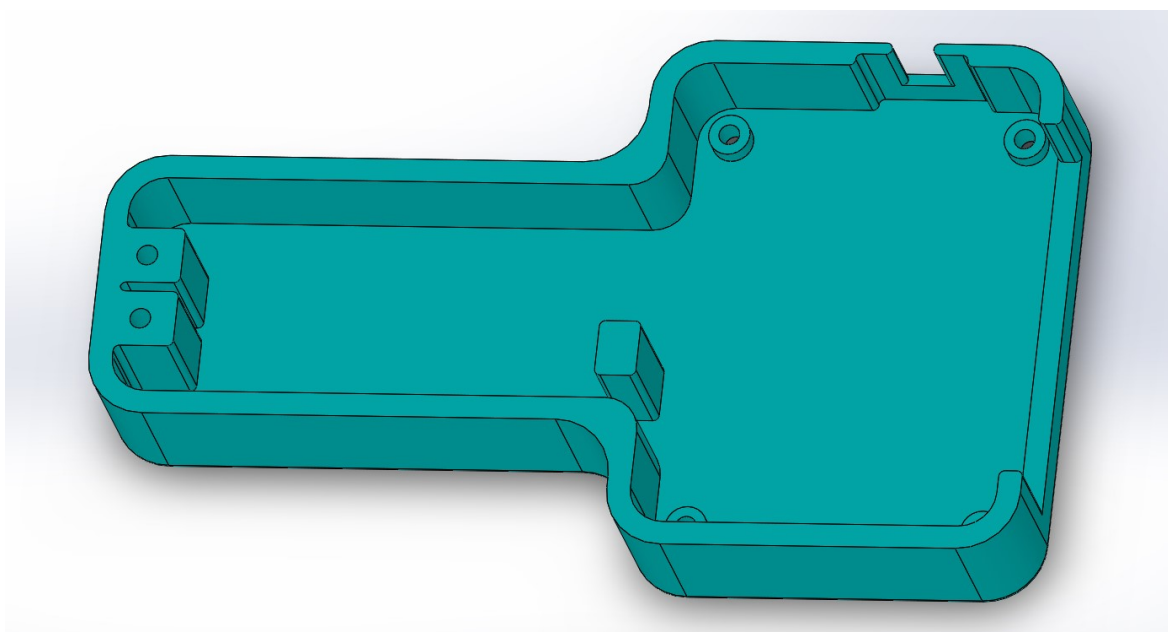
Obrázek 3.16: Pinheader 16 samec a samice

Zbývající prvek je LED dioda. Její průměr je 3 mm a rozteč vývodů 2,54 mm. Stejný model byl použit pro červenou, žlutou i zelenou barvu protože rozměry jsou stejné a není nutné je v mechanickém návrhu rozlišovat.



Obrázek 3.17: LED dioda

Následujícím úkolem bylo sestavení výše uvedených modelů do pouzdra. Přestože je možné koupit různé krabičky byla zvolena technologie 3D tisku. Nejprve byl navržen spodní díl, na který jsou všechny prvky navázány.



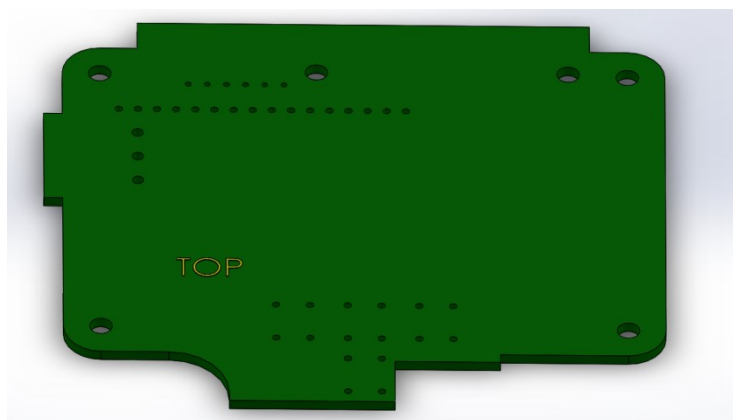
Obrázek 3.18: Spodní část krabičky

Základní tvar respektuje pohodlí při držení přístroje v ruce a zároveň efektivní využití vnitřního prostoru. V úzké části je nezbytné množství místa pro akumulátor. Široká část byla navržena tak, aby se do ní s určitou rezervou vešel LCD displej, ovládací prvky a konektory. Výška základní plochy je 5 mm a tloušťka stěn odpovídá 4 mm. Téměř všechny hrany byly zaobleny z estetických a technologických důvodů. Použitá 3D tiskárna má potíže s nanášením materiálu v ostrých hranách.

Na začátku bylo uvažováno umístění akumulátoru na plošný spoj. Výhodou je snadné osazení pružinových kontaktů. Důsledkem je zbytečný nárůst výšky celého přístroje a tak došlo k odvrácení od této možnosti. Místo toho byly přidány výstupky, do kterých je možné kontakty jednoduše vmáchnout. Výška pružin navíc odpovídá poloze kladného i záporného vývodu.

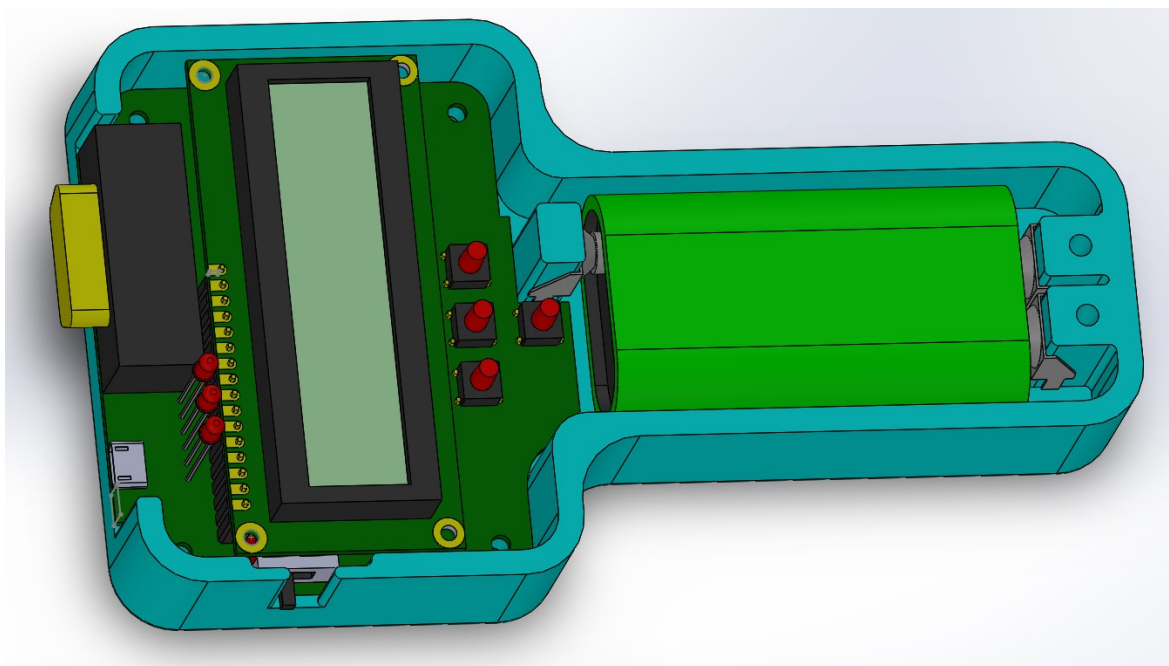
V širší oblasti byly vytvořeny 3 mm vysoké plošky s otvory. Na ně bylo plánováno položení desky plošných spojů. Zároveň slouží k celkovému smontování přístroje a umožňuje osazení součástek na spodní straně DPS. Z obrázku 3.18 nejsou patrná zahloubení pro hlavy šroubů ve spodní straně krabičky. Z boku byly vytvořeny výřezy pro přepínač a konektory.

Oboustranná deska plošného spoje má tloušťku 1,5 mm. Tvar vychází z úplného využití zbývajících vnitřního prostoru. V oblasti konektorů deska dosahuje vnějšího okraje krabičky, aby nebylo USB příliš zapuštěné. Rohy jsou opatřeny montážními otvory. Další dvojice rozměrných otvorů slouží pro trny konektoru D-SUB 15. Zbývajících otvory menších rozměrů odpovídají umístění jednotlivých součástek, které jsou v kontaktu s vnějším prostředím přístroje.



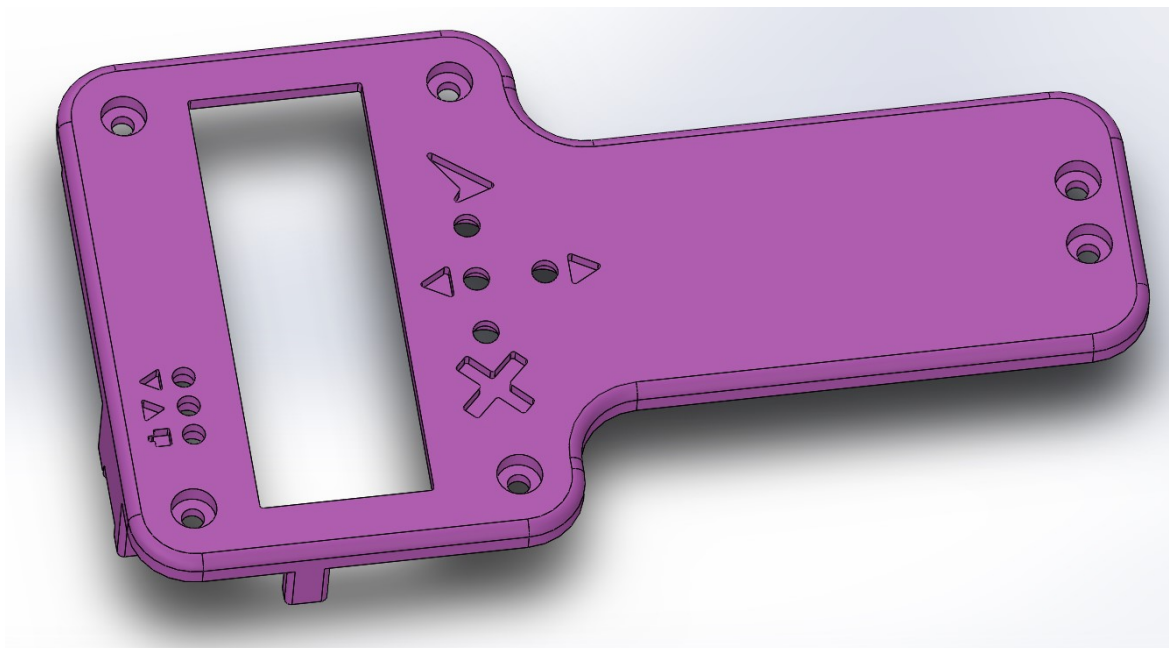
Obrázek 3.19: Deska plošných spojů

V programu SolidWorks byla vytvořena nová sestava. Základem se stal spodní díl krabičky. Na výstupky byly navázány pružinové kontakty a mezi ně vložen samotný akumulátor. Do široké části byla umístěna deska plošných spojů. V prostoru konektorů byl osazen D-SUB 15 a USB. Dále byly položeny pinheadery obou typů a na ně displej. Nakonec byly umístěny tlačítka, LED diody a vypínač. Polohy otvorů na DPS byly mírně upraveny, aby rozmístění působilo esteticky dobře.



Obrázek 3.20: Sestava dílů, 1. fáze

Podle vytvořeného rozmístění dílů byl navržen horní kryt přístroje. Výstupky zakrývají výřezy v oblasti konektorů a vypínače. Byly vytvořeny otvory pro smontování přístroje se zhloubením. Dále došlo k vytvoření okna pro displej. Jeho rozměry jsou mírně zvýšené aby byl zajištěn průchod rámečku zobrazovače tímto otvorem. Díry pro LED diody byly umístěny nad displejem a opatřeny symboly pro nabíjení a komunikaci.



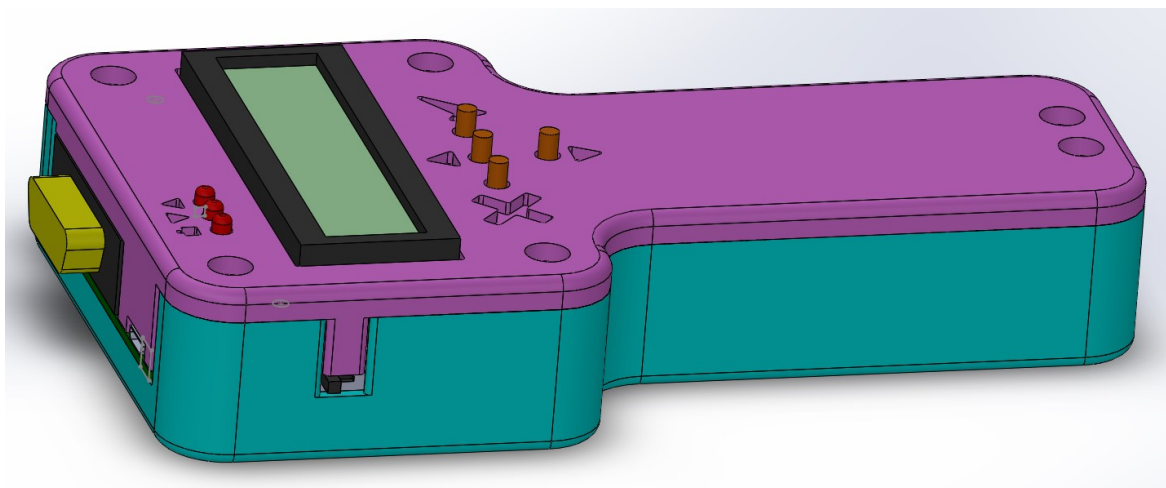
Obrázek 3.21: Horní kryt přístroje

Nakonec byly vytvořeny průchody pro tlačítka. Problém nastal v nedostatečné délce hmatníků a tak je bylo nutné prodloužit. Vhodné řešení spočívalo ve vytvoření nástavce jako 3D dílu.



Obrázek 3.22: Nástavec hmatníku tlačítka

Sbírka všech modelů byla dostačující k vytvoření konečné sestavy. Hmatníky byly položeny na tlačítka a horní kryt svázan se spodním. Soubory byly exportovány do formátu .stl a vše potřebné bylo vytisknuto PLA materiálem ve žluté barvě.



Obrázek 3.23: Sestava dílů, 2. fáze

3.14 Návrh desky plošných spojů

Na základě výše uvedeného návrhu elektronických funkčních bloků bylo sestaveno kompletní schéma zapojení znázorněné v příloze C. Pro přehlednost byly jednotlivé části ohraničeny a popsány. Během kontroly byly zjištěny a opraveny některé chyby. Pouzdro konektoru D-SUB 15 odpovídalo samci. Osazením samice by došlo k převrácení pořadí pinů. Osazení samce by zvýšilo riziko nechtěného zkratu. Byl zvolen správný konektor. Naprosto stejný problém byl odhalen u konektoru USB. Dále bylo změněno zapojení vypínače, aby byl přístroj zapnutý v poloze blíže ke konektorům. Některé úpravy byly provedeny až při rozpracovaném plošném spoji z důvodu usnadnění vedení cest.

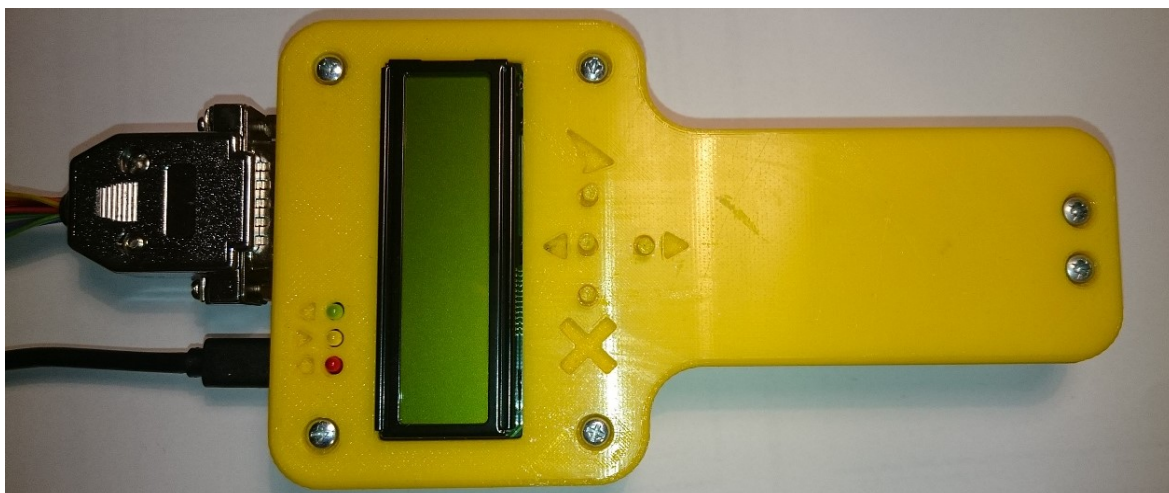
Návrh byl přepnut do režimu kreslení desky plošných spojů. Na začátku bylo nezbytně nutné přenesení obrysu desky do programu Eagle. V SolidWorks byl otevřen model desky plošného spoje a jeho pohled shora byl exportován jako výkres ve formátu DXF. Použití výstupního měřítka 1:1 zajistilo správné rozměry. Pomocí softwaru Eagle PCB Power Tools byl zkonvertován výkres DXF do formátu SCR [35]. V nastavení převodu bylo nutné zvolit jednotky mm. Spuštění tohoto skriptu v programu Eagle provedlo vytvoření nové desky s výkresem vloženým ve vrstvě Dimension. Nakonec byla vložena kopie této vrstvy do souboru plošného spoje spárovaného se schématem.

V dalším kroku byly rozmístěny součástky s definovanou pozicí podle sestavy 3D modelů. Komponenty byly přesunuty tak, aby jejich pájecí plošky přesně překrývaly otvory ve vrstvě Dimension. Výjimkou byl USB konektor s povrchovou montáží. Jeho poloha byla určena pomocí kóty. Potom byly posunuty a propojeny i ostatní součástky. Nakonec byla provedena automatická kontrola pravidel návrhu. Mezi nalezenými chybami se nacházela některá místa s nedodrženou izolační vzdáleností. Vše bylo opraveno. Výsledné návrhy DPS jsou uvedené v příloze D.

3.15 Stavba přístroje

Plošný spoj bylo nutné oříznout na navržený tvar. Nejprve byly ručně vyvrtány 2 úhlopříčně umístěné montážní otvory desky a opatrně obroušeny až k tenké měděné kružnici. Na CNC fríze byl importován DXF výkres obrysu a do svěráku byla upnuta plastová podložka. Do ní byla vyvrtána stejná dvojice děr. Pomocí šroubů a matic byl plošný spoj upnut k podložce. To zajistilo naprostou shodu souřadnic obráběné plochy. Nakonec byl spuštěn ořez všech ostatních částí.

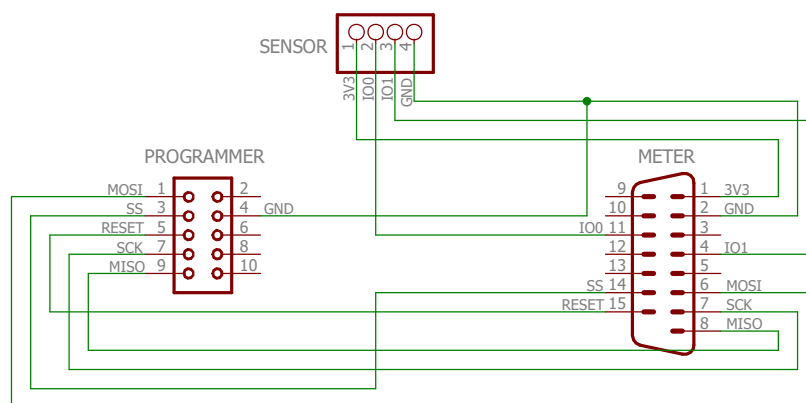
Oříznutý plošný spoj byl odmontován z podložky a lihem odstraněn fotocitlivý lak. Dále byly vloženy drátové propojky, které v případě této desky nahrazují prokovené otvory. Nakonec byly osazeny všechny součástky. Mikroprocesor má přivedené cesty v horní i spodní vrstvě a proto musela být jeho patice připájena na obou stranách. Do krabičky byly vloženy pružinové kontakty na připravené výstupky. Šrouby a distanční sloupky posloužily k upevnění plošného spoje. Na tlačítka byly umístěny hmatníky a celý přístroj byl zakryt horním krytem.



Obrázek 3.24: Sestavený přístroj

3.16 Základní oživení

Na začátku nebyl vložen mikroprocesor. Místo toho byly na jeho patici propojeny piny 14 a 15. Jedná se o linky RX a TX sériového rozhraní UART. Dále byl spojeny piny 10 a 28 pro zapnutí podsvícení displeje. Vložení akumulátoru a připojení USB kabelu předcházelo rozsvícení LED diody indikující nabíjení. Počáteční napětí 3 V postupně narůstalo na 4,2 V. Při dosažení 3,3 V byl přepnut vypínač do polohy zapnuto. Ve správci zařízení se objevil nový sériový port. Pomocí terminálu byla ověřena správná funkce sériové komunikace. Odeslaná data se rovnala přijatým. Dalším krokem byl test programovacího rozhraní mikroprocesoru. Bylo nutné vyrobit propojovací kabel mezi konektorem D-SUB 15 a programátorem. Z kabelu byla navíc vyvedena odbočka pro připojení senzoru, aby nebylo nutné při nahrávání nového programu přepojovat konektor.

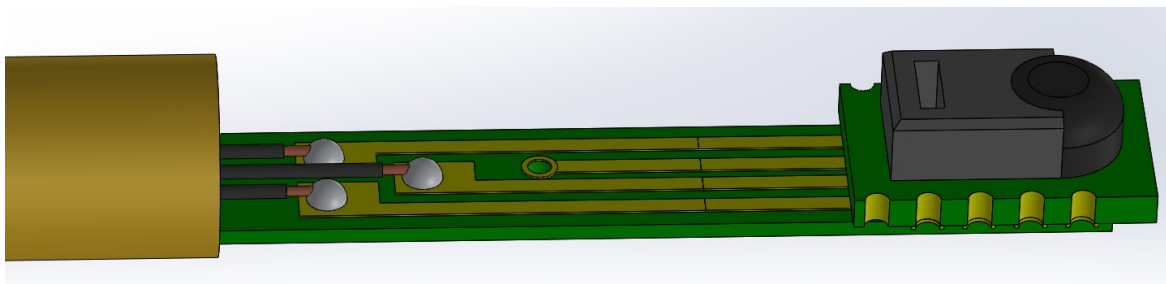


Obrázek 3.25: Propojovací kabel pro senzor a programátor

Přístroj byl propojen s programátorem vyrobeným kabelem a ve vývojovém prostředí CodeVisionAVR byla úspěšně vyčtena signatura mikroprocesoru ATmega644.

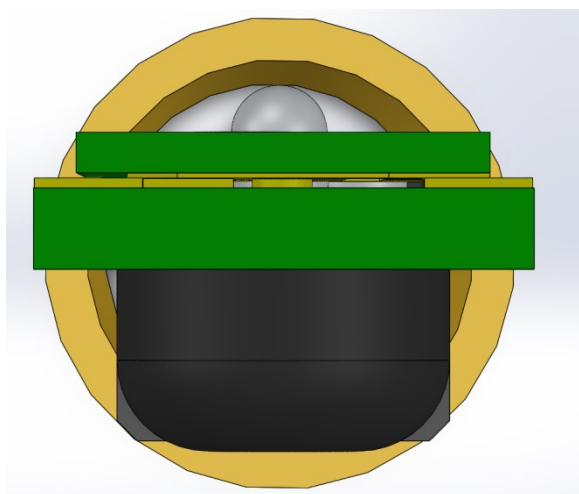
3.17 Konstrukce měřicí sondy

Návrh vycházel z požadavku co nejmenšího průměru. Vrtání rozměrných otvorů do zdi bývá velmi pracné. Použitý senzor SHT11 je prodáván osazený na malém nosném plošném spoji. Ten má délku kratší hrany nejvýše 4,98 mm [13]. Proto byla snaha o sestavení sondy, která tento rozměr příliš nepřesáhne. V modelářství byla zakoupena mosazná trubka s vnějším průměrem 5mm. Dále byl hledán způsob upevnění čidla a připojení vodičů. Z prostorových důvodů bylo vhodné použít tenký plošný spoj, který lze do trubky vložit. Byl pořízen oboustranný plošný spoj o tloušťce 0,4 mm. V následujícím postupu byl vytvořen 3D model senzoru a trubky. Potom byly tyto díly vzájemně svázány plošným spojem.



Obrázek 3.26: 3D model sondy

Šířka této malé DPS měla přímý vliv na vertikální polohu senzoru, protože její hrany jsou v přímém styku s vnitřní stěnou trubky. Za pomoci sestavy v SolidWorks byly vyladěny optimální rozměry, při kterých čidlo a plošný spoj přesahuje profil trubky minimálně.



Obrázek 3.27: Profil sondy

Správný tvar destičky byl vyřezán na CNC fréze. V prostřední části byl vyvrtán otvor pro drátový propoj do spodní vrstvy. Po důkladném očištění lihem byly vodivé cesty nakresleny černým popisovačem. Leptání bylo provedeno ve vodném roztoku chloridu železitého. Při přiložení snímače na určené místo bylo zjištěno, že se obnažené prokovené otvory na spodní straně senzoru dotýkají vodivých cest na vyleptaném plošném spoji. Jako izolace byla nanesena velmi tenká vrstva SMD lepidla. Po pocínování pájecích plošek byla součástka osazena pomocí horkého vzduchu foukaného na spodní stranu DPS. Skrz trubku byly protaženy 4 vodiče a připájeny k plošnému spoji, který byl nakonec svou zúženou stranou zasunut do vnitřku trubky. Mechanická pevnost byla zvýšena zalitím pomocí tavné pistole. Nadbytečné přesahy byly ořezány. Lze konstatovat, že vytvořenou sondu bude možné bez problému zasunout do otvoru u průměru 6 mm.



Obrázek 3.28: Vyrobená sonda

4 Softwarový vývoj měřiče vlhkosti

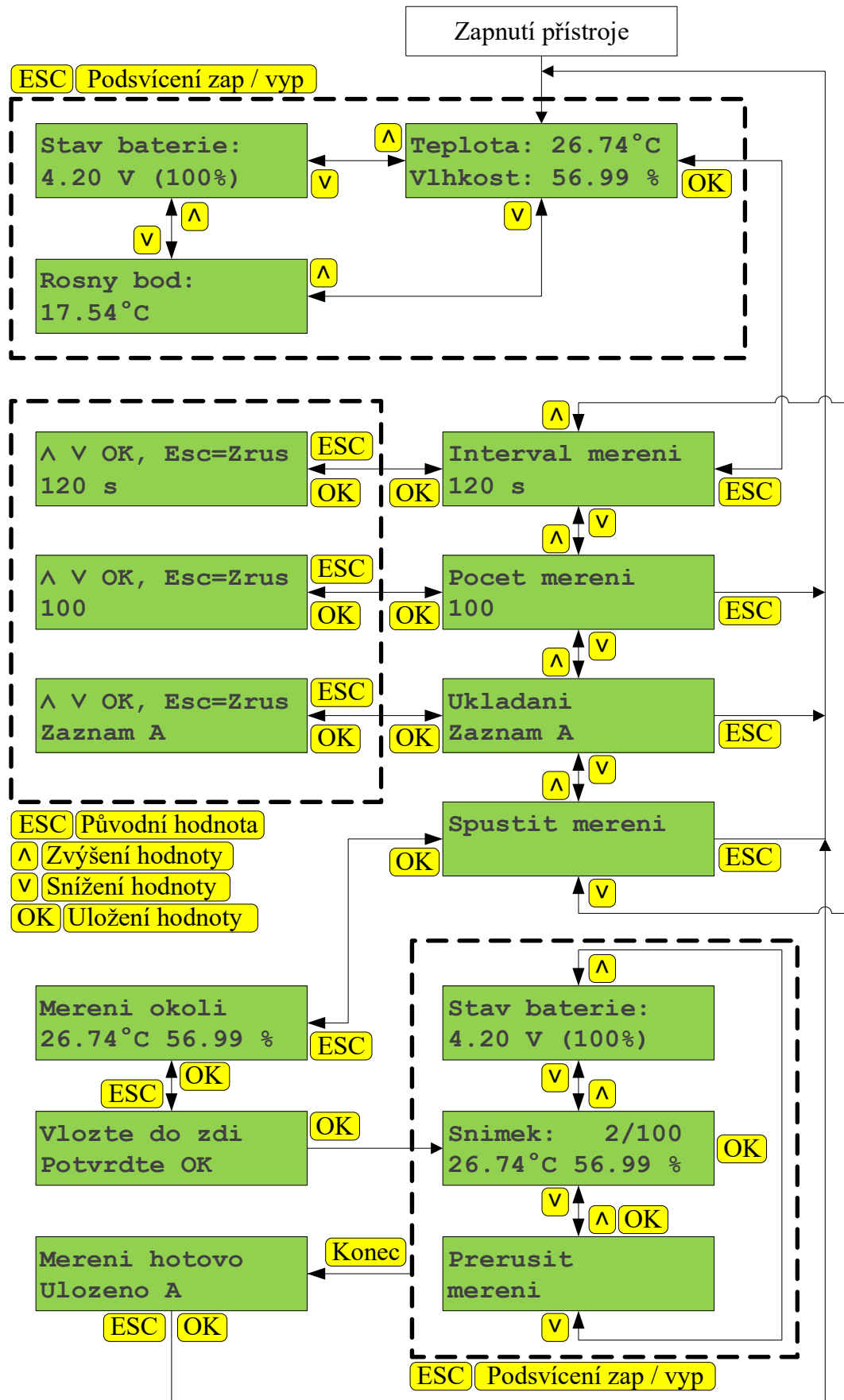
Tato část se zabývá programováním softwaru pro mikroprocesor měřiče. Použité vývojové prostředí je CodeVisionAVR. Dále byl v jazyce Delphi vytvořen nástroj pro PC, který umožňuje přenést změřené hodnoty po sériovém rozhraní. V prvním kroku je naplánováno přesné chování vytvářených prostředků a nakonec je provedena realizace.

4.1 Vize o metodě měření

Použitý senzor je určený pro měření vlhkosti plynu. Zdi jsou typicky vyrobené z látek pevného skupenství a proto je nutné stanovit vzájemnou relaci. Je předpokládáno, že vlhké zdivo bude uvnitř vyvrtného otvoru vysycháním produkovat určité klesající množství vodní páry. Zároveň je nutné počítat s vlhkostí vnějšího prostředí, která může pronikat mezerou mezi sondou a povrchem vrtu směrem k měřenému bodu. Navržený pokus je založen na změření vnějšího prostředí a zahájení průběhového měření uvnitř otvoru. Prozatím je neznámý celkový počet snímků a jejich vzájemný časový interval. Z výsledků by mohlo být možné odhadnout nebo stanovit vlhkost uvnitř zdiva např. integrací průběhu. Na základě této myšlenky byl stanoven základní funkční diagram přístroje.

4.2 Funkční diagram přístroje

Přístroj je po zapnutí uveden do pohotovostního režimu. Na hlavní obrazovce ukazuje měřenou teplotu a vlhkost. Šipkami je možné se přesunout na výpočet rosného bodu a měření stavu baterie. Ve všech případech je možné tlačítkem ESC zapínat a vypínat podsvícení displeje. Stisknutí tlačítka OK na hlavní obrazovce vyvolá menu přístroje. Šipky slouží k procházení nabídky a ESC umožňuje návrat zpět na hlavní obrazovku. Položka je vybrána tlačítkem OK. Pro průběhové měření lze nastavit interval snímků a jejich celkový počet. Také lze zapnout ukládání měřeného průběhu do paměti EEPROM. Hodnoty jsou upravovány šipkami a uloženy tlačítkem OK. Stisknutí ESC při úpravě vrátí původně nastavenou hodnotu. Kromě změny parametrů je v nabídce také samostatné spuštění snímkování. Nejprve je uživatel požádán o změření veličin v okolním prostředí a potom potvrdí, že vložil senzor do měřeného otvoru ve zdi. Následně je spuštěno automatické průběhové měření. Pokud byl nastaven nulový časový interval, je přístroj v režimu ručního spouštění. Snímek je pak pořízen každým stisknutím tlačítka OK. Uplatnění je při měření vlhkosti v závislosti na poloze (hloubce) senzoru v otvoru.



Obrázek 4.1: Funkční diagram

Během pořizování snímků lze kdykoliv tlačítkem ESC zapínat a vypínat podsvícení displeje. Přístroj ukazuje poslední změřený snímek a jejich dosavadní i cílový počet. Šípkami se lze přesunout na měření stavu baterie a na obrazovku pro přerušování měření. Tento krok však nezpůsobí zahodění změřených hodnot, ale cílový počet snímků je upraven na hodnotu o 1 vyšší než je dosavadní změřený počet. Nakonec je zobrazeno potvrzení o dokončení měření případně informace o uložení do paměti. Stisknutí tlačítka OK nebo ESC způsobí návrat na hlavní obrazovku.

4.3 Základní nastavení mikroprocesoru

Nejprve bylo nutné změnit výrobní naprogramování pojistkových bitů. Původní interní kalibrovaný oscilátor byl přepnut na externí krystal vysoké frekvence. Dále bylo zjištěno zapnuté testovací rozhraní JTAG. To bylo nutné vypnout, protože vývody jsou použity pro spínání tranzistorů. Byl vytvořen nový projekt v jazyce C. Na začátku funkce main před hlavní programovou smyčkou bylo vloženo nastavení registrů.

Tabulka 4.1: Inicializace registrů

Registr	Hodnota	Význam
DDRA	0x03	Vývody IO0 a IO1 pro senzor nastaveny jako digitální výstupy
PORTC	0x20	Vypnutí podsvícení a měniče 5V
DDRC	0xE0	Vývody E, SWBL a SW5V pro displej a tranzistory nastaveny jako výstupy
DDRD	0x0C	Vývody RS a RW pro displej nastaveny jako výstupy
UCSR0B	0xD8	Zapnutí přijímače i vysílače UART včetně rutin přerušování
UCSR0C	0x06	Asynchronní přenos, délka dat 8 bitů, 1 stop bit, žádná parita
UBRR0L	0x03	Rychlost přenosu 115200 bd
ACSR	0x80	Vypnutí analogového komparátoru
DIDR0	0x80	Vstup pro měření baterie není digitální
ADMUX	0xC7	Interní reference pro AD převodník 2,56 V a volba kanálu
ADCSRA	0x8B	Zapnutí AD převodníku včetně rutiny přerušování, nastavení frekvence převodníku

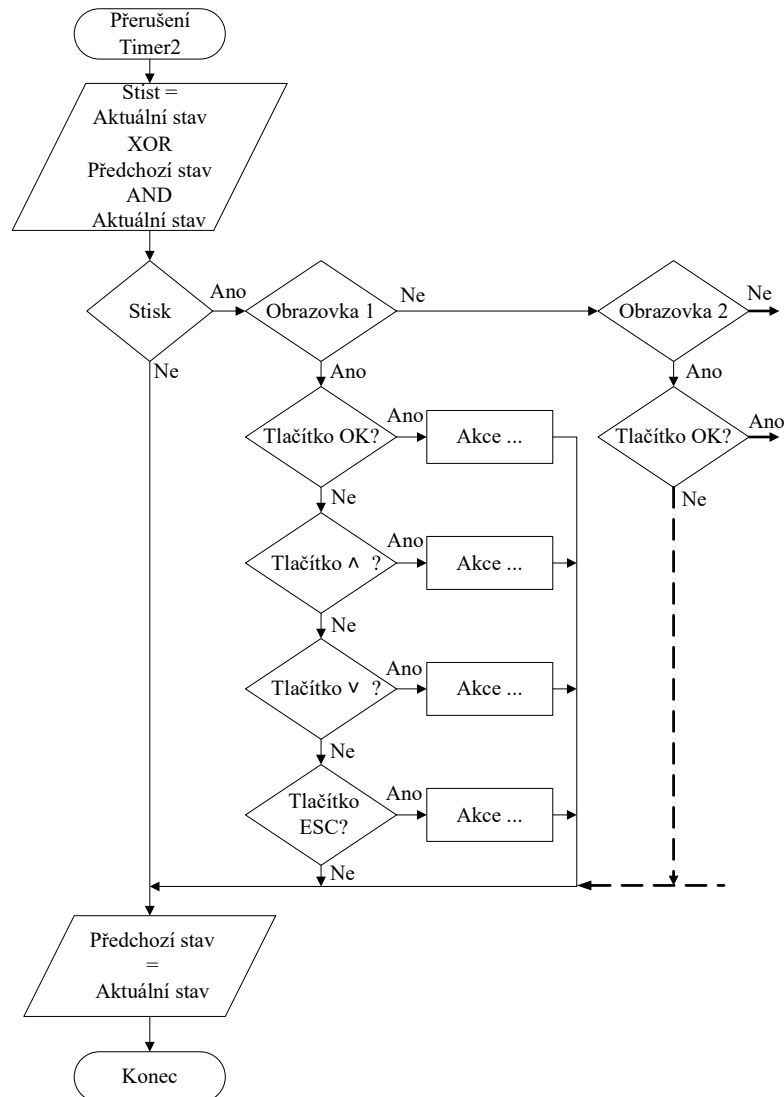
4.4 Obsluha tlačítek

Není vhodné uvnitř programové smyčky číst stav tlačítek a prostým porovnáním hodnoty uvažovat stisknutý stav. Během jednoho krátkého přidržení hmatníku by mohlo být vyhodnoceno až několik tisíc stisknutí. Proto je nutné vyhodnocovat stisk pomocí detekce hrany. Ani v tomto případě není zajištěna správná funkce, protože během sepnutí nebo rozepnutí kontaktu dochází k zákmitům, které se pro vstup mikroprocesoru mohou projevit jako větší množství hran. Tento jev lze odstranit zpomalením cyklu čtení stavu. V programu bylo použito snímání tlačítek v rytmu přerušování osmibitového časovače Timer2.

Tabulka 4.2: Registry časovače Timer2

Registr	Hodnota	Význam
TCCR2B	0x07	Nastavení frekvence čítání 7,2 kHz
TIMSK2	0x01	Zapnutí rutiny přerušení časovače

Rutina přerušení časovače je vyvolána jednou za 33,56 ms. Pamatuje si stav tlačítek uložený v předchozím vyvolaném přerušení a porovná ho s aktuálním. Vyhodnocení hrany způsobí, že tlačítko je při tomto průchodu přerušením považováno za stisknuté. Bylo-li některé tlačítko stisknuto, je program větven podle aktuální obrazovky.



Obrázek 4.2: Vývojový diagram obsluhy tlačítek

4.5 Obsluha displeje

Displej umožňuje 4 nebo 8 bitovou komunikaci. Operace je možné provádět zápisem do instrukčního a datového registru. Jejich přepínání je řízeno pomocí vstupu RS (Register Select). Vstup RW (Read/Write) je určen pro volbu mezi čtením a zápisem registrů [36]. Možné kombinace RS a RW společně s jejich významem jsou uvedené v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3: Kombinace vstupů RS a RW [36]

RS	RW	Význam
0	0	Zápis do instrukčního registru
0	1	Čtení aktuální adresy paměti nebo indikace zaneprázdnění řadiče (Busy Flag)
1	0	Zápis do datového registru
1	1	Čtení z datového registru

Vstup E (Enable) má podobný význam jako hodinový signál synchronního přenosu. V případě 4 bitového přenosu je nutné provést přenos bajtu na 2 části. Nejprve je odeslána horní čtveřice bitů a potom spodní. Podle časování displej při příjmu dat reaguje na doběžnou hranu signálu E.

Byla vytvořena funkce `lcd_sendChunk`. Slouží k odeslání čtveřice bitů a jejím parametrem je datový typ `char`. Horní 4 bity tohoto parametru jsou přeneseny na vývody DB7–DB4. Poté je výstup E nastaven na log. 1, ve kterém setrvává po dobu 1 ms. E je přepnut na log. 0 a nakonec jsou data ponechána ještě další 1 ms. Použití takové doby čekání může být považováno za plýtvání, ale vzhledem k charakteru přístroje nebylo zaznamenáno žádné nepříjemné zpoždění během používání.

Stejný typ parametru je přenášen do funkce `lcd_sendByte`. Uvnitř je voláno `lcd_sendChunk` nejprve s nezměněným parametrem (jsou odeslány horní 4 bity) a podruhé se stejným parametrem bitově posunutým o 4 bity doleva (odeslání spodní čtveřice).

V katalogovém listu byl nalezen doporučený diagram pro inicializaci displeje s 4 bitovou komunikací. Na jeho základě byla sestavena sekvence volání výše uvedených funkcí proložena doporučeným čekáním. Kompletní výčet byl zapouzdřen do funkce `lcd_init`, jejíž volání se nachází mezi základní inicializací registrů mikroprocesoru a hlavní programovou smyčkou.

Tabulka 4.4: Sekvence příkazů inicializace displeje

Funkce	Parametr	Význam
sleep	16	Doporučená sekvence pro reset řadiče
lcd_sendChunk	0x30	
sleep	5	
lcd_sendChunk	0x30	
sleep	1	
lcd_sendChunk	0x30	
lcd_sendChunk	0x20	Nastavení 4 bitového režimu komunikace
lcd_sendByte	0x28	Dvouřádkový displej, znaky ve formátu 5x8 bodů
lcd_sendByte	0x08	Vypnutí displeje
lcd_sendByte	0x01	Smazání displeje
lcd_sendByte	0x06	Kurzor se po zápisu posouvá o 1 znak doprava
lcd_sendByte	0x0c	Kurzor je neviditelný a má vypnuté blikání

Zobrazovaný obsah je uložený v paměti DDRAM (Display Data Random Access Memory). Každý znak je zastoupen hodnotou na dané adrese. Relace mezi pozicí displeje a adresou v paměti je znázorněna v tabulce 4.5.

Tabulka 4.5: Adresace obsahu displeje

Řádek	Sloupec															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F
2	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	5A	5B	5C	5D	5E	5F

Příkaz pro změnu polohy kurzoru je bitový logický součet $0x80$ a adresy z výše uvedené tabulky. Výsledek je zapisován do instrukčního registru řadiče. Pro tyto účely byla vytvořena funkce `lcd_goto` s parametry x a y , kde x reprezentuje sloupec počítaný od nuly. Analogický význam má y pro řádek. Výsledná odeslaná hodnota je dána vztahem 4.1.

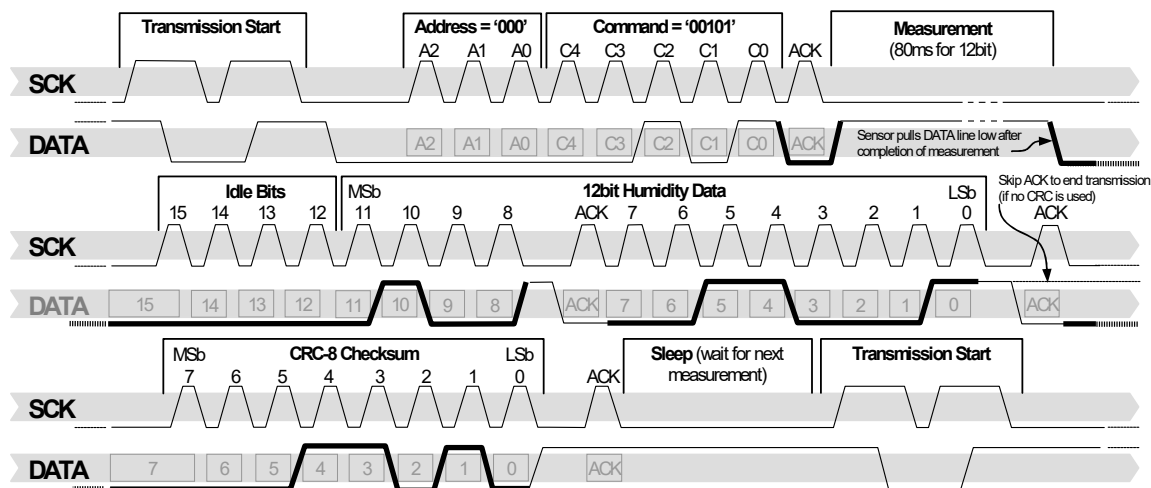
$$\text{příkaz} = 0x80 | (x + (y \cdot 0x40)) \quad (4.1)$$

Zapsání nějakého znaku na aktuální pozici kurzoru bylo umožněno funkcí `lcd_putchar`. Jejím parametrem je požadovaný znak. Funkce nejprve nastaví výstup RS na log. 1, aby byl aktivní zápis do datového registru. Potom zavolá `lcd_sendByte` a jako parametr použije právě znak určený k zápisu. Po odeslání bajtu vrátí RS zpět na log. 0, aby byl znovu přístupný zápis do instrukčního registru.

Vrcholem obsluhy displeje je funkce `lcd_puts`. Jejím parametrem je pointer na pole znaků. Slouží k vypsání celého textového řetězce. Každé takové pole je na svém konci zakončeno znakem s hodnotou $0x00$. Jednotlivé prvky pole jsou odesílány do displeje pomocí funkce `putchar`. V případě zjištěné nulovosti je cyklus ukončen.

4.6 Komunikace se senzorem

Katalogový list uvádí průběhy na vodičích DATA a SCK. Z diagramu je patrné střídání směru přenosu na lince DATA. Lze odhadnout, že tenkou čarou je znázorněna část vysílaná mikroprocesorem a tučně je vyznačen průběh generovaný senzorem.



Obrázek 4.3: Časové průběhy na komunikační lince senzoru [13]

Pro usnadnění programování komunikace byly vytvořeny makra a funkce. Makra se starají o okamžité řízení a snímání pinů mikroprocesoru a funkce je rozšiřují o časování. Vodič DATA musí být přes pull-up rezistor připojen ke kladnému napájecímu napětí. Ten se fyzicky nenachází na navrženém plošném spoji a tak se nabízela možnost přidání této součástky do pouzdra konektoru sondy. Nakonec byl použit interní pull-up rezistor, který lze připojit správným nastavením registru. Každý pin x náležící portu y může zastávat funkci podle nastavení bitů registrů $PORTy.x$ a $DDRy.x$ [22]. Možné kombinace jsou uvedené v tabulce 4.5.

Tabulka 4.5: Nastavení vstupně výstupního pinu mikroprocesoru

DDRy.x	PORTy.x	Funkce
0	0	Digitální vstup, interní pull-up odpojen
0	1	Digitální vstup, interní pull-up připojen
1	0	Digitální výstup, výstupní hodnota log. 0
1	1	Digitální výstup, výstupní hodnota log. 1

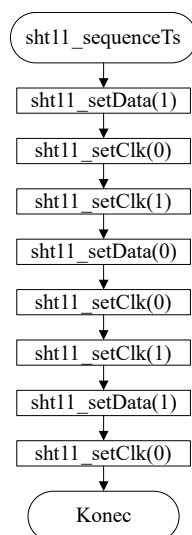
Posílá-li mikroprocesor na linku DATA log. 1, není v režimu digitálního výstupu, ale je nastaven jako vstup s připojeným pull-up rezistorem. V takové konfiguraci senzor může komunikovat stahováním linky na log. 0 přičemž mikroprocesor může přijímat čtením bitu

x registru PINy. Makra byla postavena tak, že nastavení pinu DATA přechází mezi druhou a třetí možností ve výše uvedené tabulce.

Tabulka 4.6: Makra pro komunikaci se senzorem

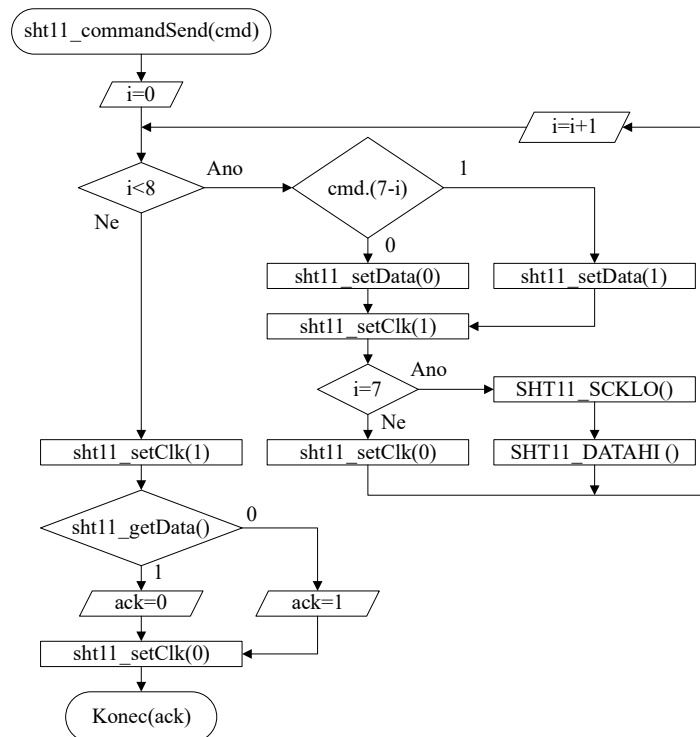
Označení makra	Provedené příkazy	Funkce
SHT11_DATA	PINA.1	Data generovaná senzorem během příjmu
SHT11_DATAHI()	PORTA.1=1; DDRA.1=0	Příjem dat, nebo vysílání log. 1
SHT11_DATALO()	PORTA.1=0; DDRA.1=1	Vysílání log. 0
SHT11_SCKHI	PORTA.0=1	Hodinový signál do log. 1
SHT11_SCKLO	PORTA.0=0	Hodinový signál do log. 0

Funkce `sht11_getData`, `sht11_setData` a `sht11_setClk` začínají i končí časovou prodlevou. Mezi tím je použito vhodné makro a odpadá problém s časováním při programování celého cyklu komunikace. Na začátku každého z nich se vyskytuje sekvence označovaná jako `Transmission Start`. Je vykonána zavoláním další vytvořené funkce `sht11_sequenceTs`.



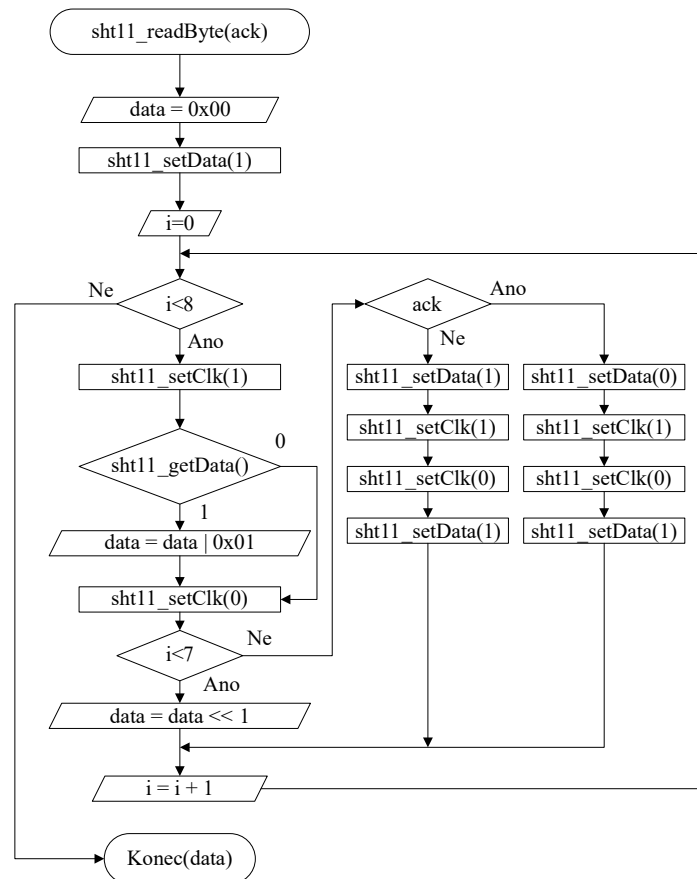
Obrázek 4.4: Funkce `sht11_sequenceTs`

Odeslání příkazu je prováděno voláním funkce `sht11_commandSend`. Parametr `cmd` je vysílán synchronním sériovým přenosem v pořadí MSb first. Po vyslání posledního bitu je uvolněna linka DATA, protože po přepnutí 8. hodinového pulzu do log. 0 je senzorem generován `acknowledge`. Ten je mikroprocesorem kontrolován během 9. cyklu hodin a jeho přítomnost vyjadřuje návratová hodnota celé funkce.



Obrázek 4.5: Funkce sht11_commandSend

Opačný směr přenosu zajišťuje funkce sht11_readByte. Senzor vysílá v rytmu hodinového signálu 8 bitů. Mikroprocesor používá pro příjem pomocnou proměnnou data. Ta je v každém cyklu nastavena na pozici nejnižšího bitu podle stavu datové linky a bitově posunuta vlevo. Po vyčtení celého bajtu je senzoru předán v rámci 9. hodinového pulzu signál acknowledge. Jeho hodnotu lze funkci předat parametrem ack a v log. 1 má význam posledního přenášeného bajtu.



Obrázek 4.6: Funkce sht11_readByte

Reset komunikačního rozhraní lze provést ponecháním datové linky v log. 1 a vysláním 9 hodinových pulzů. Tento průběh musí být bezprostředně následován sekvencí Transmission Start. Proces byl zapouzdřen do funkce sht11_connectionReset, která je volána před hlavní programovou smyčkou.

Nakonec byly sestaveny funkce pro samotné měření teploty a vlhkosti. Jejich název je sht11_measTemp a sht11_measHumi. Jejich návratová hodnota je nulová, pokud senzor neodpověděl na příkaz signálem acknowledge. V opačném případě vrací hodnotu 1. Na začátku je generována startovací sekvence. Potom je vyslán příkaz 0x03 pro teplotu nebo 0x05 pro vlhkost. Senzor signalizuje dokončení měření nastavením log. 0 na lince DATA. Dvojice přenesených bajtů je uložena do proměnné datového typu integer. Pro zobrazení na displeji je však nutné provést přepočítání do desetinného formátu float. Vztahy byly nalezeny v katalogovém listu [13].

$$tempFloat = d_1 + d_2 \cdot temp \quad (4.2)$$

kde	<i>tempFloat</i>	Změřená teplota [°C]
	<i>temp</i>	Hodnota vyčtená ze senzoru
	<i>d₁</i>	Konstanta rovna -39,7
	<i>d₂</i>	Konstanta rovna 0,01

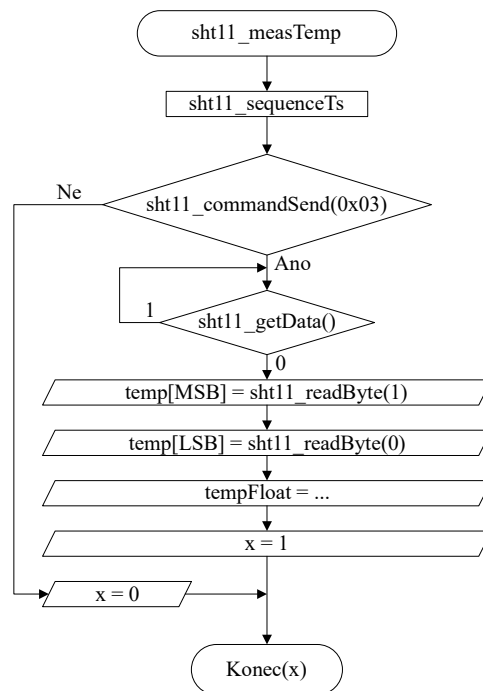
$$humiFloat = c_1 + c_2 \cdot humi + c_3 \cdot humi^2 \quad (4.3)$$

kde	<i>humiFloat</i>	Změřená relativní vlhkost [%]
	<i>humi</i>	Hodnota vyčtená ze senzoru
	<i>c₁</i>	Konstanta rovna -2.0468
	<i>c₂</i>	Konstanta rovna 0.0367
	<i>c₃</i>	Konstanta rovna -1.5955E-6

Pro relativní vlhkost je navíc použita teplotní kompenzace, která je doporučena pro teploty velmi odlišné od 25 °C. Ze vztahu je patrné, že se při této teplotě hodnota nezmění.

$$humiFloat = (tempFloat - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot humi) + humiFloat \quad (4.4)$$

kde	<i>t₁</i>	Konstanta rovna 0.01
	<i>t₂</i>	Konstanta rovna 0.00008



Obrázek 4.7: Funkce sht11_measTemp

4.7 Organizace paměti EEPROM

Paměť je využita pro ukládání změřených hodnot a konfiguraci. Každý snímek reprezentovaný teplotou a vlhkostí zabírá 4 bajty. Úložiště je rozdělené na 2 soubory z nichž každý může obsahovat až 255 snímků. Každý soubor má navíc 2 bajty pro hlavičku, která nese informaci o počtu snímků a časovém intervalu měření. Další buňky paměti jsou využity pro nastavené hodnoty v menu. Pro práci s EEPROM byla vytvořena dvojice funkcí. Čtení provádí `eeprom_read`. Parametrem je předána adresa a data jsou získána návratovou hodnotou. Zápis je zajištěn předáním adresy a hodnoty funkcí `eeprom_write`.

Tabulka 4.7: Organizace paměti EEPROM

Adresa	Součást	Význam
0x000	Soubor A	1. snímek
0x004		2. snímek
0x3FC		Časový interval snímků
0x3FD		Počet snímků
0x3FE	Nevyužito	
0x3FF	Konfigurace	Výběr souboru pro uložení
0x400	Soubor B	1. snímek
0x404		2. snímek
0x7FC		Časový interval snímků
0x7FD		Počet snímků
0x7FE	Konfigurace	Časový interval snímků
0x7FF		Počet snímků

4.8 Počítání času

Základní interval měření a obnovení hodnot na displeji je 1 s. Přestože není přítomen hodinový krystal, bylo docíleno přesného času z frekvence 7,3728 MHz. Byla definována proměnná `flag1s`. Její hodnota je jednou za sekundu změněna z 0 na 1. Časování zajišťuje rutina přerušení 16 bitového čítače `Timer1`. Ten je inkrementován v rytmu externího krystalu bez dělení frekvence. Bylo vypočteno, kolikrát je nutné čítač protočit aby byla celková doba právě 1 s.

$$k = \frac{7372800}{2^{16}} = 112,5 \quad (4.5)$$

Čítač je 112 krát protočen v celém rozsahu a 113. cyklus je nastaven do poloviny. Při posledním přerušení je nastavena proměnná `flag1s`. Tu je nutné ručně nulovat v ostatních částech programu. V režimu automatického měření musí být pro jeden snímek proměnná `flag1s` nastavena a vynulována vícekrát podle nastaveného intervalu.

4.9 Sériová komunikace

Pro komunikaci mezi mikroprocesorem a počítačem byl vytvořen jednoduchý protokol. Po sériovém rozhraní je odeslán některý z příkazů. Přístroj vrátí 0x08 v případě, že pokyn akceptoval a následně pošle data, pokud mají v rámci příkazu význam. Pokud je přístroj zaneprázdněn (např. probíhajícím snímkováním), posílá 0x06.

Tabulka 4.8: Příkazy sériové komunikace

Příkaz	Délka vrácených dat	Význam
0x10	0	Test komunikace
0x12	2	Přečíst teplotu
0x14	2	Přečíst vlhkost
0x20	0	Zapnout step-up měnič 5V
0x21	0	Vypnout step-up měnič 5V
0x22	0	Zapnout podsvícení
0x23	0	Vypnout podsvícení
0x24	2048	Přečíst paměť EEPROM
0x26	1022	Přečíst snímky v paměti SRAM

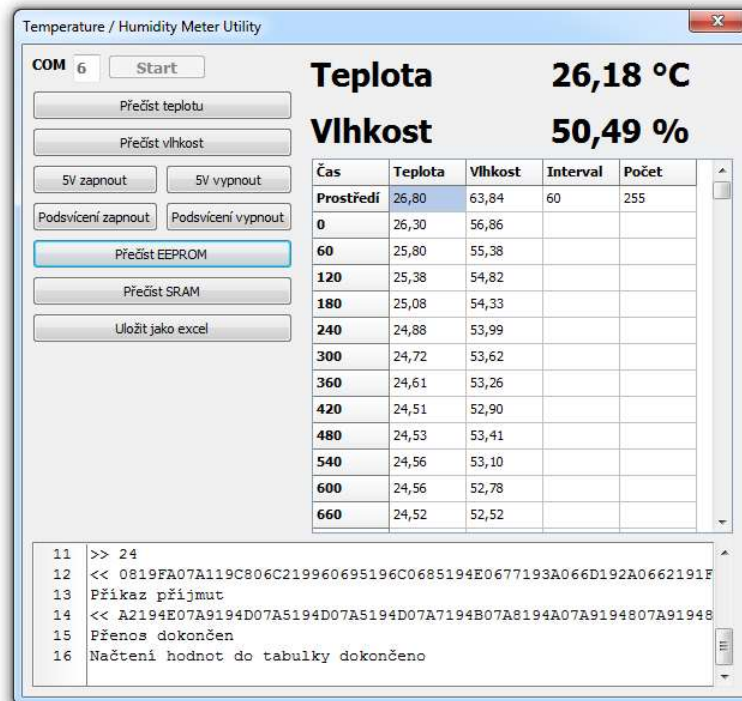
4.10 Aplikace pro stažení dat

Ve vývojovém prostředí Delphi byla sestavena ovládací aplikace. Její jí hlavní účel je převod změřených hodnot do sešitu formátu excel. Tlačítka jednotlivých funkcí jsou zpřístupněna po výběru COM portu a kliknutí na tlačítko start. Aby byl příkaz přístrojem akceptován, musí se nacházet na hlavní obrazovce. V opačném případě je vypsána informace o zaneprázdnění přístroje. Výjimku tvoří zapínání a vypínání podsvícení a step-up měniče pro 5V. Tyto povely je možné provést kdykoliv. Kliknutí na některé tlačítko způsobí odeslání odpovídajícího příkazu na sériový port. Další krok je obsluhování událostí, která je vyvolána příchozími daty v zásobníku. Po dosažení odpovídající délky dat je provedeno zpracování.

Čtení teploty a vlhkosti využívá pro přepočítání hodnot stejné vztahy jako mikroprocesor. Čtení paměti SRAM provádí přenos pole znaků, které mikroprocesor naplní během měření. Je nutné podotknout, že vypnutí přístroje způsobí ztrátu této informace. Čtení paměti EEPROM přenáší do počítače celých 2048 bajtů. Následně je uživatel požádán o výběr souboru.

Nakonec jsou všechny hodnoty vyplněny do tabulky. Součástí přeneseného balíku dat je i informace o intervalu a počtu snímků. Do prvního sloupce je vyplněn čas v sekundách od druhého snímku (první snímek reprezentuje stav okolního prostředí). Druhý sloupec

obsahuje hodnoty teplot. Ve třetím sloupci lze nalézt naměřené vlhkosti. Ve čtvrtém a pátém sloupci je upřesněn interval měření a počet snímků. Kliknutí na tlačítko pro uložení excelu vyvolá klasické dialogové okno vyžadující název a umístění souboru.



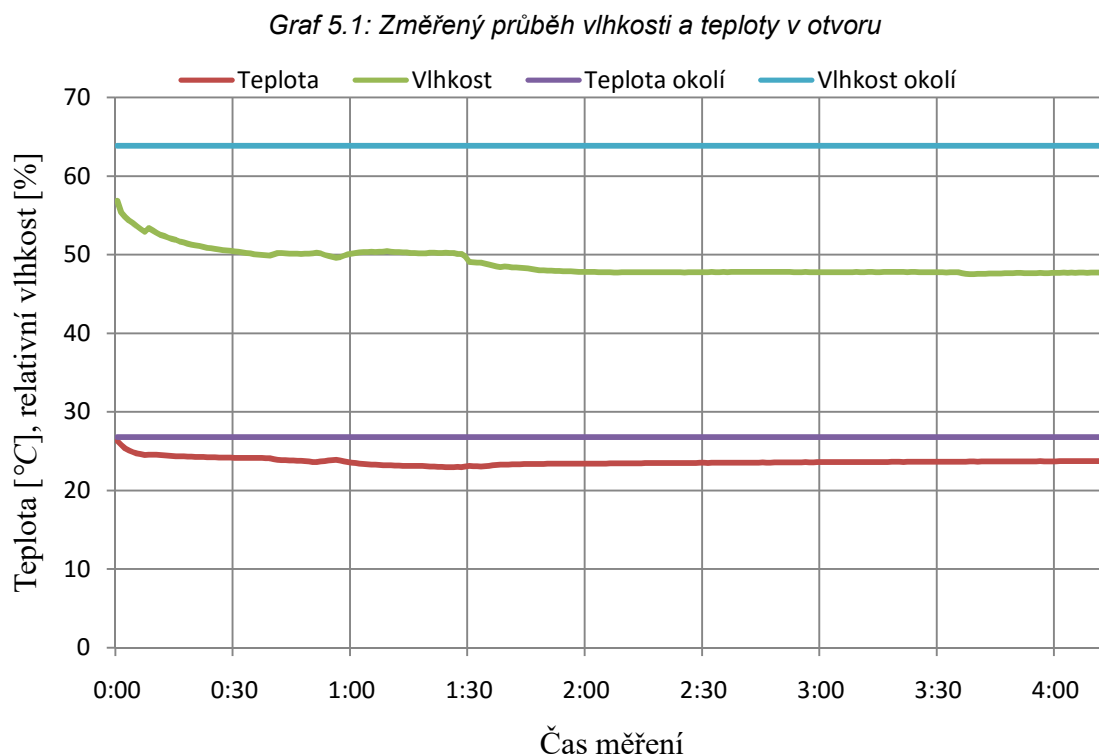
Obrázek 4.8: Aplikace pro stažení dat

5 Experimentální měření

V místnosti o ploše 16 m² je pravidelně prováděno vaření a sušení prádla. Na přístroji bylo nastaveno měření 255 snímků s intervalem 120 s. Do obvodové stěny o tloušťce 40 cm byl zevnitř vyvrtán otvor o průměru 6 mm a hloubce 10 cm. V místnosti byla změřena teplota 26,8 °C a relativní vlhkost 63,84 %. Potom byla umístěna sonda do maximální možné hloubky a spuštěno průběhové měření.

5.1 Výsledný průběh

Změřené hodnoty byly uloženy do paměti EEPROM a přeneseny do excelu. Průběh veličin byl graficky znázorněn. Počáteční vlhkost v otvoru byla 57 % a během první půlhodiny exponenciálně poklesla na 50 %. Na této hodnotě se držela přibližně hodinu, ale poté začala opět klesat. Po dvou hodinách lze vlhkost považovat za ustálenou na 47,5 %. Teplota na začátku měření během prvních 10 minut rychle klesla cca o 2 °C. Do konce první hodiny se pak pozvolna snížila o další 1 °C. Nakonec se po zbytek měření držela na necelých 24 °C.



Závěr

V této práci došlo k podrobnému seznámení s problematikou vlhkosti. Základní fyzikální vztahy byly postupně rozvinuty ke konečným veličinám. U metod měření byla prokázána spojitost s vyjádřenými rovnicemi.

Dále byl získán přehled o dostupných senzorech a bylo zjištěno, že parametry nejsou vždy přímo úměrné pořizovací ceně senzoru.

Během realizace měřiče byly získány zkušenosti v oblasti návrhu elektronických zařízení a programování. Byl vytvořen přístroj, který umožňuje měřit vlhkost a teplotu plynu. Pouhou úpravou softwaru může být rozšířen o další typy senzoru nebo najít i jiná využití.

Vzhledem k tomu, že byl použit senzor vlhkosti plynu pro měření vlhkosti pevné látky, není jediné měření příliš vypovídající a bude potřeba provést množství dalších experimentů, které budou měření parametrizovat různou mírou navlhnutí i materiálem daného zdiva. Podařilo se vyvinout vybavení pro realizaci těchto pokusů.

Použitá literatura

- [1] Vlhkost vzduchu. [online]. [Citace: 23. 2. 2017]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/Gemet/meteo2/vlhkost.htm>
- [2] Sensirion. Introduction to Humidity. [Citace: 23. 2. 2017]. Dostupné z: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Sensirion_Humidity_Sensors_Introduction_to_Relative_Humidity_V2.pdf
- [3] Entropie – WikiSkripta. [online]. [Citace: 24. 2. 2017]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Entropie>
- [4] DAŘO, S., KREIDL M. *Senzory a měřící obvody*. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [5] Látkové množství – Wikipedie. [online]. [Citace: 24. 2. 2017]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1tkov%C3%A9_mno%C5%BEstv%C3%AAD
- [6] NOHÁČ, K. Termodynamika pro +EE1. [Citace: 24. 2. 2017]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/Termodynamika_pro_EE1.pdf
- [7] Entalpie – Wikipedie. [online]. [Citace: 24. 2. 2017]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Entalpie>
- [8] Gibbsova volná energie – Wikipedie. [online]. [Citace: 24. 2. 2017]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Gibbsova_voln%C3%A1_energie
- [9] Clapeyron and Clausius Clapeyron Equations. [online]. [Citace: 24. 2. 2017]. Dostupné z: <http://cbc.arizona.edu/~salzmanr/480a/480ants/clapeyro/clapeyro.html>
- [10] Permittivita – Wikipedie. [online]. [Citace: 14. 4. 2017]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Permittivita>
- [11] Microwave moisture measurement / principles. [online]. [Citace: 14. 4. 2017]. Dostupné z: http://www.rgi-ms.com/html/moisture_principles.html
- [12] Bosch. BME280 datasheet. [Citace: 14. 4. 2017]. Dostupné z: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BME280_DS001-11.pdf
- [13] Sensirion. SHT11 datasheet. [Citace: 15. 4. 2017]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/91100/ETC/SHT11.html>
- [14] Mouser Electronics Europe - Electronic Components Distributor. [Citace: 15. 4. 2017]. Dostupné z: <http://eu.mouser.com/>
- [15] Texas Instruments. HDC1000 Datasheet. [Citace: 15. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1000.pdf>
- [16] Texas Instruments. HDC1008 Datasheet. [Citace: 15. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1008.pdf>
- [17] Texas Instruments. HDC1010 Datasheet. [Citace: 15. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1010.pdf>
- [18] Texas Instruments. HDC1050 Datasheet. [Citace: 15. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1050.pdf>

- [19] STmicroelectronics. HTS221 Datasheet. [Citace: 15. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/4d/9a/9c/ad/25/07/42/34/DM00116291.pdf/files/DM00116291.pdf/jcr:content/translations/en.DM00116291.pdf>
- [20] Honeywell. HIH-4000 Series Datasheet. [Citace: 15. 4. 2017]. Dostupné z: <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-hih4000-series-product-sheet-009017-5-en.pdf>
- [21] Honeywell. HIH-8000 Series Datasheet. [Citace: 15. 4. 2017]. Dostupné z: <https://sensing.honeywell.com/hih8000-datasheet-009075-7-en.pdf>
- [22] Atmel Corporation. ATmega644 Datasheet. [Citace: 16. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc2593.pdf>
- [23] Boston Power. Swing 4400 Datasheet. [Citace: 16. 4. 2017]. Dostupné z: <http://liionbms.com/pdf/bostonpower/swing4400.pdf>
- [24] Diodes Incorporated. AUR9705 Datasheet. [Citace: 17. 4. 2017]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AUR9705.pdf>
- [25] Ninigi. 5M Series Datasheet. [Citace: 18. 4. 2017]. Dostupné z: <http://en.ninigi.com/product/5ms3s102am6qe/document/315>
- [26] Maxim Integrated. MAX1811 Datasheet. [Citace: 18. 4. 2017]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1811.pdf>
- [27] FTDI Chip. FT230x Datasheet. [Citace: 19. 4. 2017]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT230X.pdf
- [28] Excel Cell Electronic. ESB 22 Series Datasheet. [Citace: 19. 4. 2017]. Dostupné z: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/esb22.pdf>
- [29] Raystar Optronics. RC1602B Datasheet. [Citace: 19. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/gb/Document/fd07cc5001ac4caa95d8dfd32e88aeb9/RC1602B-YHY-CSVD.pdf>
- [30] Microchip. MCP1640/B/C/D Datasheet. [Citace: 20. 4. 2017]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22234B.pdf>
- [31] Diodes Incorporated. BSS138 Datasheet. [Citace: 20. 4. 2017]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds30144.pdf>
- [32] Omron. B3F Series Datasheet. [Citace: 21. 4. 2017]. Dostupné z: <https://www.omron.com/ecb/products/pdf/en-b3f.pdf>
- [33] Comfortable Electronic. Battery Contacts. [Citace: 21. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/fb95b59fbd01ed654993837a4168d7a9/BatteryContact.pdf>
- [34] Ninigi. DHP9F Series Datasheet. [Citace: 22. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/fb95b59fbd01ed654993837a4168d7a9/BatteryContact.pdf>
- [35] Import board outline from Solidworks to Eagle. [online]. [Citace: 23. 4. 2017]. Dostupné z: <https://www.element14.com/community/thread/11142/1/import-board-outline-from-solidworks-to-eagle?displayFullThread=true>
- [36] Sitronix. ST7066U Datasheet. [Citace: 22. 4. 2017]. Dostupné z: https://www.newhavendisplay.com/app_notes/ST7066U.pdf

Přílohy

Příloha A - Odvození vztahu pro výpočet teploty rosného bodu

$$U_2(t_2) = 100\% \cdot \frac{e^{\frac{\beta \cdot t_d}{\lambda + t_d}}}{e^{\frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2}}}$$

$$\frac{U_2(t_2)}{100\%} = \frac{e^{\frac{\beta \cdot t_d}{\lambda + t_d}}}{e^{\frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2}}}$$

$$\ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) = \ln\left(e^{\frac{\beta \cdot t_d}{\lambda + t_d}}\right) - \ln\left(e^{\frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2}}\right) = \frac{\beta \cdot t_d}{\lambda + t_d} - \frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2}$$

$$\ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_d) \cdot (\lambda + t_2) = \beta \cdot t_d \cdot (\lambda + t_2) - \beta \cdot t_2 \cdot (\lambda + t_d)$$

$$\ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda^2 + \lambda \cdot t_2 + t_d \cdot \lambda + t_d \cdot t_2) = \beta \cdot t_d \cdot \lambda + \beta \cdot t_d \cdot t_2 - \beta \cdot t_2 \cdot \lambda - \beta \cdot t_2 \cdot t_d$$

$$t_d \cdot \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2) + \lambda \cdot \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2) = \beta \cdot t_d \cdot \lambda - \beta \cdot t_2 \cdot \lambda$$

$$t_d \cdot \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2) - \beta \cdot t_d \cdot \lambda = -\beta \cdot t_2 \cdot \lambda - \lambda \cdot \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2)$$

$$t_d \cdot \left[\ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2) - \beta \cdot \lambda \right] = -\beta \cdot t_2 \cdot \lambda - \lambda \cdot \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2)$$

$$t_d = \frac{-\beta \cdot t_2 \cdot \lambda - \lambda \cdot \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2)}{\ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2) - \beta \cdot \lambda}$$

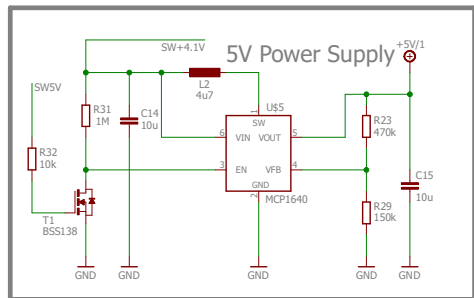
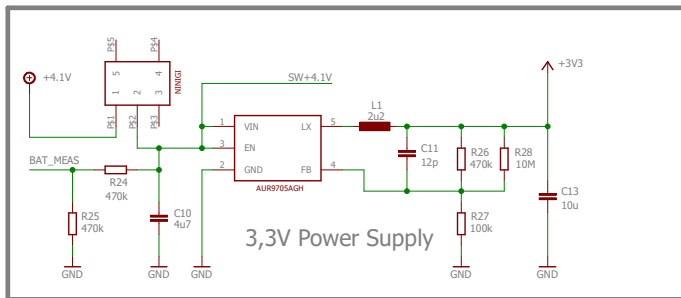
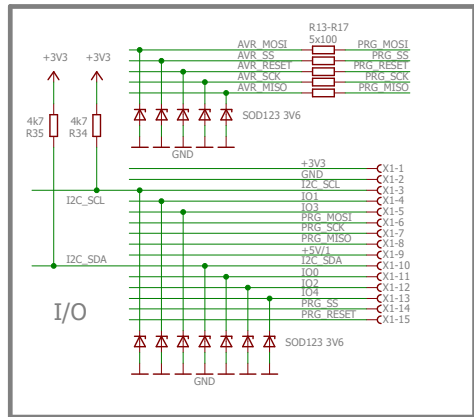
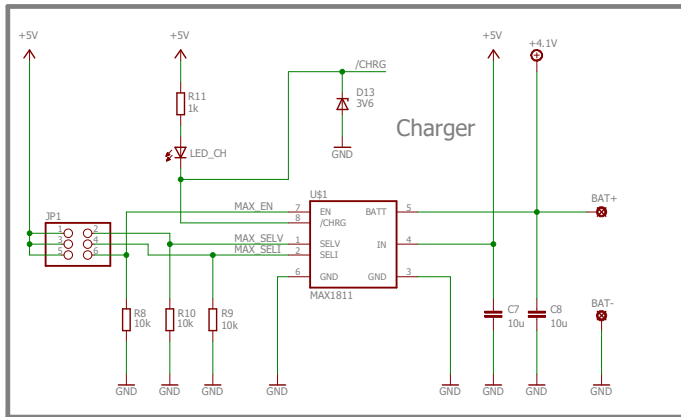
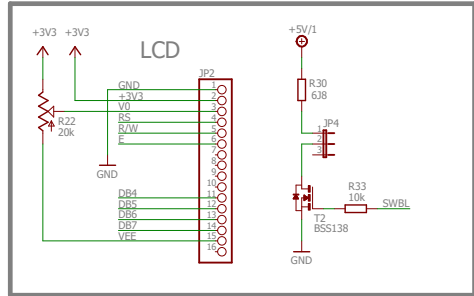
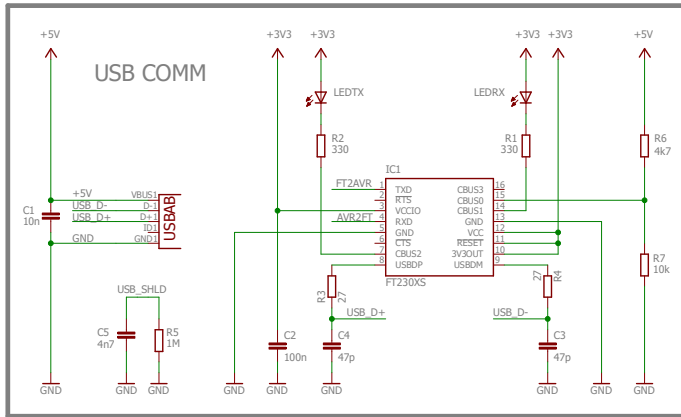
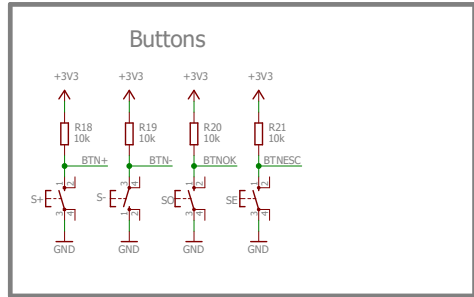
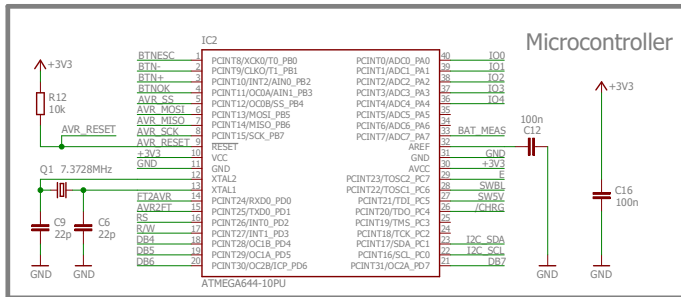
$$t_d = \lambda \cdot \frac{-\beta \cdot t_2 - \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2)}{\ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) \cdot (\lambda + t_2) - \beta \cdot \lambda} = \lambda \cdot \frac{-\frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2} - \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right)}{\ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right) - \frac{\beta \cdot \lambda}{\lambda + t_2}}$$

$$t_d = \lambda \cdot \frac{\frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2} + \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right)}{\frac{\beta \cdot \lambda}{\lambda + t_2} - \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right)} = \lambda \cdot \frac{\frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2} + \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right)}{\beta - \frac{\beta \cdot t_2}{\lambda + t_2} - \ln\left(\frac{U_2(t_2)}{100\%}\right)}$$

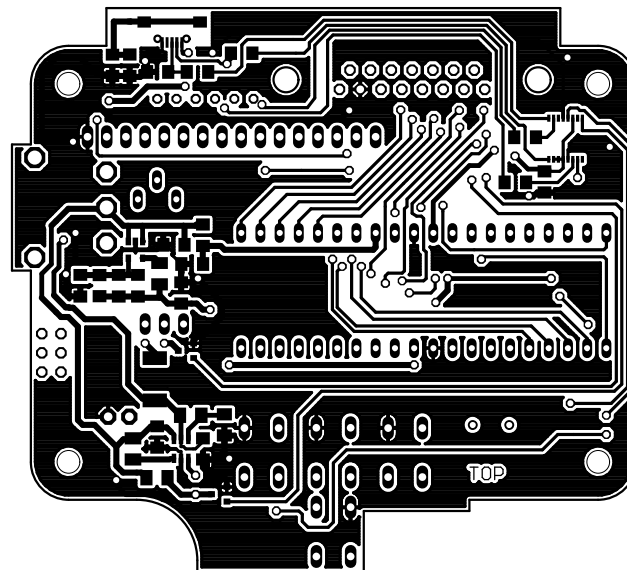
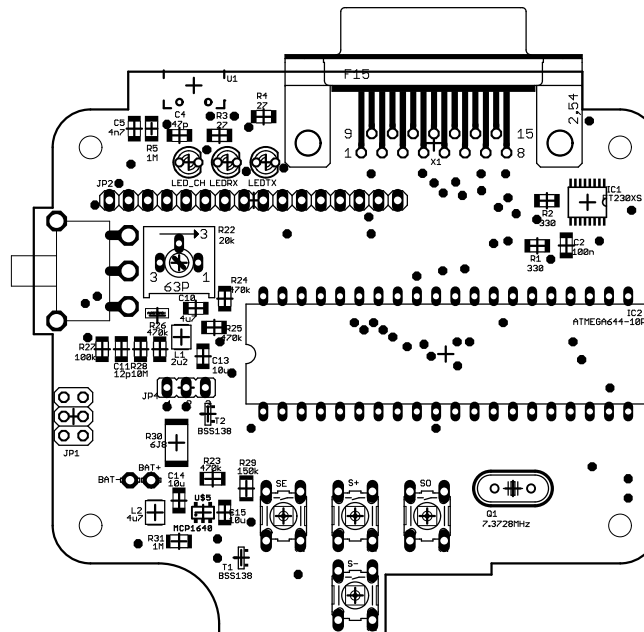
Příloha B - Seznam součástek

Součástka	Pouzdro	Hodnota
Akumulátor	-	BP SWING 4400
AUR	TSOT25	AUR9705AGH
BAT+,BAT-	309B	Battery Contact
C1	1206	10 nF
C10	1206	4,7 μ F
C11	1206	12 pF
C13,C7,C8,C14,C15	1206	10 μ F
C2,C12,C16	1206	100 nF
C3,C4	1206	47 pF
C5	1206	4,7 nF
C6,C9	1206	22 pF
D1-D12	SOD123	Zener 3,6V
IC1	SSOP16	FT230x
IC2	DIP40	ATMEGA644
IC3	DIP40	Precizní patice
JP1	2,54mm 1x2	Jumper
JP1	2,54mm 3x2	Pinheader samec 5mm
JP2	2,54mm 1x16	Pinheader samec 5mm
JP2	2,54mm 1x16	Pinheader samice 5mm
JP2		RC1602B- YHY
JP4	2,54mm 1x3	Pinheader samec 5mm
JP4	2,54mm 1x3	Pinheader samice 5mm
L1	1210	2,2 μ H
L2	1210	4,7 μ H
LED CH	LED 3mm	Červená
LEDRX	LED 3mm	Žlutá
LEDTX	LED 3mm	Zelená
Q1	HC49	7,3728 MHz
R1,R2	1203	330 Ω
R11	1206	1 k Ω
R13,R14,R15,R16,R17	1205	100 Ω
R22	POT T73YE	20 k Ω
R24,R25,R26,R23	1206	470 k Ω
R27	1206	100 k Ω
R28	1206	10 M Ω
R29	1206	150 k Ω
R3,R4	1206	27 Ω
R30	2512	6,8 Ω
R5,R31	1206	1 M Ω
R6,R34,R35	1206	4,7 k Ω
R8,R9,R10,R7,R33,R32,R18,R19,R20,R21,R12	1206	10 k Ω
S+,S-,S0,SE	B3F10xx	B3F1070
S1	-	5MS3S102AM6QE
Senzor	SMD4	SENSIRION SHT11
T1,T2	SOT23	BSS138
U\$1	SO8	MAX1811
U\$4	SOT23-6	MCP1640
USB1	USB B MICRO	USB 227
X1	DSUB15	Samice

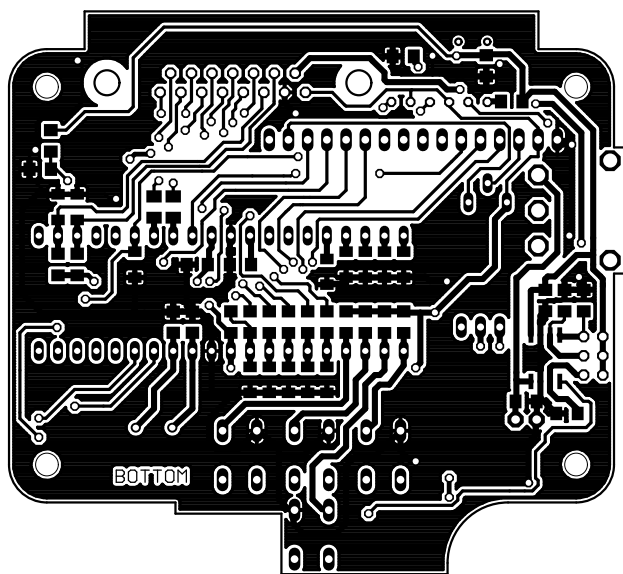
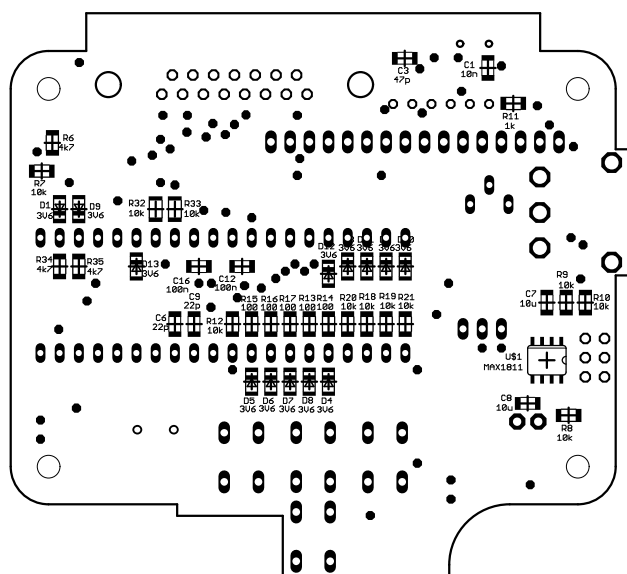
Příloha C - Kompletní schéma zapojení přístroje



Příloha D - Navržená deska plošného spoje



Horní vrstva plošného spoje



Spodní vrstva plošného spoje